



HAL
open science

La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur

Patrice Bouvier

► **To cite this version:**

Patrice Bouvier. La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur. Autre [cs.OH].
Université Paris-Est, 2009. Français. NNT : 2009PEST1035 . tel-00581550

HAL Id: tel-00581550

<https://theses.hal.science/tel-00581550>

Submitted on 31 Mar 2011

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

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



Université Paris-Est

THÈSE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Informatique

Présentée et soutenue publiquement par

Patrice Bouvier

le 4 décembre 2009

LA PRÉSENCE EN RÉALITÉ VIRTUELLE, UNE APPROCHE CENTRÉE UTILISATEUR

PRESENCE IN VIRTUAL REALITY,
A USER CENTRED APPROACH

Directeur de Thèse

Gilles Bertrand

Jury

Rapporteurs :	Daniel Mestre	Directeur de recherche CNRS, Univ Méditerranée
	Jacques Tisseau	Professeur des Universités, ENIB
Examineurs :	Isabelle Viaud-Delmon	Chercheur CNRS, Université Pierre et Marie Curie
	Christian Jacquemin	Professeur à l'Université Paris-Sud, CNRS-LIMSI
	Gilles Bertrand	Professeur des Universités, ESIEE
	Venceslas Biri	Maître de Conférences à l'Université Paris-Est

*À Camille,
et à ses frères et sœurs à venir...*

Remerciements

Mes premiers remerciements sont pour les membres de mon jury : Daniel Mestre, Jacques Tisseau, Isabelle Viaud-Delmon et Christian Jacquemin. Merci à eux pour le temps consacré à rapporter ou examiner mes travaux de thèse. Merci de votre intérêt.

Je remercie très sincèrement Gilles Bertrand pour avoir accepté, "au pied levé", de devenir mon directeur de thèse. J'ai ainsi pu finir ma thèse dans d'excellentes conditions.

Un grand et chaleureux merci à Venceslas Biri pour son soutien, ses conseils et son amitié. Merci également pour m'avoir permis de passer une dernière année de thèse confortable.

Je veux également saluer tous les anciens doctorants : Cyril Pichard, Pascal Chauderac, Olivier "BuDounet" Derpierre, Pierre Boulenguez, Vincent Nozick, François de Sorbier et Ismaël Daribo. Courage également aux nouveaux : Benjamin Raynal, Fabrice Boutarel, Anthony Giroux, Adrien Hérubel et Nadine Dommanget. Merci à tous pour votre bonne humeur, vos connaissances et votre sympathie. Tous ces points participent pleinement au bon déroulement d'une thèse et au plaisir de retrouver le labo.

Je souhaite adresser des remerciements particulièrement intenses à mes parents et à ma sœur. Ces quelques mots ne sauraient traduire ni tout ce que je vous dois ni mon admiration et encore moins ma profonde affection.

Enfin, comment dire merci à la personne qui, la même année, met au monde notre petit ange Camille, me soutient, m'encourage et relit ma thèse (!). Anne-So, parler de soutien ou d'écoute est bien faible au regard de ce que je te dois. Merci pour ta présence...

Résumé

Mots-clés: réalité virtuelle, modèle du sentiment de présence, crédibilité, affordance, approche écologique, rendu perceptif

Nous présentons une refondation théorique de la réalité virtuelle. Celle-ci est marquée par la conviction profonde de définir la réalité virtuelle comme une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence. Ce dernier est défini comme le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où le corps se trouve.

Nous proposons un éclairage nouveau et global sur le sentiment de présence. Cet éclairage consiste en une approche unifiée de la présence prenant en compte des considérations technologiques, psychologiques et écologiques. Nous avons élaboré un modèle qui identifie les processus menant au sentiment de présence. Selon notre modèle, deux phases inconscientes de jugement conditionnent l'émergence de la présence. Le premier jugement concerne la crédibilité de l'environnement, celle-ci dépend de la satisfaction des attentes intellectuelles et perceptives de l'utilisateur. Le deuxième jugement vise la crédibilité de l'expérience. Nous considérons que ce jugement est positif si un maximum des affordances perçues dans l'environnement est assumé, c'est-à-dire réalisable par l'intermédiaire des schémas d'interaction proposés à l'utilisateur. Nous avons mené une phase d'expérimentations pour valider la pertinence et la cohérence de notre modèle. Notre modèle a de multiples implications. Nous considérons par exemple qu'il peut constituer une grille d'analyse intéressante pour les jeux vidéo. De plus, il incite les concepteurs d'applications en réalité virtuelle à penser en terme d'affordances. Ce dernier point implique donc de faire entrer l'utilisateur très tôt dans la boucle de conception de l'application. Notre vision globale de la réalité virtuelle et de la présence a été mise en pratique notamment lors de la conception de dispositifs de réalité virtuelle transportables et à bas coûts.

Sur la base de ce cadre théorique nous présentons un framework de conception d'applications en réalité virtuelle. Puisque l'objectif est la crédibilité et non le réalisme, nous nous intéressons à la réalité perçue de l'environnement et non pas à sa réalité physique. C'est pourquoi, le point de départ de notre framework consiste en un socle de connaissances sur la cognition humaine. Cette base de connaissances sert de vivier d'idées pour les quatre piliers sur lesquels peut s'appuyer le concepteur d'applications en réalité virtuelle. Ces piliers sont l'immersion, l'interaction, les émotions et un quatrième regroupant la boucle sensori-motrice et la multimodalité.

Concernant le pilier immersion nous proposons un nouvel algorithme pour le calcul de la réverbération sonore dans un environnement complexe et dynamique. Notre méthode repose sur l'algorithme existant du lancer de frustum mais propose deux optimisations. La première exploite le socle de connaissances sur la cognition humaine pour déterminer une sphère d'acuité sonore. Celle-ci nous sert de cadre pour lancer les frusta depuis l'auditeur et non depuis les sources sonores. Cette deuxième optimisation réduit le nombre de calculs.

Abstract

Keywords: virtual reality, model of the feeling of presence, credibility, affordance, ecological approach, perceptual rendering

We present a new theoretical context for virtual reality : virtual reality is defined as a mediated experience which is able to generate a feeling of presence. The latter is delimited as the genuine feeling to exist in a different world than the physical world where the body is located.

We propose a new and comprehensive light on the feeling of presence through a unified approach of presence with technological, psychological and ecological considerations. We have developed a model which explains the processes leading to presence. According to our model, two unconscious stages of judgment govern the emergence of presence. The first judgment refers to the credibility of the virtual environment. The latter depends on the satisfaction of intellectual and perceptual user's expectation. The second judgment deals with the credibility of the experience and is positive if most affordances perceived in the virtual environment are taken up, that means achievable with the interaction schemes offered to the user. We have conducted a study to assess the relevance and the consistency of our model. This model has some interesting repercussions like to be an analytical grid for video games. Moreover, it suggests to virtual reality developers that they should think in terms of affordances. This last idea involves to take into consideration the user very early in the design loop of the virtual reality experience. Our whole conception of virtual reality and presence has been put in practice during the design of low-cost and easily transportable virtual reality systems.

Based on this theoretical content we introduce a virtual reality application framework. Since the objective is the credibility, and not the realism of the environment and of the experience, we take an interest in the perceptual reality and not in its physical reality. This is why the starting point of our framework is a knowledge base on human cognition. The latter act as an idea pool for the four inter-related technical and psychological pillars upon which virtual reality developers can lean on. These pillars are immersion, interaction, emotions and a fourth one including the sensori-motor loop and the multimodality.

Concerning the immersion pillar we introduce a new algorithm to compute sound reverberation in complex and dynamic virtual environment. Our method relies on the existing algorithm called frustum tracing but we provide two optimizations. The first one makes the most of the knowledge base on human cognition in order to work out a sphere of sound acuity. This information acts as a template in order to shoot the frusta from the listener and not from sound sources. This second optimization reduces the number of computations.

Table des matières

Table des figures	xix
Introduction	1
Partie I La réalité virtuelle	5
Chapitre 1 Fondements théoriques de la réalité virtuelle	7
1.1 Évolution des différentes définitions, concepts clés et finalités	7
1.1.1 Aux origines du flou	7
1.1.2 Rappel historique	8
1.1.3 Différentes définitions de la réalité virtuelle	9
1.2 Notre vision et définition de la réalité virtuelle	12
1.3 Aparté	15
1.3.1 La réalité augmentée	16
1.3.2 La virtualité augmentée	16
Chapitre 2 Les bénéfices de la réalité virtuelle	17
2.1 Substitution du réel	17
2.1.1 Outil d'aide à la conception	17
2.1.2 Outil de visualisation de données scientifiques	17
2.1.3 Simulation de situation	18
2.2 Stimulation sensorielle pleine et interactivité	19
2.3 La présence	21
Chapitre 3 Conception d'un système de réalité virtuelle	25
3.1 Différents choix de conception d'un dispositif de réalité virtuelle	25
3.1.1 Les dispositifs complexes, couteux et statiques	25

3.1.2	Les dispositifs simples, peu chers et mobiles	27
3.1.3	Notre dispositif de réalité virtuelle	30
3.2	La réalité virtuelle à la croisée des chemins	31
3.2.1	L'informatique et l'algorithmique	32
3.2.2	L'électronique	32
3.2.3	Les sciences cognitives	32
3.2.4	L'ergonomie	32
3.2.5	Les arts	32
3.3	La salle de réalité virtuelle idéale...	33
3.3.1	Organisation de l'équipe	33
3.3.2	Ouverture du dispositif	33
3.3.3	Organisation logicielle	33
3.3.4	Mise en ambiance et introduction à l'expérience	34

Chapitre 4 Bénéfices croisés entre la réalité virtuelle et les jeux vidéo 35

4.1	Les clés du succès d'un jeu vidéo	35
4.1.1	L'immersion	35
4.1.2	L'interaction	35
4.1.3	Scénario et émotions	36
4.2	Les bénéfices croisés	37
4.2.1	Les résultats de la réalité virtuelle applicables aux jeux vidéo	37
4.2.2	Les résultats des jeux vidéo applicables à la réalité virtuelle	37
4.3	Des jeux vidéo en réalité virtuelle	38

Partie II La présence 41

Chapitre 5 Définitions de la présence 43

5.1	L'évolution des différentes définitions	43
5.1.1	L'approche technologique	43
5.1.2	L'approche psychologique	45
5.1.3	L'approche écologique	48
5.2	Notre définition de la présence	49

Chapitre 6 Les composantes de la présence 51

6.1	Le point de vue de Heeter	51
-----	-------------------------------------	----

6.2	Le point de vue de Biocca	52
6.3	Le point de vue de Lee	52
6.4	Notre point de vue et proposition d'une quatrième composante	53
Chapitre 7 Les facteurs de la présence		55
7.1	La forme : les caractéristiques du système	55
7.1.1	Immersion	55
7.1.2	Interaction	64
7.2	Le fond : le contenu de l'expérience	66
7.3	Les caractéristiques de l'utilisateur	67
7.4	Framework dédié à la conception d'applications en réalité virtuelle	68
7.4.1	Le socle cognitif	69
7.4.2	Immersion	70
7.4.3	Interaction	71
7.4.4	Cohérence de la boucle sensori-motrice et multimodalité	72
7.4.5	Émotions	74
7.4.6	Liens entre piliers et composantes de la présence	76
7.4.7	Effet compensatoire entre les piliers	77
7.4.8	Des seuils minimaux pour atteindre la présence ?	78
Chapitre 8 Les différents modèles de la présence		81
8.1	Les modèles existants	81
8.1.1	Le modèle de Lessiter et al.	81
8.1.2	L'embodied model de Schubert et al	82
8.1.3	Le modèle de Wirth et al	84
8.2	Notre modèle de la présence	87
8.2.1	Point de départ de notre modèle : la description de l'environnement	87
8.2.2	Perception des affordances, le cœur écologique de notre modèle	89
8.2.3	Acceptation de se prendre au jeu et implication de l'utilisateur	91
8.2.4	Émergence des composantes de la présence et de la présence globale	92
8.2.5	Crédibilité	93
8.3	Bilan de notre approche unifiée de la présence	96
8.4	Implications de notre approche unifiée de la présence	96

8.4.1	Présence et jeux vidéo	96
8.4.2	Présence et dispositifs de réalité virtuelle	97
8.4.3	Présence et conception logicielle	97

Partie III Le son pour la réalité virtuelle 99

Chapitre 9 Le son : de la génération jusqu'à la perception 101

9.1	Génération et propagation	101
9.2	La perception du son par l'homme	103
9.2.1	L'oreille externe	103
9.2.2	L'oreille moyenne	104
9.2.3	L'oreille interne	104

Chapitre 10 Apports du son pour la réalité virtuelle et la présence 105

10.1	Apport pour l'immersion	105
10.2	Apport pour l'émotion	106
10.3	Le son comme canal de communication	106

Chapitre 11 La spatialisation sonore 109

11.1	La perception en trois dimensions	109
11.1.1	La théorie Duplex	109
11.1.2	Les indices spectraux	111
11.1.3	Loi du premier front d'onde	111
11.1.4	Perception de la distance	112
11.1.5	Approche multisensorielle de la localisation	112
11.2	Les systèmes et méthodes de restitution sonore	112
11.2.1	Restitution au casque	113
11.2.2	Restitution par enceintes	114
11.2.3	Méthodes binaurales	115
11.2.4	La méthode des Wave Field Synthesis	116
11.2.5	La méthode Ambisonic	117
11.2.6	La méthode des Vector Base Amplitude Panning	118

Chapitre 12 Les algorithmes de réverbération 121

12.1	Méthodes des images sources	124
------	---------------------------------------	-----

12.2	Méthode du lancer de rayon	124
12.3	Méthode du lancer de faisceaux	126
12.3.1	Première phase : conception d'un arbre BSP	126
12.3.2	Deuxième phase : émission des faisceaux	127
12.3.3	Troisième phase : détermination des chemins menant de la source à l'auditeur	127
12.3.4	Quatrième phase : construction de la réponse impulsionnelle . .	128
12.3.5	Bilan de la méthode de lancer de faisceaux	128
12.4	Méthode du lancer de frustum	129
12.4.1	Procéder par analogie	129
12.4.2	Faire des concessions sur la précision	130
12.4.3	Subdivision adaptative d'un frustum	131
12.4.4	Lancer de frustum et diffraction	132
12.5	Méthode du sonel mapping	134
12.5.1	Méthode du photon mapping	134
12.5.2	Méthode du sonel mapping, première passe : émission des sonels	136
12.5.3	Méthode du sonel mapping, deuxième passe : calcul du rendu .	137
 Chapitre 13 Notre chaîne de rendu pour la spatialisation sonore et algorithme de réverbération		141
13.1	Notre chaîne de rendu pour la spatialisation sonore	141
13.1.1	Description d'un monde sonore	142
13.1.2	Modèle de propagation des ondes sonores	143
13.1.3	Gestion des flux sonores et spatialisation	143
13.2	Capacité de localisation et de discrimination humaine	144
13.3	Calcul de réverbération et rendu perceptif	148
13.3.1	Rendu perceptif pour le lancer de frustum	148
13.3.2	Rendu perceptif et sonel mapping	152
 Partie IV Évaluation du sentiment de présence		157
 Chapitre 14 Les méthodes d'évaluation de la présence		159
14.1	Protocole et recommandations diverses	159
14.1.1	Protocole et vocabulaire	159

14.1.2	Recommandations	160
14.2	Les méthodes subjectives	160
14.2.1	Principe de l'évaluation par questionnaire	161
14.2.2	Les principaux questionnaires	161
14.2.3	Les limites des évaluations par questionnaire	163
14.2.4	Recommandations pour la formulation des questions	164
14.2.5	Les études qualitatives	165
14.2.6	Mesure subjective et continue	165
14.2.7	Mesure du temps qui passe	165
14.3	Les méthodes objectives	166
14.3.1	Évaluation des réponses physiologiques	166
14.3.2	Évaluation des réponses comportementales	167
14.4	Bilan	168
Chapitre 15 Notre phase d'évaluation		169
15.1	Élaboration de l'étude	169
15.1.1	Les variables indépendantes	170
15.1.2	Les variables dépendantes	171
15.2	Déroulement de la phase d'évaluation	173
15.2.1	Contexte de l'expérimentation	173
15.2.2	Protocole de l'expérimentation	173
15.3	Résultats	174
15.3.1	Notre définition de la présence et les différentes composantes de la présence	174
15.3.2	Notre définition de la présence et les manifestations associées .	176
15.3.3	Notre définition de la présence et les jugements portant sur la crédibilité ou le réalisme	179
15.3.4	Cercle vertueux entre émotions ressenties et présence	180
15.3.5	Lien entre présence et plaisir à jouer	181
15.3.6	Lien entre implication et présence	181
15.3.7	Écran autostéréoscopique et écran polarisé au crible de notre modèle	183
15.4	Bilan et retour d'expérience	186
Bilan et perspectives		189

Bibliographie	193
Annexes	223
Annexe A Notre chaîne de rendu sonore - Exemple de fichier XAC	223
Annexe B Notre chaîne de rendu sonore - Architecture logicielle simplifiée	227
Annexe C Le questionnaire communiqué aux participants de la phase d'évaluation	229
Annexe D Phase d'évaluation. La table de correspondance entre les questions et les variables dépendantes.	239
Annexe E Phase d'évaluation. Fiche explicative communiquée aux participants.	241

Table des figures

1	Une affiche vantant le <i>Sensorama</i>	9
2	Une vue du premier visiocasque	10
3	L'espace AIP : Autonomie, Interaction, Présence	11
4	Les technologies déterminant la téléprésence selon Steuer	15
5	Le continuum réalité–virtualité	16
6	Étude de l'habitacle d'une voiture dans un CAVE	18
7	La réalité virtuelle pour la visualisation scientifique	19
8	La réalité virtuelle pour le traitement des phobies	20
9	La réalité virtuelle comme support pour l'art	21
10	La réalité virtuelle et l'expérience de Milgram	22
11	Dispositif de réalité virtuelle, le C6	27
12	Dispositif de réalité virtuelle, la Allopsphere vue de l'extérieur	28
13	Dispositif de réalité virtuelle, la Allopsphere vue de l'intérieur	28
14	Dispositif de réalité virtuelle, le miniVR	29
15	Notre premier dispositif de réalité virtuelle, l'écran polarisé	30
16	Notre premier dispositif de réalité virtuelle, la spatialisation sonore	30
17	Notre 2ème dispositif de réalité virtuelle, un CAVE à bas coût	31
18	Le tapis sensitif <i>fait maison</i>	31
19	Photoréalisme et jeux vidéo, le jeu Crysis 2	36
20	Photoréalisme et jeux vidéo, le jeu ArmA 2	36
21	Approche psychologique de la présence, les trois pôles	46
22	Les trois niveaux de virtualisation de Ellis	59
23	Interface à retour d'effort, le bras Phantom	62
24	Touchable Holography, une interface haptique sans contact	62
25	Une interface pour la marche, le Cyberwalk	64
26	Une interface pour la marche, la Virtosphere	64
27	Une interface pour la marche, le CirculaFloor	64
28	Notre framework pour la conception d'applications en réalité virtuelle	69
29	Modèle de la présence, l'embodied model de Schubert et al	83
30	Le modèle de la présence spatiale de Wirth et al	86

31	Notre modèle complet de la présence	93
32	Vue d'une scène réaliste obtenue par lancer de rayons	95
33	Scène réaliste avec ombre portée	95
34	Propagation d'une onde sonore	102
35	Schéma de l'oreille humaine	103
36	Le cône de confusion	111
37	Mannequin en salle anéchoïque pour la mesure des fonctions de transfert	113
38	Localisation d'une source sonore virtuelle entre deux enceintes	115
39	Transmission directe et croisée des signaux aux oreilles de l'auditeur	116
40	Diffusion du son par Wave Field Synthesis	117
41	Triplet d'enceintes servant de support à la méthode des VBAP	118
42	Les différents modes de propagation des ondes sonores	121
43	Les phénomènes acoustiques simulés dans les environnements sonores interactifs	123
44	Schéma d'une réponse impulsionnelle	124
45	Chaîne de rendu classique pour une spatialisation sonore	124
46	Méthode des sources images	125
47	Méthode du lancer de rayons	125
48	Méthode des lancers de faisceaux, le processus global	126
49	Méthode des lancers de faisceaux, le partitionnement binaire de l'espace	127
50	Méthode des lancers de faisceaux, subdivision d'un faisceau	128
51	Méthode des lancers de faisceaux, parcourt des faisceaux au travers du graphe d'adjacence	128
52	Lancer de frustum, le processus global	129
53	Lancer de faisceaux VS lancer de frustum : comparaison pour la précision	130
54	Lancer de frustum : association frustum-quadtrees	131
55	Lancer de frustum : différences de précision entre lancer de faisceaux, lancer de frustum classique et lancer de frustum adaptatif	132
56	Lancer de frustum : cône de diffraction selon la théorie uniforme de la diffraction	133
57	Lancer de frustum et diffraction : émission du frustum diffracté dans la zone d'ombre	133
58	Sonel mapping, première passe : émission des sonels	136
59	Sonel mapping : définition des zones de diffraction et de non-diffraction	137
60	Sonel mapping, deuxième passe : calcul du rendu	138
61	Organisation de notre atelier de réalité virtuelle	142
62	Courbes isosoniques de Fletcher et Munson	145
63	Dispositif employé par Oldfield et Parker pour évaluer la capacité humaine en localisation absolue	147
64	Erreurs moyennes en localisation absolue	154
65	Énergie sonore issue des réflexions spéculaires et diffuses	155

66	Mesures physiologiques pour la présence : vue de côté de l'environnement virtuel stressant	167
67	Mesures physiologiques pour la présence : le dispositif	167
68	Écran autostéréoscopique, l'image affichée et sa carte de profondeur	170
69	Écran autostéréoscopique, le réseau lenticulaire	171
70	Capture d'écran du jeu ayant servi de support à la phase d'évaluation . . .	173

Introduction

MOTIVATIONS ET OBJECTIFS

L'expression *réalité virtuelle* vient de fêter ses vingt ans, ce domaine de recherche devrait donc être sorti de sa phase d'adolescence. Pourtant, on peut constater encore maintenant que le périmètre de définition de la réalité virtuelle est flou et mouvant. Il est par exemple courant d'entendre parler de réalité virtuelle au sujet des jeux vidéos ou plus récemment encore, au sujet des effets spéciaux créés pour le film *Avatar* de James Cameron. Est-ce que les rêves (éveillés ou non d'ailleurs) sont de la réalité virtuelle ? Les livres sont capables de transporter leurs lecteurs dans des mondes imaginaires, peut-on alors considérer les livres comme une expérience de réalité virtuelle ? La réalité virtuelle a besoin d'un parti pris fort pour se distinguer des autres médias. Pour devenir un domaine de recherche à part entière, elle doit disposer d'un cadre théorique solide. Ainsi, elle ne sera plus vue comme une émanation de la synthèse d'images ou comme l'empilement de technologies onéreuses.

Par ailleurs, la réalité virtuelle est souvent associée au sentiment de présence. Ce dernier est un concept parapluie multidimensionnel et multifactoriel qui est souvent l'objet de querelles de chapelles scientifiques. Est-il le fruit de la technologie mise en oeuvre ? Naît-il des émotions portées par l'expérience ? Si le sentiment de présence est un objet difficilement identifiable, il est encore plus délicat de l'atteindre. En vue de cet objectif, il est important en amont de disposer de fondements théoriques solides. Il est ensuite nécessaire de comprendre les processus sous-jacents menant à la présence.

Cette thèse se propose, pour répondre à ces multiples besoins et questions, de redéfinir le concept d'expérience en réalité virtuelle mais aussi de préciser le cheminement qui permet de tendre vers le sentiment de présence. L'identification d'un modèle complet et unifié de la présence servira de cadre théorique et technique pour la conception de dispositifs et d'applications en réalité virtuelle. Une fois cette nécessaire phase de réflexion menée et le cadre théorique posé, nous souhaitons proposer des solutions dans le but de tendre vers le sentiment de présence lors d'une expérience en réalité virtuelle.

CONTRIBUTIONS

La première contribution de cette thèse est donc la définition d'un cadre théorique de la réalité virtuelle. Celui-ci est marqué par la conviction profonde de définir la réalité virtuelle comme une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence [Bou08]. En parallèle de cette phase de réflexion, nous avons participé à la conception de systèmes de réalité virtuelle à bas coûts et transportables [dSBHB09], [dSBH⁺08],

[BCL⁺06], [BLC⁺06]. Ceux-ci auront été l'occasion de réflexions sur le lien entre réalité virtuelle et jeux vidéo [BdSCB08] mais aussi de développements de jeux en réalité virtuelle [dSBH⁺08], [dSBC⁺06].

La deuxième contribution de cette thèse est relative à la présence. Trois approches dominant actuellement le champ théorique de la présence. Il s'agit des approches technologiques, psychologiques et écologiques. Comme toute expérience humaine, une expérience en réalité virtuelle est complexe et ne peut être monolithique. C'est pourquoi, nous proposons une approche unifiée prenant en compte des considérations propres aux trois approches précédentes. L'idée conductrice de notre approche (et par extension de cette thèse) est de centrer nos réflexions et développements sur l'utilisateur. Nous proposons un nouveau cadre théorique à la présence [Bou08]. Celui-ci se compose d'une nouvelle définition en accord avec notre approche. Nous définissons la présence comme un sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où le corps se trouve. Nous avons également identifié une quatrième composante de la présence intitulée présence d'action. Cette dernière se traduit par le fait d'avoir conscience de ses actes et de leurs portées. Le troisième volet de ce cadre théorique est un modèle de la présence explicitant l'enchaînement des processus menant au sentiment de présence. Ce nouveau modèle s'articule notamment autour des deux idées fortes suivantes. Pour tendre vers le sentiment de présence, l'important n'est pas le réalisme de l'expérience mais sa crédibilité. Nous verrons que cette notion de crédibilité peut diriger à la fois la conception de l'environnement virtuel mais aussi celle des dispositifs matériels. La deuxième idée forte est que l'émergence de la présence est conditionnée par le fait que les affordances perçues dans l'environnement virtuel soient assumées par les dispositifs et schémas d'interaction. Enfin, sur la base de ce contenu théorique nous proposons un framework de conception d'application en réalité virtuelle. Ce framework consiste en un socle de connaissances sur la cognition humaine sur lequel les quatre piliers définissant une application en réalité virtuelle prennent support. Ces piliers sont l'immersion, la cohérence de la boucle sensorimotrice, les émotions et l'interaction. Les trois premiers piliers servent à la perception de l'environnement virtuel et à lui donner du sens.

Notre troisième contribution est une proposition d'algorithme pour augmenter le sentiment de présence. Cet algorithme a pour cadre le calcul de la réverbération des sources sonores dans l'environnement virtuel. La réverbération est une des solutions possibles pour améliorer la crédibilité d'une expérience. Or, ce calcul n'est pas réalisable dans un environnement complexe totalement dynamique. Nous proposons une évolution de l'algorithme de lancer de frustum. Notre méthode s'appuie sur la perception humaine pour définir une sphère d'acuité sonore. L'idée originale de notre méthode est d'effectuer les lancer de frustum non pas depuis la source sonore comme cela se fait classiquement, mais depuis l'auditeur en se servant de la sphère d'acuité sonore comme cadre pour optimiser les calculs.

Enfin, la dernière contribution de cette thèse est une phase d'évaluation. Pour cette phase nous avons élaboré un questionnaire comportant soixante-quatre questions dont un tiers a été créé pour l'occasion. Le contexte de l'évaluation est un jeu vidéo en trois dimensions. Les participants ont expérimenté ce jeu sur deux dispositifs de restitution visuelle différents : un écran polarisé de grande dimension offrant une vision stéréoscopique et un écran autostéréoscopique. Une grande partie des questions vise à valider certaines

des hypothèses avancées lors de la conception de notre modèle de la présence. Ainsi, un premier résultat valide le bien fondé de notre définition de la présence et les notions avancées de sentiment d'existence et d'incarnation de rôle. Le deuxième résultat indique que le jugement de la crédibilité est un critère pertinent. Enfin, le troisième résultat pointe la cohérence de notre modèle dans sa continuité.

ORGANISATION DU DOCUMENT

Le fil directeur de cette thèse s'organise autour de la conviction suivante : pour tendre vers le sentiment de présence, le concepteur d'applications en réalité virtuelle doit proposer une expérience suffisamment crédible aux sens et à l'esprit critique de l'Homme pour que celui-ci accepte de se prendre au jeu. La thèse s'organise donc autour du triptyque suivant : réalité virtuelle, présence et perception humaine. Celui-ci annonce le plan de cette thèse.

Dans la première partie nous présentons différentes visions de la réalité virtuelle et arrivons à la position suivante : la réalité virtuelle est une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence. Parallèlement à cette thèse, deux dispositifs de réalité virtuelle ont été conçus par l'équipe de recherche. Nous tirons un certain nombre d'enseignements et de réflexions de cette expérience.

La seconde partie traite du sentiment de présence. Après avoir décrit trois approches existantes : technologique, psychologique et écologique, nous présentons une nouvelle approche équilibrée entre ces trois visions. Cette dernière nous sert de base théorique pour proposer un framework dédié à la conception d'applications de réalité virtuelle ainsi qu'un modèle de la présence.

La troisième partie est consacrée au son pour la réalité virtuelle. Nous décrivons notamment le dispositif de restitution sonore exploité dans notre salle de réalité virtuelle ainsi que son implantation. Par ailleurs, nous présentons un algorithme de rendu perceptif dédié au calcul de réverbération du son dans l'environnement. Le gain espéré est un supplément de crédibilité pour l'expérience.

La quatrième et dernière partie décrit une phase de test chargée, d'une part de valider certaines des hypothèses avancées lors de la conception de notre modèle de la présence et d'autre part de mesurer les variations de présence ressentie en fonction du système de restitution visuelle employé. Les systèmes sont un écran polarisé de grande taille permettant une vision stéréoscopique et un écran autostéréoscopique à réseau lenticulaire.

Première partie

La réalité virtuelle

Cette première partie présente la réalité virtuelle. Le premier chapitre propose de revenir sur les différentes définitions avancées par la communauté. Nous expliciterons alors notre conception de la réalité virtuelle et proposerons une définition. Dans un deuxième chapitre, nous décrirons les principaux bénéfices de la réalité virtuelle. Puis, nous préciserons les différentes approches possibles pour concevoir une plateforme de réalité virtuelle. Cette thèse ayant accompagné le développement du dispositif de réalité virtuelle de notre équipe de recherche, nous présenterons les différents choix auxquels nous avons été confrontés. Enfin, nous listerons un certain nombre de bénéfices croisés entre la réalité virtuelle et les jeux vidéos.

Pour cette partie nos contributions sont donc une réflexion sur la réalité virtuelle qui aboutit à la proposition de définir la réalité virtuelle par la présence, la conception de dispositifs de réalité virtuelle mobiles et à bas coûts et une réflexion sur les bénéfices croisés entre la réalité virtuelle et les jeux vidéos. Ces contributions ont donné lieu à plusieurs publications internationales.

Chapitre 1

Fondements théoriques de la réalité virtuelle

L'expression *réalité virtuelle* est souvent employée dans les médias, tantôt pour parler d'un jeu vidéo, tantôt pour présenter des simulateurs servant à l'entraînement des pilotes d'avion. Parfois, l'expression servira à vanter le réalisme des effets spéciaux créés pour un film. Nous pouvons donc constater que la réalité virtuelle possède un périmètre de définition très large et mouvant. Ce chapitre revient dans un premier temps sur les origines du flou entourant la réalité virtuelle. Nous nous proposons d'en préciser les contours en présentant les différents concepts clés et finalités présents dans la littérature. Enfin, nous précisons notre conception de la réalité virtuelle et proposons une définition différente.

1.1 Évolution des différentes définitions, concepts clés et finalités

Il est de coutume dans un document de thèse de consacrer la première partie à la présentation du domaine de recherche dans lequel s'inscrivent les travaux du doctorant. Alors que dans certains domaines scientifiques cette définition est claire et adoptée de tous, la réalité virtuelle a d'ores et déjà ceci d'intéressant que sa simple définition même est sujette à débat.

1.1.1 Aux origines du flou

Le flou qui entoure la réalité virtuelle a plusieurs origines : l'expression même de réalité virtuelle, le fait que la réalité virtuelle s'appuie sur beaucoup d'autres domaines scientifiques d'où des contours diffus mais aussi probablement les fantasmes souvent déçus qu'elle fait naître.

Réalité virtuelle dites-vous ???

Le terme de réalité virtuelle d'abord, un bel oxymore qui peut laisser pour le moins dubitatif. Le terme de *virtual reality* a été lancé en 1989 par Jaron Lanier [KHS89] lors

du salon Texpo. Alors président de la société VPL Research qui commercialisait les gants Dataglove et les visiocasques EyePhones, c'est en cherchant une accroche marketing pour promouvoir ses équipements immersifs qu'il inventa l'expression *réalité virtuelle*. Coup marketing pour le moins réussi. Le livre d'Howard Rheingold [Rhe93] retrace l'histoire des pionniers de la réalité virtuelle dont fait partie Jaron Lanier.

La traduction directe en français débouche sur l'expression *réalité virtuelle*, un oxymore qui n'aura pas facilité la compréhension de la réalité virtuelle par le grand public. A noter que cet oxymore serait dû à une mauvaise traduction du mot virtual qu'il aurait fallu comprendre selon J.P Papin [FM03] comme *quasiment*. L'expression de *réalité vicariante* aurait été alors plus adéquate [FM03].

Puisqu'il est déjà complexe de définir ce qu'est la réalité, Ellis [Ell91] préféra l'expression d'*environnement virtuel* qui offre le double avantage d'être sémantiquement cohérent et moins ambitieux que ce que suggère une expression telle que réalité virtuelle.

Des contours diffus

La réalité virtuelle s'appuie sur de nombreux domaines de recherche (voir le chapitre 3.2 page 31 consacré précisément à ce point). Ceci a pour conséquence que la réalité virtuelle a du mal à exister en tant que discipline scientifique à part entière. Parfois les chercheurs disent faire de la synthèse d'images appliquée à la réalité virtuelle ou de l'électronique pour créer des systèmes à retour d'effort. Il est plus délicat d'affirmer être chercheur en réalité virtuelle comme on pourrait l'être en mathématiques ou en musicologie.

Des fantasmes déçus

Enfin, les livres et les films de science-fiction se sont emparés de la réalité virtuelle tout en s'affranchissant des contraintes technologiques inhérentes, pour offrir à leurs lecteurs ou spectateurs une réalité virtuelle surtout fictionnelle. On pourrait citer *The Lawnmower Man*, *Matrix* ou *eXistenZ* comme exemples. La science-fiction laisse alors peu de chance aux résultats de laboratoire pour impressionner le public. En plus d'une éventuelle déception, ce genre d'exemples incite à restreindre la réalité virtuelle à l'utilisation d'interfaces. De fait, le grand public assimile parfois la réalité virtuelle aux effets spéciaux employés au cinéma ou aux jeux vidéo. La relation entre réalité virtuelle et jeux vidéo est par ailleurs particulière. Nous aborderons ce point particulier dans le chapitre 4 (page 35) dédié aux bénéfiques croisés entre ces deux domaines et verrons en quoi réalité virtuelle et jeux vidéos s'auto-fertilisent.

1.1.2 Rappel historique

Avant de définir la réalité virtuelle, il nous semble intéressant de citer quelques travaux des précurseurs de la réalité virtuelle, tellement précurseur que le terme de réalité virtuelle n'existait pas encore... En 1962 Morton Heilig [Hei62] crée le *Sensorama* (voir la figure 1 pour un aperçu du dispositif), considéré comme le premier système de réalité virtuelle, il permettait de simuler une balade en bicyclette dans le quartier de Brooklyn. Pour

cela, Heilig a créé un dispositif proposant un écran grand angle permettant une vision stéréoscopique, une restitution sonore spatialisée, un siège vibrant, un ventilateur et un diffuseur d'odeur.



FIG. 1: Une affiche ventant le *Sensorama*. Source : <http://www.telepresence.org>

En 1965 Sutherland [Sut65] reprend des travaux d'Heilig et crée le premier visiocasque (voir figure 2). Celui-ci est vu par Sutherland comme une fenêtre sur le virtuel. Le dispositif comporte deux tubes cathodiques monochromatiques mais n'offre pas encore une vision stéréoscopique (les images affichées sont les mêmes). Les deux tubes cathodiques rendent le casque tellement lourd qu'il doit être accroché au plafond, c'est pourquoi le système reçoit le surnom d'*Épée de Damoclès*.

On ne peut être qu'impressionné devant l'ingéniosité et l'intelligence visionnaire de ces précurseurs. Nous renvoyons le lecteur intéressé par l'histoire de ces inventeurs vers le livre de Rheingold [Rhe93].

1.1.3 Différentes définitions de la réalité virtuelle

La littérature foisonne de définitions qui, bien que souvent différentes, se retrouvent sur un certain nombre de notions clés. Nous ne reprenons ici qu'un échantillon que nous espérons représentatif. Précisons que nous éliminons les définitions qui restreignent la réalité virtuelle à des images de synthèse ou à l'utilisation d'une interface spécifique.

Burdea et Coiffet [BC93] définissent la réalité virtuelle par le triptyque Immersion, Interaction et Imagination. Alors que les deux premiers I font l'unanimité dans la communauté et sont même considérés comme les conditions *sine qua non* pour accepter une application comme étant de la réalité virtuelle, le troisième I est lui sujet à discussion.



FIG. 2: Une vue du premier visiocasque. *Source* : [Sut65]

Fuchs [Fuc03] critique le fait de mettre l'imagination au même niveau que l'immersion et l'interaction. Pour notre part nous allons dans le sens de la critique mais nous estimons louable l'idée de vouloir mettre plus dans la réalité virtuelle que des stimulations sensorielles et des outils d'interactions. Les auteurs percevaient-ils qu'il manquait une dimension humaine et cognitive dans une définition de la réalité virtuelle restreinte à l'immersion et l'interaction? Nous reviendrons d'ailleurs sur ce point à plusieurs reprises dans ce document.

Comme nous l'avons déjà mentionné Ellis [Ell91] préfère à l'expression de réalité virtuelle, celle sémantiquement plus cohérente d'*environnement virtuel*. Voici la définition qu'il en fait :

Les environnements virtuels sont des images virtuelles interactives améliorées par des processus particuliers et complétées par des restitutions provenant d'autres modalités telles que le son et l'haptique et ce pour convaincre les utilisateurs qu'ils sont immergés dans un espace synthétique.

Nous remarquons de suite qu'une fois encore l'immersion et l'interaction sont mis en exergue. Nous regrettons toutefois que l'aspect sensoriel et notamment l'image soient mis tant en avant et que les aspects humain et cognitif soient négligés.

En 1992, Zeltzer[Zel92] propose un nouveau triptyque composé cette fois-ci de l'autonomie, de l'interaction et de la présence. L'autonomie désigne le comportement des entités virtuelles présentes dans l'environnement virtuel. L'interaction pointe la capacité d'interagir avec ces entités et l'environnement. La présence est ici associée à la stimulation sensorielle. Autonomie, interaction et présence sont vues comme les dimensions définissant l'espace des environnements virtuels (voir la figure 3 pour une représentation de cet espace).

La réalité virtuelle est présentée comme étant le Saint Graal alliant une autonomie, une interaction et une présence parfaite. Nous trouvons intéressant de faire ressortir l'autonomie comme une clé de la réalité virtuelle. Peupler l'environnement d'entités autonomes

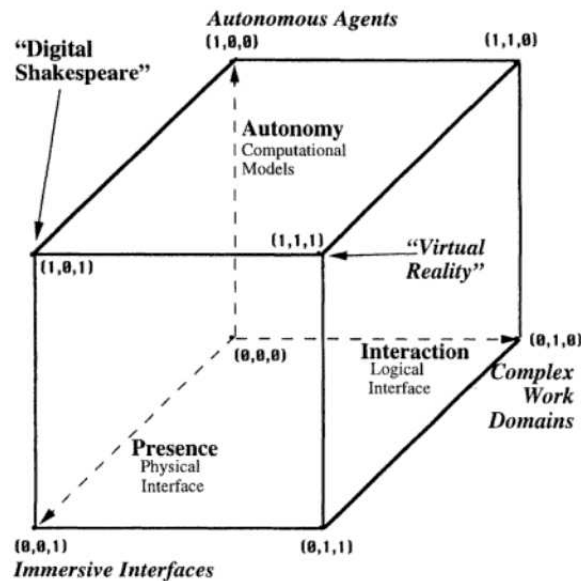


FIG. 3: L'espace AIP : Autonomie, Interaction, Présence. *Source : [Zel92]*

dont les réactions pourront être attendues ou surprenantes est en effet une bonne solution pour apporter un peu de vie et de dynamisme dans l'environnement. De plus, doter l'environnement de capacités d'autonomie est une façon de rendre l'environnement plus réactif. Comme nous le verrons dans la prochaine partie (section 1.2 page 12) lier réalité virtuelle et présence nous intéresse tout particulièrement. Par contre nous regrettons que la présence soit ici assimilée à la stimulation sensorielle (visualisation stéréoscopique via un visiocasque comme cité en exemple dans l'article) et donc de fait confondue avec l'immersion. Notons que cette confusion était très courante dans les années 90, malheureusement il est encore possible de la rencontrer. Dans la section 7.4.2 (page 70) traitant de la présence, nous reviendrons sur la relation entre immersion et présence.

En 2000, Jaron Lanier revient sur sa vision de la réalité virtuelle dans une interview [McK00] :

La réalité virtuelle permet via l'informatique de créer l'illusion d'être dans un monde alternatif avec d'autres personnes. Il s'agit d'une sorte de rêve que vous faites de façon consciente et auquel d'autres personnes participent.

Nous apprécions la vision poétique voire humaniste de cette définition. Celle-ci soulève d'ailleurs un point important : l'utilisateur qui se sent présent dans ce monde alternatif, est-il toujours conscient d'être dans une salle de réalité virtuelle ? Ou doit-il au préalable perdre totalement conscience de l'environnement physique qui l'entoure pour être pris totalement dans l'expérience ?

Enfin, la communauté scientifique française s'est accordée autour d'une finalité et deux définitions. Voici comment Fuchs [Fuc03] précise la finalité de la réalité virtuelle :

La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de

certains aspects du monde réel.

Fuchs [Fuc03] propose une définition fonctionnelle de la réalité virtuelle :

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

Arnaldi et al [AFT03] proposent une définition technique :

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 des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs.

La définition technique permet de décrire avec efficacité les fonctionnalités d'un dispositif de réalité virtuelle. L'énoncé de la finalité et la définition fonctionnelle sont elles plus axées sur l'expérience dans le monde artificiel créé. Nous proposons dans la section suivante une définition alliant technique, considération cognitive et expérience.

1.2 Notre vision et définition de la réalité virtuelle

Bien que toutes les définitions citées précédemment disposent de propriétés intéressantes, aucune ne correspond pleinement à notre approche de la réalité virtuelle. Nous avons pour habitude dans nos différents articles [Bou08] [dSBHB09] de définir la réalité virtuelle comme suit :

La réalité virtuelle est une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au cœur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de présence.

Précisons que cette définition a été légèrement remaniée pour ce document. On peut remarquer que celle-ci associe des considérations technologiques et cognitives et n'oublie pas de pointer l'aspect expérience. Nous ne réduisons donc pas la réalité virtuelle à un ensemble de technologies mais la considérons comme le médium d'un type d'expérience qui peut mener au sentiment de présence.

En associant ainsi réalité virtuelle et présence, nous avançons que la capacité de susciter un sentiment de présence chez l'utilisateur est ce qui caractérise la réalité virtuelle et donc la différence des autres médias. Une application graphique (même stéréoscopique) qui n'induit pas la présence ne pourrait donc être qualifiée de réalité virtuelle. Par contre, si manipuler un objet virtuel via un système à retour d'effort convainc l'utilisateur de la *présence* (ou de l'*existence*) de cet objet alors, même si aucune restitution visuelle n'est proposée, il s'agit bien de réalité virtuelle. L'inconvénient de notre définition est qu'elle est à tiroir et nécessite donc d'introduire la présence.

Nous consacrons la partie 2 de ce document à la présence, nous verrons alors que sous ce terme se cache un grand nombre de concepts et d'approches. Toutefois, nous pensons nécessaire pour une meilleure compréhension de préciser dès maintenant et de manière succincte notre vision de la présence. Nous considérons la présence comme :

le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où le corps se trouve.

Ainsi, être présent signifie ressentir un sentiment fort d'appartenir ou plutôt d'exister dans l'environnement virtuel. Le sentiment d'appartenance peut être suscité chez l'utilisateur en *se contentant* de décrire, via une stimulation adéquate des sens, l'environnement virtuel. Le sentiment d'existence est lui à un niveau cognitif plus élevé : il s'agit d'incarner le rôle que l'application dédie à l'utilisateur. Ceci n'est possible que si l'utilisateur accepte de se prendre au jeu de l'expérience, pour cela il faut, entre autres, qu'il puisse percevoir et agir de façon naturelle et intuitive.

Le sentiment de présence est donc, comme tout sentiment, une expérience subjective vécue consciemment qui dépend de facteurs internes et externes à l'utilisateur. L'état de présence se traduit [SVS05] alors par des réactions physiologiques (accélération du rythme cardiaque, transpiration etc.), comportementales (modification de la posture, expressions du visage etc.), émotionnelles (peur, joie, tristesse, anxiété etc.), intellectuelles (conversation avec un avatar ¹) ou sentimentales (empathie). Ces réactions seront inconscientes, irréflechies. Nous rappelons que nous reviendrons plus en détail sur la présence dans la partie 2.

Le sentiment de présence maintenant défini, nous pouvons revenir à notre définition et vision de la réalité virtuelle. Nous aurions pu définir la réalité virtuelle ainsi :

Est réalité virtuelle toute expérience capable de susciter un sentiment de présence chez l'utilisateur.

Nous nous serions alors exposé à ce que la communauté scientifique a nommé le *paradoxe du livre* [Bio03] (en anglais *the book problem*). Ce paradoxe est né de l'observation suivante : comment un livre qui possède des qualités immersives pour le moins réduites et des possibilités d'interaction nulles, arrive à induire un sentiment de présence souvent plus fort que des systèmes de réalité virtuelle complexes ? Un livre ou un film serait donc de la réalité virtuelle ? Et quid des rêves (éveillés ou non) ?

Effectivement, lire un livre ou visionner un film peut créer par le seul talent de son créateur, l'illusion de vivre une expérience. Nous traiterons de ce paradoxe très débattu de façon approfondie dans le chapitre 5.1.2 (page 45). Considérons simplement que cette *illusion de vivre une expérience* n'est en fait qu'une réponse émotionnelle à l'histoire ou aux événements présentés et où la part de l'imagination est importante. Le livre immerge son lecteur dans un monde imaginaire, la réalité virtuelle immerge sensoriellement son utilisateur dans un monde virtuel. Toutefois, Nous reviendrons sur l'importance des émotions en réalité virtuelle pour induire la présence dans le chapitre 7.4.5 (page 74) dédié aux piliers de la présence.

Aussi, afin de ne pas contribuer au flou précédemment décrit nous préférons conserver une dimension technologique et préciser *expérience médiatisée* puis ajouter la phrase [...]

¹Un avatar est une représentation virtuelle d'un personnage vivant ou non.

dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices.

Nous souhaitons exprimer au travers de cette définition une relation forte entre la réalité virtuelle, la présence et l'utilisateur. Ce triptyque définit l'expérience en réalité virtuelle et fait ressortir l'importance de l'utilisateur qui est souvent laissé de côté dans les définitions. Il ne faut voir dans le fait d'employer une définition qui nous est propre ni forcément défaut des précédentes ni envie de se démarquer à tout prix mais juste la volonté de faire ressortir certains thèmes qui nous sont chères et qui nous semblent en cohérence avec le contenu de ce document.

En premier lieu, nous voulons mettre en exergue la relation directe réalité virtuelle – présence : la réalité virtuelle est une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence. Nous touchons ici un des aspects que nous regrettons dans les définitions usuelles. Celles-ci, souvent axées technologie, ne nous satisfont pas car nous ne voulons pas restreindre la réalité virtuelle à un ensemble de technologies mais bien l'associer à une expérience.

En employant l'expression *au cœur*, nous souhaitons mettre l'accent sur l'idée de se centrer sur l'homme et ses capacités sensorielles et cognitives. En réalité virtuelle, plus que dans toutes autres activités informatisées, nous pensons qu'il faut adopter une approche centrée sur l'homme, pour l'efficacité de l'expérience bien sûr mais aussi pour atteindre le sentiment de présence.

Le premier objectif de la réalité virtuelle (indépendamment de la présence) est déjà élevé : simuler un environnement complexe et le restituer aux sens de l'utilisateur. Aussi, nous avons conscience qu'en définissant la réalité virtuelle par la présence nous proposons un défi supplémentaire à relever. C'est pourquoi nous avons coutume de dire que nous cherchons à tendre vers la présence plutôt qu'un ambitieux atteindre la présence.

Nous préférons l'expression *interfaces sensori-motrices* à *interfaces comportementales* introduite par [AFT03]² car elle caractérise plus clairement le couple perception – action. Nous verrons dans la partie 5.2 (page 49) consacrée à notre approche de la présence que cet aspect *Gibsonien* [Gib86] nous intéresse particulièrement (voir la partie 5.1.3 sur l'approche écologique de Gibson). Selon cette approche, l'environnement n'est pas perçu selon son apparence (forme, couleur etc.) mais au travers des possibilités d'action³ qu'il nous offre. Ainsi une interface strictement sensorielle comme un écran décrit un environnement dans lequel l'utilisateur percevra des possibilités d'action.

Les notions de crédibilité et d'acceptation de se prendre au jeu étant rattachées à notre approche de la présence nous les expliciterons dans la partie traitant de notre modèle de la présence (chapitre 8.2 page 87). Toutefois, précisons très brièvement que ces deux notions montrent clairement que l'utilisateur participe à l'émergence de la présence. Il est donc important que cette considération soit prise en compte dans notre définition.

²Les interfaces comportementales peuvent être soit sensorielles (communication d'informations dans le sens système → utilisateur) soit motrice (communication d'informations dans le sens utilisateur → système) soit sensori-motrice (communication bidirectionnelle des informations).

³Gibson appelle ces possibilités d'action *affordance* [Gib86]. Ainsi un marteau n'est pas perçu comme un ensemble de caractéristiques descriptives (forme, couleur, taille) mais comme un objet offrant (*affordant*) la possibilité de planter des clous.

On peut remarquer que notre définition annonce en quelque sorte le plan de ce document : réalité virtuelle (partie 1), présence (partie 2) et apport du son pour la crédibilité d'une expérience (partie 3). L'approche *centrée utilisateur* constitue en quelque sorte le fil directeur de nos recherches et de ce document. Aussi, il nous semble nécessaire de disposer d'une définition qui soit en adéquation avec notre recherche et le fil directeur de cette thèse.

Enfin, notons que notre volonté de définir la réalité virtuelle par la présence se retrouve dans la définition de la réalité virtuelle donnée par Steuer [Ste92] :

Une réalité virtuelle est définie comme un environnement réel ou simulé dans lequel un utilisateur peut faire l'expérience de la téléprésence.

Nous constatons ici que Steuer emploie le terme de *téléprésence* et non de *présence*, nous reviendrons plus en détail dans la partie 5 (page 43) sur les différences entre ces deux termes. Nous pouvons nous contenter pour l'instant de considérer ces deux notions comme équivalentes. Notre définition a plusieurs points communs avec celle de Steuer. Le premier est la volonté d'associer la réalité virtuelle à une expérience et non pas simplement à un ensemble de technologies. Les notions d'immersion et d'interaction sont elles aussi présentes car induites par l'idée de téléprésence (voir figure 4). Troisièmement, nos définitions pointent l'importance de l'individu dans l'expérience. Toutefois, nous avons préféré une définition plus explicite. D'une part, sur les conditions nécessaires (et ce afin d'éviter des interprétations erronées comme pour le paradoxe du livre). Et d'autre part sur le déroulement de l'expérience : l'utilisateur perçoit et interagit avec l'environnement virtuel ; si l'utilisateur juge l'expérience suffisamment crédible et intéressante pour qu'il accepte de se prendre au jeu, alors seulement, en réponse il pourra ressentir un sentiment de présence.

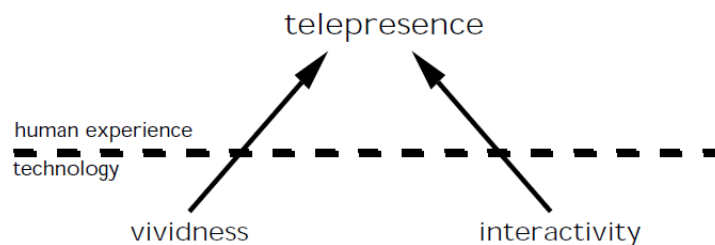


FIG. 4: Les technologies déterminant la téléprésence selon Steuer : la richesse des informations sensorielles et les capacités d'interaction avec l'environnement virtuel. *Source : [Ste92]*

1.3 Aparté

Nous n'avons pas abordé jusqu'ici un domaine de recherche voisin de la réalité virtuelle : la réalité mixte. Alors que les techniques de réalité virtuelle, pour mieux plonger l'utilisateur dans l'environnement virtuel, vont chercher à le couper sensoriellement de l'environnement physique, la réalité mixte va elle combiner environnement physique et informations virtuelles.

Milgram et al [MTUK94] ont défini un *continuum réalité-virtualité* qui lie par l'intermédiaire de la réalité mixte le purement réel au purement virtuel. La figure 5 propose une représentation de ce continuum.

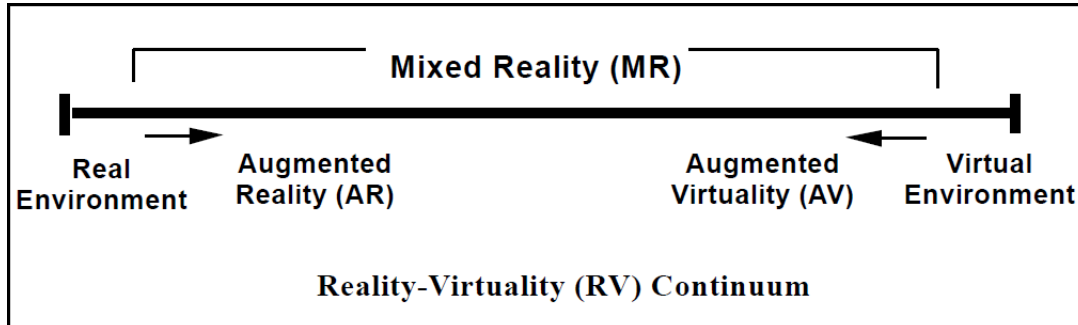


FIG. 5: Le continuum réalité–virtualité : environnement réel \rightarrow réalité augmentée \rightarrow virtualité augmentée \rightarrow environnement virtuel. *Source* : [MTUK94]

La réalité mixte occupe tout l'espace entre les deux extrêmes et regroupe deux sous-domaines : la réalité augmentée et la virtualité augmentée. La réalité augmentée présente un contenu à forte proportion réelle alors que la virtualité augmentée sera à dominante virtuelle.

1.3.1 La réalité augmentée

La réalité augmentée va ajouter des informations virtuelles au-dessus de l'environnement physique réel. Les informations virtuelles ajoutées sont principalement visuelles et consistent en des images de synthèse calculées par ordinateur et rendues visibles à l'utilisateur par l'intermédiaire d'un dispositif tel qu'un visiocasque, un écran d'ordinateur ou tout autre système de projection. Bien entendu, la réalité augmentée pourra s'étendre au sonore, à l'olfactif ou à l'haptique.

1.3.2 La virtualité augmentée

La virtualité augmentée va intégrer à l'environnement virtuel des entités physiques bien réelles. Ces entités réelles incorporent donc l'environnement virtuel et peuvent interagir avec celui-ci.

Chapitre 2

Les bénéfices de la réalité virtuelle

Le chapitre précédent nous ayant permis de définir la réalité virtuelle, il est maintenant temps de montrer son utilité via ses différents domaines d'application. Ceux-ci sont regroupés suivant la fonctionnalité de la réalité virtuelle dont ils tirent partie. Premier point fort de la réalité virtuelle : pouvoir substituer un évènement ou un objet réel par son pendant virtuel. Le deuxième avantage est directement lié à l'aspect multisensoriel et interactif de la réalité virtuelle. Enfin, le sentiment de présence qu'elle permet de faire naître constitue son troisième bénéfice.

2.1 Substitution du réel

2.1.1 Outil d'aide à la conception

Intérêt premier de la réalité virtuelle : pouvoir se dispenser du réel en rendant perceptible (et compréhensible) un évènement ou une entité (objet, données scientifiques, réaction chimique etc.) via sa représentation virtuelle. Cet avantage fait de la réalité virtuelle un formidable outil de conception assistée par ordinateur [JP07]. Il est exploité par exemple dans l'industrie ([Zim08] propose un état de l'art récent sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'industrie automobile, voir figure 6 pour une illustration) où une représentation virtuelle d'un produit est utilisée pour valider un choix de conception. Cela permet de tester un produit auprès d'utilisateurs finaux et ainsi de s'assurer que les besoins sont remplis ou les envies satisfaites. La réalité virtuelle peut aussi servir à étudier le comportement d'un travailleur devant une représentation virtuelle d'un poste de travail afin de valider des choix d'ergonomie [RXDJ07]. Passer par une représentation virtuelle plutôt que par une maquette permet une économie sur les coûts de production mais aussi un gain de temps dans la boucle conception-validation d'un produit [MSH04]. Cet avantage est aussi retenu par les architectes et les urbanistes qui peuvent ainsi par exemple, tester l'impact d'un futur bâtiment sur le paysage urbain et le voisinage.

2.1.2 Outil de visualisation de données scientifiques

La masse de données scientifiques à visualiser (par exemple en sciences physiques ou sciences de la Terre) étant de plus en plus importante, la simple visualisation sur un écran



FIG. 6: Étude de l'habitacle d'une voiture dans un CAVE. *Source : [Zim08]*

d'ordinateur a atteint ses limites pour l'aide à la compréhension des phénomènes [Joh04]. La réalité virtuelle, par sa qualité de multisensorialité et ses capacités d'interaction, peut aider les scientifiques à mieux appréhender ces données [VDLS02] (voir figure 7 pour un exemple de visualisation d'une artère) . Les bénéfices attendus sont une analyse plus rapide et plus large, une meilleure compréhension spatiale et de nouveaux moyens d'exploration (visualisation sous des perspectives multiples) et de manipulation [LFLVD08]. [LRP08] montre que des étudiants appréhendent mieux la structure d'une molécule et comprennent mieux les modifications qui ont cours durant une réaction chimique lorsque la démonstration a lieu dans un CAVE [CNSD+92]⁴ plutôt que sur un écran d'ordinateur classique. Citons enfin l'utilisation de la réalité virtuelle en archéologie [BFS00] pour visualiser ce qui a peut-être existé.

2.1.3 Simulation de situation

La réalité virtuelle est encore exploitée lorsque l'on ne peut ou veut confronter un utilisateur à des événements réels (pour des raisons de coût, de complexité de mise en œuvre ou de danger). C'est le cas par exemple pour les simulations de scènes de guerre (pour des militaires ou pour le jeu), de situations d'urgences, de simulations sportives et plus largement d'entraînement (conduite de voitures, de chars, d'avions). Les situations ainsi créées peuvent être modifiées et paramétrées à loisir et laissent les actions des utilisateurs libres de conséquences. La réalité virtuelle peut servir aussi à la préparation à des actes chirurgicaux [SP07]. Ceci permet de tester plusieurs procédures sur un modèle virtuel similaire aux organes du patient [CMU05]. [SBPT07] montre l'intérêt des interfaces haptiques pour l'entraînement aux actes chirurgicaux.

La finesse de paramétrage de la mise en situation, le fait que l'expérience soit re-

⁴Un CAVE est un dispositif de réalité virtuelle de la forme d'un cube dont les six faces sont des écrans illuminés par rétro-projection. Voir section 3.1.1 page 25 traitant de ce sujet



FIG. 7: La réalité virtuelle pour la visualisation scientifique. Étude d'une artère.
Source : [VDLS02]

productible et la sécurité du patient sont des propriétés très recherchées lorsque la réalité virtuelle est employée dans le milieu thérapeutique [Riv05] : traitement des phobies [PR08], [VDZB⁺08] ou des troubles de la personnalité [RBBM02] (anorexie, boulimie) mais aussi de l'anxiété [GR08]. L'environnement virtuel est alors utilisé comme support pour confronter le patient à ses sources d'angoisse mais sous le contrôle total du médecin qui peut ainsi facilement moduler l'intensité des stimuli en toute sécurité pour le patient (voir figure 8 pour un exemple de conception d'environnement pour le traitement des troubles de la personnalité). Enfin, citons un dernier exemple d'utilisation médicale de la réalité virtuelle : le trouble dit du membre fantôme [RH98] apparaît suite à l'amputation d'un membre. Très souvent le patient ressent encore l'existence du membre amputé et cette illusion peut s'accompagner de fortes douleurs. En simplifiant grandement, cette douleur serait due à la différence entre le schéma corporel ⁵ et l'image du corps ⁶ [GGGKB07]. Équipé d'un visiocasque et d'un capteur disposé sur le membre valide, le patient peut alors manipuler l'équivalent virtuel de son membre amputé [MPP⁺06]. Notons enfin que dans une méta-analyse [CB08] conclue à l'efficacité potentielle des thérapies *in virtuo* [Tis01] par rapport à celles *in vivo*.

2.2 Stimulation sensorielle pleine et interactivité

Par son aspect multisensoriel et interactif, la réalité virtuelle permet de mobiliser toutes les capacités cognitives de l'utilisateur, c'est pourquoi la réalité virtuelle est aussi employée pour l'apprentissage [Bri91] [Ded09]. En étant immergé dans l'environnement, l'utilisateur voit ses capacités d'attention pleinement focalisées sur la tâche à effectuer.

⁵Le schéma corporel correspond à la connaissance implicite de la disposition de notre corps. Il est obtenu notamment grâce au sens proprioceptif

⁶L'image du corps correspond à sa représentation mentale



FIG. 8: La réalité virtuelle pour le traitement des phobies. Conception d'un environnement pour le traitement des troubles de la personnalité, ici la boulimie. *Source* : [GR08]

De plus, les capacités interactives du système permettent à l'utilisateur d'apprendre *avec ses mains* c'est-à-dire au travers de manipulations, d'expériences réalisées et vécues grâce aux différents outils d'interaction offerts par le système (on parle alors d'une approche enactive [VTR92] de l'apprentissage). Il en découlera alors aussi une plus grande capacité de mémorisation. Nous pourrions faire le parallèle avec les théories de Jean Piaget [Pia52] sur le rôle de l'action dans le développement de l'intelligence de l'enfant.

En dehors de l'apprentissage, les capacités immersives et interactives offertes par la réalité virtuelle permettent d'impliquer très fortement un utilisateur dans l'environnement virtuel. Cette capacité de focalisation sur un environnement autre que le physique, est exploitée pour détourner l'attention de patients de la douleur qu'ils peuvent ressentir [WW07]. La réalité virtuelle ayant donné des résultats probants pour diminuer la douleur dans les cas de ponctions ou de chimiothérapie, elle est maintenant envisagée pour être utilisée comme support aux anesthésies en vue de diminuer les doses de sédatifs et d'anxiolytiques [GKKR05].

Notons que les artistes peuvent avantageusement tirer partie de ces deux premiers avantages pour s'éloigner de la simulation réelle et laisser libre court à leur esprit créatif pour ouvrir de nouvelles perspectives. La réalité virtuelle est donc un formidable support pour les arts numériques et les arts interactifs. Peut-être est-il possible de faire naître de nouvelles sensations quasi synesthésiques grâce au contrôle fin des stimuli.

Rien n'empêche d'imaginer, comme c'est déjà le cas pour les technologies existantes, que les créateurs puissent détourner de leurs destinations originelles des instruments et des connaissances ouvrant de nouvelles perspectives dans l'exploration de l'imaginaire et de l'émotion. [BSA96].

Les œuvres suivantes sont considérées comme les premières ayant utilisé la réalité virtuelle comme support. Char Davies [DH96] créé l'œuvre *Osmose* en 1995. Le specta-

teur porte une veste qui détecte ses inspirations et expirations, celles-ci déterminent ses déplacements dans un monde onirique (voir figure 9 pour une vue tirée de ce monde). Maurice Benayoun [Ben95] a créé une des premières installations artistiques basée sur la communication à distance. Ainsi *Le tunnel sous l'atlantique* permettait à des visiteurs de Montréal et Paris de vivre ensemble une expérience.

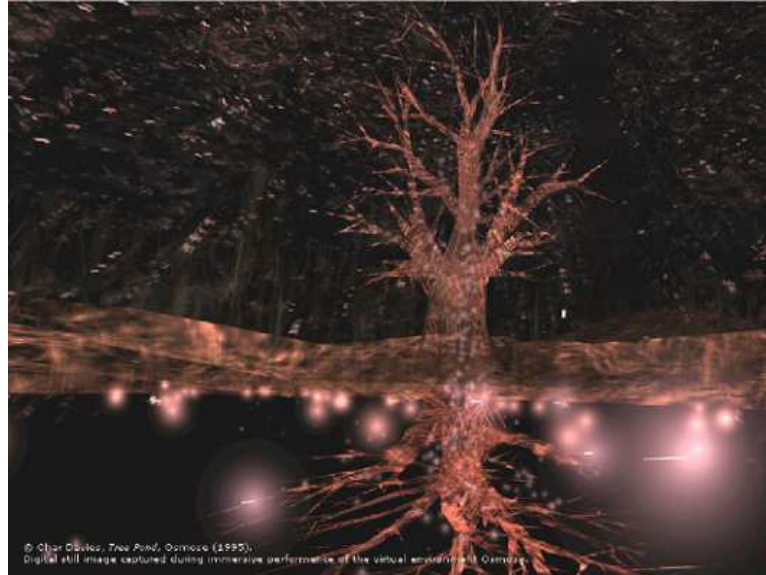


FIG. 9: La réalité virtuelle comme support pour l'art, une vue de l'oeuvre *Osmose* de Char Davies. *Source* : [DH96]

A ce moment précis de la lecture de ce chapitre, le lecteur pourrait s'interroger sur : pourquoi utiliser la réalité virtuelle et non simplement une représentation en image de synthèse par exemple ? La réponse à cette question se trouve dans le point suivant qui traite du troisième avantage de la réalité virtuelle.

2.3 La présence

L'avantage de la réalité virtuelle sur une simulation en image de synthèse *classique* se trouve dans sa capacité à faire naître chez l'utilisateur un sentiment de présence. Nous rappelons que le sentiment de présence se concrétise dans le fait de réagir physiquement, physiologiquement et émotionnellement comme si les événements et objets virtuels présentés étaient réels [SVS05].

Ainsi, on peut espérer que le comportement de l'utilisateur dans l'environnement virtuel sera similaire (en manifestation, en intensité et en qualité) à celui qu'il aurait eu dans la situation réelle [SW97]. Comme exemples de manifestations, nous pouvons citer le changement de posture [FAM⁺00] ou d'attitude, des émotions de stress ressenties face à un public [SPS99] ou l'accélération du rythme cardiaque [MIWB02].

Le réalisme du comportement lors d'une expérience en réalité virtuelle est par ailleurs une des méthodes envisageables pour évaluer le sentiment de présence ressenti (les méthodes

d'évaluation du sentiment de présence seront traitées dans le chapitre 14 page 159). Ainsi, l'expérience virtuelle pourra être considérée comme recevable car représentative de ce qui serait advenu dans l'environnement réel. Et ce, indépendamment de la distance créée par les interfaces mais aussi tout simplement par la conscience qu'a l'utilisateur de la virtualité de l'expérience.

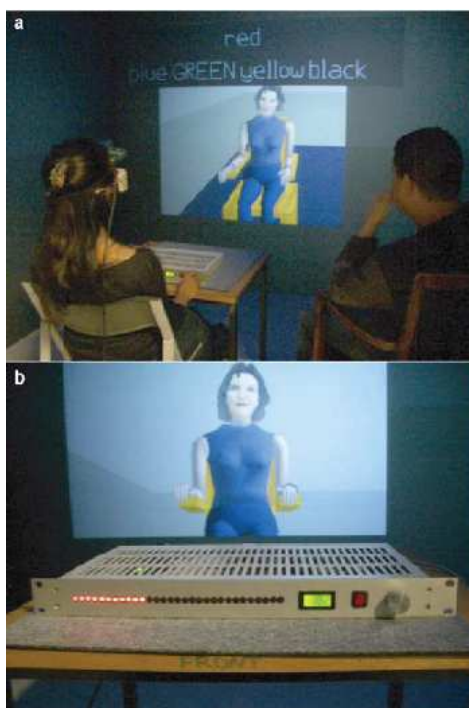


FIG. 10: La réalité virtuelle et l'expérience de Milgram. a) La participante est assise face à l'avatar. b) Le boîtier qui permet de moduler l'intensité de la décharge électrique. Source : [SAD⁺06]

En 2006, Slater et al [SAD⁺06] reprennent l'expérience menée par Milgram [Mil74] mais de façon virtuelle. Cette expérience de psychologie menée durant les années 60 avait pour but d'étudier le degré d'obéissance d'une personne soumise à une autorité, alors que les ordres reçus lui posent un problème de conscience. L'expérience consistait à demander aux participants d'infliger des décharges électriques à des personnes répondant de façon erronée à des questions. L'expérience était présentée aux participants comme une étude sur l'efficacité de la punition sur les capacités de mémorisation.

L'idée de Slater et al [SAD⁺06] n'est pas de mener à nouveau une étude sur l'obéissance mais sur la capacité de la réalité virtuelle à susciter, par la présence, des réponses physiologiques, émotionnelles et éthiques réelles face à des stimuli virtuels. Les participants sont installés dans un CAVE face à un avatar représentant le cobaye (l'apprenant) (voir la figure 10 pour une illustration). Les participants ont à leur disposition une machine capable d'infliger des décharges électriques à l'avatar. Cette étude montre que même en sachant que tout était virtuel et bien que l'avatar ne soit pas d'un grand photoréalisme, les participants sont gênés par le fait d'envoyer des décharges électriques à l'avatar. Ils ont des réactions similaires (physiologiques, émotionnelles et éthiques) mais d'intensité moindre

que celles constatées lors de la version originale de l'expérience. Cela nous semble être une démonstration supplémentaire du pouvoir de la présence en réalité virtuelle : susciter des réactions réelles face à des stimuli virtuels.

Ce postulat : *réagir réellement dans un environnement virtuel* est à la base de la création d'une Action Coordonnée sur la présence initiée par la commission européenne et dénommé Peach [Pea]. Celui-ci s'articule autour du phénomène *RAVE : Real Actions / Virtual Environments*.

Ainsi, en étant projeté dans l'environnement, en incarnant un rôle dans l'expérience, la présence permet de vivre pleinement la situation. Ceci rend les évaluations sur l'ergonomie, sur les fonctionnalités ou la qualité du design d'un modèle plus efficaces. Se sentir exister dans l'environnement permet de prendre véritablement conscience de ses actes. Ceci est particulièrement important pour les applications thérapeutiques ou en simulateur pour l'entraînement des pilotes et des chirurgiens.

Les réunions à distance est un exemple supplémentaire d'application où le sentiment de présence est bénéfique. Plus exactement, il s'agit du sentiment *d'être présent ensemble*⁷ qui est recherché. Ce sentiment pourra déboucher sur une plus grande convivialité permettant entre autres une communication non verbale et le maintien de l'attention des utilisateurs. L'efficacité sera alors proche de celle obtenue en présentiel. Cet aspect de présence sociale est par exemple très important pour l'enseignement à distance [MMB08] pour créer un climat propice à l'enseignement. Celui-ci supprimera la distance enseignant-élèves due aux kilomètres bien sûr mais aussi à la présence des interfaces. Ce climat pourra faire naître un mécanisme utile en enseignement : l'empathie [PDS⁺05].

Les traitements thérapeutiques exploitant les environnements virtuels seront plus efficaces si le patient éprouve un sentiment de présence dans les environnements. La thérapie par réalité virtuelle permet de créer des situations dédiées à la phobie dont souffre le patient et permet de faire varier les stimuli qui sont à l'initiative de la phobie. Les phobies possèdent une structure complexe en relation avec les émotions. Le sentiment de présence est alors recherché pour sa capacité à faire ressentir les émotions de façon plus intense et donc d'activer le mécanisme de la peur sous-jacent à cette phobie. Hodges et al [HKM⁺95] qualifient la présence de *cruciale* dans le cadre du traitement contre l'acrophobie⁸. La présence est donc vue comme un moyen permettant de susciter des émotions plus fortes donc une angoisse plus intense, la guérison par habituation pourrait alors en être plus efficace [PA07].

L'étude menée dans [VRR07] traite de la réalité virtuelle comme outil pour la relaxation et conclue que le sentiment de présence ressenti par les participants de l'étude augmente l'efficacité du traitement. Des études portant sur d'autres domaines d'application ont montré une relation entre présence et performance. Jung et al [JJM08] dans une étude ayant pour contexte les jeux vidéo, établissent une corrélation entre présence ressentie et efficacité du tir (ce critère dépend du nombre d'avions détruits).

Précisons tout de même que, bien qu'il soit possible de citer encore un grand nombre

⁷Le sentiment d'être présent ensemble est dénommé présence sociale, voir chapitre 6 page 51 traitant de ce sujet.

⁸L'acrophobie est la phobie de la hauteur et du vide.

de publications vantant le rôle bénéfique de la présence, il est tout aussi facile de trouver des articles [SLU⁺96], [MC00], [MK06] n'établissant pas de lien entre présence et efficacité ou performance. Citons un exemple caractérisant cette incertitude : Krijn et al [KEB⁺04] ne trouvent pas de corrélation entre présence ressentie et efficacité du traitement contre l'acrophobie. Cette étude est donc en contradiction avec celle de Hodges et al [HKM⁺95] précédemment citée.

Bien que souvent pressentie, la corrélation positive entre présence et performance n'est donc pas encore formellement établie. De notre côté, comme nous l'avons avancé précédemment, nous avons une vision positive du rôle de la présence. On peut alors s'interroger sur les raisons de ces résultats contradictoires. Plusieurs causes peuvent être avancées. Premièrement, comme nous le verrons dans la partie 2 de ce document, il n'existe pas encore de cadre précis et accepté de tous sur les tenants et aboutissants de la présence. On peut donc craindre que les auteurs des différentes publications n'aient pas tous la même conception de la présence et donc n'évaluent pas le même phénomène. Deuxièmement, le sentiment de présence est difficile à évaluer [Wel99] et des questionnaires d'auto-évaluation seront le plus souvent exploités. Comme nous le verrons dans le chapitre 14 (page 159) dédié à l'évaluation de la présence, cette méthode d'évaluation n'est pas parfaite : problème de questions, problème d'interprétation des résultats etc. C'est pourquoi ces auto-évaluations a posteriori voient leur validité remise en cause [SG07b].

Chapitre 3

Conception d'un système de réalité virtuelle

Le déroulement de cette thèse a accompagné la création de la salle de réalité virtuelle de notre équipe de recherche. Le propos de ce chapitre n'est pas d'effectuer un historique exhaustif des salles de réalité virtuelle ni de faire l'inventaire des différentes interfaces rencontrées en réalité virtuelle, mais plutôt de présenter les différents choix qui s'offrent aux concepteurs de salle de réalité virtuelle. Le critère premier qui guidera ces choix sera bien souvent pécuniaire. Nous verrons comment notre équipe s'est adaptée à cette donnée. Dans une section suivante, nous listerons les domaines de recherche dont la réalité virtuelle a besoin pour se développer. Nous terminerons en décrivant notre salle de réalité virtuelle idéale.

3.1 Différents choix de conception d'un dispositif de réalité virtuelle

Dés lors qu'une équipe de recherche souhaite s'équiper d'une salle de réalité virtuelle, elle se retrouve confronter à un certain nombre de choix pour définir les grandes lignes du système employé. Deux grandes directions nous sont apparues :

- Les systèmes complexes avec des équipements nombreux. Le dispositif est alors souvent couteux, nécessite une infrastructure lourde et un espace conséquent pour l'héberger. De fait, ces systèmes sont statiques.
- Les systèmes simples présentant un minimum d'équipements parfois créés de toutes pièces pour en diminuer le coût. Leur taille raisonnable permet de les installer dans une salle de dimension classique et sont transportables.

3.1.1 Les dispositifs complexes, couteux et statiques

Nous prenons le parti dans ce chapitre de nous concentrer sur les systèmes de réalité virtuelle à base d'écrans et de ne pas traiter des systèmes utilisant des visiocasques. Bien que, comme le montre la plateforme Virtualization Gate [PLBR09], les capacités immersives soient très grandes, l'utilisation de visiocasque soulève un certain nombre de

problème comme la perte de repères qui peuvent gêner les déplacements de l'utilisateur ou encore des problèmes de fatigue ou vertiges [SCMW08].

Si l'on a la chance de pouvoir, dans une certaine mesure, s'affranchir des contraintes d'argent et d'espace, il est possible d'aller très loin dans le perfectionnement d'un dispositif de réalité virtuelle. La plupart des salles présentées dans cette section sont des évolutions du modèle CAVE [CNSD⁺92]. Le CAVE est reconnu comme étant la première salle immersive pour la réalité virtuelle. Un utilisateur peut se déplacer au sein d'un cube dont les 6 faces sont des écrans illuminés par rétro-projection. Sur ces écrans sont projetées deux images présentant deux points de vues légèrement décalés (de la distance inter-oculaire) d'une même scène. Le port de lunettes adéquates permet d'associer un point de vue à chaque œil pour offrir une vision stéréoscopique omnidirectionnelle à l'utilisateur. De fait, ce type de dispositif permet de parfaitement immerger visuellement l'utilisateur. Ce point pourra se révéler crucial pour les simulateurs ou pour toute autre application nécessitant un haut niveau d'immersion visuelle. Revers de la médaille, outre que ce type de système est complexe à configurer, il a un coût élevé (plusieurs centaines de milliers d'euros) dû aux écrans bien sûr, à la structure du dispositif mais aussi aux douze vidéo-projecteurs et aux différentes machines nécessaires pour gérer le système. De plus, un espace d'installation présentant un volume conséquent est requis.

Version améliorée du CAVE, le dénommé *C6* [VRA] du Virtual Reality Applications Center de l'Université de l'Iowa revendique une surface de projection de 100 millions de pixels (16.7 millions de pixels par mur). Répartis sur les 6 faces d'un cube de 3 mètres de côté, ces images requièrent 48 stations de travail et 24 projecteurs pour être affichées par rétro-projection (voir la figure 11 pour une illustration). Ce système, qui permet une vision stéréoscopique omnidirectionnelle de haute résolution (4096x4096), aura coûté près de 4 millions de dollars.

La *Allosphere* [AKMHP09] située à l'Université de Californie-Santa Barbara (UCSB) propose elle aussi une immersion visuelle omnidirectionnelle. La *Allosphere* consiste en deux hémisphères de 5 mètres de diamètre offrant une surface de projection de 320m² (voir la figure 12 pour une illustration vue de l'extérieur). Entre ces deux hémisphères, un pont permet à 30 utilisateurs de se déplacer (la figure 13 montre la *Allosphere* vue de l'intérieure). Quatorze stéréo-vidéoprojecteurs disposés à la base des deux hémisphères permettent une vision stéréoscopique. L'écran de projection est en aluminium perforé ce qui le rend transparent pour la propagation du son. Enfin, la sphère est accueillie dans une salle anéchoïque dans laquelle sont installées 425 enceintes permettant une spatialisation sonore omnidirectionnelle. Bien entendue la salle dispose des outils d'interaction et de suivi adéquats.

Pour répondre (en partie) à la contrainte du coût et de l'espace, il a été développé un système intermédiaire dénommé le *SAS Cube*. Ce système est composé d'une surface de projection au sol de trois pans de projection verticaux. Ceux-ci peuvent être soit alignés pour offrir une grande surface de projection en ligne, soit en forme de U pour permettre une immersion plus enveloppante. Ce système économise donc un pan de projection arrière et surtout la projection au plafond qui requiert une salle au plafond élevé. L'idée est que la hauteur des pans est suffisamment grande pour recouvrir le champ de vision vertical de l'utilisateur et ainsi dissimuler la limite verticale de la zone de projection. Un système de ce type a été inauguré en octobre 2007 au Centre de la Réalité Virtuelle de



FIG. 11: Dispositif de réalité virtuelle, le C6. Des couples d'images sont rétro-projetés sur les faces du cube permettant une vision stéréoscopique omnidirectionnelle. *Source : [VRA]*

la Méditerranée [CRV] de l'Université de la Méditerranée. Ce dernier exploite des écrans de quatre mètres de haut pour trois mètres de large. Huit vidéos projecteurs assurent la vision stéréoscopique. Le coût de cette plateforme dépasse toutefois largement le million d'euros.

Il est évident que ces trois exemples de dispositif offrent une qualité immersive exceptionnelle : vision stéréoscopique omnidirectionnelle et qualité du rendu sonore. Tout est présent ici pour faire rêver tout chercheur en réalité virtuelle. Toutefois, et en faisant abstraction du coût et de l'espace nécessaire à ce type d'installation, la gestion d'un tel système ne va pas sans soulever des problèmes : problème de calibration des vidéo-projecteurs, problème de synchronisation des machines etc. Il est important aussi de veiller à ce que la démesure de ces systèmes ne bloque pas les initiatives car trop complexes à utiliser ou trop chères pour en donner l'accès. On laisse probablement moins facilement ce type de matériels à des étudiants pour des projets...

3.1.2 Les dispositifs simples, peu chers et mobiles

Les équipes de recherche ne disposant ni d'emplacement au volume suffisant ni des finances nécessaires se sont tournées vers des solutions plus modestes. Idée naturelle pour pouvoir diminuer le coût et installer un système de réalité virtuelle dans une salle de taille classique : diminuer le nombre d'écrans. Premier exemple de solution et qui fait écho à la Allosphère [AKMHP09] mais en version miniature (surface de projection à taille

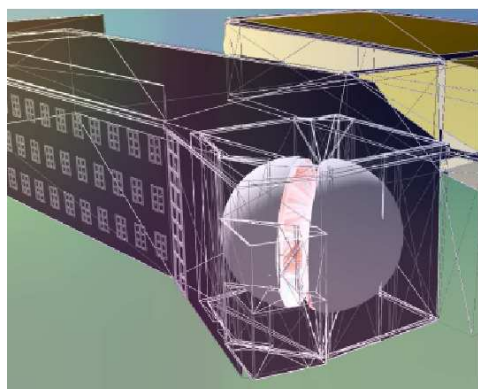


FIG. 12: Dispositif de réalité virtuelle, la AlloSphere nécessite un bâtiment dédié.
Source : [AKMHP09]

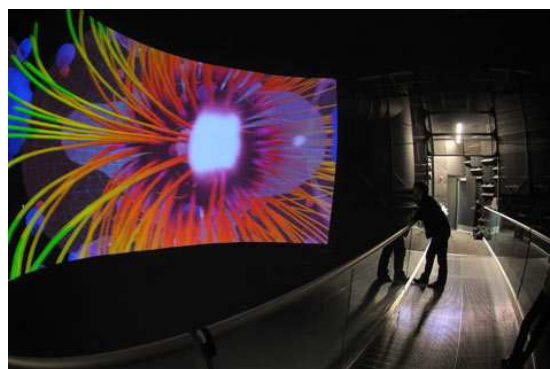


FIG. 13: Dispositif de réalité virtuelle, la AlloSphere vue de l'intérieur. À gauche de l'image seule une petite partie de l'écran est illuminée, à droite le pont sur lequel se déplace les utilisateurs.
Source : [AKMHP09]

humaine) le Cyberdome [SHH⁺03]. L'avantage principal recherché avec un écran courbe est l'absence de discontinuités dans l'image au niveau des bords des écrans ; une meilleure immersion est alors espérée. L'inconvénient majeur est le problème de distorsion d'images inhérent à la projection sur des surfaces non planes.

D'autres configuration de salles ont été testées, citons par exemple la projection sur deux pans formant un coin [BFFW03]. *The HIVE* [CS05] propose une projection sur trois toiles acryliques enduites d'une laque spéciale conservant la polarisation de la lumière permettant ainsi une projection stéréoscopique. [GMF08] propose une projection sur un demi cylindre de 2,5 mètres de rayon permettant ainsi une vision semi-panoramique à 180°. Certaines solutions s'orientent plus directement sur l'aspect transportable du système. Nous pouvons citer l'exemple de miniVR [FBT04] composé de deux mini-projecteurs, un petit miroir pour réfléchir les images, un mini écran offrant une surface de projection de 50x40 cm et un système de suivi pour l'interaction. Le tout tient dans une valise pour pouvoir être transporté par une seule personne. Comme le montre la figure 14, l'inconvénient est que l'utilisateur doit porter lui-même l'écran.

A la lecture de ces quelques exemples de systèmes de réalité virtuelle à moindre coût, on constate que les équipes de recherche ont pu jouer sur les biais suivants : ordinateurs puissants mais de type grand public, stéréoscopie passive plutôt qu'active (auquel cas le système de projection ainsi que les lunettes sont plus couteux). Pas de solution clé en main mais plutôt du *fait maison* tant pour l'aspect logiciel que matériel (écran, structure). Outre l'aspect financier et spatial, un gain de facilité pour maintenir la salle est espéré. Enfin, réduire le nombre d'écrans, choisir des toiles plus légères, disposer de vidéoprojecteurs plus petits permet de se contenter d'une infrastructure plus légère et fait que le système peut être démonté, déplacé et remonté facilement. Ce type de dispositif est pour le coup tout à fait intéressant pour être le support de projets étudiants. Bien entendu ce type de salle souffre de limites :

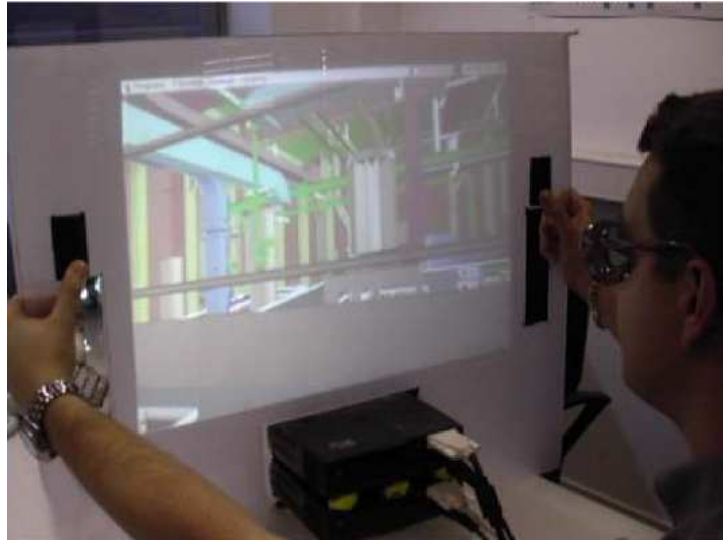


FIG. 14: Dispositif de réalité virtuelle, le miniVR. Un dispositif de réalité virtuelle parfaitement transportable. *Source : citeminiVR*

- Aspect visuel du système moins propre, la salle accueillant l'installation n'ayant probablement pas été conçue dans cette optique.
- La qualité moindre des écrans implique souvent une moins bonne conservation de la polarité de la lumière, les canaux dédiés aux yeux ne sont alors plus parfaitement séparés, la vision stéréoscopique sera alors de moindre qualité. De plus un phénomène de point chaud pourra alors apparaître face aux vidéoprojecteurs.
- Les vidéoprojecteurs employés sont souvent de type grand public, la luminosité (de l'ordre de 2000 lumens pour les grand public contre 12000 pour les professionnels) est alors un peu faible et les images projetées manquent alors de clarté. Ceci est encore plus vrai lorsque les images sont rétro-projetées (la *traversée* de l'écran ne se faisant pas sans perte) et que le dispositif pour la vision stéréoscopique est passif (l'emploi de filtres polarisant diminue encore la luminosité).
- La faible résolution des vidéoprojecteurs bon marché est encore un inconvénient.
- Enfin les surfaces de projection plus réduites font que l'utilisateur perçoit les limites de l'affichage.

Toutes ces limites auront pour conséquence de diminuer la qualité de l'immersion dans l'environnement virtuel proposé. On pourra remarquer à la lecture des articles précédents que souvent, seul l'aspect visuel est abordé. L'aspect sonore est bien souvent négligé voire inexistant, l'aspect interaction très peu abordé et se limite au mieux au suivi de l'utilisateur. Ceci peut se comprendre puisque la vue est le sens dominant chez l'homme mais cela confirme aussi que les équipes de réalité virtuelle sont surtout menées par des chercheurs travaillant dans le domaine de l'image.



FIG. 15: Notre premier dispositif de réalité virtuelle : l'écran polarisé et quatre des huit enceintes disponibles. *Source : [BCL⁺06]*

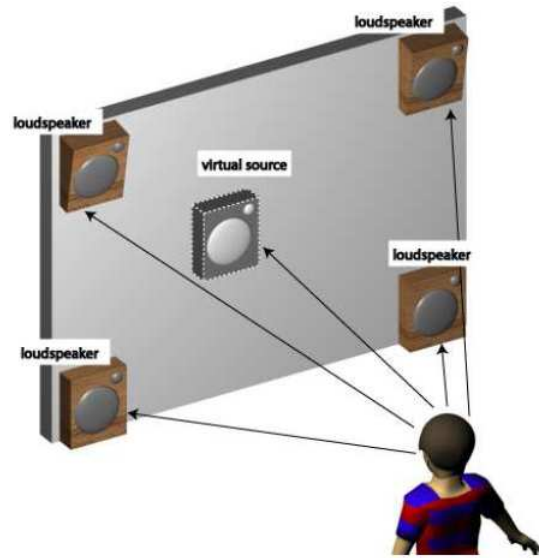


FIG. 16: Notre premier dispositif de réalité virtuelle, la spatialisation sonore par variation d'amplitude. *Source : [BCL⁺06]*

3.1.3 Notre dispositif de réalité virtuelle

Comme nous l'avons déjà mentionné cette thèse a accompagné la création du système de réalité virtuelle de l'équipe de recherche. Celui-ci a dû supporter les contraintes suivantes : tenir dans une salle de cours, être bon marché, transportable, les développements informatiques sont faits sous Linux et aucun logiciel externe n'est utilisé. Pour répondre à la contrainte d'espace, il a été décidé de ne disposer que d'un seul plan de projection mais qui offrirait une surface suffisante (4 mètres par 3) pour offrir une immersion de bonne qualité (voir illustration 15). Cette surface permet de couvrir presque complètement le champ de vision de l'utilisateur. Pour une raison de coût, nous avons opté pour un système de stéréoscopie passif : deux filtres polarisant sont placés devant les deux vidéoprojecteurs, l'écran conserve la polarité de la lumière et l'utilisateur porte des lunettes polarisées.

Toujours pour l'aspect immersif, nous avons équipé la salle d'un système 8.0, les huit enceintes sont placées aux sommets d'un cube dont le centre est la tête de l'utilisateur. La spatialisation sonore est effectuée selon une méthode de variation d'amplitude qui permet de positionner la source sonore virtuelle entre les enceintes (voir figure 16 pour une illustration). Dans le chapitre 13 (page 141), nous décrivons la dernière version de notre chaîne de rendu pour la spatialisation sonore.

Concernant l'interaction, nous avons employé comme premier outil un suivi des doigts. Le but est de pouvoir indiquer, via des mouvements de la main, les schémas d'interaction de base : navigation, sélection et manipulation simple. Cet outil consiste à positionner deux diodes sur un doigt de l'utilisateur. Ces deux diodes définissent un vecteur qui est détecté et suivi par deux caméras placées face à l'utilisateur et sur le côté. Ne reste alors qu'à trianguler les positions des diodes détectées par les deux caméras pour obtenir une



FIG. 17: Notre 2ème dispositif de réalité virtuelle : un CAVE à bas coût vu de l'intérieur. *Source : [dSBHB09]*



FIG. 18: Le tapis sensible *fait maison*. *Source : [dSBH+08]*

position dans l'espace. Bien que donnant des résultats intéressants cette solution a été par la suite remplacée par l'utilisation d'une *Wii mote*. Cet outil de suivi de mouvements développé par Nintendo nous a permis d'obtenir des résultats plus précis et surtout plus stables.

Hormis l'écran de projection, l'ensemble des équipements est composé d'éléments non spécifiques à la réalité virtuelle et pouvant être trouvés dans des commerces grand public. Ceci nous a permis de créer un système pour moins de 15000 euros et de parfaitement maîtriser notre dispositif. La structure est suffisamment simple et légère pour être facilement montable/démontable et transportable. Ce travail d'équipe a donné lieu à plusieurs publications [BCL+06] [BLC+06] [dSBC+06].

Dans le cadre d'un projet étudiant, une deuxième salle a été créée [dSBHB09]. Le concept est de proposer une salle dans l'esprit d'un CAVE mais à faible coût (moins de 7000€ dont une majeure partie allouée aux vidéoprojecteurs), le choix du *fait-maison* s'est donc imposé. Première concession, seules les quatre faces verticales du cube servent à l'affichage. Celui-ci est fait par rétro-projection, les écrans sont des feuilles de papier calque collées entre elles pour assurer une surface de projection continue (voir figure 17 pour une illustration). La vision est monoscopique mais peut évoluer facilement vers du stéréoscopique. Un tapis sensible d'une surface de 9m² occupe la base du cube. Celui-ci aussi fut conçu de toutes pièces [dSBH+08] pour ce projet et permet de suivre les déplacements de l'utilisateur à l'intérieur de l'installation (voir figure 18 pour une illustration). Servant à déclencher certains évènements, il offre ainsi un canal d'interaction supplémentaire.

3.2 La réalité virtuelle à la croisée des chemins

A la lecture de la section précédente, on comprend aisément que concevoir un système de réalité virtuelle capable de susciter un sentiment de présence demande un grand nombre de compétences. De fait, la réalité virtuelle et la présence ont un rôle moteur pour motiver les recherches dans les différents domaines sur lesquels elles s'appuient. Nous listons ici

un certain nombre de ces domaines.

3.2.1 L'informatique et l'algorithmique

L'informatique et l'algorithmique sont entre autres utilisées pour générer des environnements virtuels toujours plus réalistes et plus complets. Cela nécessite de développer de nouvelles méthodes en image (synthèse d'images) et en son (synthèse sonore, restitution sonore). Pour que tout fonctionne en temps réel, on cherche à optimiser les capacités de calculs [HRF09]. Le traitement d'images et la vision par ordinateur cherchent à proposer des méthodes d'interaction sans marqueur [AMR⁺07] pour que ceux-ci soient toujours plus naturels, transparents et intuitifs. L'intelligence artificielle permet de peupler l'environnement virtuel d'entités intelligentes au comportement complexe. Le réseau est utilisé pour la communication à distance mais aussi pour déporter les applications gourmandes sur des systèmes dédiés. Le nœud du problème sera alors de gérer la synchronisation de ces machines et d'assurer la stabilité de la communication.

3.2.2 L'électronique

Les développements électroniques décuplent les capacités de calcul des processeurs et des cartes graphiques. Cette augmentation de puissance accompagne les développements informatiques. Mais l'électronique permet aussi de créer de nouvelles interfaces haptiques.

3.2.3 Les sciences cognitives

Les sciences cognitives sont nécessaires pour comprendre comment l'homme perçoit son environnement et agit avec celui-ci, comment il perçoit les autres, quels sont les schémas sous-jacents à ses actions, comment il se construit une représentation mentale de son environnement etc. L'éventail des besoins est très large.

En 1990 lors de la conférence SIGGRAPH, William Bricken [BDL⁺90] affirma que :

la psychologie est la science physique de la réalité virtuelle

La psychologie constitue une des clés pour concevoir des expériences en réalité virtuelle menant à la présence.

3.2.4 L'ergonomie

L'ergonomie [Bur03] saura tirer partie des enseignements obtenus grâce aux sciences cognitives pour proposer des schémas d'interaction intuitifs. Différentes contraintes font qu'il n'est pas toujours possible d'offrir des interactions naturelles alors il faut proposer des métaphores d'interaction ou passer par des interactions schématiques.

3.2.5 Les arts

Les environnements virtuels sont souvent modélisés par des informaticiens dont la fibre artistique n'est pas toujours le point fort. La participation des artistes permet d'apporter

une touche esthétique aux environnements. Ce supplément d'âme et d'émotion permet d'augmenter l'intérêt de l'expérience. Dans la section 7.4.5 (page 74), nous expliciterons le rôle que nous attribuons à l'émotion dans un objectif de présence.

3.3 La salle de réalité virtuelle idéale...

Comme indiqué précédemment, notre équipe de recherche a conçu de toutes pièces son dispositif de réalité virtuelle. Cette expérience nous permet d'identifier les grandes lignes d'un système de réalité virtuelle idéal.

3.3.1 Organisation de l'équipe

Comme nous l'avons vu dans la section 3.2, la réalité virtuelle est intrinsèquement pluridisciplinaire. Cet aspect se retrouvera forcément dans l'origine diverse des membres travaillant dans notre salle de réalité virtuelle idéale. Ceci permettra bien entendu de disposer d'un éventail large de compétences, mais permettra aussi d'aborder les problèmes sous des angles différents, de confronter ses méthodes voire peut-être de procéder par analogie. Par exemple, et comme nous le verrons dans le chapitre 12 (page 121), les méthodes de calcul de réverbération sonore sont essentiellement des adaptations de méthodes employées en synthèse d'images. Les connaissances sur la perception humaine et plus largement sur la cognition humaine, apportent les bases nécessaires aux autres membres de l'équipe pour construire les briques et les algorithmes d'une expérience capable de faire naître un sentiment de présence. La coopération avec des artistes permettra d'apporter un supplément d'âme (ou au moins d'intérêt) à l'expérience.

3.3.2 Ouverture du dispositif

Nous pensons qu'un dispositif de réalité virtuelle situé par exemple au sein d'une université, devrait être proposé aux autres équipes de recherche. Offrir les possibilités du système pour visualiser des données issues des sciences physiques ou du vivant pourra soulever un certain nombre de problèmes comme, entre autres, la visualisation de grandes quantités de données. Il est alors possible d'exploiter les capacités multisensorielles du dispositif pour représenter ces données. Le son ou le tactile peuvent être utilisés comme une dimension supplémentaire pour représenter ces données. Les équipes en psychologie apporteraient bien entendu leurs connaissances sur l'humain mais pourraient aussi exploiter la salle de réalité virtuelle pour mener des expérimentations. Au delà des chercheurs, il serait intéressant d'ouvrir le dispositif aux étudiants. L'organisation matérielle et logicielle du dispositif devra offrir une certaine modularité pour être exploitable par partie afin d'en faciliter la mise à disposition.

3.3.3 Organisation logicielle

Il existe sur le marché des solutions logicielles *clés-en-main* dédiées à la réalité virtuelle, 3DVIA Virtools [Das] et OpenMask [LCAA08] en sont deux exemples. Toutes deux sont

des plateformes de développement d'applications 3D interactives, la première est payante alors que la deuxième gratuite. En tant qu'outil, ces solutions logicielles risquent de nous contraindre dans leurs fonctionnalités. Ce dernier point peut donc être un frein à la diversité et à l'originalité de nos recherches. Partant du principe que nous disposons d'une équipe pluridisciplinaire nous pensons préférable de disposer de nos propres briques logicielles. Toutefois, ces outils peuvent être exploités pour développer rapidement des applications. Ils peuvent donc se révéler utiles lorsque le dispositif sert à des partenariats avec d'autres équipes de recherche ou des entreprises.

3.3.4 Mise en ambiance et introduction à l'expérience

Ce point traitant de l'ambiance peut surprendre. Nous verrons dans la partie 2 dédiée à la présence que celle-ci est un sentiment difficile à atteindre et que, afin de mettre toutes les chances de leur côté, les concepteurs du dispositif de réalité virtuelle doivent apporter une attention particulière sur l'ambiance dégagée par la salle. Cette ambiance passera par l'apparence de la salle hébergeant le dispositif mais aussi par une phase d'introduction à l'expérience qui facilitera le passage de l'environnement physique vers le virtuel [SBH⁺09].

Chapitre 4

Bénéfices croisés entre la réalité virtuelle et les jeux vidéo

Parfois confondus, réalité virtuelle et jeux vidéo entretiennent une relation particulière basée sur des conditions de succès et des objectifs communs. Ce chapitre dont le contenu a donné lieu à une publication internationale [BdSCB08] propose de faire le point sur ce lien presque fraternel qui unit les deux domaines.

4.1 Les clés du succès d'un jeu vidéo

Dans cette section nous identifions les clés du succès d'un jeu vidéo.

4.1.1 L'immersion

Les jeux récents proposent un réalisme visuel de plus en plus poussé (voir figures 19 et 20 pour des exemples récents). Toutefois, si ce réalisme visuel est un formidable argument de vente, il ne garantit pas forcément le succès commercial du jeu. En effet, ce dernier dépend également des autres clés de succès que nous présentons par la suite. L'immersion visuelle devrait faire un bond en avant très prochainement sous l'impulsion de NVIDIA. Le concepteur de cartes graphiques entend ajouter la vision stéréoscopique à tous les jeux vidéo existants et futurs. Pour cela, il exploite son processeur graphique pour calculer un deuxième point de vue de la scène courante. Le kit appelé *3D Vision* [Nvi09] intègre des lunettes stéréoscopiques actives à obturateurs qui seront synchronisés par infrarouge avec l'écran. L'immersion sonore exploite les systèmes de restitution de type 5.1 ou au casque depuis de nombreuses années et permet de créer l'ambiance adéquate.

4.1.2 L'interaction

Les qualités de jouabilité et de maniabilité d'un jeu vidéo conditionnent souvent la réussite de l'expérience ludique. Les possibilités d'action, si possible nombreuses, doivent être faciles à réaliser et intuitives. Longtemps limitée à la trilogie manette – souris – clavier, l'interaction a fortement évolué ces dernières années avec l'apparition de nouvelles

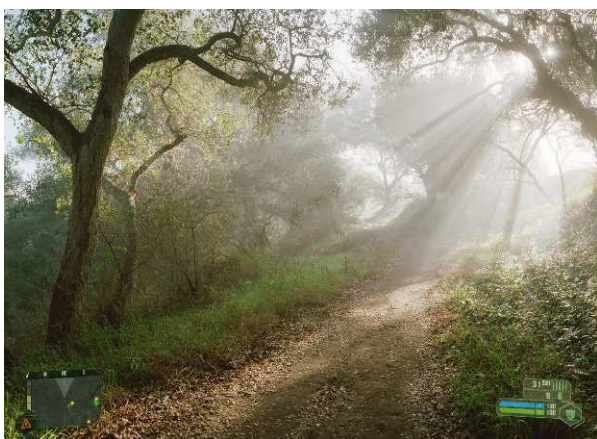


FIG. 19: Photoréalisme et jeux vidéo, capture d'écran du jeu Crysis 2.
Source : [Cry09]



FIG. 20: Photoréalisme et jeux vidéo, capture d'écran du jeu ArMA 2.
Source : [Stu09]

interfaces permettant au joueur d'interagir avec le jeu par les gestes. L'*Eye Toy* [Son03] de Sony en fut l'initiateur, la Wiimote [Nin05] de Nintendo aura complètement démocratisé ce type d'interaction. Le projet Natal [Mic09] de Microsoft ouvre (si les promesses sont tenues) une nouvelle dimension dans l'interaction directe pour le jeu. Le dispositif permettra de suivre les mouvements du corps du joueur sans que celui-ci ne porte de marqueur. L'interface consiste en l'association de deux caméras, l'une classique pour conserver l'apparence du joueur, l'autre infrarouge pour suivre ses mouvements.

L'environnement du jeu devient moins figé et peut être modifié par le joueur. Outre l'interaction joueur – environnement, l'intérêt d'un jeu passera aussi beaucoup par les interactions possibles avec d'autres joueurs. Le comportement des adversaires ou équipiers non-humains étant souvent peu intelligent et stéréotypé, le plaisir du jeu sera souvent augmenté [RST⁺06] si il est possible de se confronter ou de faire équipe avec d'autres humains. Une communication directe entre joueurs par la voix augmentera le sentiment d'être ensemble.

Enfin, troisième type d'interaction, les concepteurs de jeux vidéo offrent la possibilité aux joueurs de s'impliquer dans le contenu du jeu lui-même. Cela passe essentiellement par le développement de nouvelles scènes de jeu.

4.1.3 Scénario et émotions

L'étude de Schneider et al [FAMD04] montre combien le fait de créer une histoire autour d'un jeu vidéo augmente l'intérêt de celui-ci mais aussi incite le joueur à s'impliquer et se projeter plus profondément dans le jeu. Le scénario, en devenant moins linéaire et moins prévisible, permet d'apporter plus de profondeur à l'intrigue mais aussi de la complexité aux personnages.

Les émotions seront portées par ce scénario et un travail conséquent sur l'ambiance visuelle et sonore est effectué. Enfin, pour augmenter encore plus l'identification d'un joueur dans

son personnage, des possibilités de personnalisation de l'apparence de l'avatar sont souvent offertes. Le joueur peut ainsi décider (ou non) d'avoir un personnage à son image.

Nous pouvons constater que les clés de succès d'un jeu vidéo rejoignent très souvent celles d'une application en réalité virtuelle.

4.2 Les bénéfices croisés

Comme nous venons de le voir, réalité virtuelle et jeux vidéo ont en commun un grand nombre d'objectifs et défis à relever. C'est pourquoi les avancées de l'un peuvent souvent s'appliquer à l'autre.

4.2.1 Les résultats de la réalité virtuelle applicables aux jeux vidéo

La réalité virtuelle constitue en soi un défi à relever, celle-ci a servi de moteur pour les nombreux domaines sur lesquels elle repose. De fait, un grand nombre des améliorations obtenues en synthèse d'images temps réel est maintenant exploité dans les jeux vidéo. Des recherches sur la spatialisation sonore comme celle de Moeck et al [MBT⁺07] ont été intégrées par la suite dans le moteur sonore de l'entreprise de jeux vidéo Atari. La réalité virtuelle exploite les connaissances sur la cognition et la perception humaine. Grelaud et al [GBW⁺09] montrent comment des connaissances sur la perception intermodale (image et son) peuvent, par l'intermédiaire de la réalité virtuelle, s'appliquer aux jeux vidéo. Les premières interfaces haptiques [SJ93] développées pour la réalité virtuelle ont rapidement été adoptées par les jeux vidéo. Les travaux sur la téléprésence et le travail à distance ont existé bien avant les premiers jeux vidéo en ligne.

Comme nous le verrons dans le chapitre 6 (page 51), le sentiment de présence comporte différentes composantes. Très brièvement résumées, les composantes identifiées dans la littérature sont la présence de soi dans l'environnement, la présence de l'environnement et la présence d'être avec d'autres. On fera de suite le lien entre ces composantes et les clés de succès d'un jeu vidéo identifiées précédemment. Certains jeux cherchent à susciter un sentiment d'identification chez le joueur. Pour ces jeux, la présence constitue une grille d'analyse intéressante. Les recherches sur la présence permettent d'identifier les facteurs pouvant influencer sur son émergence. Nul doute que les travaux sur ces facteurs et sur les processus sous-jacents menant à la présence pourraient être positivement exploités pour la conception des jeux. Les méthodes d'évaluation de la présence pourraient être employées en amont de la sortie d'un jeu pour évaluer les futures implication et identifications du joueur.

4.2.2 Les résultats des jeux vidéo applicables à la réalité virtuelle

Si initialement le développement des cartes graphiques performantes était une demande de la réalité virtuelle pour animer des simulateurs très gourmands, force est de constater que dorénavant c'est le marché du jeu vidéo qui pousse cette demande. Alors

que jusque dans les années 90 les dispositifs de réalité virtuelle devaient s'appuyer sur de coûteuses stations de travail, il est maintenant possible d'exploiter des ordinateurs et cartes graphiques grand public et donc de réduire les coûts de conception de la plateforme de réalité virtuelle.

Comme nous l'avons déjà énoncé, le transfert de technologie en matière d'interaction allait traditionnellement dans le sens réalité virtuelle \rightarrow jeux vidéo. Ces dernières années le mouvement s'est inversé. La Wiimote [Nin05] de Nintendo est devenue un outil d'interaction très employé dans les laboratoires de réalité virtuelle, [SG07a] et [GDPM08] en sont deux exemples parmi beaucoup d'autres. La Wiimote constitue un outil de suivi précis et peu coûteux. L'interaction directe par le corps de l'utilisateur est espérée depuis longtemps en réalité virtuelle [SU94], des travaux récents [AMR⁺07] donne à ce sujet de très bons résultats. Peut-être que le futur outil de Microsoft [Mic09] précédemment évoqué constituera un nouvel outil d'interaction en réalité virtuelle.

Les entreprises de jeux vidéo ont des contraintes de rapidité et de stabilité que les laboratoires n'ont pas forcément. De fait, les développeurs ont souvent su optimiser des algorithmes issus de la recherche pour les faire fonctionner en temps réel.

Enfin, les concepteurs de jeux vidéo ont compris depuis longtemps le rôle de l'esthétisme, des émotions et de la création d'ambiance pour impliquer le joueur et maintenir son attention focalisée sur le jeu. De la même façon, ils savent qu'intégrer une histoire à une expérience permet d'apporter de la profondeur à celle-ci. Cette profondeur augmente l'intérêt de l'expérience et l'implication du joueur [FAMD04]. Ces considérations sont en partie à la base de l'essor des jeux sérieux [SJB07] et devraient être plus souvent appliquées à la réalité virtuelle.

4.3 Des jeux vidéo en réalité virtuelle

Badiqué et al [BCK⁺02] proposent un historique des applications ludiques de la réalité virtuelle. Nous appelons jeux vidéo en réalité virtuelle toute expérience ludique cherchant à susciter un sentiment de présence chez le joueur. Notre équipe a développé deux exemples de jeux vidéo en réalité virtuelle, ceux-ci ont donné lieu à des publications internationales. Le premier, intitulé Jim 3D [dSBC⁺06], propose une spatialisation sonore et une visualisation panoramique et stéréoscopique de l'environnement. Le joueur peut se déplacer de salle en salle en pointant une direction avec son doigt sur lequel deux diodes sont positionnées pour être suivies par des caméras. De la même façon, il peut sélectionner et déplacer des objets.

Le deuxième, dénommé ISSI [dSBH⁺08], exploite le tapis sensitif et le dispositif à bas coût de type CAVE présentés au chapitre précédent. Le joueur est dans la peau d'un prisonnier cherchant à s'évader. La surface du tapis correspond à celle de la cellule ce qui permet au joueur de se déplacer physiquement dans l'environnement virtuel.

Le photoréalisme est souvent recherché par les concepteurs de jeux vidéo et de réalité virtuelle, pourtant ce réalisme visuel n'est une garantie de succès pour aucun des deux. Pour les jeux vidéo, ce succès sera surtout conditionné par l'intérêt intrinsèque du jeu mais aussi par sa maniabilité et sa jouabilité. Pour la réalité virtuelle, nous considérons que c'est la crédibilité de l'expérience proposée qui prime, mais nous en reparlerons longuement

dans la prochaine partie.

Deuxième partie

La présence

Dans la partie précédente traitant de la réalité virtuelle nous avons déjà, à maintes reprises, abordé le thème de la présence. Dans cette deuxième partie, nous proposons une analyse approfondie de ce sentiment. Dans le premier chapitre, nous présentons trois conceptualisations existantes de la présence. Celles-ci correspondent à des approches technologiques, psychologiques ou écologiques. Nous proposons alors une approche équilibrée prenant en compte les considérations précédentes. Nous verrons dans le deuxième chapitre que le sentiment de présence repose sur quatre composantes principales. Les trois premières sont d'ores et déjà identifiées dans la littérature, la quatrième est une proposition qui nous est propre. Le troisième chapitre fait le point sur les différents facteurs pouvant influencer sur le sentiment de présence. L'approche équilibrée présentée dans le premier chapitre nous sert de base théorique pour proposer un framework dédié à la conception d'applications en réalité virtuelle. Enfin, le dernier chapitre est consacré à notre modèle de la présence. Celui-ci identifie et organise les processus sous-jacents menant à la présence.

Pour cette partie nos contributions sont donc l'élaboration d'une approche unifiée de la présence prenant en compte des considérations techniques, psychologiques et écologiques. Nous avons par ailleurs identifié une quatrième composante de la présence que nous avons intitulée *présence d'action*. Nous proposons également un framework dédié à la conception d'applications de réalité virtuelle. Celui-ci a comme base les connaissances sur la cognition humaine au sens large et s'organise autour des considérations suivantes : en plus d'une description diégétique de l'environnement, une large place est accordée au rôle des émotions et enfin nous avançons qu'une des clés pour tendre vers le sentiment de présence est de concevoir des expériences virtuelles où les affordances perçues peuvent être assumées par les outils d'interaction. Pour valider cette dernière hypothèse, nous proposons de mener une étude pour déterminer si les affordances perçues dans l'environnement virtuel dépendent du contexte médiatisé ou sont similaires à celles perçues dans l'environnement réel. Pour ce framework, nous pointons l'importance de l'aspect bidirectionnel de l'immersion et reprenons l'idée que l'intermodalité peut être une des solutions pour palier à certaines impossibilités techniques. De plus nous proposons que laisser plus de place à l'imagination pourrait, dans une optique de présence, avoir un impact positif.

Enfin, nous proposons un modèle complet de la présence qui déroule les processus menant à ce sentiment. Ce modèle pointe notamment les trois principes suivants : que les attentes sensorielles et intellectuelles de l'utilisateur soient satisfaites, que les affordances perçues soient assumées et enfin que l'expérience proposée apparaisse crédible à l'utilisateur pour que celui-ci accepte de se prendre au jeu.

Chapitre 5

Définitions de la présence

Les réflexions sur la présence n'ont pas attendu l'avènement de la réalité virtuelle, des philosophes comme Heidegger ou Descartes se sont penchés sur cette notion bien avant [She99]. Bien que ces réflexions soient très intéressantes et éclairantes sur la notion d' *être présent* nous n'aborderons pas ce versant là du concept. Nous nous limitons à la présence dans le cadre d'environnements médiatisés comme c'est le cas pour la réalité virtuelle. La définition de la présence est une tâche délicate. Comme le remarque Kalawsky [Kal00], la présence :

est un paramètre multidimensionnel que l'on peut qualifier de concept-parapluie regroupant un grand nombre de facteurs perceptifs et psychologiques inter-reliés.

Nous proposons un rappel sur différentes conceptualisations proposées dans la littérature puis explicitons notre point de vue.

5.1 L'évolution des différentes définitions

Dans cette section, nous passons en revue différentes définitions de la présence qui ont eu cours ces dernières années. Nous verrons que trois courants de pensée s'opposent. Les approches centrées sur la technologie considèrent la présence comme essentiellement le fruit de la stimulation sensorielle. L'approche psychologique centrée sur l'humain, considère la présence comme un état psychologique dont l'esprit humain est le principal moteur, les aspects technologiques sont alors vus comme secondaires. Enfin, une troisième approche dite écologique envisage la présence sous l'angle des actions réalisées dans l'environnement.

5.1.1 L'approche technologique

Les définitions de cette section défendent une approche sensorielle. La présence est alors le fruit de la technologie mise en œuvre.

Présence ou télé-présence ?

C'est en 1980 que Minsky [Min80] a introduit le concept de *télé-présence*. Il fait alors référence au sentiment que peut ressentir un opérateur lors d'une opération à distance également appelée télé-opération. Le corps de l'opérateur est alors projeté sur le lieu de travail de la machine, les caméras de l'opérateur deviennent ses yeux, l'opérateur peut donc à ce moment là se sentir comme étant (télé)-présent dans cet autre lieu.

En 1992, Sheridan [She92] propose d'employer le terme de *virtual presence* pour désigner le sentiment de présence suscité par les environnements virtuels et de restreindre l'utilisation du terme *télé-présence* pour les télé-opérations. En effet, toutes les applications exploitant un environnement virtuel ne reposent pas sur l'idée d'intervention à distance.

Présence ou être là

En 1991, Reeves [Ree91] emploie l'expression *être là* (*being there* en anglais) pour décrire l'expérience vécue par les spectateurs devant leurs postes de télévision. Cette notion d'*être là* sera par la suite très utilisée et représente un des concepts clés pour définir la présence : se sentir là (présent) dans cet environnement autre que l'environnement réel.

Slater [SU93] propose une définition qui nous semble similaire au concept d'*être là* :

L'utilisateur est ailleurs que là où il est physiquement, le "ailleurs" est formé par les images, sons et sensations physiques fournis aux sens de l'utilisateur par le système générant l'environnement virtuel.

Cette dernière définition est proche de celle donnée par Ellis [Ell91] pour le concept de virtualisation :

Le processus par lequel une personne interprète des impressions sensorielles pour représenter des objets dans un environnement autre que celui dans lequel la personne existe physiquement.

On comprendra donc que le concept de *être là* est très souvent associé à la perception sensorielle : l'utilisateur se sent là car ses sens perçoivent des stimuli décrivant l'environnement virtuel puis il construit une représentation mentale de l'environnement qui l'entoure.

Cette définition de la présence par le concept de *être là* est encore très souvent employée. Elle offre l'avantage d'être simple, le fait de *se sentir ailleurs que là où l'on se trouve physiquement* est une sensation assez courante obtenue par exemple par l'imagination lors de rêves éveillés ou en visionnant un film : *on s'y croirait*. Toutefois, nous pouvons lui reprocher d'être exclusivement dépendante de la stimulation des sens de l'utilisateur, d'oublier le rôle de l'action et de nier l'aspect psychologique et humain. Comme nous le verrons plus tard, la stimulation des sens n'implique pas forcément la présence. De même, une stimulation de plus grande qualité n'implique pas nécessairement une présence ressentie plus intense.

Présence ou une illusion perceptive

Suite à un état de l'art très complet sur les différentes définitions de la présence, Lombard et Ditton [LD97] parviennent à isoler l'idée centrale suivante : la présence est :

une illusion perceptive de non-médiation

Cette définition indique que la présence apparaît lorsque l'utilisateur n'a plus conscience de l'existence des interfaces. En d'autres termes, la présence jaillit lorsque la communication entre l'environnement virtuel et l'utilisateur se fait sans que celui-ci ne se rende compte de la présence et du rôle joué par les différentes interfaces (sensorielles et/ou motrices). L'expérience n'est donc plus perçue comme médiatisée mais tout simplement vécue, l'utilisateur se sent alors présent.

Cette deuxième définition est elle aussi devenue un grand classique. Elle nous rappelle que la présence est une illusion et indique clairement que les interfaces doivent s'effacer pour ne pas entraver l'illusion. Cette définition est donc appréciable car elle pointe l'aspect perceptif et la propriété de transparence que doivent revêtir les interfaces pour laisser apparaître la présence. Nous reprochons à cette définition qu'elle semble plus énoncer une condition de succès de l'interaction (au travers du choix des interfaces et des schémas d'interactions) que de vraiment définir la présence. De plus, encore une fois celle-ci met en avant exclusivement l'aspect perceptif.

Toutes les définitions que nous avons vues jusqu'alors sont centrées sur l'aspect technologique et sous-entendent que le sentiment de présence dépend directement et exclusivement des propriétés techniques du système. Meilleures sont les qualités techniques (meilleure immersion, possibilités fines d'interaction) plus forte sera la présence ressentie. Nous regrettons cette orientation exclusivement technologique. Nous verrons que notre approche, sans nier l'importance de la technologie, pointera le besoin d'une dimension cognitive supplémentaire.

Une définition intermédiaire est proposée par Lee [Lee04], la présence est :

un état psychologique dans lequel la virtualité de l'expérience n'est pas perçue.

Cette définition reprend donc le concept de médiation non perçue défini par Lombard et Ditton [LD97] mais y ajoute une considération psychologique. Cette dernière définition nous permet de faire le lien avec l'approche psychologique centrée sur l'humain.

5.1.2 L'approche psychologique

L'approche psychologique peut se caractériser par l'observation suivante de Biocca [Bio03] :

Si l'immersion sensorimotrice est la clé à l'origine de la présence, alors comment expliquer le haut niveau de présence ressentie par les lecteurs d'un livre. Les livres présentent un niveau très bas dans tous les facteurs identifiés comme à l'origine de la présence : qualité de la stimulation sensorielle, restitution à la première personne et possibilités de modifier l'environnement.

Cette observation est connue sous l'intitulé de *paradoxe du livre*.

Dans l'approche précédente, la présence pouvait être associée à un curseur se déplaçant entre l'espace physique et l'espace virtuel. Un haut niveau de présence ressentie dans

l'environnement virtuel s'accompagnait simultanément d'un faible niveau de présence ressentie dans l'environnement physique [SUS94]. Le décalage vers l'espace virtuel dépend des possibilités immersives du système. Plus celles-ci sont élevées et plus la perception de l'environnement virtuel se substitue à celle de l'environnement physique et donc plus la présence se déplace vers l'espace virtuel.

Dans le même article, Biocca [Bio03] propose d'introduire un troisième pôle : l'espace imaginaire. La présence spatiale ressentie dépend de l'espace de référence de l'utilisateur. Celui-ci se déplace entre les trois pôles suivants : physique, virtuel et imaginaire (voir la figure 21 pour une illustration). Ainsi, la réponse au paradoxe du livre serait l'imagination. La raison pour laquelle un lecteur peut ressentir un sentiment de présence intense malgré une immersion de piètre qualité, serait due en partie au pouvoir de son imagination pour se transporter dans l'environnement (la trame) du livre. Le pouvoir de l'espace imaginaire pourrait en quelque sorte pallier au manque d'immersion sensorielle.

Éclairage intéressant, selon les résultats de l'étude [BBG⁺05] comparant la présence perçue dans un environnement virtuel et dans un environnement imaginé, la présence perçue serait plus forte dans l'environnement virtuel.

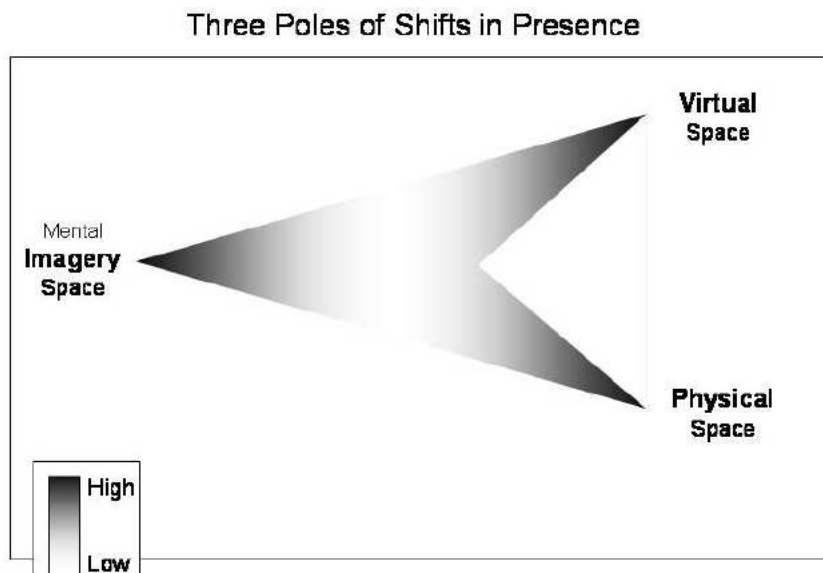


FIG. 21: Approche psychologique de la présence. L'espace de référence de l'utilisateur se déplace entre les trois pôles : espace physique, espace virtuel et espace imaginaire. *Source : [Bio03]*

La réponse de certains tenants de l'approche technologique au *paradoxe du livre* ne se fit pas attendre. La même année, Slater [Sla03] et Waterworth [WW03] rétorquent que la présence ne doit être vue que comme le fruit de la technologie. Introduire le contenu (c'est-à-dire la partie non technologique d'une expérience : scénario, aspect artistique etc.) dans cette relation risquerait de provoquer une confusion entre présence, réponse émotionnelle et implication. L'argumentation est la suivante : si à l'écoute d'un disque d'opéra ou à la lecture d'un livre il est possible de ressentir l'impression *d'y être*, cela n'est dû qu'à la puissance de l'oeuvre qui, par les émotions suscitées, est capable de nous transporter.

Si le livre n'est pas bon ou tout simplement ne plaît pas, cela ne fonctionnera pas. Or, toujours selon les auteurs [Sla03, WW03], le sentiment de présence n'a rien à voir avec l'intérêt voire plus globalement avec les émotions. Émotions et présence sont qualifiées d'*orthogonales* par Slater [Sla03]. Se sentir *là* dans un opéra, parce que les stimulations sensorielles décrivent un opéra, est de la présence, mais avoir l'impression d'y être par la seule force de l'oeuvre et son pouvoir de projection n'est *qu'une* réponse émotionnelle.

L'objection s'appuie aussi sur le constat que le livre ne peut provoquer que des réponses émotionnelles puis physiologiques mais pas comportementales. Si un feu surgit dans l'environnement virtuel, l'utilisateur pourrait alors se mettre à courir ou au moins avoir un mouvement de recul. Par contre, si un livre ou un film décrit un feu, le lecteur ne lâcherait pas le livre de peur de se brûler les mains et le spectateur n'évacuerait pas la salle de projection. Pour les défenseurs de l'approche technologique, le paradoxe du livre est donc nul et non avvenu.

Les défenseurs de l'approche psychologique restent tout de même convaincu que [IJs03] :

l'intéret premier d'un média réside dans son contenu, son scénario, les idées et les émotions qui sont communiquées.

Ainsi, même si le réalisme sensoriel a certainement une grande influence sur la présence, il faut plus pour la ressentir [Hee03] :

La présence est une expérience subjective. Même une immersion sensorielle parfaite ne pourrait par elle-seule automatiquement susciter un fort sentiment de présence. Même la réalité ne peut automatiquement susciter un fort sentiment de présence.

Une vision mixte associant immersion sensorielle et considération cognitive est proposée [SC02] :

Le sentiment de présence ne dépend pas directement de l'immersion mais passe par une représentation cognitive construite à partir des stimulations sensorielles. De ce modèle mental dépendra l'émergence ou non d'un sentiment de présence chez l'utilisateur.

Cette approche effectue un décalage de la technologie vers l'humain.

De notre côté, nous envisageons une position équilibrée entre ces deux points de vue. Tout comme Slater [Sla03], nous ne confondons pas réponse émotionnelle et présence et ne considérons pas le livre comme un système de réalité virtuelle puisque, entre autres, le livre n'est pas capable de décrire sensoriellement un lieu. Or, comme nous l'avons présenté partie 1.2 (page 12), nous définissons la réalité virtuelle comme *une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au cœur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de présence.*

Par contre, nous considérons le contenu et plus globalement les émotions portées par l'application en réalité virtuelle mais aussi l'imagination comme certains des facteurs permettant de tendre vers la présence. Nous parlerons plus en détail de l'apport des émotions dans le chapitre 7.4.5 (page 74) décrivant les piliers sur lesquels un concepteur d'expérience en réalité virtuelle peut s'appuyer pour faire émerger un sentiment de présence chez l'utilisateur.

5.1.3 L'approche écologique

L'approche écologique de la présence est issue des travaux de Gibson [Gib86] sur la perception visuelle. Gibson [Gib86] avance que la perception de l'environnement ne se fait pas via son apparence (définie par des propriétés de taille, de forme, de couleur etc.) mais au travers des possibilités d'action que perçoit l'utilisateur dans l'environnement. Ainsi, l'homme ne perçoit pas un environnement par ses sens puis en déduit des actions possibles mais perçoit l'environnement directement par les possibilités d'action détectées. Ces possibilités d'action sont intitulées *affordances* par Gibson [Gib86]. Ce terme est une création de Gibson [Gib86] et provient du verbe anglais *to afford* qui signifie offrir. Les affordances définissent donc les possibilités ou potentialités d'action offertes par l'environnement pour un animal donné ⁹.

Une affordance dépend de l'environnement et de l'animal qui observe. Par exemple, le sol afforde pour l'homme la marche mais afforde l'asphyxie pour le poisson. Autrement dit, les affordances ne dépendent pas, de façon disjointe, des propriétés de l'environnement ou de l'animal mais bien de leur relation. Les affordances sont donc l'objet de la perception.

Une autre différence entre l'approche perceptive/technologique et l'approche Gibsonienne est la suivante. Alors que l'approche technologique considère que de la perception découle une représentation mentale d'un objet ou de l'environnement [SC02], l'approche écologique estime que les affordances remplacent cette représentation mentale. Par exemple, un marteau est perçu comme une entité offrant l'action de marteler et non comme un ensemble de propriétés comme la taille, la couleur ou le poids. De fait, une représentation mentale reprenant ces caractéristiques est inutile puisque l'objet est là devant soi.

Partisans de l'approche écologique, Zahorik et Jenison [ZJ98] proposent la définition suivante :

La présence est équivalente à entreprendre avec succès des actions dans l'environnement.

Les auteurs affirment par cette définition que la réalité se forme via les actions entreprises et que la réalité d'une expérience est définie par les fonctionnalités plutôt que par les apparences. *Si je peux agir avec succès dans l'environnement alors c'est que j'existe dans cet environnement donc que je suis présent.*

Entreprendre avec succès des actions signifie que les réponses de l'environnement aux actions de l'utilisateur correspondent aux réponses auxquelles il est habitué dans le monde réel. Ces réponses satisfont alors ses attentes.

Zahorik et Jenison [ZJ98] rejettent que la présence soit associée au concept *d'être là* qui repose sur une stimulation sensorielle décrivant l'environnement virtuel. À la place ils proposent d'associer présence et capacité *de faire là*. Alors que dans l'approche technologique l'interaction est souvent vue comme la deuxième clé de la présence derrière l'immersion, ici pouvoir réussir des actions dans l'environnement est la condition nécessaire et suffisante pour ressentir un sentiment de présence.

Premier point fort de cette approche, elle met le couple perception-action en avant (et non d'abord l'immersion puis l'interaction) et pointe l'idée que ce couple devrait diriger la

⁹Gibson emploie le terme d'animal pour désigner l'ensemble des entités qui peuvent percevoir et agir.

conception des environnements virtuels. Plus que la définition de la présence proposée par Zahorik et Jenison [ZJ98], c'est le concept d'affordance qui nous intéresse. Ainsi, que ce soit notre framework de conception d'applications en réalité virtuelle (section 7.4 page 68) ou notre modèle de la présence (section 8.2 page 87) tous ont une dimension écologique marquée. Une objection possible à l'approche écologique est que celle-ci ne traite que de la perception visuelle. Or, avec une restitution sonore de qualité et un système à retour d'effort pour les interactions, une personne non voyante peut parfaitement ressentir un sentiment de présence lors d'une expérience en réalité virtuelle. De plus, cette définition nie la possibilité de ressentir un sentiment de présence dans une expérience contemplative. Enfin, nous regrettons que les considérations psychologiques de l'expérience soient laissées de côté.

5.2 Notre définition de la présence

Comme nous l'avons mentionné section 1.2 (page 12), nous définissons la réalité virtuelle comme une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence. Nous rappelons la définition de la réalité virtuelle proposée précédemment :

La réalité virtuelle est une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au cœur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de présence.

Et nous définissons la présence comme :

le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve.

Le sentiment de présence est donc, comme tout sentiment, une expérience subjective vécue consciemment qui dépend de facteurs internes et externes à l'utilisateur. L'immersion décrit à nos sens un environnement, notre cerveau reçoit alors ces stimuli et les interprète. Le système perceptif ne sait pas que tout ceci est virtuel et le cerveau considère donc ces stimuli comme décrivant la réalité. Cet état se manifeste par des réponses instinctives : réponses physiologiques, émotionnelles et comportementales [SVS05]. L'intensité du sentiment de présence n'est pas constant au cours de l'expérience, il pourra par moment disparaître complètement provoquant des pauses dans la présence [SS00].

Mais l'homme est plus qu'un simple *système perceptif*, il est doté d'une intelligence qui le rend capable d'interpréter sa perception et d'avoir un esprit critique. Ainsi, il est à la fois possible d'avoir des réponses similaires à celles obtenues dans un environnement réel tout en étant en même temps, conscient de la virtualité de la situation. Toutefois, bien que toujours conscient de la virtualité des événements, l'utilisateur est capable de ressentir un *authentique* sentiment de présence. Il est donc nécessaire qu'à un moment de l'expérience l'utilisateur passe outre sa conscience de la virtualité de la situation. Si l'expérience est de qualité suffisante (tant dans le contenu que dans la forme) et a un sens pour l'utilisateur alors l'utilisateur jugera l'expérience crédible et il acceptera de se prendre au jeu de celle-ci. Pour cela, il ne nous semble pas nécessaire de proposer une expérience

réaliste, c'est pourquoi nous préférons employer le terme de crédibilité qui traduit mieux la subjectivité sous-jacente. Crédibilité et affordances dépendent de la relation observateur - environnement. Nous verrons dans les prochains chapitres que l'association jugement de la crédibilité - affordances est au cœur de notre approche de la présence.

Nous avons employé le verbe *exister* plutôt que *être* car ce dernier est trop associé au concept d'*être là* souvent rattaché à la stimulation sensorielle. Or, bien que nous voulions garder ce précédent aspect, nous souhaitons ajouter à celui-ci une idée d'identification, d'incarnation du rôle proposé par l'application. Les stimulations sensorielles mais aussi les possibilités d'actions dans l'environnement concourent au sentiment d'exister. Il nous semble que cette dimension d'incarnation manquait aux précédentes définitions.

L'étude que nous présentons section 15.3.1 (page 174) valide notre vision et définition de la présence. En effet, celle-ci montre que les notions d'*existence* et d'*incarnation de rôle* sont corrélées aux différentes composantes de la présence (les composantes de la présence sont présentées au chapitre 6 page 51). Ainsi, les participants qui ont ressenti un sentiment d'existence et d'incarnation de rôle intense, ont également éprouvé un fort sentiment de présence dans chacune des composantes de la présence. Par ailleurs, ces mêmes participants ont également ressenti des émotions plus intenses que la moyenne des participants (voir expérience 15.3.4 page 180). Tout semble donc indiquer que les notions d'existence et d'incarnation de rôle correspondent bien au concept de présence tel qu'il est appréhendé par la communauté scientifique.

Avec ces deux définitions indissociables, nous pensons occuper une position intermédiaire entre les trois approches décrites précédemment. Nous pointons l'importance de la technologie pour l'immersion et l'interaction. En cela nous sommes proches de l'approche technologique. Toutefois, nous nous en écartons en ajoutant une dimension cognitive chère à l'approche psychologique. Nous ne pensons pas que la présence dépende exclusivement de l'immersion ou de l'interaction. Par le jugement de la crédibilité de l'expérience et par son acceptation de se prendre au jeu nous montrons clairement que l'utilisateur participe à l'émergence de la présence. Toujours en rapport avec l'approche psychologique, notre framework de conception d'application en réalité virtuelle (section 7.4 page 68) considère les émotions portées par l'application comme un des facteurs permettant de tendre vers le sentiment de présence. De plus, dans une optique de présence, laisser plus de place à l'imagination pourrait avoir un impact positif. Enfin, nous verrons dans les prochains chapitres que les affordances sont au cœur de notre modèle de la présence (section 8.2 page 87) et de notre framework. Par l'introduction de la notion de crédibilité et par l'importance accordée aux affordances, notre approche comporte une forte dimension écologique.

Chapitre 6

Les composantes de la présence

La présence est un concept complexe. Souhaiter répondre à la question *pourquoi est-ce que je me sens présent ?* fait comprendre que la réponse ne peut être monolithique. Heeter [Hee92] sera la première à parler des 3 dimensions de la présence. Dans un premier temps, nous faisons le point sur les différentes dimensions proposées dans la littérature. Puis nous précisons notre point de vue sur l'aspect multidimensionnel de la présence et avançons qu'une dimension est manquante. Nous l'avons identifiée comme étant la présence d'action.

6.1 Le point de vue de Heeter

Pour Heeter [Hee92], la présence est un sentiment subjectif (et donc personnel) qui englobe les trois dimensions suivantes :

- *La présence personnelle* : il s'agit du fait de se sentir là (dans cet endroit précis). Ce sentiment reprend l'idée très répandue du *être là* (en anglais *being there*) et repose donc essentiellement sur une stimulation sensorielle.
- *La présence sociale* : dans quelle mesure les autres êtres (vivants ou non) *sont là avec vous* et peuvent interagir avec vous.
- *La présence environnementale* : dans quelle mesure l'environnement semble savoir que vous êtes là. Cela se traduit par les réactions de l'environnement à votre présence et à vos actions. L'auteur donne l'exemple d'une lumière qui s'allume à l'entrée de l'utilisateur dans une pièce.

Ces trois dimensions participent à l'émergence du sentiment de présence. Par exemple, le fait de pouvoir communiquer avec d'autres personnes dans l'environnement incite l'utilisateur à accepter la présence des autres et par transitivité sa présence aussi. A contrario, si les autres vous ignorent alors vous remettrez en question votre présence personnelle. Le même raisonnement est avancé pour expliquer l'apport positif de la présence environnementale.

On pourra noter que la distinction entre présence personnelle et présence environnementale peut paraître assez flou. En effet, la présence environnementale telle qu'elle est pensée par Heeter nous semble plus être une méthode pour augmenter la présence personnelle qu'une composante de la présence à part entière.

6.2 Le point de vue de Biocca

Pour Biocca [Bio97] la présence se décompose au travers des trois composantes suivantes :

- *La présence physique* : il s'agit ici de répondre à la question *où suis-je ?*. La réponse se situe entre les trois pôles (physique, virtuel ou imaginaire) présentés dans l'approche psychologique de la présence (voir section 5.1.2). Cette composante repose essentiellement sur une stimulation sensorielle. L'idée d'être transporté dans un environnement autre que l'environnement physique est sous-jacente.
- *La présence sociale* : celle-ci intervient lorsque l'utilisateur a la sensation de pouvoir communiquer avec une autre entité (vivante ou artificielle). La présence sociale augmente lorsque l'utilisateur perçoit de l'intelligence, des intentions et un retour sensoriel de son interlocuteur.
- *La présence de soi* : intervient lorsque l'utilisateur perçoit son *soi* (la conscience qu'il a de lui-même) comme appartenant à l'environnement virtuel. Selon l'auteur, la présence de soi peut apparaître par exemple si une ressemblance entre le corps réel de l'utilisateur et sa représentation virtuelle existe.

Cette fois encore on pourra trouver la distinction entre présence physique et présence de soi assez floue. Si l'utilisateur peut affirmer "je suis sur une plage" (présence physique), il est difficile de comprendre que son *soi* n'y soit pas également. Présence physique et présence de soi sont donc très fortement corrélées.

6.3 Le point de vue de Lee

Lee [Lee04] reprend les mêmes intitulés que Biocca [Bio97] pour définir les composantes de la présence mais pour des concepts légèrement différents :

- *La présence physique* : intervient lorsque les objets composants l'environnement (et par extension l'environnement lui-même) sont appréhendés comme des objets réels. Ici, il n'y a pas de notions sous-jacentes d'*être là* ou d'être transporté dans l'environnement virtuel.
- *La présence sociale* : apparaît lorsque les autres acteurs de l'environnement (vivants ou artificiels) sont acceptés comme des acteurs réels.
- *La présence de soi* : le *soi* virtuel est perçu comme le *réel*. Selon l'auteur, la présence de soi peut être augmentée si le point de vue change de façon synchrone avec les mouvements de la tête de l'utilisateur. L'idée de projection dans l'environnement virtuel ou d'appropriation de la représentation virtuelle se retrouve donc dans ce point.

L'intérêt principal de cette approche est qu'elle différencie clairement présence physique et présence de soi. L'auteur insiste sur le fait que la présence physique ne soit pas associée à l'idée d'être transporté car celle-ci repose essentiellement sur les qualités immersives du dispositif. L'auteur considère que sa composante présence physique ainsi définie peut inclure les dispositifs faiblement immersifs.

6.4 Notre point de vue et proposition d'une quatrième composante

Nous nous rangeons derrière la taxonomie proposée par Lee [Lee04] pour les raisons suivantes. Cette taxonomie permet d'éviter les confusions entre présence physique et présence de soi. Ces deux composantes sont ainsi disjointes. De plus, sa volonté de retirer l'idée de projection de la composante présence physique permet de rééquilibrer le poids des différentes composantes. En effet, les autres propositions accordaient, il nous semble, beaucoup trop d'importance à la présence physique ce qui pouvait amener à une confusion entre présence globale (dans toutes ses dimensions) et présence physique.

Au premier abord, présence physique et présence de soi pourraient être considérées comme les deux composantes principales de la présence. La présence sociale serait alors considérée comme une composante annexe permettant d'augmenter le sentiment global de présence. Mais la taxonomie de Lee [Lee04] permet de considérer aussi les dispositifs faiblement immersifs (présence physique faible). Ainsi une application de télé-présence faiblement immersive mais générant une présence sociale forte a toute sa place dans l'approche de Lee [Lee04].

Toutefois il nous semblerait plus parlant de renommer la présence physique en présence environnementale ou présence spatiale car il s'agit bien d'accepter l'environnement comme un environnement physique réel. La présence spatiale est souvent mentionnée dans la littérature mais elle s'accompagne la plupart du temps de l'idée de projection dans l'environnement.

Par ailleurs, nous pensons qu'il manque une composante à la taxonomie courante. Pour l'instant nous disposons des dimensions suivantes : la présence de l'environnement, la présence des autres et la projection de soi dans l'environnement au travers de son avatar par exemple. Nous avons défini le sentiment de présence comme le sentiment d'exister dans l'environnement virtuel. Nous associons ce sentiment d'exister au fait d'incarner le rôle que l'expérience dédie à l'utilisateur. Or, si cette idée d'exister repose bien sur les trois composantes actuellement identifiées, il nous semble qu'il manque une dimension relative aux actions de l'utilisateur dans l'environnement. Nous pensons donc que l'utilisateur doit avoir conscience de ses actes et de leur portée pour pleinement incarner son rôle. Nous appelons cette quatrième composante la *présence d'action*. La présence de soi s'approche de cette considération mais elle est vue par les différents auteurs [Bio97, Lee04], seulement comme l'appropriation de la représentation virtuelle de l'utilisateur.

Cette présence d'action nous semble particulièrement pertinente pour des applications comme les simulateurs de vol, de combat ou les entraînements pour des actes chirurgicaux. Prenons l'exemple d'un pilote dans un simulateur de vol devant effectuer un atterrissage d'urgence aux commandes d'un airbus A380 transportant 800 passagers. Pour que cet entraînement soit efficace, il faut que le pilote ait pleinement conscience de l'enjeu de la situation. S'il ne ressent pas le stress inhérent à cette situation, la dimension ludique risque de l'emporter. Par contre, si la présence d'action est bien là, l'expérience acquise par le pilote lors de cette simulation sera d'autant plus grande. Il en sera de même pour un chirurgien préparant une opération délicate sur une représentation virtuelle de son futur patient.

Nous avons déjà mentionné l'expérience de Milgram (page 22) menée par Slater et al [SAD⁺06] dans un environnement de réalité virtuelle. Les participants ressentent une présence d'action lorsqu'ils infligent des décharges électriques à leur victime virtuelle. Cette présence d'action se traduit par des réactions physiologiques, émotionnelles et éthiques.

Nous avons identifié les trois facteurs suivants comme pouvant influencer sur la présence d'action :

- L'action de l'utilisateur doit correspondre à une affordance perçue et assumée par les schémas d'interaction.
- Les schémas d'interaction doivent permettre une correspondance entre les sensations proprioceptives du soi virtuel et les sensations proprioceptives du soi réel. Pour cela il faut que le schéma d'interaction soit naturel.
- Le lien de causalité doit être maintenu entre une action de l'utilisateur et sa perception de la réponse du système.

Pour l'heure, nous nous contentons de lister ces facteurs car le chapitre 7 (page 55) est dédié aux facteurs pouvant influencer la présence et ses différentes composantes.

L'étude que nous présentons section 15.3.1 (page 174) montre que les évaluations obtenues pour la présence d'action sont cohérentes avec celles des trois autres composantes. Ce résultat indique donc la pertinence de l'introduction de la présence d'action. Bien sûr, d'autres études ciblant plus particulièrement la présence d'action et ses liens avec les affordances assumées et les sensations proprioceptives restent à être menées afin de confirmer le bien fondé de la dimension présence d'action.

Chapitre 7

Les facteurs de la présence

La lecture des chapitres précédents fait comprendre que susciter un sentiment de présence chez un utilisateur est un objectif louable, souvent pertinent mais difficile à atteindre et à maintenir. Garau et al [GRWA⁺04] proposent une étude sur les variations de la présence ressentie au cours du déroulement d'une expérience. Aussi, nous préférons parler plus modestement de tendre vers ce sentiment.

Trois grandes catégories de facteurs participent à l'émergence de la présence [IdRFA00] : les caractéristiques du système (la forme), le contenu de l'application (le fond) et les caractéristiques de l'utilisateur. Nous verrons pour chaque famille les propriétés ou fonctionnalités qui pourront être prises en compte. Enfin, nous exposerons notre framework de conception d'applications en réalité virtuelle.

7.1 La forme : les caractéristiques du système

La forme concerne essentiellement les propriétés immersives et interactives du système. Nous détaillons les caractéristiques principales que peut revêtir le système et en présentons les bénéfices attendus et les conditions de succès.

7.1.1 Immersion

Définition

Le concept d'immersion a longtemps été confondu avec celui de la présence. Par exemple Witmer et Singer [WS98] décrivent l'immersion comme (version traduite de l'anglais) :

un état psychologique caractérisé par le sentiment de se sentir enveloppé par, inclus dans, et d'interagir avec un environnement qui fournit un flux continu de stimuli et d'expériences.

Le défaut majeur de cette définition est qu'elle situe l'immersion à un niveau psychologique et de fait, introduit une confusion avec le sentiment de présence. Il est encore courant de lire des articles parlant de sentiment d'immersion et donc confondant immersion et présence. Un sentiment est subjectif mais l'immersion est, comme le propose la définition suivante, objective.

Slater et Wilbur [SW97] proposent en effet, une définition différente de l’immersion (traduction depuis l’anglais) :

Dans quelle mesure les systèmes de restitution sont capables de délivrer une illusion de la réalité aux sens de l’utilisateur qui soit exclusive, large, englobante et juste.

Une rapide explication de texte s’impose :

- *Exclusive* signifie que l’immersion a pour but de substituer la perception de l’environnement virtuel à celle de l’environnement réel. On cherche donc à empêcher la perception de l’environnement réel.
- *Large* indique que pour une immersion complète, il faut qu’un nombre maximum de sens soit stimulé.
- *Englobante* signifie que la perception de l’environnement doit être omnidirectionnelle et non pas limitée à un angle restreint.
- *Juste* impose que la stimulation de chaque sens soit fidèle à la perception usuelle et à une bonne résolution perceptive.

Avec cette définition l’immersion est circonscrite à la description objective et mesurable des moyens technologiques mis en œuvre pour restituer aux sens l’environnement virtuel. Nous adoptons ce point de vue dans le reste de document.

Bénéfices attendus de l’immersion

Nous présentons dans cette partie les bénéfices espérés, dans une optique de présence, d’une immersion de qualité :

Être plongé dans l’environnement virtuel. Toutes les informations sensorielles reçues par l’utilisateur décrivent l’environnement virtuel, on espère alors que le cerveau considère ces informations comme décrivant un environnement réel.

Être coupé de l’environnement réel. Les informations sensorielles décrivant l’environnement virtuel doivent se substituer aux perceptions sensorielles issues de l’environnement réel. L’environnement réel doit, d’un point de vue sensoriel, ne plus exister pour l’utilisateur. Le nombre de distractions potentielles [YKT⁺06] est ainsi diminué et l’utilisateur peut focaliser son attention sur l’expérience.

Une meilleure compréhension de l’environnement. Une stimulation multisensorielle constitue autant d’informations redondantes [NSC08] décrivant l’environnement virtuel et les événements qui s’y déroulent. Si de plus, la vision est stéréoscopique et la spatialisation sonore omnidirectionnelle, alors on peut espérer pour l’utilisateur une meilleure compréhension spatiale de la scène et des événements s’y déroulant [TGSP06], [SB07]. De cette meilleure compréhension peut découler une interaction facilitée mais aussi une plus grande efficacité pour effectuer des tâches dans l’environnement dont voici quelques exemples : mémorisation de procédures [SWB08], analyse de données biologiques [PFK⁺08], détection de détails fins dans une scène [BT06] ou estimation des distances [TLHW09]. Toutes les études citées comparent la réussite à une tâche donnée pour différents niveaux d’immersion.

Conditions de succès de l'immersion

Nous rappelons dans cette section les critères habituellement présentés comme pouvant juger de la qualité de l'immersion.

Il nous semble intéressant de faire le parallèle entre l'immersion et la *virtualisation* telle qu'elle est définie par Ellis [Ell91] :

Le processus par lequel un humain interprète des impressions sensorielles pour se représenter des objets dans un environnement autre que celui d'où proviennent physiquement les impressions.

Le but de l'immersion (tout comme la virtualisation) est donc que l'utilisateur ait sensoriellement l'impression d'être dans un autre environnement que celui où il se situe physiquement. De fait, chercher à plonger l'utilisateur dans l'environnement virtuel revient de façon symétrique à empêcher la perception de l'environnement réel. Pour disposer d'une immersion de qualité il faut remplir au mieux les conditions suivantes.

Stimuler l'ensemble des sens de l'utilisateur. L'immersion sera complète [SMW93] si l'ensemble des sens de l'utilisateur est stimulé. Steuer [Ste92] emploiera le terme de *vividness* pour décrire l'intensité et la richesse de la stimulation sensorielle. Cette stimulation multisensorielle offre les deux avantages suivants. Premièrement, cela fournit des indices redondants permettant une meilleure compréhension de l'environnement virtuel [BA06]. Deuxièmement, l'homme est habitué à une perception multisensorielle, ne recevoir aucune stimulation sur un sens risque de provoquer un phénomène de manque [GW95] qui sera préjudiciable à l'immersion puis probablement, par extension, au sentiment de présence. Une étude intéressante de Hecht et al [HRH06] montre que le processus de traitement mental des informations sensorielles est plus lent lorsque celles-ci sont monomodales plutôt que multimodales. Les auteurs considèrent que cet avantage de la multimodalité permet aux utilisateurs d'environnements virtuels multimodaux de bénéficier de plus de temps pour la perception de l'environnement et l'intégration des informations. Ceci aboutit alors à une meilleure compréhension de l'environnement. Pour des raisons historiques (les chercheurs travaillant sur la réalité virtuelle proviennent souvent du domaine de la synthèse d'images) puis techniques, les travaux actuels se sont surtout focalisés sur l'image puis le son et l'haptique. La stimulation du goût et de l'odorat doit encore relever des défis technologiques.

Les interfaces immersives doivent respecter les fréquences de perception des sens de l'utilisateur. Stimuler les sens à une résolution de perception qui leur sont propres permet de maintenir l'illusion. Du fait de la persistance rétinienne une fréquence d'au moins 25 Hz pour le visuel est nécessaire. Par contre, elle sera de 10kHz pour l'haptique.

Offrir un champ de perception omnidirectionnel. Il est préférable que l'utilisateur puisse regarder dans toutes les directions sans voir l'environnement physique (on peut alors utiliser un système de type CAVE ou un visiocasque). De même il faut que la restitution sonore permette une perception omnidirectionnelle.

Proposer une immersion égoцентриque. Celle-ci consiste en une perception à la première personne. Les dispositifs de restitution sensorielle s'adaptent à la position et

orientation des récepteurs de l'utilisateur (correction des mouvements pseudoscopiques¹⁰ et changements de parallaxe pour la vue, spatialisation sonore adaptée pour l'ouïe). Pour cela, il faut être capable de suivre finement les mouvements de l'utilisateur.

Maintenir une cohérence entre les stimuli. Il est nécessaire de maintenir une cohérence spatiale et temporelle [HD92] entre les différentes modalités décrivant l'environnement. Tous les canaux sensoriels doivent décrire le même monde (que ce soit les objets le composant ou les événements s'y déroulant).

En complément des conditions de succès de l'immersion précédemment énoncées, nous allons maintenant rentrer plus en profondeur en listant les propriétés et fonctionnalités recherchées pour chaque sens.

Compléments pour le visuel

La vue, sens dominant chez l'homme, a longtemps été considérée comme le facteur clé de la présence. En 1999 Brooks [Bro99] désigne comme *cruciale* la restitution visuelle mais comme seulement importants (et donc pas cruciaux) les aspects sonores, haptiques et même interactifs.

Encore une fois nous ferons un parallèle avec le concept de virtualisation défini par Ellis [Ell91]. En plus de la définition de la virtualisation précédemment énoncée, Ellis [Ell91] identifie trois niveaux croissants de virtualisation (voir figure 22) :

- **L'espace virtuel** : apparaît lorsque l'on perçoit un objet en trois dimensions alors que l'objet est affiché en deux dimensions sur un écran. Il faut alors jouer sur la perspective, le flou de profondeur, les occlusions, les jeux de lumières et d'ombres, les gradients de texture¹¹ et une éventuelle parallaxe de mouvement.
- **L'image virtuelle** : naît de la vision en trois dimensions d'un objet. En réalité virtuelle la vision en profondeur et en relief est obtenue par différents procédés de vision stéréoscopique¹². Les propriétés exploitées seront l'accommodation-convergence [HGAB08], la disparité binoculaire et la stéréopsie [BHB99].
- **L'environnement virtuel** : est atteint avec l'impression que l'environnement virtuel nous entoure. Où que l'utilisateur regarde il ne verra que l'environnement virtuel. De plus, la restitution visuelle s'adapte aux déplacements de l'utilisateur et aux changements d'orientation de sa tête. Cela se traduira par le maintien d'une vision orthostéréoscopique et la gestion des changements de parallaxe. La détection de ces mouvements requiert un outil de suivi.

Ces trois niveaux définissent un continuum de virtualisation, plus le niveau est élevé plus l'objet virtuel aura les caractéristiques de l'objet réel jusqu'à devenir indistinguishable du réel. Ces principes définis par Ellis en 1991 sont toujours d'actualité.

Il est possible d'identifier un certain nombre de critères dont dépend la qualité de

¹⁰Les mouvements pseudoscopiques apparaissent lorsque l'utilisateur est mobile et regarde des images stéréoscopiques. Ceci se traduit par des distorsions des proportions dans la scène virtuelle et les objets semblent se déplacer de façon non naturelle.

¹¹Type de perspective où la texture d'un objet nous paraît moins détaillée à mesure qu'il s'éloigne.

¹²Procédé permettant de restituer une impression de relief à partir du fusionnement de deux images planes représentant un même sujet mais depuis deux points de vue légèrement décalés du fait de l'écartement naturel des yeux.

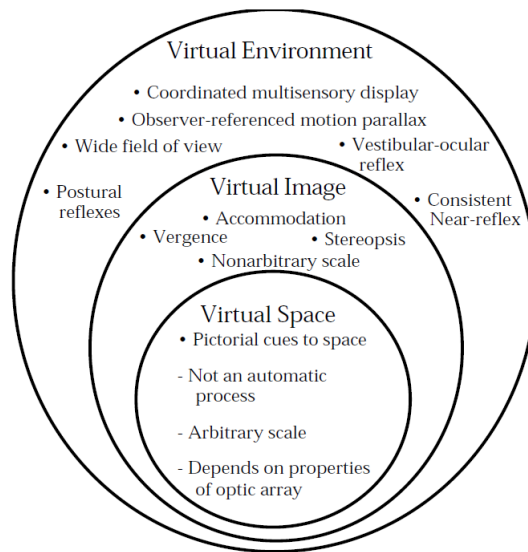


FIG. 22: Les trois niveaux de virtualisation de Ellis définissent un continuum de virtualisation. *Source : [Ell91]*

l'immersion. Les paramètres du dispositif de restitution tels que la taille du champ de vision [BH96], le taux de rafraîchissement (le minimum serait de l'ordre de 15Hz [BH95] mais pour le confort de l'utilisateur il est préférable de monter à au moins 25Hz), la qualité de l'image (résolution [Sno98], clarté et contraste), le temps de latence entre une action de l'utilisateur et le retour visuel [MRWB03] influent sur la qualité de l'immersion.

Proposer un environnement graphiquement réaliste influe aussi sur le niveau d'immersion. Pour cela il est possible de travailler sur les effets de lumière et d'ombres portées dépendantes de la position de l'utilisateur [SKMY09], le réalisme des formes et des textures, le réalisme de l'apparence des avatars, mais aussi de simuler la perception visuelle associée à un déplacement piéton [TLHW09] (des oscillations de caméra simulent les déplacements des yeux lors de la marche).

Enfin, pour que l'utilisateur retrouve ses sensations habituelles et puisse plus facilement accepter son environnement virtuel comme un monde à part entière, il lui est très souvent proposé une vision stéréoscopique [IRF⁺01]. Celle-ci peut se faire avec des lunettes passives : il faut alors séparer les deux images projetées en disposant des filtres polarisants (la polarisation est orthogonale entre les deux filtres) devant les deux vidéoprojecteurs. L'écran doit conserver cette polarisation et l'utilisateur porte des lunettes elles aussi polarisées. L'avantage de ce système est qu'il n'est pas cher, néanmoins il souffre de plusieurs inconvénients : il y a une perte de luminosité due à l'utilisation des filtres polarisant et si la séparation n'est pas parfaite il est possible de distinguer les deux vues en même temps sur un même œil.

Il est aussi possible d'employer des lunettes actives à obturateurs. Les obturateurs et le vidéoprojecteur sont synchronisés par infrarouge pour proposer alternativement et très rapidement les deux points de vue légèrement décalés de la même scène à chaque œil. Ce procédé très efficace évite les pertes de luminosité mais est aussi très coûteux que

ce soit pour le vidéoprojecteur ou pour les lunettes. Il existe aussi les visiocasques qui permettent de lier directement un œil à un point de vue. Et enfin, citons les solutions autostéréoscopiques qui dispensent l'utilisateur de porter un équipement, les deux vues différentes sont envoyées directement aux deux yeux grâce à un réseau de lentilles.

Pour le cas où l'utilisateur porte un visiocasque, si celui-ci baisse la tête il doit pouvoir voir son buste et ses jambes virtuels. Ceux-ci seront soit à l'image de son avatar soit à sa propre image [PLBR09].

Il nous reste à préciser que l'inconvénient commun [TAI07] aux systèmes de vision stéréoscopique est que ceux-ci, du fait principalement des problèmes d'accommodation-convergence [HGAB08], peuvent provoquer des fatigues visuelles pouvant entraîner maux de tête et malaises [SCMW08].

L'immersion visuelle est considérée comme étant le premier facteur en direction de la présence. Il est en tout cas celui qui suscite la recherche la plus abondante et c'est vers ce domaine que se dirigent les premiers efforts des concepteurs d'expérience en réalité virtuelle. Toutefois, il ne faudrait pas considérer qu'il existe une relation directe et quasi exclusive entre le niveau d'immersion et le niveau de présence ressentie. L'étude menée par Banos et al [BBA⁺04] évalue les variations de présence ressentie en fonction des interfaces visuelles employées et du niveau d'émotions portées par l'environnement. Les résultats indiquent que le niveau de présence varie simultanément en fonction de ces deux facteurs.

Compléments pour l'ouïe

De même que pour l'image il est possible de suivre les trois niveaux de virtualisation définis par Ellis [Ell91] :

- **L'espace virtuel** : apparaît lorsque l'auditeur a l'impression de percevoir un espace sonore car les sons présentent des propriétés de profondeur alors qu'ils sont restitués sur des enceintes ou par un casque sans exploiter de technique de spatialisation particulière. Cela est possible en ayant enregistré des sons spatialisés au préalable ou en appliquant des filtres pour simuler un éloignement, un effet Doppler ou donner une impression d'espace et de volume grâce à des effets de réverbération [LV07].
- **La source sonore virtuelle** : naît de l'impression de percevoir la position en trois dimensions d'une source sonore. Cela est possible par l'utilisation de technique de spatialisation sonore telle que, pour une restitution par enceintes, la stéréophonie, les VBAP, l'ambisonique ou les WFS. Une restitution par casque exploite les HRTF. Nous ne rentrons pas dans les détails sur ces différentes méthodes maintenant car elles sont explicitées dans une partie dédiée (partie 11 page 109).
- **L'environnement virtuel** : est atteint avec l'impression que l'environnement virtuel entoure l'auditeur. Celui-ci entend des sources sonores provenant de toutes les directions possibles autour de lui. De plus, la restitution sonore s'adapte aux déplacements de l'utilisateur et aux changements d'orientation de sa tête. La détection de ces mouvements requiert un outil de suivi.

Là encore, plus le niveau atteint est élevé plus l'espace sonore virtuel est indistinguable d'un espace sonore réel. En plus des critères précédemment cités, la qualité de l'immersion dépend du système de restitution sonore employé. Une restitution par enceintes peut être améliorée via différentes méthodes relatives à la zone d'écoute optimale (appelée "sweet

spot" anglais). Celle-ci peut être mobile [AS09] ou plus large [RA01]. Pour une restitution au casque des HRTF personnelles [ZHDD03] seront utilisées plutôt que des génériques [GM94]. Une immersion sonore de qualité permet une localisation précise [GLT07] des sources sonores dans l'espace et calcule une réverbération dépendant réellement de la configuration de l'espace [TFNC01] plutôt qu'une réverbération artificielle [Jot97]. Celle-ci peut également tenir compte des détails de la scène [TDL07].

Le rôle du sonore dans l'immersion et plus généralement pour la réalité virtuelle et la présence sera détaillé dans un chapitre dédié (chapitre 10 page 105).

Compléments pour l'haptique

La stimulation haptique est parfois réduite au sens du toucher (le mot haptique provient du grec *haptomai* qui signifie *je touche*). Pourtant, elle englobe un grand nombre de propriétés supplémentaires. Les interfaces haptiques regroupent les deux familles d'interfaces suivantes : les interfaces tactiles et les interfaces à retour d'effort appelées aussi interfaces kinesthésiques (voir figure 23 pour un exemple d'interface à retour d'effort). Les premières permettent de ressentir si une pression est exercée mais aussi la texture d'un objet, son volume, sa densité ou sa température (voir figure 24 pour un exemple d'interface tactile). Les deuxièmes apportent des informations sur les mouvements du corps mais aussi les forces exercées sur lui comme le poids ou la force du vent (dans ce cas l'interface sera un ventilateur [MK04]).

L'haptique apporte un supplément de tangibilité et donc de réalité. Non seulement via le retour d'effort qui évite de traverser les objets, mais aussi par toutes les informations tactiles apportées qui ainsi donnent plus de corps aux objets. L'intérêt pour l'immersion et la présence est donc immédiat [HGR⁺96]. De surcroît, la définition de la présence donnée par Lombard et Ditton [LD97], à savoir *l'illusion perceptive de non médiation*, prend ici un sens particulièrement criant. En effet, bien que par ce supplément de tangibilité elles apportent un plus indéniable pour l'immersion et par extension pour la présence, ces interfaces souffrent souvent d'un encombrement et d'un poids qui vont à l'encontre de la nécessaire propriété de transparence. Elles sont donc difficiles à oublier et l'illusion de non médiation en est compromise. Pour pouvoir être qualifiée de transparentes ces interfaces doivent répondre aux conditions suivantes :

- ne pas entraver les déplacements de l'utilisateur que ce soit par leur encombrement, leur poids ou leur position nécessairement statique ;
- le poids des systèmes ne doit pas induire une inertie qui pénalise les mouvements de l'utilisateur ;
- la stimulation doit se faire de façon fluide c'est-à-dire sans "à-coup" et sans forcer ;
- le retour d'effort doit être suffisamment puissant pour offrir une résistance forte (si l'objet est dur) et d'une grande réactivité à la pression de l'utilisateur (passage d'une zone vide puis contact avec l'objet).

De fait, dans une optique de présence il faut trouver un équilibre entre le gain obtenu en immersion et la nature intrusive de ces interfaces qui constituent un lien avec l'environnement physique. Enfin, citons un autre défi à relever en plus de l'encombrement et du poids : le prix. Ces interfaces sont très coûteuses ce qui limite leurs diffusions pour des salles de réalité virtuelle bénéficiant de moyens limités.



FIG. 23: Interface à retour d'effort, le bras Phantom. *Source : <http://www.sensable.com>*



FIG. 24: Touchable Holography, une interface haptique sans contact. Des ultrasons sont émis et génèrent un champ de pression, l'utilisateur ressent sur sa main les gouttes de pluie qui tombent. *Source : [HTNS09]*

Compléments pour l'odorat

Première différence avec les sens précédents, l'odorat (tout comme le goût) n'est pas stimulé physiquement mais chimiquement. Cette première caractéristique explique en grande partie le retard pris pour la stimulation de ce sens. En effet, la conception de molécules odorantes est très complexe car non composable à partir d'odeurs primaires. Buck et Axel [BA91] ont identifié 100 récepteurs d'odeurs différents chez l'homme. Il faut donc que soit stocké dans l'interface olfactive, l'ensemble des odeurs nécessaires à l'expérience. Deuxième défi à relever, il faut pouvoir apporter via l'air, les molécules odorantes jusqu'au nez de l'utilisateur. Yanagida et al [YKN⁺04] proposent un dispositif composé d'un outil de suivi de nez et d'un canon à odeur. Le dernier défi consiste à pouvoir passer rapidement d'une scène odorante à une autre puis à une troisième sans odeur.

Enfin, notons que l'odorat a un pouvoir de projection particulièrement efficace. Une odeur de pain au chocolat sortant du four est capable de transporter une personne dans une boulangerie virtuelle beaucoup plus efficacement que toute représentation photoréaliste.

Compléments pour le goût

La stimulation du goût est non seulement chimique mais aussi multisensorielle. La perception d'un goût dépend aussi de la texture et de la densité d'un aliment. Ces propriétés haptiques sont détectables par la mastication. La perception est aussi olfactive car très liée à l'odorat. Elle est visuelle car la perception visuelle d'un aliment influe sur le goût perçu. Enfin, elle est sonore car le bruit de la mastication a aussi une influence [ZS04].

Si l'on ajoute à ces différentes contraintes, les problèmes inhérents au fait d'avoir une

interface dans la bouche (inconfort, hygiène) on comprend aisément que les interfaces gustatives ne sont pas légion. Nous pouvons néanmoins citer le *Food simulator* [IYUM04].

Compléments pour la proprioception

La proprioception permet de connaître en permanence la position relative des différentes parties de notre corps sans avoir besoin d'informations visuelles [She06]. Elle permet de construire un modèle mental associé à la disposition des différents segments de notre corps. Son statut de sens incite à positionner la proprioception dans la partie dédiée à l'immersion. Pourtant, elle doit être traitée à part car contrairement aux autres sens elle ne peut être stimulée directement.

Le lecteur de ce document pourrait objecter que le sens proprioceptif ne peut être pris en compte pour la description de l'environnement virtuel, qui rappelons-le est le rôle de l'immersion. Et pourtant, rappelons la définition de l'immersion donnée par Slater et Wilbur [SW97] : *Dans quelle mesure les systèmes de restitution sont capables de délivrer une illusion de la réalité aux sens de l'utilisateur...* De fait, cette illusion de la réalité sera plus prégnante si les sensations proprioceptives sont en accord avec les stimuli reçus par les autres sens. Si visuellement l'utilisateur a l'impression de tourner sur lui-même, pour changer son point de vue par exemple, il est préférable qu'il le ressente aussi proprioceptivement.

Ainsi, il est considéré comme très important pour la présence que les schémas d'interaction permettent une correspondance entre les sensations proprioceptives du soi virtuel et les sensations proprioceptives du soi réel [SU94]. Par exemple, si l'utilisateur (ou son avatar) marche dans l'environnement virtuel, il est préférable que l'utilisateur ressente des sensations proprioceptives correspondant à celles d'une marche réelle. Si cela est souvent difficile à mettre en œuvre pour la marche, il est plus facile d'assurer cette correspondance pour des actions plus simples comme le déplacement d'un objet virtuel par exemple. Si celui-ci est effectué par un déplacement réel du bras de l'utilisateur alors le retour proprioceptif est valide, par contre, il ne le sera pas si le déplacement est obtenu en appuyant sur les touches d'un clavier. En cela le sens proprioceptif fait le lien parfaitement avec la section suivante dédiée à l'interaction.

Le déplacement par la marche est l'exemple typique d'interaction où le manque de retour proprioceptif est criant. Pour répondre à ce manque plusieurs types d'interfaces ont été proposés : le Cyberwalk [STU07] consiste en un tapis roulant en deux dimensions sur lequel l'utilisateur peut marcher tout en faisant du surplace (voir figure 25 pour une illustration). Malheureusement ce système est très encombrant et nécessite un temps d'adaptation. La Virtusphere [LL06] reprend le concept de la roue de hamster : l'utilisateur porte un visiocasque et marche à l'intérieur d'une roue qui tourne sur des roulettes (voir figure 26 pour une illustration). Enfin l'Université de Tsukuba propose deux dispositifs. Le CirculaFloor [IYFN05] exploite quatre dalles mobiles qui viennent alternativement se disposer sous les pieds de l'utilisateur lorsque celui-ci marche. Ceci permet de le maintenir sur une position fixe (voir figure 27 pour une illustration). Les Powered Shoes [IYT06] sont des chaussures sous lesquelles sont disposées des roulettes motorisées tournant dans le sens inverse de la direction de déplacement de l'utilisateur, celui-ci fait donc du surplace.



FIG. 25: Une interface pour la marche, le Cyber-walk. *Source* : [STU07]



FIG. 26: Une interface pour la marche, la Virtusphere. *Source* : [LL06]



FIG. 27: Une interface pour la marche, le Circula-Floor. *Source* : [IYFN05]

Toutes ces solutions astucieuses souffrent soit d'un encombrement important et/ou d'un nécessaire temps d'adaptation. Nous verrons dans la section 7.4.4 relative à la multimodalité que des méthodes existent pour donner une impression de déplacement sans toutefois assurer un retour proprioceptif.

7.1.2 Interaction

L'interaction est le deuxième intervenant dans la famille des facteurs ayant trait aux caractéristiques du dispositif de réalité virtuelle. Cette dernière est parfois présentée comme la condition sine qua non pour différencier la réalité virtuelle des autres médias. Offrir la possibilité à l'utilisateur de modifier la forme mais aussi d'intervenir sur le contenu de l'expérience permet à l'utilisateur de ne pas être qu'un simple spectateur de l'expérience mais de pouvoir en être aussi l'acteur. Sheridan [She92] présente la possibilité de modifier l'environnement comme le facteur principal de la présence.

Les différentes tâches d'interaction

Des recherches successives [Min95, Han97, Bow99] ont abouti à la classification des actions possibles en réalité virtuelle suivante :

- la navigation : constitue la possibilité offerte à l'utilisateur de déplacer son point de vue à l'intérieur de l'environnement virtuel, les changements d'orientation de sa tête devront être pris en compte ;
- la sélection : correspond à la désignation d'un objet ou d'une commande ;
- la manipulation : permet de modifier les propriétés d'un objet de manière directe ou indirecte (une représentation symbolique est alors nécessaire) ;
- le contrôle du système : lorsque l'on modifie les propriétés internes du système.

Conditions de succès de l'interaction

En dehors du fait que l'interaction soit efficace pour la tâche qui lui est dédiée, plusieurs facteurs permettent d'évaluer la qualité de l'interaction et le degré d'interactivité de l'expérience.

Notons d'ores et déjà que la qualité de l'interaction peut dépendre de facteurs externes à celle-ci. Ainsi, de la qualité de l'immersion dépend la bonne compréhension de l'environnement [TGSP06]. Cette compréhension facilite la navigation, il est en effet plus facile de trouver son chemin dans un environnement que l'on comprend bien [BKH98]. Il en est de même pour la sélection et la manipulation, elles pourront en être plus ou moins précises ou aisées.

Le degré d'interactivité de l'environnement dépend de plusieurs fonctionnalités. En tout premier lieu la variété des modalités d'interaction [LD97] : mains, voix, suivi de la tête et du regard, mouvements du corps, outils d'interaction dédiés ou expressions du visage. La plage de liberté doit être grande : pouvoir se déplacer dans toutes les directions et à différentes vitesses, pouvoir modifier l'environnement mais aussi influencer sur le cours des événements. Le temps de latence entre une action de l'utilisateur et la réponse du système est un critère important [BBB98]. Si le temps de latence entre les actions de l'utilisateur et les réponses sensorielles reçues en provenance de l'environnement est trop important alors la réalisation de certaines tâches [BCL⁺04] en sera plus compliquée.

Si l'on se réfère au concept *d'illusion de non médiation* énoncé par Lombard et Ditton [LD97], on comprend qu'il faut d'une part que les outils d'interaction soient les plus transparents possibles jusqu'à pouvoir être oubliés au cours de l'expérience. Et d'autre part il faut que les schémas d'interactions ainsi que la manipulation des éventuelles interfaces soient ergonomiques, facilement compréhensibles et faciles d'usage.

Si le schéma d'interaction requiert une période d'apprentissage alors il est préférable que celle-ci soit courte car durant cette période, l'attention de l'utilisateur est focalisée sur l'outil ou la démarche et non sur le reste de l'expérience. Les capacités cognitives de l'utilisateur ne doivent pas être mobilisées par la manipulation car sinon il ne pourrait appréhender le reste de l'expérience. Idéalement, il faut donc que la manipulation de l'outil d'interaction devienne aussi naturelle que peut l'être la manipulation de l'archet pour le violoniste. L'archet devient le prolongement de la main lui permettant de transmettre ses intentions.

Une méthode sensée pouvoir satisfaire toutes ces conditions de succès est l'interaction directe couplée à des schémas d'interaction naturels. Une interaction directe n'exploite pas d'autres interfaces que le corps de l'utilisateur [SU94, RMFS08]. Dans une optique d'illusion de non médiation, l'interaction directe doit idéalement, pouvoir se faire sans marqueur [AMR⁺07]. Des schémas d'interaction naturels sont similaires à ceux employés dans l'environnement physique. Ils correspondent donc aux capacités sensorimotrices de l'utilisateur et par voie de conséquence il y a une correspondance parfaite entre les schémas d'interaction et les sensations proprioceptives de l'utilisateur. Il s'agit par exemple de déplacer un objet avec la main plutôt qu'avec une souris ou les touches du clavier.

De fait, l'interaction n'est alors plus une source de perturbations et l'utilisateur peut se focaliser pleinement sur l'expérience. Les gains pour la présence sont donc multiples : retour proprioceptif, illusion de non médiation, focalisation de l'attention sur l'expérience.

Ces différents aspects ajoutés au supplément de ludisme inhérent à cette méthode, n'auront pas échappé aux éditeurs de consoles de jeux. La console Wii [Nin05] de Nintendo avait déjà fait un grand pas dans cette direction mais le projet Natal [Mic09] de Microsoft semble être une mini-révolution puisque offrant un suivi de mouvements sans marqueur grâce un dispositif composé d'une caméra classique et d'une caméra infra-rouge.

Bénéfices attendus de l'interaction

Nous ne traitons pas dans cette partie du bénéfice conséquence directe de la tâche d'interaction mais des bénéfices espérés dans une optique de présence.

Pouvoir agir dans l'environnement plutôt qu'observer passivement est un facteur important pour l'émergence du sentiment de présence [WBL⁺96]. La capacité d'agir permet de maintenir l'attention des utilisateurs sur l'expérience [LD97]. Or, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, que l'attention de l'utilisateur soit focalisée sur l'expérience est une condition importante sur le chemin de la présence. De plus, pouvoir modifier l'environnement induit non seulement que lui est *bien là* (joue sur la présence de l'environnement) mais aussi que l'utilisateur *est là* puisqu'il peut le modifier.

Si le schéma d'interaction permet un retour proprioceptif adéquat alors l'utilisateur s'identifie plus facilement à son corps virtuel [SSMM98]. Ceci constitue un pas très important pour la présence de soi et pour la présence d'action.

L'étude de Schubert et al [SFR99b] identifie l'*exploration* comme un des facteurs de la présence. La capacité de voir l'environnement et les objets qui le composent sous différents angles influe sur la présence spatiale. Dans cette même étude la *prédictabilité* (ce même facteur est appelé *anticipation* dans [WS98]) est aussi identifiée comme un facteur pour la présence spatiale. Ce facteur de prédictabilité signifie que le résultat d'une action sur l'environnement est conforme à celui escompté. Il nous semble retrouver dans ce facteur de *prédictabilité* l'esprit de la définition de la présence proposée par Zahoric et Jenison [ZJ98]. S'inscrivant dans l'approche écologique définie section 5.1.3, ils considèrent que *la présence est équivalente à entreprendre avec succès des actions dans l'environnement*. Le critère de succès est défini par les auteurs comme le fait que les réponses de l'environnement aux actions de l'utilisateur correspondent aux réponses auxquelles l'utilisateur est habitué dans le monde réel. Rappelons que selon l'approche écologique [Gib86], plus que l'apparence de l'environnement et sa restitution aux sens de l'utilisateur, ce sont les fonctionnalités offertes (les affordances) par l'environnement qui influent sur la présence [FH98].

7.2 Le fond : le contenu de l'expérience

Dans la section précédente nous avons abordé les aspects technologiques exploités en réalité virtuelle pour tendre vers la présence. Nous traitons maintenant du contenu de l'application proposée à l'utilisateur. Dans la littérature, le contenu de l'expérience regroupe indifféremment les objets, acteurs ou évènements constituant l'environnement. Cela regroupe donc tout ce qui donne du sens et un intérêt à l'application.

Nous pensons pertinent de diviser cet ensemble en deux sous familles : le contenu

neutre et le contenu esthétique. Le contenu neutre se charge de donner une représentation descriptive et réaliste de l'environnement. Le contenu esthétique regroupe l'ensemble des éléments n'étant pas dédiés à la simple description de l'environnement mais plutôt à susciter des émotions pour, par exemple, augmenter l'intérêt de l'expérience.

Cette distinction nous permet de regrouper l'immersion et le contenu de niveau neutre dans une catégorie ayant une finalité que nous qualifions de diégétique ¹³. Cette finalité nous semble être en accord avec l'approche technologique présentée section 5.1.1. Le niveau esthétique a lui une finalité extradiégétique ¹⁴ qui nous semble correspondre à l'approche psychologique présentée section 5.1.2.

Ainsi, dans le niveau neutre nous englobons l'ensemble des méthodes qui visent à proposer un environnement réaliste aux sens. Cela regroupe par exemple les algorithmes de photoréalisme (calculs des reflets, des ombres, visages réalistes des avatars [VGS⁺06a] etc.). Ici, le but n'est pas de provoquer une émotion particulière chez l'utilisateur mais de faire une description réaliste de l'environnement.

Au niveau esthétique nous associons l'ensemble des méthodes ou subterfuges employés par les concepteurs pour susciter des émotions en vue par exemple de créer et maintenir l'intérêt de l'utilisateur sur l'expérience. Prenons quelques exemples. Le calcul d'ombre en synthèse d'images : si celui-ci est le fruit du calcul des échanges de lumière entre les différentes facettes composant la scène, alors nous le rangeons dans le niveau neutre. Par contre, si les ombres ont été ajoutées indépendamment de toute réalité physique dans le but de créer une ambiance, alors ces ombres se situent au niveau esthétique. Une musique rajoutée pour créer une ambiance se situe aussi au niveau esthétique.

Des émotions peuvent aussi être suscitées par l'intermédiaire des avatars rencontrés dans l'environnement. Pan et al [PGS08] proposent de faire rougir le visage d'un avatar pour exprimer la gêne et l'excuse en vue de susciter la patience et l'empathie d'utilisateurs. La posture de l'avatar peut aussi communiquer des émotions [VSS08]. Vinayagamoorthy et al [VGS⁺06b] proposent un état de l'art complet sur la conception d'avatars expressifs. Enfin, ce niveau englobe aussi tout ce qui peut être apporté pour développer un sentiment d'identification ou d'empathie dans l'expérience. Dans cette optique le storytelling est une des solutions employables. L'étude menée par Schneider et al [FAMD04] montre qu'agrémenter un jeu vidéo d'une histoire permet d'augmenter le sentiment d'identification du joueur. Ladeira et al [LN07] proposent d'appliquer les méthodes des conteurs à la réalité virtuelle. Un des principes avancés serait que le système de réalité virtuelle puisse détecter le niveau d'attention de l'utilisateur pour en cas de baisse d'attention, déclencher certains événements pour la réactiver.

7.3 Les caractéristiques de l'utilisateur

La perception et le déroulement de l'expérience ainsi que la présence ressentie dépendent également des caractéristiques de l'utilisateur [KDU02]. Celles-ci font référence

¹³Au cinéma, un son faisant partie de l'action et pouvant être entendu par les personnages du film est qualifié de diégétique.

¹⁴Au cinéma, un son ne faisant pas partie de l'action comme une musique d'ambiance est qualifié d'extradiégétique.

aux capacités cognitives, motrices ou sensorielles, à l'âge et au sexe, aux expériences préalables avec les environnements médiatisés [FAPI99] et aux schémas sous-jacents à la perception de l'environnement [MRB05]. Mais aussi à différents traits de caractères de l'utilisateur : degré d'empathie, capacité d'attention et d'absorption. Les attentes de l'utilisateur ont aussi un impact sur la réussite de l'expérience, il est préférable que celles-ci soient satisfaites pour que l'utilisateur juge positivement l'expérience.

Une expérience préalable dans les environnements médiatisés peut être un avantage si par exemple elle permet une compréhension plus aisée des outils et schémas d'interaction. Les capacités de concentration sont alors entièrement dédiées au reste de l'expérience. En contre-partie, les expériences préalables peuvent générer un phénomène d'habituation qui pourra se traduire par une baisse d'excitation et d'intérêt. A contrario, un utilisateur *neuf* et enthousiaste peut très facilement et pour des expériences même simples ressentir un sentiment de présence d'une belle intensité.

Sas et O'Hare [SO03] montrent qu'une personne qui est imaginative, qui a une grande facilité à se transposer dans des situations fictionnelles, qui a des capacités d'absorption, qui est de nature empathique et qui est sensible aux mondes virtuels ressent plus de présence.

Une étude récente de Thornson et al [TGL09] identifie six caractéristiques qui permettent de ressentir la présence avec plus de facilités : la capacité à s'impliquer dans certaines tâches qui requièrent des décisions ou des jugements, le sens de l'orientation (connaître la configuration et l'orientation de son corps dans l'environnement), l'introversion (le fait de préférer les activités en solitaire), la capacité à être absorbé dans des situations passives comme la lecture, la capacité à construire des modèles mentaux (représentation mentale d'un fait réel) et enfin avoir une tendance naturelle à l'empathie.

La capacité d'imagination chère à l'approche psychologique (présentée section 5.1.2) est souvent perçue comme une qualité très importante. En effet, de cette capacité découle en partie la faculté que possède l'homme de se projeter psychologiquement dans un autre environnement. Notons que l'imagination semble toutefois ne pas être un facteur suffisamment important puisque d'après les résultats de l'étude [BBG⁺05] comparant la présence perçue dans un environnement virtuel et dans un environnement imaginé, la présence perçue était plus forte dans l'environnement virtuel.

7.4 Framework dédié à la conception d'applications en réalité virtuelle

Dans cette section nous définissons un framework présenté à la conférence Presence 2008 [Bou08] dédié à la conception d'application en réalité virtuelle. L'élaboration de ce framework s'appuie sur la base théorique présentée aux chapitres précédents. Une fois identifiés les besoins et objectifs de l'application ainsi que l'utilisateur type (on tiendra compte de ses caractéristiques et plus particulièrement de ses capacités motrices et intellectuelles), le concepteur peut suivre le framework pour définir les services et fonctionnalités qu'il souhaite offrir. En fonction des objectifs, des contraintes et des compétences présentes il peut s'appuyer sur une combinaison optimale de facteurs.

Rappelons que la finalité de ce framework est de proposer une expérience suffisamment crédible à l'utilisateur afin que celui-ci accepte de se prendre au jeu pour qu'en retour il puisse ressentir un sentiment de présence. Le concepteur peut donc s'appuyer sur un socle de connaissances sur la cognition humaine puis sur quatre piliers nommés immersion, interaction, boucle sensori-motrice et émotions (voir figure 28 pour une illustration). Les piliers immersion, interaction et émotions ont déjà été détaillés dans la section précédente et ce qui a été présenté précédemment est toujours valable. Toutefois, nous introduirons en plus un certain nombre de considérations plus originales.

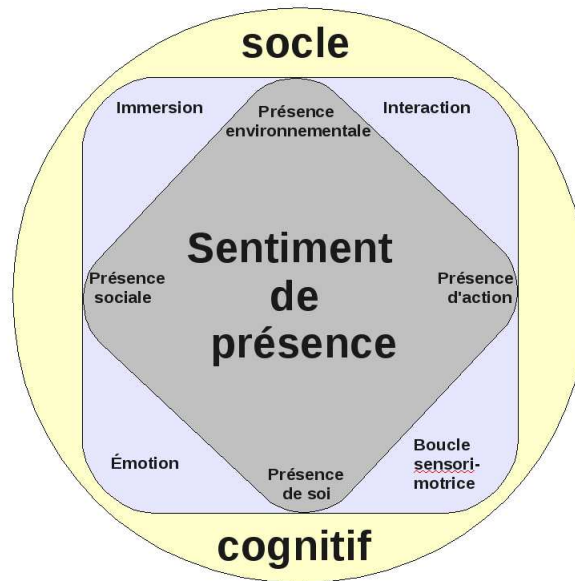


FIG. 28: Notre framework pour la conception d'applications en réalité virtuelle. Les quatre piliers peuvent s'appuyer sur un socle de connaissances sur la cognition humaine

7.4.1 Le socle cognitif

Nous avons déjà insisté sur la place centrale que doit avoir l'utilisateur dans la conception d'un système de réalité virtuelle. Nous considérons la connaissance de la cognition humaine comme primordiale pour élaborer de nouveaux paradigmes d'interaction et d'immersion ou tout simplement pour optimiser les algorithmes et méthodes.

Par cognition humaine nous entendons l'ensemble des connaissances pouvant répondre à l'échantillon de questions suivant : comment l'homme perçoit son environnement ? par couches successives ? dans sa globalité ? par les affordances ? par points clés symboliques ? Comment perçoit-il les autres ? Le rôle des émotions ? Mais aussi ses capacités de raisonnement, d'extraction de l'information, de mémorisation etc.

Un exemple d'application réussie des connaissances sur la vision humaine [Fer01] se retrouve en synthèse d'images dans la famille des algorithmes de rendu perceptif (perceptual rendering en anglais) [OHM⁺04]. Les résultats des études sur les seuils de la perception

humaine ont débouché sur un grand nombre d'optimisations exploitées dans les formats de compression audio (MP3) ou vidéo (MPEG4).

Les études sur la perception de l'environnement sont généralement axées sur un unique sens. Ce n'est que récemment que les chercheurs en psychologie et neuroscience étudient la perception par l'intégration multisensorielle [CSS04]. Il en ressort que l'homme perçoit son environnement via tous ses sens en même temps et synthétise toutes ces multiples perceptions en une information unique. Si une augmentation de qualité sur un rendu monosensoriel (visuel par exemple) est perceptible lorsqu'un seul sens est stimulé, ce n'est alors peut-être pas le cas dans le cadre d'un rendu multisensoriel : les capacités perceptives et l'attention de l'utilisateur étant alors partagées entre plusieurs sens et non plus dédiées à un seul. Grelaud et al [GBW⁺09] tirent partie de connaissances récentes sur la perception multimodale des matériaux [BSVDD09] pour proposer une méthode efficace permettant de rendre graphiquement et de façon sonore les impacts entre des objets.

L'intégration de stimuli obtenus via des sens distincts peut aboutir à des illusions multimodales ou à des effets plus ou moins surprenants. On peut citer comme exemple pour le visuel et le sonore l'effet ventriloque [AB04]¹⁵ et l'effet McGurk [MM76]¹⁶. Mais aussi le goût et l'audition : [ZS04] montre que la sensation de croquant et de fraîcheur d'une chips peut être améliorée en modifiant le bruit du craquement de la chips entre les dents. Les études sur l'intégration vision-toucher sont à la base des interfaces pseudo-haptiques [LCK⁺00]. Celles-ci permettent de simuler des sensations haptiques mais sans interfaces haptiques dédiées. D'autres exemples d'exploitations réussies des connaissances sur la cognition humaine seront présentées dans la section 7.4.4 dédiée au pilier traitant de la multimodalité.

Nous verrons dans le chapitre 13 (page 141) dédié au calcul de la réverbération sonore, comment nous exploitons les connaissances sur la perception sonore humaine pour proposer un nouvel algorithme.

7.4.2 Immersion

Nous rappelons que l'immersion se définit par la stimulation des sens de l'utilisateur dans le but de générer les sensations qui permettent, parfois grâce à une illusion (on cherche à leurrer les sens de l'utilisateur), la perception de l'environnement virtuel. De cette perception doit résulter une bonne compréhension de l'environnement virtuel puis son appropriation. De cette bonne compréhension dépend la perception des affordances de l'environnement. Nous avons déjà écrit que l'immersion s'inscrit dans une finalité diégétique et reprenons l'ensemble des considérations présentées dans la section immersion précédente (section 7.1.1). Nous englobons également dans ce pilier le contenu de l'expérience de niveau neutre (voir section 7.2 traitant du contenu de l'application). En effet, nous considérons que la description de niveau neutre de l'environnement concourt à la perception diégétique de l'environnement virtuel.

¹⁵Cet effet intervient lors de stimulation auditive et visuelle, la stimulation visuelle domine et semble capturer le son. L'origine spatiale du son semble alors coïncider avec celle du stimuli visuel.

¹⁶Cet effet suggère que la perception de la parole est multimodale. La syllabe "da" est perçue lorsque l'on visionne une vidéo où la syllabe "ga" est articulée mais que la syllabe "ba" est diffusée par la bande son.

De surcroît, nous pensons que l'immersion doit être bidirectionnelle. Si l'immersion consiste à plonger l'utilisateur dans l'environnement virtuel alors sa simple présence doit avoir des conséquences sur cet environnement. Rendre ces conséquences doit augmenter la crédibilité de l'expérience. Voici une liste de propositions allant dans ce sens : extraire la silhouette réelle de l'utilisateur pour insérer son reflet dans l'environnement (dans un miroir [PLBR09] ou dans l'eau) ou calculer des ombres correspondant à sa stature. On pourra aussi, si la nature du sol virtuel le permet, laisser des traces de pas, ou pouvoir tester l'écho d'une pièce avec sa propre voix ou entendre le bruit de ses pas sur le sol. De plus il nous semble que ceci peut réduire l'aspect statique et immuable de l'environnement.

Lors de notre phase d'évaluation présentée chapitre 15 (page 169) nous avons notamment constaté que la présence environnementale ressentie par les participants de l'étude, est faible par rapport à la présence globale et aux autres composantes de la présence (voir section 15.3.7 page 183). Pourtant, le jeu vidéo qui sert de support à l'expérimentation propose une vision stéréoscopique, l'environnement est en trois dimensions et les participants ont la possibilité de se déplacer librement dans le monde virtuel. Nous pensons que la raison de ce déficit est que l'immersion repose dans le cas présent, uniquement sur une représentation visuelle. Il est très probable qu'avec une stimulation sonore rendant les bruits des explosions et du moteur et en proposant comme outil d'interaction, un volant ou une manette à retour d'effort, la présence spatiale aurait été meilleure. Ce résultat milite donc pour une immersion résolument multisensorielle.

7.4.3 Interaction

Dans la section 7.1.2 nous présentions les tenants et aboutissants de l'interaction. Nous avons mentionné la classification des actions possibles en réalité virtuelle suivante : navigation, sélection, manipulation et contrôle du système. Selon notre point de vue, il nous semble judicieux de différencier les interactions possibles avec l'environnement selon les deux seuls critères suivants : soit l'utilisateur veut acquérir de l'information (par exemple via une interface tactile) soit communiquer de l'information (en manipulant un objet ou en indiquant une direction).

Le pilier interaction reprend l'ensemble des notions présentées dans la section interaction précédente mais en plus nous souhaitons tenir compte des interactions avec les autres personnages (vivants ou non) que l'utilisateur peut rencontrer au cours de son expérience. Ce type d'interaction est en accord avec notre classification des actions possibles en réalité virtuelle que nous venons de définir. Cette interaction aura un impact direct sur la présence sociale et donc sur le sentiment de présence. Skalski et al [ST07] montrent que la présence sociale est augmentée si l'utilisateur est face à des agents capables d'interactivité plutôt que passifs.

Il est également important de réfléchir à d'autres canaux d'interaction que la main. Le suivi du regard [JK03] est une des possibilités. Toutefois, ce type d'interactivité requiert souvent que l'utilisateur porte un outil de suivi dédié (par exemple un casque avec caméra) ce qui risque de le gêner et donc de diminuer la présence. Certains visiocasques intègrent une mini-caméra pour suivre le regard de l'utilisateur. Notons que le regard est un facteur important pour la présence sociale. Échanger des regards est un point important pour la conscience de la présence de l'autre [SWM⁺08]. De plus, cela permet l'émergence

d'une communication non verbale qui représente un type d'échange très bénéfique lors de réunion virtuelle par exemple [GSV⁺03]. Le suivi du regard peut aussi servir comme outil d'optimisation du calcul de l'affichage d'une scène via un niveau de détail qui s'adapte à la direction du regard [MD01]. Enfin, il peut être utile pour ajouter du flou en fonction de là où se porte le regard de l'utilisateur, ceci permet d'inciter l'utilisateur à regarder une zone particulière de la scène ou de reposer ses yeux [PdSA05].

Notons que le développement d'interfaces énaactives [VTR92] c'est-à-dire qui exploitent les schémas d'interaction usuels de l'utilisateur semble très prometteur. Les interfaces énaactives ne sont ni symboliques ni iconiques et sont pensées pour être parfaitement intuitives puisqu'elles collent à la gestuelle naturelle de l'homme. Cela nécessite donc en amont un travail conséquent de reconnaissance et d'interprétation des gestes.

Conformément à notre modèle de la présence présenté dans le prochain chapitre (chapitre 8.2 page 87) nous considérons que les affordances que l'utilisateur perçoit dans l'environnement virtuel doivent être assumées (c'est-à-dire réalisables) par les interfaces et schémas d'interaction proposés par le dispositif de réalité virtuelle. Les affordances sont assumées si un schéma d'interaction direct permet de répondre aux affordances. Par exemple, si l'environnement offre (propose) à l'utilisateur de se déplacer par la marche il faut que le schéma d'interaction marche soit réalisable par l'utilisateur. C'est-à-dire que la navigation se fait réellement par la marche et non par l'utilisation d'un joystick par exemple. Interaction énaactive et affordances assumées sont les clés d'une interaction réussie conduisant à l'illusion de non médiation et à des sensations proprioceptives valides. On peut donc en conclure que lors de la conception d'une expérience en réalité virtuelle il est important de veiller à ce qu'un maximum d'affordances perçues soit assumées par les schémas d'interaction.

Enfin construire l'environnement autour d'un moteur physique chargé de gérer les interactions internes à l'environnement (entre les objets constituant l'environnement) mais aussi avec l'utilisateur pourrait apporter un supplément de crédibilité à l'expérience.

7.4.4 Cohérence de la boucle sensori-motrice et multimodalité

Ce pilier est multidimensionnel. La première dimension concerne le maintien du lien de causalité entre une action de l'utilisateur et sa perception des réponses du système. Cette dimension constitue donc un pont entre les deux premiers piliers. Il est clair que si ce lien de causalité est rompu, l'illusion de non médiation sera vaine et la crédibilité de l'expérience sera nulle. Il faut donc veiller à implanter des algorithmes fonctionnant en temps-réel et fournir des interfaces sensori-motrices dont les fréquences d'affichage ou de détection soient suffisamment rapides pour que l'utilisateur ne perçoive pas de latence.

Sa deuxième dimension cible la cohérence temporelle et spatiale entre les différentes modalités décrivant un même objet ou un même événement. Les recherches sur la perception multimodale nous montrent que les sens *se parlent entre eux* c'est-à-dire sont intégrés pour aboutir à une représentation mentale cohérente de l'environnement [EB04]. Selon Biocca et al [BIL⁺02] cette représentation mentale a un impact sur la présence. Par exemple, la perception de la texture d'une surface fait appel à des sensations haptiques, visuelles et auditives [LK04]. De même, déterminer quand deux objets s'entrechoquent est influencé par l'écoute d'un son simulant le contact [SSL97]. Si l'utilisateur peut toucher

un objet virtuel via une interface haptique, il faut que les stimuli visuels et sonores soient rendus de façon cohérente et synchrone. De la même façon, si un objet visuel et sonore est vu à un certain endroit de l'espace, il faut que la source sonore semble provenir du même endroit [NSVDW09]. Ce dernier point dépend donc aussi des capacités des interfaces à positionner une source sonore en tout point de l'espace.

Enfin, nous assimilons à la troisième dimension de ce pilier, tous les travaux liés à la perception multimodale mais qui ne correspondent pas à une description diégétique de l'environnement. Citons en guise d'exemples les illusions multimodales. Shams et al [SKS00] montrent qu'entendre des *bips* sonores peut donner l'illusion de voir des flashes. Plus intéressant pour la réalité virtuelle, les illusions multimodales peuvent aider à pallier une sensation qui fait souvent défaut dans les expériences et qui pourtant est très importante : la sensation de déplacement. Kapralos et al [KZJH04] et Valjamae et al [VLVK05] montrent comment une stimulation sonore adéquate peut donner l'illusion du mouvement à l'utilisateur. Toujours dans la même optique, Riecke et al [RFR08] proposent d'associer stimulations sonores et vibrations. Riecke et al [RVSP09] étudient l'impact des interactions sonores et visuelles pour la simulation de mouvements. Toutefois, notons que ces méthodes multimodales permettent de ressentir une impression de déplacement mais l'utilisateur n'aura pas de retour proprioceptif correspondant.

Toujours dans le troisième point de ce pilier, nous pouvons citer la suppléance perceptive ou substitution sensorielle [LGH⁺03]. Celle-ci consiste à remplacer une perception normalement dédiée à un sens par une perception sur un autre sens. Visell [Vis09] propose une revue récente dédiée à la suppléance de la perception haptique. Celle-ci est plus particulièrement utilisée lorsque une déficience sensorielle est présente chez un utilisateur.

Nous englobons également les travaux sur le pseudo-haptique qui consiste à simuler une sensation haptique mais sans employer d'interface haptique dédiée. Lécuyer et al [LCK⁺00] en sont les précurseurs et exploitent un retour visuel adapté aux actions de l'utilisateur. Les sensations pseudo-haptiques permettent de simuler des sensations haptiques comme le frottement, la raideur, la masse, la texture. Pusch et al [PMC09] proposent une méthode pour simuler la sensation d'une force s'appliquant sur la main de l'utilisateur. La représentation virtuelle de la main de l'utilisateur est visualisée dans un visiocasque, la main virtuelle est légèrement déplacée et, du fait de la domination du sens visuel sur la proprioception, l'utilisateur ressent ce déplacement et donc la force virtuelle s'appliquant sur sa main.

Comme dernier exemple nous citons *l'illusion de la main en caoutchouc* [BC98]. La situation est la suivante. Une personne est assise devant une table, une de ses mains est dissimulée derrière un cache, face à lui une main en caoutchouc est posée sur la table. Un opérateur stimule (gratte) de façon synchrone et de façon similaire le dos de la main dissimulée et la main en caoutchouc. Au bout d'un certain nombre de stimulations, la personne perçoit la main en caoutchouc comme étant sa propre main. Une expérience similaire mais avec une main virtuelle a été menée par Slater et al [SPMESV08]. La main dissimulée du participant et une main virtuelle affichée sur un écran polarisé sont stimulées de façon similaire. Après cinq minutes de stimulation, la main virtuelle est perçue par le participant comme étant sa propre main. Pour évaluer l'acceptation de la main virtuelle les auteurs ont utilisé un questionnaire et des mesures physiologiques. Après les cinq minutes de stimulation la main virtuelle effectue une rotation pour orienter sa paume vers

le haut. Des mesures physiologiques menées sur le main réelle de l'utilisateur ont montré que celle-ci réagissait au mouvement de rotation affiché. Cette étude est particulièrement intéressante dans une optique de présence de soi puisque celle-ci correspond à la relation entre un utilisateur et son corps virtuel.

Tous les exemples et références cités dans ce troisième point montrent que le potentiel de la multimodalité pour la réalité virtuelle est très grand. Notamment pour faire ressentir à l'utilisateur des sensations impossibles à rendre du fait de contraintes technologiques ou algorithmiques. Ainsi, la famille des facteurs liés à la cohérence de la boucle sensori-motrice et à la multimodalité *mérite* son statut de pilier.

7.4.5 Émotions

En considérant les émotions comme un facteur à part entière pour tendre vers la présence nous sommes en rupture avec l'approche technologique pour qui les émotions et la présence sont orthogonales [Sla03]. Pour répondre à l'avertissement de Slater [Sla03], nous ne confondons pas présence et réponses émotionnelles. Nous avons conscience que les réponses émotionnelles permettent d'être transporté et qu'elles peuvent induire des réponses physiologiques. Toutefois, nous savons aussi qu'elles ne peuvent se traduire par des réactions comportementales, ce qui, de fait, exclut de confondre présence et émotions. Par contre, nous pensons que même une immersion et une interaction de haute qualité ne peuvent suffire à ressentir un sentiment de présence. Ou alors celui-ci peut-être fugace, comme le fruit d'un effet de surprise : *waouh!!! c'est comme si j'y étais!*. Si dans les premières secondes ce *waouh!!!* peut traduire un sentiment de présence nous sommes convaincus que celui-ci ne peut perdurer que si l'expérience est porteuse d'émotions. Nous pensons en effet que les émotions font partie intégrante de notre expérience usuelle et qu'elles influent sur la façon dont nous percevons, comprenons et réagissons dans notre environnement [HA99]. Ainsi augmentée d'émotions, l'expérience doit avoir un sens pour l'utilisateur.

Dans la *vie réelle* il peut nous arriver d'être absent. Pourtant l'immersion et les possibilités d'interactions sont bien là. Ce sentiment d'absence peut naître alors d'un moment d'ennui, d'un moment dénué de toutes émotions. Nous aurions pu intituler ce pilier *intérêt* mais nous pensons que celui-ci naît des émotions ressenties. Le premier bénéfice des émotions est donc de séduire l'utilisateur pour l'attirer vers cet autre lieu qu'est l'environnement virtuel. Bien entendu les émotions peuvent être portées, indépendamment du contenu, par l'aspect excitant ou extraordinaire (dans le sens qui sort de l'ordinaire) chez des utilisateurs neufs de toutes expériences de ce type. Toutefois cette prime à la nouveauté ne peut, par définition, perdurer. Les spectateurs ayant fuit devant *l'Arrivée d'un train en gare de La Ciotat* ne l'auraient sans doute pas fait à la deuxième projection.

De plus, nous pensons les émotions utiles pour détourner l'attention de l'utilisateur des perturbations extérieures à l'environnement virtuel qu'une immersion non parfaite n'aurait pas réussi à dissimuler. Wang et al [YKT⁺06] montrent l'impact négatif sur la présence des distractions provenant de l'environnement physique. De même, une expérience porteuse d'émotions incite l'utilisateur à focaliser et à maintenir son attention sur l'expérience. Ceci permet de dissimuler les défauts et limites techniques de l'expérience. Le pilier émotion peut être sollicité pour pallier à une immersion de moindre qualité (nombre

de sens stimulés, précision des stimuli). Ceci constitue le deuxième bénéfice attendu des émotions en vue de la présence.

En outre, nous pensons la relation scientifiques-artistes très bénéfique pour la réalité virtuelle. Bien entendu parce que la réalité virtuelle constitue un formidable outil pour les artistes. Mais aussi, parce que nous considérons les artistes capables de concevoir des mondes virtuels plus esthétiques. On peut alors espérer que l'utilisateur trouve ces derniers plus intéressants car porteurs d'émotions. De plus, peupler l'environnement d'objets désignés par des artistes peut apporter une dimension affective supplémentaire à ceux-ci. Le résultat peut être que l'utilisateur a plus aisément conscience de leur présence et donc les accepte comme des objets réels. Choe et al [CK05] montrent l'intérêt de la *patte de l'artiste* pour la synthèse et l'animation de visages expressifs.

Enfin les artistes ont une longue expérience dans le leurre des sens : travail sur la perspective, trompe-l'oeil etc. Peut-être est-il possible de concevoir des trompe-l'oeil dynamiques pour représenter les environnements virtuels et ainsi leur donner une impression de profondeur et de relief plus efficace. Si l'on ajoute à cela une vision stéréoscopique, l'effet peut être saisissant et apporter plus de crédibilité à l'environnement.

Ainsi, nous rangeons dans ce pilier ce que nous avons identifié précédemment comme étant le niveau esthétique du contenu de l'expérience. Nous ne précisons pas à nouveau ce que nous englobons dans ce niveau esthétique. Par ailleurs, nous tenons à souligner que nous accordons une grande importance à l'imagination dont peut faire preuve l'utilisateur et au pouvoir de suggestion. C'est-à-dire que nous pensons utile voire peut-être nécessaire de laisser une place à l'imagination de l'utilisateur et qu'il est probablement parfois plus efficace de suggérer que de montrer. Nous expliciterons notre pensée dans la partie 8.2.2 (page 89) dédiée à la présentation de notre modèle de la présence.

Notre parti pris quant au rôle des émotions comme facteur de la présence, est étayé par différentes études. Les expérimentations de Price et al [PA07] sur la phobie montrent que dans un environnement stimulant la phobie d'un patient, plus celui-ci ressent les émotions de façon intense, plus il ressent de présence. Les études de Banos et al [BBG⁺04] abondent elles-aussi dans ce sens. Pour évaluer le sentiment de présence ressenti, les auteurs utilisent le questionnaire ITC-SOPI qui évalue la présence au travers des 4 dimensions suivantes : la présence spatiale, l'implication, le réalisme de l'expérience et les effets négatifs (voir la section 14.2.2 page 161 dédiée à l'évaluation de la présence par questionnaire). L'étude montre que présenter un environnement porteur d'émotions (joie, tristesse, anxiété ou relaxant) influe positivement sur l'implication mais aussi sur la présence spatiale qui pourtant, dépend théoriquement des technologies immersives employées. Le jugement du réalisme de l'expérience est aussi positivement impacté. Ce dernier point semble confirmer que les émotions font partie intégrante d'un environnement et qu'il n'est pas naturel de se retrouver face à un environnement neutre. Riva et al [RMC⁺07] montrent que la réalité virtuelle est un médium capable de susciter des émotions et que les émotions influencent positivement le sentiment de présence. L'expérimentation que nous présentons dans la section 15.3.4 (page 180) montre que les participants ayant ressenti de fortes émotions ont également éprouvé un sentiment de présence globale plus fort que la moyenne des participants. Ce résultat va donc dans le sens de notre parti pris quant au rôle des émotions comme facteur de la présence.

Le pilier émotions entretient une relation particulière avec la présence car nous es-

timons que émotions et présence s'entretiennent dans un cercle vertueux : les émotions aident à ressentir la présence puis une fois le sentiment de présence atteint, les émotions sont ressenties avec plus d'intensité. Cette conviction est étayée par différents résultats. Ainsi, les thérapies exploitant la réalité virtuelle introduisent des stimuli dans l'environnement dans le but de susciter des émotions en relation avec la phobie du patient. Celui-ci se sent plus présent car plus impliqué du fait de ses émotions ressenties et lorsqu'il est présent il ressent des émotions plus intenses [MBD⁺04]. Riva et al [RMC⁺07] montrent la relation bidirectionnelle qui relie émotions et présence : un environnement porteur d'émotions (anxiogène ou relaxant) génère un sentiment de présence plus élevé qu'un environnement neutre, puis le sentiment de présence permet de ressentir plus intensément les émotions. L'expérimentation présentée section 15.3.4 (page 180) montre d'une part que les personnes qui éprouvent des émotions intenses ressentent un sentiment de présence globale plus élevé et d'autre part que les participants qui ressentent un fort sentiment de présence éprouvent également des émotions de façon plus intense que la moyenne des participants. Cette étude pointe donc la relation vertueuse entre émotions et présence.

Enfin, on peut chercher à modifier en temps réel les émotions portées par l'environnement pour s'adapter aux ressentis de l'utilisateur ou à la volonté des concepteurs de l'expérience [SRLT05], [TBI09]. Les différentes personnalisations de l'environnement peuvent s'exercer, entre autres, sur le rendu de l'environnement, les modalités d'interaction ou sur le déroulement de l'histoire et l'enchaînement des événements. Nous avons proposé une méthode de personnalisation basée sur la personnalité de l'utilisateur [SKC⁺06]. Pour cela, nous proposons à l'utilisateur un environnement en trois dimensions de type jeu vidéo dans lequel il doit répondre à des questions et réaliser un certain nombre d'actions. Parallèlement, nous enregistrons ses mouvements oculaires ainsi que les mouvements de la souris. L'ensemble des données est traité pour pouvoir déduire le trait de personnalité dominant chez l'utilisateur. Les différents traits de personnalité identifiés découlent de la théorie dite de l'Enneagram [RH00] qui identifie huit types de personnalités. Une extension de ce papier propose de déduire non seulement la personnalité de l'utilisateur mais aussi ses intentions [BCS⁺07]. Nous souhaitons pour cela étudier les corrélations entre les choix réels de l'utilisateur et un certain nombre de paramètres comme les mouvements oculaires et de la main mais aussi le temps d'hésitation pour répondre à des questions. L'idée est donc de tenir compte des caractéristiques de l'utilisateur et de pouvoir dans un premier temps adapter l'environnement à la personnalité détectée chez l'utilisateur puis, à terme, d'adapter le déroulement de l'expérience en fonction des intentions et ressentis détectés via le suivi de pupilles et des mouvements de la souris.

7.4.6 Liens entre piliers et composantes de la présence

La présence que nous avons définie précédemment comme *le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve* peut être examinée au travers de ses quatre composantes : présence environnementale, présence sociale, présence de soi et présence d'action. Dans cette section nous souhaitons souligner l'influence des piliers sur les différentes composantes de la présence.

La présence environnementale relève principalement du pilier immersion chargé de restituer l'environnement virtuel. Toutefois, nous avons émis l'hypothèse qu'un environ-

nement esthétique peut être accepté comme réel plus efficacement qu'un environnement neutre. Par conséquent, les émotions peuvent également influencer sur la présence environnementale.

La présence sociale repose en grande partie sur le pilier interaction puisque celui-ci définit les modalités de communication entre les acteurs : communication orale directe, écrite ou peut-être symbolique. Le pilier immersion peut participer à la présence sociale en permettant notamment une communication non verbale exploitant la visualisation des expressions du visage et des échanges de regard. La restitution sonore peut servir à percevoir des variations d'intonation dans la voix. Enfin le pilier émotion contient tout ce qui incite l'utilisateur à penser qu'il a une entité intelligente face à lui : visage expressif, comportement non stéréotypé, dialogue ouvert etc.

La présence de soi dépend en partie de l'aspect bidirectionnel de l'immersion (voir section 7.4.2). Par le fait de disposer d'un avatar à son image ou de visualiser son corps lorsque l'immersion visuelle se fait par un visiocasque, mais aussi en représentant tout ce qui indique que la simple présence de l'utilisateur impacte l'environnement. Par ailleurs, la présence de soi est renforcée si les sensations proprioceptives de la représentation virtuelle de l'utilisateur, correspondent aux sensations proprioceptives ressenties réellement. L'expérience de la main en caoutchouc présentée précédemment constitue un exemple criant d'appropriation d'une représentation virtuelle par un utilisateur. Ceci nous indique clairement que les piliers interaction et boucle sensori-motrice influent sur la présence de soi.

Enfin, la présence d'action s'appuie sur en partie sur le retour proprioceptif ressenti par l'utilisateur. Le pilier immersion permet une bonne compréhension de l'environnement, ainsi l'utilisateur peut identifier clairement ses affordances. Si celles-ci sont assumées par les schémas d'interaction alors les sensations proprioceptives du soi virtuel correspondent à celles du soi réel. Il faut donc que les schémas d'interactions soient naturels et directes. Enfin il est clair que le lien de causalité entre les actions de l'utilisateur et les réponses du système doit être maintenu. Si ces trois conditions sont respectées alors la présence d'action en sera améliorée. Enfin, la présence d'action est plus intense si des émotions fortes sont associées aux actions.

7.4.7 Effet compensatoire entre les piliers

Rappelons que le socle *cognition humaine* sert de vivier d'idées pour les quatre piliers décrits précédemment et que tous servent au concepteur pour proposer une expérience suffisamment crédible et qui a du sens pour l'utilisateur, afin que celui-ci accepte de se prendre au jeu. Nous pensons de plus, que les piliers ne travaillent pas de façon parallèle et additive. Par exemple, l'immersion en permettant une bonne compréhension de la scène facilite les interactions avec l'environnement et permet de percevoir des affordances. De même, un schéma ou un dispositif d'interaction trop complexe ou encombrant peut pénaliser la perception des émotions dans l'environnement. Les exemples pourraient se multiplier.

Dans une optique de présence, nous pensons que les piliers se compensent entre eux. C'est-à-dire que si un pilier souffre d'une qualité moindre alors un effort dans un (ou plusieurs) autres piliers peut compenser ce manque. Nous avons déjà mentionné l'impact

positif des émotions, Ijsselsteijn [Ijs02] remarque que la présence peut être aussi bien ressentie dans un environnement photoréaliste mais non interactif que dans un environnement moins réaliste mais offrant plus de possibilités d'interaction. Banos et al [BBA⁺04] étudient l'impact de l'émotion pour la présence lorsque différents systèmes immersifs sont employés : non immersif avec un classique écran d'ordinateur, semi-immersif avec un écran rétro-projeté et pleinement immersif avec un visiocasque. Deux types d'environnements sont proposés, l'un neutre, l'autre suscitant un sentiment de tristesse (paysage urbain gris, sans feuille sur les arbres et sous un ciel nuageux avec une musique d'ambiance triste). Les résultats indiquent que dans l'environnement neutre, le type d'immersion influe beaucoup sur la présence. Par contre, dans l'environnement triste il n'y a pas de différences significatives sur le niveau de présence ressentie entre les différents systèmes immersifs. Bien que le visiocasque soit considéré comme le système le plus immersif, cette étude montre que ce dernier souffre de son côté inconfortable.

Offrir une vision stéréoscopique est l'une des solutions classiques pour susciter un sentiment de présence [BH96], [IRF⁺01]. Une étude récente menée de nouveau par Banos et al [BBR⁺08] montre que la vision stéréoscopique a effectivement un impact positif sur un environnement neutre mais l'impact est nul lorsque l'environnement est porteur d'émotions. Dans le cas de l'étude, les émotions ressenties sont soit joyeuses soit relaxantes. Le sentiment de présence ressenti est similaire que la vision soit monoscopique ou stéréoscopique.

Toutes ces études vont donc dans le sens de notre intuition sur l'effet compensatoire entre les piliers. Ainsi les piliers n'interagissent pas entre eux de façon additive mais plutôt en synergie.

7.4.8 Des seuils minimaux pour atteindre la présence ?

Considérant que les piliers travaillent en synergie nous pensons qu'il doit être possible d'établir des seuils minimaux à atteindre à l'intérieur de chaque combinaison possible de piliers. La question sur le niveau minimum d'immersion a déjà été posée [BM07]. Notre approche est différente puisqu'elle ne cible pas les piliers tour à tour mais bien l'union des piliers. Cette connaissance sur les seuils minimaux permettrait de maximiser les chances d'atteindre la présence tout en minimisant les contraintes technologiques ou algorithmiques. Un dispositif pointu mais très couteux n'est peut-être pas toujours nécessaire dans une optique de présence. Notre vision rejoint celle de Ellis [Ell96] qui pense possible d'établir des équivalences d'iso-présence entre différents facteurs de la présence. A ce jour ces niveaux minimums n'ont toujours pas été identifiés.

Pour identifier ces combinaisons optimales il faut soit multiplier les expériences soit faire varier au cours d'une expérience les différents facteurs tout en mesurant les variations de présence en continu. Pour ce faire, il est nécessaire de croiser des mesures physiologiques et comportementales avec des études par questionnaires. Cette recherche peut donc ressembler à une sorte de Quête du Graal de la présence...

Le résultat espéré est d'établir des diagrammes en radar femelle et mâle. Chaque axe du diagramme correspond à un seuil à atteindre pour chaque pilier. Le diagramme femelle représente les besoins propres à un type d'application ou d'expérience. Une installation artistique n'a pas les mêmes besoins qu'un simulateur ou qu'une application destinée à

l'éducation. Le diagramme mâle représente les possibilités et fonctionnalités disponibles pour chaque pilier. Le but est idéalement d'arriver à faire correspondre les deux diagrammes. Si toutefois cela n'est pas possible, alors il faut travailler pour que la surface définie par les niveaux de chaque axe sur le diagramme mâle soit proche voire plus grande que celle du diagramme femelle. Cette équivalence de surface est le fruit de l'effet compensatoire entre les piliers pour tendre vers le sentiment de présence.

Chapitre 8

Les différents modèles de la présence

Ce chapitre est dédié aux modèles de la présence. Un modèle de la présence vise à identifier et à organiser les processus sous jacents menant au sentiment de présence. Il s'agit donc de comprendre comment et pourquoi à partir d'une expérience en réalité virtuelle, un utilisateur ressent - ou non - un sentiment de présence. Avant de préciser notre propre modèle de la présence, nous présentons trois modèles existants.

8.1 Les modèles existants

8.1.1 Le modèle de Lessiter et al.

Pour établir leur modèle de la présence, Lessiter et al [LFKD01] ont mené différentes expériences. Au cours de celles-ci, les auteurs ont diversifié les caractéristiques immersives de l'expérience et ont proposé alternativement des environnements porteurs ou non d'émotions. Ces différentes études ont isolé les identifiants de la présence suivants.

L'impression d'être dans un espace autre que l'espace réel. Les considérations sont ici équivalentes au concept d'*être là* nommé également présence personnelle par Heeter [Hee92] ou présence physique par Biocca [Bio97]. L'idée que l'utilisateur est transporté dans cet autre environnement est donc sous-jacente. Ce déterminant de la présence repose essentiellement sur les capacités immersives et interactives du dispositif.

L'implication ou engagement de l'utilisateur dans l'expérience. L'implication est définie comme un état de forte concentration dans lequel l'utilisateur n'a plus conscience des distractions extérieures, oublie l'environnement réel dans lequel il se situe et ne fait plus attention au temps qui passe. Les auteurs considèrent l'implication comme dépendant en majeure partie de l'intérêt que porte l'utilisateur à l'expérience. Toutefois, ils précisent que les caractéristiques immersives et interactives du dispositif peuvent faciliter ou entraver le développement de l'intérêt de l'utilisateur.

Le jugement de la validité écologique. Ce jugement porte sur le réalisme du contenu et l'aspect naturel de l'environnement. Selon les auteurs, l'aspect naturel dépend de la qualité immersive du dispositif et de la cohérence des stimuli.

Les effets négatifs induits par le système. Il s'agit ici des nausées, maux de tête ou fatigues que l'utilisateur peut ressentir. Ceux-ci sont causés essentiellement par les dispositifs immersifs.

Les auteurs considèrent que la présence ressentie peut s'évaluer via ces quatre facteurs. Pour ce faire, ils ont créé leur propre questionnaire d'évaluation de la présence intitulé ITC Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI). Ce questionnaire est présenté dans la section 14.2.2 (page 161) dédiée à l'évaluation du sentiment de présence. Ce modèle ressemblant beaucoup à l'*embodied model* de Schubert et al [SFR99a] nous proposons après la présentation de ce dernier un bilan commun.

8.1.2 L'*embodied model* de Schubert et al

Schubert et al [SFR99a] estiment que la présence résulte de la construction d'un modèle mental représentant le corps de l'utilisateur évoluant dans l'environnement virtuel. Ce modèle mental, nommé *embodied model* n'est pas seulement une image mentale de l'environnement mais consiste en une représentation spatiale et fonctionnelle de celui-ci. Les fonctions perçues par l'utilisateur sont relatives aux tâches classiques d'interaction : navigation, manipulation d'objets et interaction avec d'autres agents. Pour que ce modèle mental fonctionnel se construise, il faut dans un premier temps, que la perception de l'environnement réel soit supprimée. Les auteurs considèrent que le sentiment de présence émerge lorsque l'utilisateur a (au moins) mentalement l'impression que ces tâches peuvent être effectuées par son propre corps. Plus l'utilisateur peut effectivement interagir avec l'environnement virtuel par l'intermédiaire de son propre corps, plus l'émergence du sentiment de présence est facilitée. Suite à une étude, les auteurs ont identifié les trois facteurs suivants comme étant des composantes de la présence.

La présence spatiale (SP). Ce facteur reprend l'idée *d'être transporté ailleurs* que l'on retrouve comme composante de la présence identifiée par Heeter [Hee92] sous le terme de *présence personnelle*, également appelée *présence physique* par Biocca [Bio97].

L'implication (INV). Celle-ci est définie comme un état psychologique conséquence de la focalisation de l'énergie et de l'attention de l'utilisateur sur l'environnement virtuel.

Le jugement du réalisme (REAL). Celui-ci dépend du niveau de similitude entre l'expérience virtuelle et une expérience réelle.

Ces trois composantes de la présence dépendent directement des cinq facteurs ci-dessous. Ceux-ci rendent compte de la qualité de la description de l'environnement et des propriétés des interactions possibles entre l'utilisateur et l'environnement virtuel.

La qualité de l'immersion (QI). Dépend de la qualité et de la richesse de la stimulation multimodale.

Le contenu dramatique (DRA). Est-ce que l'utilisateur a le sentiment de pouvoir influencer sur le déroulement de l'expérience ?

La conscience des interfaces (IA). Est-ce que les interfaces ont un impact négatif sur l'attention que porte l'utilisateur à l'expérience ?

L'exploration de l'environnement (EXPL). Est-ce que l'utilisateur a la possibilité de naviguer dans l'environnement et d'examiner les objets le composant ?

La prédictibilité (PRED). Est-ce que le résultat d'une action de l'utilisateur correspond bien à ce à quoi il s'attendait ?

Les liens d'influence entre ces cinq facteurs et les trois composantes de la présence précédemment identifiées sont explicitées sur la figure 29. On peut constater que la composante spatiale dépend des cinq facteurs, que l'implication dépend de tous les facteurs à l'exception de la conscience des interfaces et que le jugement de la réalité dépend de la présence spatiale, de l'implication et du facteur exploration.

Plusieurs relations de ce modèle nous laissent interrogatifs. Premièrement nous ne comprenons pas comment la présence spatiale et l'implication peuvent influencer sur le jugement de la réalité. Il nous semble qu'au contraire ce jugement est une étape préalable à la présence spatiale. Nous constatons également que ni le facteur qualité de l'immersion ni le facteur contenu de l'expérience n'ont d'influence sur le jugement du réalisme. Ce résultat est pour le moins surprenant. Par ailleurs, seul le facteur exploration est en relation avec le jugement de la réalité. Compte tenu de ces trois remarques, nous nous interrogeons sur la pertinence du jugement du réalisme comme composante de la présence. Nous verrons que dans notre modèle (présenté section 8.2) le jugement du réalisme est en quelque sorte remplacé par le jugement de la crédibilité.

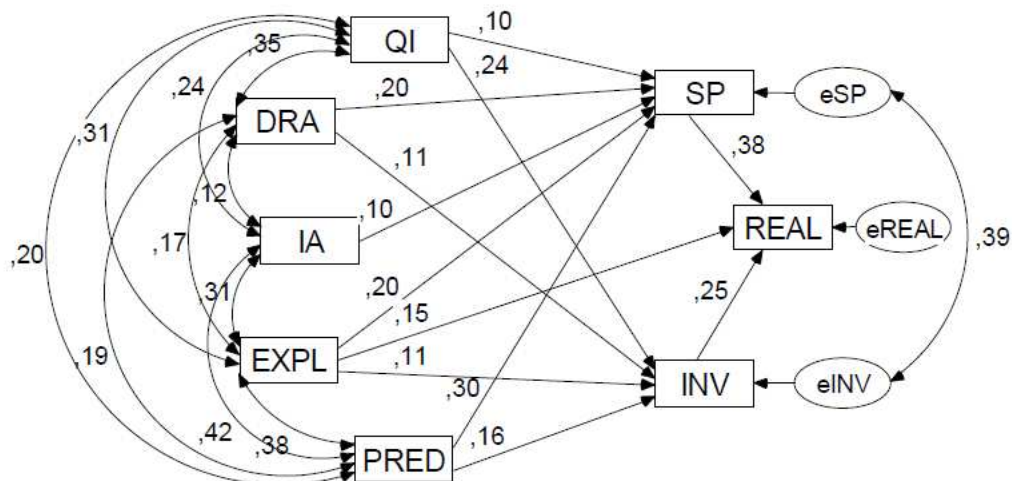


FIG. 29: L'embodied model de Schubert et al. Les composantes de la présence dépendent de cinq propriétés de l'expérience. *Source* : [SFR99a]

Parallèlement, les auteurs ont créé le Igroup Presence Questionnaire (présenté section 14.2.2 page 161) pour évaluer le sentiment de présence ressenti [SFR01]. Ce dernier est mesuré via les trois composantes de la présence présentées précédemment : la présence spatiale, l'implication et le jugement du réalisme.

Faisons un bilan de ces deux modèles. Nous pouvons constater que ceux-ci sont très similaires et reposent sur les trois déterminants suivants : le sentiment d'être physiquement situé dans l'environnement virtuel, le degré d'implication dans l'expérience et le jugement du réalisme de l'environnement. L'apport majeur de ces deux modèles est qu'ils introduisent une notion de jugement. Cette dimension de jugement indique que l'utilisateur participe au processus menant à l'émergence de la présence. Nous ne revenons pas sur nos réserves quant au critère de ce jugement, ici le réalisme. Ils montrent également que la présence ne dépend pas uniquement de la qualité de l'immersion et des propriétés de l'interaction. Enfin, ils pointent le rôle crucial de l'implication.

Notons que ces deux modèles considèrent l'implication et le jugement du réalisme comme des composantes de la présence voire comme des marqueurs de celle-ci. En effet, les deux questionnaires associés à ces modèles mesurent l'implication et le jugement du réalisme pour évaluer le niveau de présence ressenti. Dans notre modèle ces deux facteurs sont considérés non pas comme des composantes de la présence mais comme des étapes sur le chemin menant à la présence. Comme le remarquent Wirth et al [WHB⁺07] la différence entre implication et présence est parfois assez floue. Par exemple Lessiter et al [LFKD01] ne définissent pas clairement la présence mais considèrent l'implication comme *une réponse de l'utilisateur associée à la présence*.

Nous déplorons également que ces deux modèles identifient comme seuls facteurs de la présence les caractéristiques du dispositif de réalité virtuelle. Hormis le jugement du réalisme, aucun facteur n'est propre à l'utilisateur. En outre, nous regrettons que ces modèles ne ciblent que la présence spatiale et ne mentionnent pas les autres composantes de la présence : présence de soi, présence sociale et présence d'action. Il est malheureusement courant de réduire la présence à la présence spatiale. Enfin, les modèles proposés n'explicitent pas l'enchaînement des processus qui interviennent dans l'émergence de la présence. Ce regret est un peu moins vrai pour Schubert et al [SFR99a] qui identifient la construction d'un modèle mental spatial et fonctionnel comme une étape nécessaire à l'émergence de la présence. Toutefois nous pensons le cheminement menant à la présence plus complexe.

8.1.3 Le modèle de Wirth et al

Le modèle de Wirth et al [WHB⁺07] se propose d'établir le premier modèle complet de la présence. Les auteurs reprochent aux deux modèles présentés précédemment de se contenter d'une analyse de données et par conséquent de ne pas reposer sur une base théorique explicitant ce qu'est la présence et surtout comment celle-ci émerge au cours d'une expérience.

Ce modèle repose sur les connaissances acquises au cours des deux dernières décennies sur la présence et tient compte des caractéristiques du dispositif mais aussi de l'utilisateur. Notons que cette volonté de proposer un modèle complet se traduit dans le fait qu'il est le fruit de la collaboration de quinze chercheurs provenant de cinq universités différentes et travaillant dans des domaines tels que l'informatique, les sciences sociales et neurologiques et la philosophie.

Les auteurs assument un certain nombre de choix. Premièrement, ce modèle est spécifiquement dédié à la présence spatiale (c'est-à-dire la conviction d'être situé dans un autre environnement), on notera donc que la présence sociale et la présence de soi ne sont pas

considérées. La présence spatiale est ici définie comme une expérience binaire (l'utilisateur est présent ou ne l'est pas), durant laquelle l'utilisateur se perçoit et perçoit les actions possibles comme étant connectées à l'environnement spatial médiatisé. Deuxièmement, ce modèle ne se limite pas à la réalité virtuelle et peut s'appliquer à d'autres médias tels que les livres ou la télévision qui peuvent, selon les auteurs, susciter eux aussi un sentiment d'*être ailleurs*. On retrouve dans ce choix la théorie dite des trois pôles de Biocca [Bio03] qui met en avant le rôle de l'imagination dans l'émergence de la présence. Biocca fait d'ailleurs partie des concepteurs de ce modèle. Nous avons abordé ce point dans le chapitre 5.1.2 dédié aux différentes approches de la présence (page 45). Rappelons que selon cette théorie, l'espace de référence de l'utilisateur peut être physique, virtuel ou imaginaire.

Le modèle s'articule sur deux niveaux. Le premier permet la formation d'un modèle mental (*Spatial Situation Model* dans la figure 30). Celui-ci représente l'environnement virtuel tel qu'il est perçu par l'utilisateur. Le deuxième niveau correspond au passage du modèle mental à l'état psychologique de la présence spatiale. Nous décrivons maintenant ces deux niveaux.

Le premier niveau est influencé par les caractéristiques du média employé (media factors sur la figure 30) et les caractéristiques de l'utilisateur (user factors sur la figure 30). Les propriétés du média englobent à la fois les caractéristiques techniques, principalement les capacités immersives et interactives du média (mais ce pourrait être les mots d'un auteur décrivant un lieu) et le contenu de l'application. Le rôle du média est de décrire l'environnement et de maintenir l'attention de l'utilisateur en vue de la construction du modèle mental. Les caractéristiques de l'utilisateur dépendent de ses expériences préalables, de sa mémoire et de ce que les auteurs intitulent *le domaine spécifique d'intérêt* de l'utilisateur. Si celui-ci correspond au contenu de l'expérience alors l'utilisateur portera une plus grande attention à l'expérience. L'ensemble de ces facteurs doit permettre à l'utilisateur de façonner un modèle mental de l'environnement spatial qui lui est propre. Ce modèle mental est bien distinct de la présence spatiale : le modèle mental est une représentation mentale alors que la présence spatiale est une expérience. Des processus perceptifs et cognitifs supplémentaires sont nécessaires pour atteindre la présence spatiale.

Une fois le modèle mental construit, un ensemble d'hypothèses doit être validé pour arriver à la présence spatiale. Les hypothèses relatives aux caractéristiques du média sont par exemple le réalisme de l'environnement proposé et que le contenu ait du sens c'est-à-dire que l'utilisateur puisse y retrouver une certaine cohérence. De fait, les caractéristiques du média exploitées lors du premier niveau se retrouvent également à ce second niveau. Concernant les caractéristiques de l'utilisateur, les auteurs se concentrent sur l'implication de l'utilisateur et sa suspension consentie de l'incrédulité (*suspension of disbelief* dans la figure 30).

L'implication est vue comme une relation intense et active à l'environnement médiatisé. Alors que l'implication se traduit par exemple par le fait de penser très fortement à l'environnement médiatisé, la présence spatiale se réduit simplement au fait d'*être* dans ce dernier. Les auteurs précisent également que l'implication est différente de la présence spatiale en ce qu'elle n'implique pas forcément une perte de conscience de l'environnement réel. L'implication influe positivement sur la présence spatiale car elle détourne l'attention que pourrait porter l'utilisateur sur les distractions issues de l'environnement réel.

La suspension consentie de l'incrédulité est le deuxième facteur permettant l'émergence de la présence spatiale. Cette notion a été introduite par Coleridge [Col69] et fait référence au fait d'accepter volontairement et en dépit des imperfections techniques et/ou narratives, une œuvre fictionnelle comme étant la réalité. Pour Coleridge, cette suspension était à l'origine effectuée par les lecteurs de poèmes ou de livres afin de vivre plus intensément l'œuvre. Celle-ci est maintenant appliquée à toute activité médiatisée (télévision, cinéma, jeux vidéos et réalité virtuelle). Cette suspension a un impact positif en vue de la présence spatiale car elle incite l'utilisateur à ne pas tenir compte des informations et faits qui ne lui semblent pas réalistes (par rapport à ce qu'il connaît dans le monde réel) : oui je veux bien croire le temps du film que les sorcières existent et se déplacent sur des balais... En conclusion, cette suspension volontaire permet de ressentir une présence spatiale même si l'expérience dans son ensemble est de qualité moyenne.

Enfin, les auteurs précisent que les caractéristiques du média, l'implication et la suspension volontaire d'incrédulité participent ensemble à l'émergence de la présence spatiale et peuvent s'auto-compenser au cas où l'un de ces points clés fasse défaut.

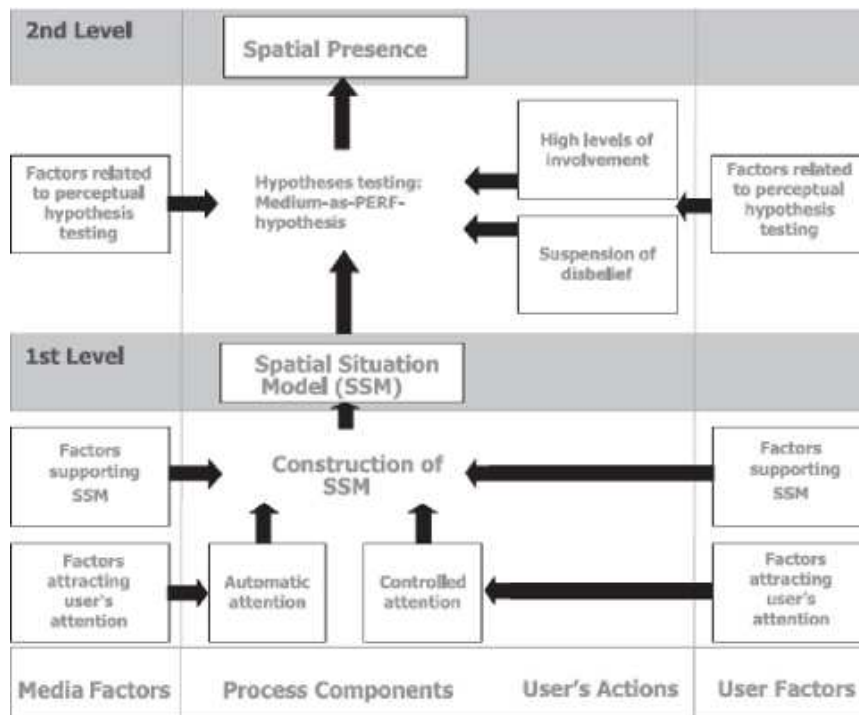


FIG. 30: Le modèle de la présence spatiale à deux niveaux de Wirth et al [WHB⁺07].
Source : Wirth et al [WHB⁺07]

Ce modèle est le premier décrivant de bout en bout l'émergence de la présence spatiale : des facteurs liés à la conception du dispositif jusqu'à l'état psychologique de présence spatiale. Nous apprécions tout particulièrement que ce modèle mette en avant le rôle de l'utilisateur dans l'émergence de la présence. De plus, il permet de faire clairement la distinction entre la présence et des concepts comme l'implication ou le jugement de la réalité. Ce n'était pas le cas avec les modèles proposés par Lessiter et al [LFKD01] et Schubert et al [SFR99a]. Enfin, nous sommes en accord avec la présentation de ces deux

concepts comme étant des étapes vers la présence et non des composants de la présence. Cette dernière considération remet en cause la validité des questionnaires considérant l'implication ou le jugement de la réalité comme des marqueurs de la présence. De fait on ne peut alors qu'estimer que les participants ont atteint ces deux étapes mais on ne peut en conclure qu'un sentiment de présence est ressenti.

Le modèle que nous allons proposer présente quelques similitudes avec celui-ci. Toutefois même si certains processus sont communs nous verrons que leur enchaînement est différent. Enfin, en adoptant une approche écologique notre modèle se distingue clairement du modèle de Wirth et al [WHB⁺07].

8.2 Notre modèle de la présence

Tout comme le modèle de Wirth et al [WHB⁺07] précédemment présenté, nous proposons un modèle de la présence qui se veut complet dans le but d'expliquer l'enchaînement des processus conduisant à l'émergence du sentiment de présence. Notre modèle débute par les briques servant à la conception de l'expérience en réalité virtuelle, tient compte des caractéristiques de l'utilisateur puis déroule l'ensemble des processus qui mènent au sentiment de présence. Par ailleurs notre modèle présente des dimensions technologiques, psychologiques et écologiques.

Notre base théorique se différencie de celle du modèle de Wirth et al [WHB⁺07] sur les deux points suivants. Tout d'abord, comme nous l'avons déjà énoncé dans ce document nous considérons que, par définition, seule la réalité virtuelle peut susciter un sentiment de présence. Ainsi, nous ne considérons pas les livres comme de la réalité virtuelle car si ils peuvent effectivement induire une réponse émotionnelle, ils ne permettent pas une perception sensorielle de l'environnement. Et comme nous l'avons précisé en commentaire de la description de l'approche psychologique de la présence (voir section 5.1.2 page 45) nous faisons la distinction entre réponse émotionnelle et présence. La deuxième différence théorique est que nous ne cibons pas la seule présence spatiale mais bien les quatre composantes de la présence telles que nous les avons identifiées dans le chapitre 6.4 (page 53). Ces quatre composantes sont la présence environnementale (ou spatiale), la présence de soi, la présence sociale et la présence d'action.

Nous allons maintenant dérouler les processus menant à la présence. Précisons que ce processus est réitéré en permanence au cours de l'expérience. Ceci explique que le sentiment de présence n'est pas constant au cours de l'expérience.

8.2.1 Point de départ de notre modèle : la description de l'environnement

Le processus est initié par les trois piliers immersion, boucle sensorimotrice et multimodalité et émotions. Bien entendu en amont ces différents piliers ont pu bénéficier du socle de connaissances sur la cognition humaine. Ces piliers sont présentés dans le chapitre 7.4 (page 68) dédié. Nous rappelons très brièvement que le rôle de l'immersion et du pilier boucle sensorimotrice et multimodalité est premièrement de décrire l'environnement

virtuel aux sens de l'utilisateur et deuxièmement de substituer la perception de l'environnement virtuel à celle de l'environnement réel. On cherche donc à réduire au maximum la perception de l'environnement réel. Rappelons très brièvement que nous rangeons dans le pilier émotion ce que nous avons identifié précédemment comme étant le niveau esthétique du contenu de l'expérience. Celui-ci regroupe l'ensemble des éléments n'étant pas dédiés à la simple description de l'environnement mais plutôt à susciter des émotions pour créer et maintenir l'intérêt de l'utilisateur sur l'expérience. Cet intérêt augmente celui intrinsèque à l'expérience et *se diffuse* tout au long du processus menant la présence. Ceci permet de détourner l'attention de l'utilisateur des limites et défauts du dispositif mais également des perturbations issues du monde réel qu'un manque d'immersion n'aurait pu dissimuler. Il incite également l'utilisateur à accepter que certaines attentes ne soient pas satisfaites. Le travail de ces trois piliers abouti à la perception de l'environnement.

Une première phase de jugement intervient alors dans le processus. Ce jugement porte sur la crédibilité de l'environnement virtuel proposé. Le critère choisi est donc la crédibilité et non pas le réalisme car ce jugement dépend de l'utilisateur et est donc subjectif. Ce critère de crédibilité dépend de la satisfaction des attentes de l'utilisateur. Nous considérons que l'utilisateur a deux types d'attentes. Les attentes intellectuelles qui dépendent de ses envies, de ses centres d'intérêts, de son expérience préalable dans ce type d'environnement et d'autres critères propres à l'utilisateur. Les autres attentes sont perceptives. Celles-ci sont satisfaites si les stimuli sont de qualité suffisante pour leurrer les sens de l'utilisateur et correspondent à ce que l'utilisateur attend de ce type de dispositif et de la situation présentée. Par exemple les attentes d'une personne ayant l'habitude des environnements virtuels sont plus fortes que celles d'une personne découvrant ce type d'environnement. Le résultat de notre expérimentation 15.3.3 (page 179) montre que les participants ayant ressenti une présence globale intense présentent un score très élevé pour la satisfaction de leurs attentes. Ce résultat montre que la satisfaction des attentes est une étape importante sur le chemin menant à la présence.

Ces différentes attentes (de plus ou moins grande importance) sont alors mises, de façon inconsciente, en balance. Si le niveau général de satisfaction est supérieur à celui de frustration (issue de la non satisfaction des attentes) alors l'utilisateur juge l'environnement crédible et son attention se porte et se maintient sur l'environnement virtuel proposé et non plus sur l'environnement réel. Nous souhaitons insister sur le fait que cette phase de jugement est inconsciente. En effet, de la même façon que l'on ne décide pas par exemple qu'un paysage nous plaît, ce jugement est effectué en dehors de tout processus de réflexion conscient.

Nous considérons la description de l'environnement virtuel de qualité suffisante si l'utilisateur est capable de percevoir dans celui-ci des affordances. En cela nous rejoignons l'approche écologique décrite au chapitre 5.1.3 (page 48) qui considère que la perception d'un environnement ne se fait pas via son apparence mais au travers des possibilités d'action que perçoit l'utilisateur dans l'environnement. Ceci implique que l'important est de fournir un environnement virtuel qui soit crédible et compréhensible par l'utilisateur (pour pouvoir en percevoir les affordances) plus qu'une représentation réaliste.

8.2.2 Perception des affordances, le cœur écologique de notre modèle

Son attention portée sur un environnement qu'il comprend, l'utilisateur peut alors percevoir de multiples affordances. Nous considérons que les affordances perçues dans l'environnement virtuel sont similaires à celles perçues dans l'environnement réel. Ceci constitue une des hypothèses avancées dans l'élaboration de notre modèle. Si cette hypothèse est vérifiée alors cela signifie par exemple, qu'un couloir virtuel affine à son observateur d'être parcouru en marchant. Une autre hypothèse, que nous ne prenons pas à notre compte, serait qu'en fonction de l'expérience préalable de l'utilisateur dans les environnements virtuels (les jeux vidéo par exemple), le couloir virtuel affine d'être parcouru, mais cette fois-ci non pas en marchant mais en pressant sur les flèches d'un clavier d'ordinateur par exemple. Cela signifierait que l'utilisateur, fortement habitué à ce type de navigation dans les environnements virtuels, a intégré le déplacement par appui sur des touches d'un clavier comme étant le mode de déplacement naturel ou au moins conventionnel dans ce type d'environnement. Selon l'approche écologique une affordance dépend de la relation observateur - environnement, aussi il est probable que les expériences préalables dans les environnements médiatisés puissent modifier les affordances considérées comme naturelles.

Pour l'heure, nous considérons que les affordances perçues sont similaires à celles perçues dans l'environnement réel. Toutefois, nous pensons nécessaire par la suite de mener une étude préliminaire pour déterminer si, dans un contexte médiatisé et en fonction de l'expérience préalable de l'observateur, les affordances perçues peuvent être différentes de celles perçues dans l'environnement réel.

Notre deuxième hypothèse est que les affordances perçues dans l'environnement doivent être assumées par les schémas d'interactions pour que l'utilisateur juge crédible l'expérience. C'est de fait ici que le pilier interaction entre en jeu. Les affordances sont dites assumées si les différents outils et schémas d'interaction proposés à l'utilisateur répondent avec succès aux affordances perçues. Prenons quelques exemples. L'affordance *marcher dans un couloir* est considérée comme assumée si le dispositif de réalité virtuelle permet à l'utilisateur de se déplacer dans ce couloir virtuel en marchant réellement. Par contre, si le déplacement se fait par manipulation d'un joystick ou tout autre schéma d'interaction différent de la marche alors l'affordance est considérée comme non assumée. Autre exemple, l'environnement virtuel décrit un objet quelconque posé sur une table. Il est demandé au participant de déplacer cet objet sur une autre table de l'environnement. L'objet affine donc d'être pris dans la main, porté puis déposé sur l'autre table. Si le schéma d'interaction est un suivi de la main de l'utilisateur capable de détecter que l'utilisateur referme sa main sur l'objet, déplace son bras puis dépose l'objet au dessus de la deuxième table alors l'affordance est assumée. Par contre, si la manipulation consiste à cliquer sur l'objet puis à cliquer sur la deuxième table pour y déposer l'objet alors l'affordance n'est pas assumée. Les affordances ne sont pas restreintes au champ de la gestuelle. Si l'utilisateur partage l'espace virtuel avec une autre personne alors l'affordance communication est perçue. Si l'utilisateur peut communiquer directement par la voix avec cet autre personne alors l'affordance communication est assumée. Par contre, si la communication se fait par le clavier ou par la sélection de phrases pré-définies alors elle n'est pas assumée. En guise de der-

niers exemples considérons les simulateurs de vol ou de conduite. L'air afforde de voler, la route afforde de rouler. Ces actions ne sont pas naturellement réalisables par l'homme. Aussi, les affordances sont considérées comme assumées dès lors que les commandes de navigation se font par l'intermédiaire d'un manche ou d'un volant. Peut-être est-ce là une des raisons pour lesquelles le sentiment de présence est ressenti fortement dans ce genre d'expérience ?

Nous considérons donc que si le pilier interaction décrit dans la section 7.4.3 (page 71) offre des schémas naturels et directs à l'utilisateur alors les affordances sont assumées. Une conséquence des affordances assumées est que les sensations proprioceptives du soi virtuel correspondent aux sensations proprioceptives du soi réel. Cette correspondance influe positivement sur le jugement de crédibilité de l'expérience.

Nous poursuivons dans l'approche écologique et considérons que le jugement de la crédibilité de l'expérience dépend de l'équilibre entre affordances assumées et affordances non assumées. Si les affordances sont assumées alors il naît chez l'utilisateur un sentiment de satisfaction, sinon celui-ci laisse la place à un sentiment de frustration. Encore une fois, satisfactions et frustrations sont mises en balance. Si le résultat est positif alors l'utilisateur juge l'expérience dans son ensemble (et plus seulement l'environnement) crédible. En introduisant les affordances dans le processus menant à la présence nous répondons en quelque sorte à la demande de Schubert [Sch09] quant à la prise en compte des affordances dans l'explication du sentiment de présence.

Par ailleurs, une affordance assumée s'accompagne de sensations proprioceptives en accord avec les schémas d'interaction, ces sensations proprioceptives viennent alors renforcer le jugement de crédibilité.

Cette phase de jugement est, elle encore, inconsciente, l'utilisateur ressent la satisfaction ou la frustration mais cette sensation ne se décide pas. Cette fois encore nous employons le terme de crédibilité et non pas de réalisme à dessein. Enfin, conformément à l'approche écologique (voir section 5.1.3 page 48) et contrairement au modèle de Wirth et al [WHB⁺07] nous ne pensons pas nécessaire la construction d'un modèle mental de l'espace. Toutefois, pour le cas où l'absence de la construction d'un modèle mental soit une erreur de l'approche écologique, celui-ci pourrait s'intégrer très facilement dans notre modèle de la présence. Cette construction ferait alors suite à la perception de l'environnement et interviendrait en amont de la phase de perception des affordances.

L'étude menée par Usho et al [UAW⁺99] compare le sentiment de présence ressenti en fonction du schéma d'interaction exploité pour gérer les déplacements de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Trois schémas ont été étudiés, la marche réelle, la marche simulée (les utilisateurs doivent reproduire les mouvements de la tête produits lors de la marche réelle) et le déplacement abstrait qui consiste à diriger le déplacement avec l'orientation de la tête. Les résultats montrent que la présence est plus intense pour la marche réelle que pour la marche simulée. Le déplacement abstrait étant le schéma suscitant la présence la plus faible. Dans cette étude il n'est fait mention nulle part de crédibilité ou d'affordance assumée. Pourtant, nous pensons que les résultats de cette étude correspondent bien à notre modèle. On peut en effet considérer que l'affordance *marche* est assumée par le premier schéma d'interaction. Suivant le déroulement de notre modèle, les participants ayant bénéficié du schéma d'interaction *marche* ont alors jugé l'expérience plus crédible

et par la suite ont ressenti un sentiment de présence plus intense.

L'hypothèse globale de cette phase est donc que la crédibilité de l'expérience émerge des affordances assumées. On peut donc en conclure que lors de la conception d'une expérience en réalité virtuelle il est important de veiller à ce qu'un maximum d'affordances perçues soit assumé par les schémas d'interaction.

8.2.3 Acceptation de se prendre au jeu et implication de l'utilisateur

Face à une expérience qu'il juge crédible, l'utilisateur accepte de se prendre au jeu de l'expérience. Rappelons que la satisfaction de l'intérêt de l'utilisateur est une étape qui a eu lieu en amont. Cette acceptation est une phase similaire à la suspension consentie de l'incrédulité introduite par Coleridge [Col69] et exploitée par le modèle de Wirth et al [WHB⁺07]. Ainsi, l'expérience présente une crédibilité suffisante pour que l'utilisateur accepte de se prendre au jeu et donc, passe outre les défauts de l'immersion, les attentes non satisfaites, les affordances non assumées et tout simplement sa conscience de la virtualité de la situation. Nous pensons cette étape d'acceptation obligatoire dans le chemin menant à la présence. Cette étape s'accompagne d'un enthousiasme qui efface les signaux allant à l'encontre de l'expérience. L'utilisateur peut alors s'impliquer pleinement dans l'expérience. La notion d'implication est ici conforme à celle que l'on peut trouver dans la littérature. Schubert et al [SFR01] la définissent comme un état psychologique où toute l'énergie et l'attention de l'utilisateur sont focalisées sur l'expérience. Autrement dit l'environnement virtuel devient l'environnement de référence pour l'utilisateur [RvdH02]. L'expérimentation présentée section 15.3.6 (page 181) montre que les participants ayant ressenti un fort degré d'implication ont également ressenti un sentiment de présence plus élevé que la moyenne des participants. Ce résultat semble donc confirmer la rôle de l'implication dans l'émergence de la présence.

Lepecq et al [LBP⁺09] ont mené une étude intéressante, celle-ci consiste à considérer la réaction comportementale des utilisateurs face à une affordance donnée, comme une méthode objective pour évaluer le sentiment de présence. L'expérience est la suivante. L'environnement virtuel proposé consiste en deux salles reliées par un passage de largeur variable. Les participants doivent passer d'une pièce à l'autre en marchant, la taille du dispositif de réalité virtuelle permet aux participants de se déplacer réellement par la marche pour rejoindre l'autre pièce. L'hypothèse est la suivante : si lorsque le passage est trop étroit pour pouvoir être traversé de face, les participants tournent leurs épaules pour ne pas se cogner contre les murs, alors cela signifie que les participants ressentent un sentiment de présence. Dix-sept des dix-neuf participants ont effectivement tourné les épaules pour rejoindre l'autre pièce, ces dix-sept participants ont donc bien ressenti un sentiment de présence. Les deux derniers participants ont par contre toujours traversé le passage de face, et ce même lorsque la largeur du passage est inférieure à la largeur de leurs épaules. Suivant notre modèle il est possible que cette expérience n'ait pas satisfait les attentes intellectuelles de ces deux participants, ils n'ont par exemple pas ressenti d'intérêt pour cette expérience. De fait, leur attention ne s'est pas portée sur l'expérience

et ils n'ont peut-être tout simplement pas perçus l'affordance dans l'environnement. Une autre raison est que ces participants n'ont pas accepté de se prendre au jeu, autrement dit ils n'ont pas passé outre leur conscience de la virtualité de la situation, auquel cas pourquoi tourner les épaules puisque les murs sont virtuels.

Tous les processus précédents la phase d'acceptation de se prendre au jeu sont inconscients. Or, comme nous l'avons indiqué chapitre 5.2 (page 49) le sentiment de présence est une expérience subjective vécue consciemment. Schubert [Sch09] propose une remarque pertinente : alors que les processus cognitifs sous-jacents à la présence sont des processus inconscients, l'expérience en elle-même est consciente. Autrement dit, comment une expérience consciente émerge de processus inconscients ? Nous proposons l'acceptation de se prendre au jeu comme réponse à cette question. En effet, tous les processus précédents cette étape (jugement des attentes, des affordances etc.) sont inconscients. Or, l'acceptation de se prendre au jeu est consciente, il s'agit d'un acte volontaire et réfléchi. Nous avançons donc que l'acceptation de se prendre au jeu est l'étape intermédiaire qui permet de passer de processus inconscients à la présence qui est une expérience consciente.

Nous considérons le jugement de la crédibilité, l'acceptation de se prendre au jeu et l'implication comme des étapes sur la route de la présence et non pas comme des composantes ou des marqueurs de la présence comme cela est le cas pour les modèles de Lessiter et al [LFKD01] et Schubert et al [SFR01].

8.2.4 Émergence des composantes de la présence et de la présence globale

Les attentes de l'utilisateur sont globalement satisfaites, les affordances globalement assumées, l'utilisateur accepte de se prendre au jeu et focalise son attention et son énergie sur l'expérience. Toutes les conditions sont alors réunies pour qu'émergent les quatre composantes de la présence (voir section 6.4 page 53). L'utilisateur, alors, incarne pleinement le rôle que lui dédie l'expérience. Rappelons que ces quatre composantes sont la présence environnementale (ou spatiale), la présence de soi, la présence sociale et la présence d'action.

Notre modèle (voir figure 31 pour une illustration) a comme point de départ notre framework de conception d'applications en réalité virtuelle présenté au chapitre 7.4 (page 68). Celui-ci est conçu pour correspondre à tout type d'expériences en réalité virtuelle. Ce modèle tient compte du rôle de l'utilisateur dans l'émergence de la présence. De plus, notre hypothèse concernant les affordances assumées s'applique à tout type d'affordances perçues dans l'environnement, une affordance peut donc être associée à telle ou telle composante de la présence. Par exemple, l'affordance communication influe sur la présence sociale, l'affordance marche influence la présence environnementale et la présence d'action.

C'est pourquoi, nous considérons que notre modèle mène aux quatre composantes de la présence et non pas seulement à la présence spatiale.

L'étude présentée dans la section 15.3.7 (page 183) passe au crible de notre modèle, deux expérimentations effectuées sur deux dispositifs de restitution visuelle différents. La cohérence des résultats obtenus nous encourage à penser que cette évaluation est une

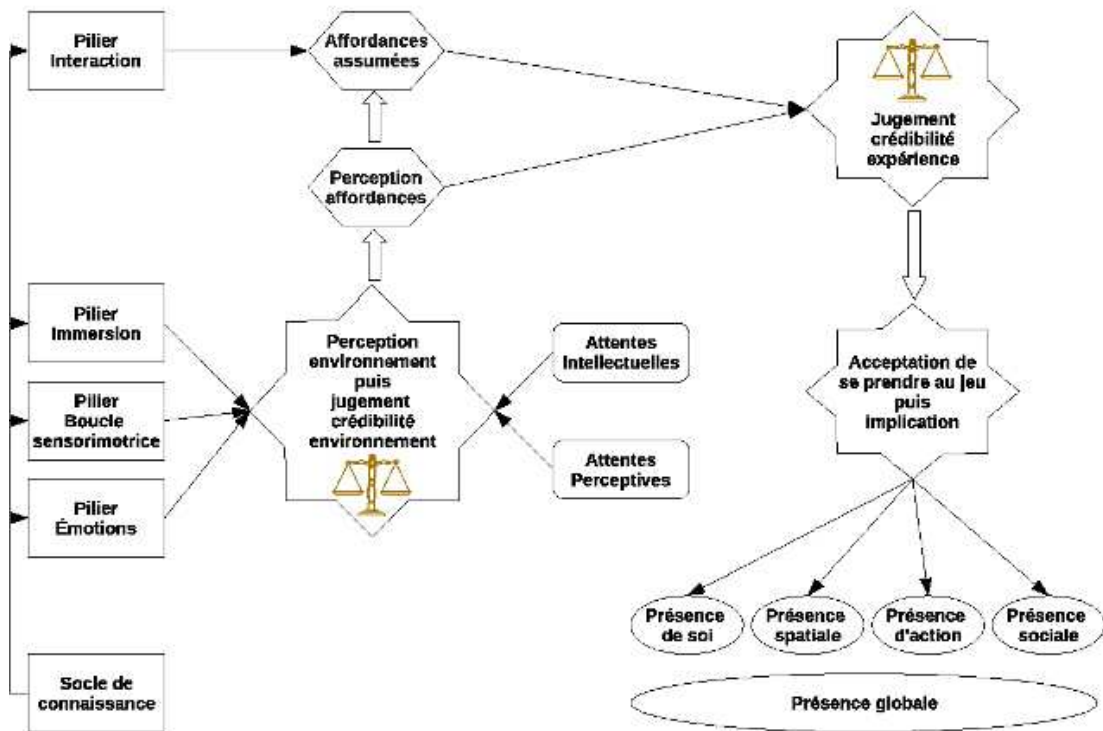


FIG. 31: Notre modèle complet de la présence.

première validation de la pertinence de notre modèle.

8.2.5 Crédibilité

Crédibilité et photoréalisme

Par deux fois, nous avons abordé le thème de la crédibilité, crédibilité de l'environnement puis crédibilité de l'expérience. Contrairement aux modèles précédents et à un grand nombre d'articles, nous ne considérons pas le réalisme (principalement visuel) comme un des facteurs clé de la présence. La notion de réalisme renvoie à la notion de réalité physique, on cherche par exemple à utiliser des algorithmes simulant différents phénomènes réels : propagation de la lumière ou du son, calculs des ombres, interférences etc. Or, dans notre modèle nous mettons en avant l'importance de l'utilisateur, la présence est un sentiment subjectif qui donc ne peut émerger sans l'aval de l'utilisateur. Une des étapes majeures de notre modèle est que l'utilisateur accepte de se prendre au jeu de l'expérience. C'est pourquoi nous préférons la notion de crédibilité qui, contrairement au réalisme, est subjective.

Le deuxième point clé de notre modèle concerne les affordances. Aussi, nous considérons que la description d'un environnement virtuel est de qualité suffisante si celle-ci permet à l'utilisateur de percevoir les affordances. De fait, il n'est pas nécessaire de disposer d'un environnement photoréaliste pour percevoir les affordances.

L'étude menée par Brogni et al [BVSS07] consiste à exposer les participants à un

environnement urbain où les passants peuvent avoir une apparence réaliste ou de type dessin animé. Les résultats montrent que la présence est meilleure pour les visages non réalistes. Il est vrai que l'homme est particulièrement sensible aux imperfections dans une représentation virtuelle d'un humain. Par exemple dans le film d'animation Shrek, l'ogre Shrek est beaucoup plus crédible que le prince qui a pourtant des traits humains.

Dans la section 2.3 (page 21) nous avons mentionné la reprise de l'expérience de Milgram par Slater et al [SAD⁺06]. Nous ne revenons pas sur la description de cette expérience. Bien que les participants soient conscients de la virtualité de la situation et que l'avatar de la victime ne soit absolument pas photoréaliste, les participants ont eu des réactions similaires (physiologiques, émotionnelles et éthiques) mais d'intensité moindre que celles constatées lors de la version originale de l'expérience. Ainsi, le contexte de l'expérience et probablement la présence d'un matériel qui afforde de moduler l'intensité de la décharge électrique et de la déclencher ont rendu cette expérience non pas réaliste mais crédible.

L'étude initiée par Slater et al [SKMY09] évalue l'intensité du sentiment de présence en fonction du réalisme visuel de l'environnement. Deux environnements représentant une même scène virtuelle sont proposés. Dans cette scène l'observateur surplombe une salle en contre-bas, une sensation de vertige peut donc être ressentie. La scène représente une pièce dont le sol est percé. Le premier environnement est obtenu par tracé de rayons, le deuxième par lancer de rayons. Ce dernier est considéré plus réaliste car il permet de calculer des effets visuels supplémentaires comme les réflexions dans un miroir et le calcul de l'ombre projeté de l'utilisateur (voir les figures 32 et 33 pour des illustrations). Les résultats de cette étude montrent que la présence ressentie est plus élevée dans l'environnement réaliste. Une autre façon d'interpréter ces résultats est de considérer que l'ombre projetée n'est pas réaliste mais crédible. Comme le montre la figure 33 celle-ci est très carrée, elle ne représente donc certainement pas l'ombre réelle du participant. Par contre son affichage rend l'environnement plus crédible, ce qui conduit par la suite à un sentiment de présence plus élevé.

L'étude que nous présentons section 15.3.3 (page 179) indique que les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence ont évalué positivement la crédibilité mais aussi le réalisme de l'environnement et de l'expérience. Ceci semble donc indiquer que le jugement de la crédibilité est un critère pertinent. Le tableau 15.7 montre que le jugement de la crédibilité obtient des notes plus élevées et plus en rapport avec l'évaluation de la présence que le jugement du réalisme. Toutefois, ce constat reste assez mince pour pouvoir confirmer que le jugement de la crédibilité est plus fiable que celui du réalisme.

Crédibilité et imagination

Bien que nous n'adhérons pas à la théorie des trois pôles de Biocca [Bio03] (voir section 5.1.2 page 45), nous pensons utile voire peut-être nécessaire d'exploiter l'imagination de l'utilisateur. Cela signifie qu'il faut laisser dans l'environnement virtuel une certaine latitude pour l'interprétation et l'imagination. Prenons un autre paradoxe du livre, pourquoi les lecteurs d'un livre sont souvent déçus de l'adaptation cinématographique de celui-ci ? Une des raisons est que le livre laisse beaucoup plus de place à l'imagination pour se représenter ses propres visages, ses propres lieux etc. De fait dans un film les choix du



FIG. 32: Vue de la scène obtenue par lancer de rayons. On peut remarquer que le reflet de l'avatar de l'utilisateur est affiché dans le miroir au fond de la pièce. *Source : [SKMY09]*



FIG. 33: Dans la scène calculée par lancer de rayons l'ombre projetée de l'avatar peut être affichée. *Source : [SKMY09]*

réalisateur ne correspondent peut-être pas aux représentations du lecteur. Il est intéressant de noter que l'acte d'imaginer qu'il soit relatif à une image ou à un son active les mêmes zones du cerveau que si la situation est réellement perçue [KGT01].

Notre hypothèse est que l'utilisateur jugera plus crédible une situation ou un environnement si une partie de ceux-ci est imaginée à son idée plutôt qu'imposée. De fait les attentes de l'utilisateur sont plus facilement remplies. Nous nous demandons donc si une solution ne consisterait pas à proposer des environnements en partie symbolique. Lors de la conception de ces environnements on se contentera de proposer les stimuli nécessaires et suffisants pour permettre la compréhension de la scène et la perception des affordances. Le pouvoir de l'imagination de l'utilisateur viendra en quelque sorte combler les trous laissés par la représentation minimaliste de l'environnement. L'utilisateur est alors libre d'imaginer que la porte est en chêne massif ou en verre, l'important restant que cette porte afforde d'être ouverte pour passer dans une autre pièce. Ce type d'environnement serait par exemple défini par les contours des objets. L'environnement dans sa totalité ne sera probablement pas représenté ainsi. Le ratio entre représentation et interprétation dépend bien entendu du type d'applications, celui-ci sera différent pour une simulation ou pour une application ludique. Il faut également tenir compte du fait que la restitution de l'environnement virtuel est multimodale. Il serait donc nécessaire en amont d'étudier comment l'homme perçoit et interprète un environnement complexe et multisensoriel.

Lors d'une expérience sur la phobie sociale (la peur de parler en public), Herbelin et al [HRVT02] ont proposé un environnement virtuel où le public est seulement représenté par des photos de regard. Malgré le non réalisme de la représentation visuelle les participants ont ressenti de l'anxiété et leur rythme cardiaque s'est accéléré. Les auteurs ont conclu de l'expérience que même un environnement virtuel non réaliste peut susciter des émotions. Cette expérience est intéressante et nous montre qu'une représentation symbolique des stimuli peut suffire à générer des émotions. Bien entendu le contexte phobique de l'expérience est à prendre en compte. De plus, il ne faut pas confondre réponse émo-

tionnelle et présence. C'est pourquoi nous pensons que pour générer la présence à partir d'environnements symboliques il faut proposer des environnements multimodaux exploitant le son et idéalement l'odorat qui ont tous deux un pouvoir de suggestion bien plus fort que l'image. Faîtes entendre une ambiance de souk marocain ou sentir une odeur de pain au chocolat chaud et vous serez transporté beaucoup plus efficacement qu'avec n'importe quelle représentation visuelle. On perçoit donc de suite les contraintes technologiques à relever et les efforts à fournir pour identifier puis proposer des stimuli efficaces.

8.3 Bilan de notre approche unifiée de la présence

Notre approche de la présence a donc une dimension technique puisqu'elle prend en compte le rôle de l'immersion et de l'interaction. Elle a aussi une considération psychologique puisque nous intégrons des processus cognitifs et les caractéristiques de l'utilisateur dans l'émergence de la présence. De plus, nous estimons le contenu, les émotions portées et l'imagination comme des facteurs pouvant influencer sur la présence. Enfin, le cœur de notre approche est écologique car nous considérons d'une part que l'important n'est pas la réalité physique de l'environnement mais la crédibilité de l'expérience, et d'autre part que les affordances perçues et assumées sont une étape clé du chemin menant à la présence. C'est pourquoi nous pensons avoir proposé une approche unifiée de la présence.

Enfin, une des forces de notre approche unifiée est que celle-ci peut s'adapter au contexte applicatif de l'expérience et accentuer tantôt le côté psychologique tantôt le côté technologique. La dimension écologique étant au cœur de notre modèle celle-ci est stable.

8.4 Implications de notre approche unifiée de la présence

Notre modèle de la présence a des implications multiples. Nous pouvons d'ores et déjà citer les trois exemples suivants.

8.4.1 Présence et jeux vidéo

Dans la section 4.1 (voir page 35) nous identifions les clés de succès d'un jeu vidéo. Nous pouvons constater que ces différentes clés de succès ont un lien étroit avec les quatre composantes de la présence (voir section 6.4 page 53). De plus, pour un certain type de jeu vidéo (qu'il soit à finalité ludique ou sérieuse) l'identification du joueur est recherchée. Nous pensons que le concept d'identification présente des similitudes avec notre conception de la présence c'est-à-dire le sentiment d'exister et d'incarner un rôle dans l'expérience (voir section 5.2 page 49).

Par ailleurs, notre phase d'évaluation (voir section 15.3.5 page 181) montre que les participants ayant ressenti un sentiment de présence élevé ont également éprouvé plus de plaisir à jouer que l'ensemble des participants.

C'est pourquoi, nous considérons que la présence en général et notre modèle en particulier pourraient constituer une grille d'analyse intéressante pour les jeux vidéo (à finalité

ludique ou sérieuse).

8.4.2 Présence et dispositifs de réalité virtuelle

Dans la section 3.1.1 (page 25) dédiée aux dispositifs de réalité virtuelle couteux et statiques nous présentons plusieurs dispositifs qui rivalisent de gigantisme. Au regard de notre modèle de la présence, il nous semble légitime de poser la question suivante : est-ce qu'un dispositif plus modeste n'est pas suffisant pour proposer un environnement virtuel crédible, pour y percevoir des affordances, pour en assumer une majorité afin que l'utilisateur accepte de se prendre au jeu puis s'implique et enfin ressente un sentiment de présence ?

8.4.3 Présence et conception logicielle

Dans notre modèle de la présence et en plusieurs points de ce document, nous insistons sur le fait de mettre l'utilisateur au centre de l'expérience. Ceci implique qu'il est nécessaire de faire entrer l'utilisateur très tôt dans la boucle du développement logiciel de l'expérience et non seulement à la fin lors de la phase de test par exemple.

Les principes de crédibilité et d'affordances assumées sont au cœur de notre modèle et conditionnent l'émergence du sentiment de présence. Ce deuxième point implique notamment de repenser complètement la façon de concevoir et programmer l'environnement virtuel. Alors que dans un processus de développement classique le concepteur/développeur va réfléchir à l'apparence (par exemple en synthèse d'image le développeur s'attache à la géométrie de la scène), nous incitons dorénavant les développeurs à penser en terme d'affordances perçues dans l'environnement virtuel. Plus largement il est nécessaire de s'intéresser à la signification de l'environnement virtuel pour l'utilisateur plutôt que uniquement à l'apparence de cet environnement. Cette préconisation incite donc également à introduire l'utilisateur très tôt dans la phase de développement du logiciel. Enfin, lors de la conception de l'application en réalité virtuelle, il faut veiller à minimiser les affordances que les schémas d'interaction ne peuvent assumer.

Troisième partie

Le son pour la réalité virtuelle

Le son fait partie intégrante de notre perception du monde, il est en effet très rare de se situer dans un environnement dénué de toute stimulation sonore. Lorsque ce non évènement sonore se produit, par exemple en montagne ou dans le désert, une sensation étrange presque inquiétante est ressentie. En règle général le son rassure, on se sent moins seul. Ceci constitue une des raisons qui militent pour que la stimulation sonore soit présente dans un environnement virtuel. Deuxièmement, ne pas percevoir de stimulation sonore peut provoquer un effet de manque chez l'utilisateur qui peut être préjudiciable à l'expérience et donc à l'émergence du sentiment de présence. Troisièmement, le son fournit des informations qui, croisées avec les autres perceptions (visuelles notamment) permettent une bonne compréhension de l'environnement.

Le premier chapitre de cette thèse présente brièvement les phénomènes physiques et physiologiques qui interviennent lors de l'émission d'un son, de sa propagation et enfin de son audition par l'homme. Le deuxième chapitre vise à identifier les multiples apports du son pour la réalité virtuelle. Le troisième chapitre décrit les processus qui aident l'homme à localiser une source sonore dans l'espace. Nous présentons alors les différents systèmes de restitution sonore employables en réalité virtuelle. Le quatrième chapitre concerne le phénomène de la réverbération sonore. Nous présentons les différents algorithmes exploitables en réalité virtuelle. Enfin, le dernier chapitre décrit la chaîne de rendu sonore mis en place dans notre dispositif de réalité virtuelle et propose un algorithme pour le calcul de la réverbération sonore dans un environnement complexe et dynamique.

Pour cette partie nos contributions sont donc premièrement un état de l'art que nous espérons assez complet sur le son pour la réalité virtuelle. Puis nous présentons la chaîne de rendu sonore exploitée dans notre dispositif de réalité virtuelle. Enfin, nous proposons un nouvel algorithme pour le calcul de la réverbération sonore dans un environnement complexe et dynamique. Notre méthode est une évolution de l'algorithme du lancer de frustum. Nous nous appuyons sur la perception humaine pour définir une sphère d'acuité sonore. L'idée originale de notre méthode est d'effectuer les lancers de frustum non pas depuis la source sonore comme cela se fait classiquement, mais depuis l'auditeur en se servant de la sphère d'acuité sonore comme cadre pour optimiser les calculs. Ceci doit permettre d'obtenir une réverbération en temps réel dans un environnement complexe et dynamique avec une qualité suffisante pour leurrer l'audition de l'utilisateur.

Chapitre 9

Le son : de la génération jusqu'à la perception

Dans ce chapitre nous traitons de la réalité physique du son. Dans un premier temps nous expliquons la génération d'un son et sa propagation dans l'environnement. Puis, nous présentons les processus physiologiques permettant la perception humaine du son.

9.1 Génération et propagation

Le son résulte de la vibration d'un objet ou de son déplacement. Les ondes sonores sont des ondes mécaniques, elles requièrent donc un médium qui fait office de support à la propagation. Si ce milieu est élastique le passage de l'onde sonore provoque une oscillation des molécules autour de leur position d'équilibre. Cela se traduit par une alternance de régions de compressions et de raréfactions des molécules constituant le milieu (voir figure 34). Précisons qu'il n'y a pas réellement de déplacement de molécules ou de matières mais bien seulement une oscillation. Si l'on prend l'exemple de la propagation dans l'air, les molécules d'air sont d'abord comprimées à l'avant de l'onde puis relaxées. En oscillant, les molécules poussent ou tirent les molécules avoisinantes et donc provoquent de nouvelles compressions et raréfactions. Ainsi, de proche en proche, l'onde acoustique se propage dans le médium. Dans la plupart des cas la propagation de l'onde sonore est omnidirectionnelle. L'onde se propage et s'étend dans tout le milieu de façon similaire aux vagues causées par le jet d'une pierre dans l'eau. La zone couverte par la propagation de l'onde sonore est appelée champ sonore.

Ce champ sonore peut être mesuré via les variations de pression acoustique, celles-ci correspondent à l'énergie sonore transmise chaque seconde au travers d'une unité de surface du champ sonore. Ces variations s'expriment en Newton par mètre carré ou en Pascal. L'amplitude de cette variation correspond à la différence entre la pression du milieu au repos et sa pression à un moment donné (pour une illustration voir la courbe du bas correspondant aux changements de la pression sur la figure 34). Cette amplitude définit l'intensité du son. L'éventail des intensités auquel l'homme est sensible est très large, aussi une échelle logarithmique est préférée plutôt qu'une directe différence de pression.

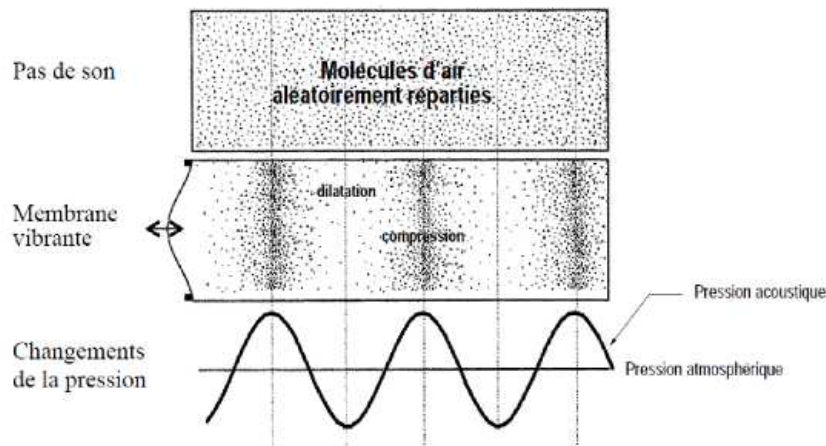


FIG. 34: La propagation d'une onde sonore consiste en une alternance de régions de compressions et de raréfactions des molécules constituant le milieu. *Source : [Tsi98]*

Le niveau de pression sonore est alors exprimé en décibel (dB) selon la formule suivante :

$$P = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

où P est le nombre de décibels (dB) correspondant au ratio entre la pression courante P_1 et une pression de référence P_0 égale à 20 micropascals. Avec cette formulation un niveau sonore de 6dB correspond au doublement de la pression de référence.

La fréquence de l'onde (exprimée en Hertz) influe sur la hauteur du son perçu. Une fréquence basse est perçue comme un son grave, une fréquence élevée comme un son aigu. La portion du spectre sonore audible pour l'homme est comprise entre 20Hz et 20kHz. En dessous de 20Hz on parle d'infrasons, au dessus de 20kHz il s'agit d'ultrasons. Le ratio entre les deux bornes de la perception auditive humaine est donc de 1000, ceci correspond à presque 10 octaves¹⁷. Par comparaison le spectre visible pour l'homme représente moins d'une octave ($4.10^{14} - 7.10^{14}$ Hz). Cette différence entre le son et la lumière implique que les phénomènes relatifs à la propagation sont plus variés et complexes pour le son que pour la lumière. Nous aborderons ce point dans le chapitre 12 (page 121).

Le médium servant de support impacte la propagation de l'onde. Au cours de celle-ci une partie de l'onde est absorbée par le médium ce qui modifie le spectre de l'onde. Cette absorption dépend bien entendu de la distance parcourue dans le médium mais aussi des caractéristiques de celui-ci. Par exemple, dans l'air la température, le taux d'humidité mais aussi la présence éventuelle de vent influent sur la propagation de l'onde. L'absorption de l'onde dépend également de sa fréquence, les hautes fréquences sont absorbées plus rapidement que les basses et par conséquent les basses fréquences portent plus loin. De même, les caractéristiques du milieu influent sur la vitesse de propagation de l'onde sonore. Celle-ci est de l'ordre de 340 m.s^{-1} dans l'air et de 1000 m.s^{-1} dans l'eau.

¹⁷Une octave correspond au doublement d'une fréquence.

9.2 La perception du son par l'homme

Nous expliquons dans cette section comment une variation de pression est transformée en impulsion électrique compréhensible par le cerveau. Cette transformation se déroule dans les trois régions anatomiques distinctes qui composent l'oreille : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. L'organisation globale de l'oreille est visible sur la figure 35. Nous ne traitons que succinctement ce processus, nous renvoyons le lecteur intéressé au chapitre dédié du Springer Handbook of Acoustics [You07].

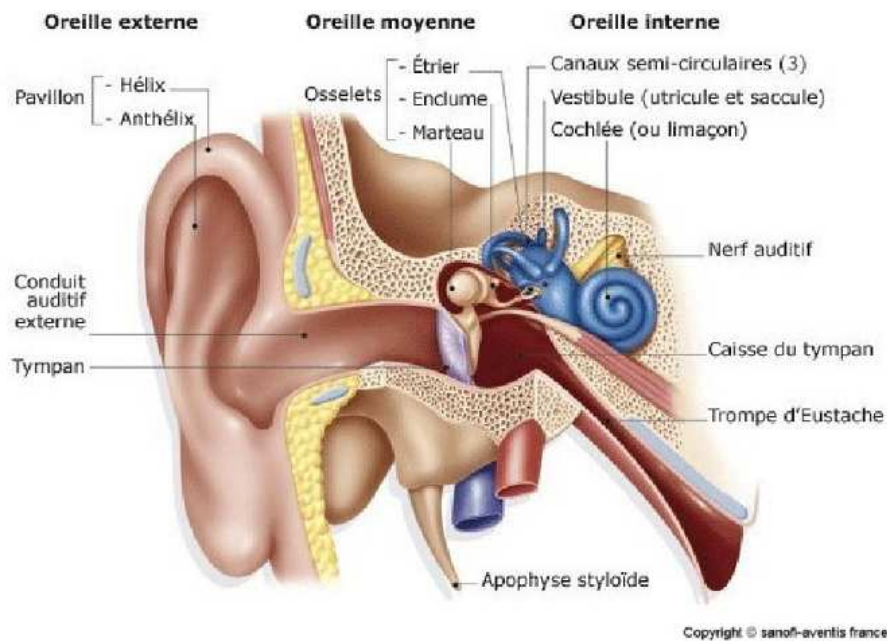


FIG. 35: Schéma de l'oreille humaine. L'oreille est composée de trois régions anatomiques distinctes : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. *Source : sanofi-aventis france*

9.2.1 L'oreille externe

L'oreille externe se compose du pavillon et du canal auditif. La forme du pavillon en entonnoir permet une captation du son plus efficace puis concentre l'onde en direction du canal auditif. Le pavillon a une configuration particulière faite de bosses et de creux qui est propre à chaque auditeur. Ces reliefs provoquent de multiples réflexions et diffractions qui modifient le spectre du son. Ces modifications du spectre sont exploitées par la suite pour localiser une source sonore. Nous examinons le phénomène de localisation d'une source sonore dans le chapitre 11 (page 109). L'onde se propage alors dans le canal auditif jusqu'à rencontrer le tympan.

9.2.2 L'oreille moyenne

Suite à la rencontre entre l'onde sonore et le tympan, celui-ci va osciller à son tour. Les oscillations du tympan propagent les variations de pression jusqu'à l'oreille interne par l'intermédiaire de trois osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Jusqu'ici les ondes se propagent dans un milieu d'impédance faible ¹⁸, or dans l'oreille interne se situe l'organe de l'audition appelé cochlée. Celle-ci est un organe creux rempli d'un liquide dont l'impédance est forte. Le tympan transmet donc les vibrations aux osselets dont le rôle est de transmettre et d'amplifier les vibrations sonores afin de contrebalancer l'impédance forte de la cochlée.

9.2.3 L'oreille interne

Le rôle de l'oreille interne est de transformer l'onde mécanique sonore en information bio-électrique. L'oreille interne est composée de la cochlée et du vestibule. Ce dernier est chargé de la perception de l'orientation et de l'accélération de la tête. La cochlée est un organe creux rempli d'un liquide appelé endolymphe. Elle a la forme d'un long cône enroulé en spirale et est tapissée de cils. Ces cils sont mis en mouvement par les vibrations acoustiques transmises par l'oreille moyenne. Chaque cil oscille plus particulièrement pour une fréquence donnée puis transmet une impulsion électrique au cerveau par l'intermédiaire du nerf auditif. La spécialisation d'un cil pour répondre à une fréquence donnée permet par la suite au cerveau de distinguer la hauteur des sons.

¹⁸L'impédance acoustique caractérise la résistance qu'un milieu oppose à sa mise en mouvement lorsqu'il est traversé par une onde acoustique.

Chapitre 10

Apports du son pour la réalité virtuelle et la présence

Ce chapitre présente les multiples apports du son pour une expérience en réalité virtuelle.

10.1 Apport pour l'immersion

Le son fait partie intégrante de notre perception du monde. Si l'expérience virtuelle ne propose pas de stimulation sonore alors l'utilisateur risque de ressentir un phénomène de manque [GW95] qui est préjudiciable à l'immersion et probablement aussi, par extension, au sentiment de présence. De plus, l'immersion sonore évite à l'utilisateur d'entendre les sons provenant de l'environnement physique. Ceci permet de substituer plus efficacement l'environnement virtuel à l'environnement réel.

La partie sonore de l'immersion fournit des informations supplémentaires qui, combinées ou non avec les autres informations sensorielles reçues par l'utilisateur permettent une meilleure compréhension de l'environnement [BA06]. Par exemple, un calcul de réverbération fournit des informations sur la nature et le volume de l'endroit où se trouve l'utilisateur [LV07]. Une cathédrale n'a pas la même réverbération qu'une bibliothèque ou qu'une scène en extérieure. Le son peut également aider l'utilisateur à estimer la position d'objets sonores dans l'espace tant pour la direction que la distance. De plus, contrairement à la vision, la perception auditive est omnidirectionnelle et permanente. Ceci offre donc une liberté totale pour communiquer des informations à l'utilisateur.

Par ailleurs, le son a une forte capacité de suggestion qui laisse une plage de liberté à l'imagination de l'utilisateur. Par conséquent, le son est très efficace pour décrire un lieu ou une situation. De fait, le son dispose d'un grand potentiel pour transporter l'auditeur. Deux cas de figure se proposent alors. Soit une perception visuelle est disponible. Il est alors possible de se contenter de sons approximatifs car l'essentiel des informations servant à la compréhension de la situation est fourni par l'image. Soit, du fait du caractère omnidirectionnel de l'audition, l'évènement à l'origine du son n'est pas visible, il faut alors proposer des sons parfaitement identifiables par l'utilisateur [Chu02]. Par exemple,

il est courant que les attentes des auditeurs associées à une situation particulière soient différentes des sons que l'on aurait pu enregistrer dans une situation identique réelle. Ceci pointe encore une fois le rôle des attentes que nous avons déjà mentionné. On peut alors s'intéresser au travail des bruiteurs qui usent souvent de moyens détournés pour assurer une identification rapide des sources sonores.

10.2 Apport pour l'émotion

Nous avons déjà mentionné plusieurs fois l'importance que nous accordons aux émotions dans le processus menant à l'émergence de la présence. Peut-être plus que l'image, le son est capable de communiquer des émotions. Ceci est vrai pour le niveau diégétique où l'on peut choisir de faire entendre une porte qui grince, le bruit du tonnerre ou des rires d'enfants et au niveau esthétique par l'intermédiaire d'une musique d'ambiance par exemple. Nous rappelons que nous avons défini ces deux niveaux dans la section 7.2 (page 66). Nous considérons alors comme profitable de travailler avec des artistes qui sont à même de proposer des sons ayant une sémantique forte et efficaces pour susciter des émotions.

10.3 Le son comme canal de communication

Le premier point concerne bien évidemment la possibilité de communiquer avec des agents (vivants ou non) par la voix. L'affordance communication est alors assumée, mais nous ne revenons pas sur ce point. Si les agents ne sont pas vivants, la tâche devient alors plus ardue car il faut mettre en place un système de reconnaissance vocale efficace. De plus, si le dialogue est ouvert, une intelligence artificielle performante est nécessaire.

La voix de l'utilisateur peut aussi être utilisée comme outil d'interaction. C'est-à-dire que l'utilisateur peut communiquer de l'information au système par l'intermédiaire de sa voix pour indiquer un déplacement par exemple ou manipuler un objet. A priori ce schéma d'interaction ne permet pas d'assumer les affordances perçues. Toutefois, dans certaines conditions une interface à commande vocale peut se révéler utile. La voix peut communiquer une information au système par l'intermédiaire d'un ordre, mais elle peut aussi en communiquer par les intonations présentes. Si le système est capable de détecter les émotions portées par la voix on peut alors imaginer adapter l'environnement virtuel ou les événements à celles-ci.

Enfin, le son peut être utilisé comme canal pour communiquer, de façon non parlée, de l'information. C'est par exemple le cas pour signaler des situations d'urgence. Mais le son peut aussi constituer une dimension supplémentaire pour représenter des données, on parle alors de sonification de données. Childs et al [CP03] exploitent la spatialisation¹⁹ sonore pour représenter des données météorologiques, Taylor et al [TKB⁺07] utilisent le son pour faciliter la compréhension de la dynamique des fluides. Beaucoup de recherches existent pour remplacer les graphiques visuels par des graphiques sonores [NW08]. Une

¹⁹Restitution sonore en trois dimensions.

façon classique de procéder est de faire correspondre l'axe des ordonnées à des variations de fréquence et l'axe des abscisses à un décalage temporel. La spatialisation sonore peut aussi être utilisée comme aide à la navigation [DHBD04], [GNEC07]. Enfin le son peut servir comme outil de détection et de suivi des interlocuteurs lors d'applications de téléconférences [FR08].

Chapitre 11

La spatialisation sonore

Selon Blauert [Bla97], la seule information exploitée dans l’audition spatiale est la pression acoustique dans les canaux auditifs. Dans la première partie de ce chapitre, nous expliquons comment les variations de pression initiées par une source sonore sont interprétées pour localiser cette source dans l’espace. Dans un deuxième temps, nous présentons différentes méthodes exploitables en réalité virtuelle pour retranscrire un univers sonore.

11.1 La perception en trois dimensions

Par rapport à la vision, l’audition possède les caractéristiques suivantes : elle est omnidirectionnelle, ne peut être suspendue (les oreilles n’ont pas de paupières) et il est même possible d’entendre dans l’obscurité... Ces propriétés confèrent à l’audition un rôle d’alarme, elle sert à nous prévenir du danger. Entendre venir le danger est une bonne chose, mais savoir d’où il provient pour fuir dans la bonne direction est vital. Déterminer la provenance d’un son signifie connaître son azimuth (angle dans le plan horizontal), son élévation (angle dans le plan vertical) et la distance qui sépare la source de l’auditeur. Nous expliquons maintenant les mécanismes sous-jacents à cette capacité de localisation que possède l’homme. Une information complète à ce sujet est disponible dans les livres de Carlile [Car96b] et Blauert [Bla97].

11.1.1 La théorie Duplex

Le processus de localisation sonore est en partie expliqué par la *Théorie Duplex* initiée par Lord Rayleigh [Str07] en 1907. Cette théorie est née de l’observation suivante. L’homme a deux oreilles diamétralement opposées donc, en dehors du cas où la source sonore se situe dans le plan médian²⁰, le champ sonore est nécessairement différent au niveau de chaque oreille. Cette inégalité se traduit par une différence de temps d’arrivée et d’intensité entre les deux oreilles.

²⁰Le plan médian est le plan qui passe entre les deux oreilles de l’auditeur.

Différence interaurale de temps

La position des oreilles de part et d'autre de la tête implique que les chemins menant de la source sonore aux deux oreilles sont différents. De fait, l'oreille la plus proche de la source sonore est atteinte par l'onde sonore en premier. Cette différence de temps d'arrivée aux oreilles est nommée *différence interaurale de temps (DIT)*. Le délai est nul pour un son dans le plan médian mais est, au maximum, de l'ordre de 690 microsecondes pour une source située dans l'axe passant par les deux oreilles. La valeur de la DIT dépend bien sûr de la taille de la tête de l'auditeur mais aussi de la fréquence de l'onde sonore. Lorsque les longueurs d'onde ²¹ sont supérieures à la taille d'un obstacle – ici la tête de l'auditeur – alors les ondes sonores vont par diffraction, *contourner* la tête de l'utilisateur puis atteindre l'oreille opposée. Ce cas se présente pour les fréquences inférieures à 1500 Hz car la longueur d'onde correspondante est alors d'environ 22 cm soit approximativement la taille de la tête. La DIT est particulièrement perceptible pour des sons très brefs comme des clics, pour des sons continus une différence interaurale de phase est alors détectée.

Différence interaurale d'intensité

La tête représente un obstacle pour une onde, de fait, elle réfléchit les ondes sonores de longueurs d'onde inférieures à sa taille. Ainsi, une partie du spectre de l'onde sonore ne parvient pas à l'oreille opposée. Ceci provoque une différence de niveau sonore entre les deux oreilles, celle-ci est nommée *différence interaurale d'intensité (DII)*. Cette différence dépend de la taille de la tête et de la longueur d'onde de l'onde sonore. Ce phénomène apparaît pour les fréquences supérieures à 1500 Hz. Plus la longueur d'onde est petite par rapport à la taille de la tête, plus l'onde est réfléchi et donc plus la DII est sensible. Pour des hautes fréquences cette DII peut s'élever à 35 dB. Pour des fréquences inférieures à 1500 Hz la longueur d'onde est plus grande que la taille de la tête, l'onde contourne la tête et la DII est alors négligeable.

Les limites de la théorie Duplex

Contrairement à l'intuition de Lord Rayleigh, l'audition en trois dimensions ne peut s'expliquer seulement par la disposition diamétralement opposée de nos oreilles. L'audition monaurale permet elle aussi la localisation des sons dans l'espace [WK97]. Par ailleurs, cette théorie ne peut expliquer que l'homme soit capable de détecter la provenance d'une source sonore lorsque celle-ci se trouve dans le plan médian. Un autre problème provient de l'approximation initiale de la tête à une sphère. De fait, les différences interaurales ne sont pas associées à une position unique dans l'espace. Par exemple, des sources sonores positionnées en tout point de la surface d'un cône centré sur l'axe interaural, provoquent des différences interaurales identiques. Ce cône de confusion, représenté sur la figure 36, est particulièrement gênant dans les situations où la source sonore est statique (et localisée au niveau du cône). Toutefois, l'auditeur peut remédier à cette confusion en ne gardant pas sa tête dans une position statique, par exemple en *tendant l'oreille*.

²¹La longueur d'onde est la plus courte distance séparant deux points de l'onde strictement identiques à un instant donné. Elle dépend de la célérité de l'onde et de sa fréquence. Soit λ une longueur d'onde, c la célérité de l'onde et f sa fréquence alors $\lambda = \frac{c}{f}$.

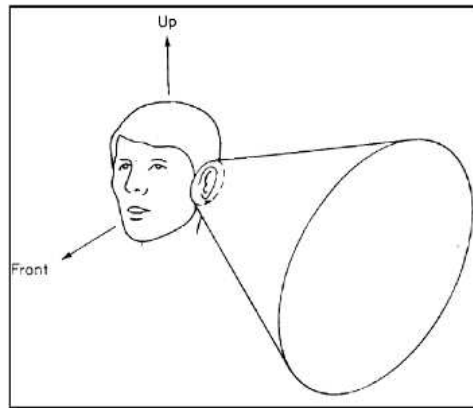


FIG. 36: Une limite de la théorie Duplex : le cône de confusion. Toutes les sources sonores positionnées à la surface du cône provoquent des différences interaurales identiques. *Source : [Car96b]*

11.1.2 Les indices spectraux

Nous rappelons que le spectre sonore audible pour l'homme est compris entre 20 Hz et 20 kHz. Si la propagation a lieu dans l'air cela correspond respectivement et approximativement à des longueurs d'onde de 20 mètres et 2 centimètres. Ces longueurs d'ondes sont donc du même ordre de grandeur que la majorité des éléments composant notre environnement. Avant de parvenir jusqu'au canal auditif les ondes sonores rencontrent le torse de l'auditeur, ses épaules, sa tête puis le pavillon des oreilles. Ces perturbations se traduisent par de multiples réflexions et diffractions qui modifient le spectre de la source sonore. Ces modifications créent un filtre qui dépend essentiellement de la fréquence de l'onde, de la position de la source par rapport à l'auditeur et de la physiologie de celui-ci. Ces filtres propres à chaque utilisateur sont nommés fonctions de transfert relatives à la tête (Head Related Transfer Functions en anglais). Par apprentissage, l'homme est capable d'associer une fonction de transfert à une localisation. Le rôle particulier du pavillon dans la localisation sonore a été mis en avant par les recherches de Batteau [Bat67]. Ces fonctions de transfert anatomiques sont particulièrement utiles pour estimer l'élévation d'une source mais aussi lever l'ambiguïté avant-arrière. Les fonctions de transfert encodent à la fois les différences interaurales vues précédemment et les modifications du spectre dues aux différentes réflexions et diffractions.

11.1.3 Loi du premier front d'onde

Dans un milieu réverbérant, les sons parviennent aux oreilles après avoir parcouru de multiples chemins. L'éventuel son direct est d'abord perçu puis arrivent les multiples sons issus des réflexions et diffractions. Le mécanisme qui permet à l'homme de localiser des sources sonores dans un milieu réverbérant est nommé *loi du premier front d'onde* ou *precedence effect* [LCYG99]. Ce phénomène psychoacoustique consiste en la non prise en compte des informations spatiales des signaux acoustiques parvenant à l'auditeur dans les 40 ms qui suivent l'arrivée du premier signal. Ainsi, seules les informations spatiales

du premier front d'onde sont exploitées pour localiser une source sonore dans un milieu réverbérant.

11.1.4 Perception de la distance

L'estimation de la distance d'une source sonore repose sur plusieurs indices. L'intensité du son varie avec la distance, 6 dB sont perdus à chaque fois que la distance est doublée. Plus le temps de propagation dans le médium est long (i.e. plus la source est éloignée) plus les aigus sont atténués. Toutefois, ce dernier indice est moins significatif que la variation d'intensité. Par exemple, pour un son de fréquence 4 kHz et pour une distance de 100 m l'atténuation n'est que de 3 à 4 dB [Beg94]. Autre indice, dans une salle plus le rapport entre son direct et son réverbéré est grand, plus la source est proche. Enfin, la familiarité constitue une aide précieuse, connaître au préalable un son permet d'en déduire plus précisément la distance et plus généralement sa localisation.

11.1.5 Approche multisensorielle de la localisation

Enfin, notons que la localisation d'une source sonore est influencée par d'autres sens que l'audition [AMS08]. Par exemple, si la source sonore et le stimuli visuel correspondant occupent des positions spatiales décalées, alors la source sonore semble provenir de la position du stimuli visuel. Les stimuli visuels capturent les stimuli sonores. On parle alors d'effet ventriloque [AB04].

Les mouvements de la tête affinent la localisation, l'homme tend l'oreille pour obtenir en quelque sorte une deuxième image sonore de l'environnement. Les sensations vestibulaires et proprioceptives sont alors combinées avec les différentes images sonores pour déduire une localisation plus précise.

11.2 Les systèmes et méthodes de restitution sonore

La capacité de localiser une source sonore dans l'espace étant comprise, voyons maintenant comment nous pouvons restituer un monde sonore à l'auditeur. Les systèmes de restitution sonore ont pour but, non seulement de décrire un environnement sonore de façon intelligible, mais aussi de permettre la localisation des sources sonores virtuelles. Nous ne revenons pas sur le rôle du son dans l'immersion et pour la présence. Pour immerger l'auditeur dans un monde sonore, il faut que le dispositif soit capable de recréer des stimuli similaires à ceux que l'utilisateur aurait perçu dans une scène réelle. Il faut donc, d'une part être capable de positionner une source sonore virtuelle en tout point de l'espace et d'autre part s'assurer de la qualité de la perception au niveau des oreilles de l'auditeur. Deux solutions matérielles s'offrent à nous : la restitution par casque et celle par enceintes. Nous verrons par la suite les différentes méthodes de restitution exploitables.

11.2.1 Restitution au casque

Lors d'une restitution au casque deux signaux sonores distincts sont transmis directement aux oreilles de l'utilisateur. Ces signaux simulent les différences interaurales de temps et d'intensité [TH92] présentées précédemment mais également les indices spectraux [CW01] que nous avons présentés dans la section 11.1.2. Ces fonctions de transfert étant propres à l'auditeur, il faut idéalement les avoir préalablement mesurées chez celui-ci. Malheureusement, cette méthode est longue et fastidieuse. L'auditeur est placé dans une salle anéchoïque où sont disposées à différents endroits de l'espace plusieurs enceintes. L'utilisateur est équipé de microphones placés dans ses canaux auditifs. Ces microphones enregistrent le son perçu après les multiples perturbations dues à la rencontre de son torse, de ses épaules, de sa tête et de ses pavillons. Suivant la finesse recherchée il faut multiplier les mesures correspondant à différentes positions de l'enceinte émettrice dans l'espace. Il est donc très peu courant d'exploiter les fonctions de transfert propres à un auditeur. Une autre solution consiste à utiliser des fonctions de transfert génériques. Celles-ci sont la plupart du temps mesurées sur des mannequins comme l'illustre la figure 37. Des techniques alternatives exploitant des photographies de l'auditeur [DPT⁺08] sont explorées pour reconstruire automatiquement et de façon suffisamment fine la tête de l'auditeur pour ensuite déduire ses fonctions de transfert.



FIG. 37: Mannequin en salle anéchoïque pour la mesure des fonctions de transfert génériques. *Source : [NIS]*

Le choix du dispositif de restitution n'est pas anodin, aussi nous pensons utile de préciser les avantages et inconvénients de la restitution au casque.

Avantages de la restitution au casque

Voici les avantages offerts par une restitution au casque :

- Un contrôle fin des signaux au niveau de chaque oreille est possible.
- De fait, le casque offre une bonne isolation phonique vis-à-vis des sons extérieurs à l’environnement virtuel. Or, empêcher la perception des stimuli provenant de l’environnement réel est un des deux rôles de l’immersion.
- La restitution par casque permet de ne pas se soucier de la réverbération propre à la salle de restitution.
- Ce type de restitution est multi-utilisateurs, la présence d’un utilisateur ne perturbe pas la perception d’un autre.

Inconvénients de la restitution au casque

Les avantages précédents s’accompagnent nécessairement d’inconvénients :

- Le port du casque est intrusif. De plus, après un certain temps d’utilisation son poids peut être une source d’inconfort et de fatigue.
- Si celui-ci n’est pas bien fixé, il peut bouger lors des déplacements de l’utilisateur. Ceci peut fortement pénaliser la qualité de la restitution.
- La différence entre les fonctions de transfert génériques et celles de l’utilisateur peuvent conduire à un certain nombre d’imprécisions au niveau de la perception spatiale [HVRVO98]. Ces imprécisions peuvent se traduire par un manque d’externalisation du son (le son est perçu comme intérieur à la tête) ou mener à une confusion avant-arrière [ZBS⁺06]. De plus, entre l’écouteur et l’oreille se crée une cavité qui possède sa propre réponse impulsionnelle. Cette dernière doit être prise en compte dans les fonctions de transfert.
- Les fonctions de transfert dépendent de la position et de l’orientation de la tête de l’auditeur. Il faut donc suivre finement ses mouvements. Ceux-ci peuvent en effet être de faible amplitude quand par exemple l’auditeur tend l’oreille. Ces mouvements doivent être détectés et intégrés pour assurer une bonne externalisation du son.
- Le son est une onde mécanique il se ressent donc dans tout le corps et non seulement au niveau des oreilles.
- Enfin la restitution des basses fréquences est souvent de qualité moyenne avec des écouteurs.

11.2.2 Restitution par enceintes

Selon la méthode de restitution par enceintes employée, un nombre très variable d’enceintes pour reproduire le champ sonore est requis. Si deux sont suffisantes pour les méthodes binaurales, plusieurs centaines sont nécessaires pour la méthode des Wave Field Synthesis. La finalité de ces différentes méthodes reste la même : positionner une source sonore virtuelle en tout point de l’espace alors qu’aucune source sonore réelle (typiquement une enceinte) ne s’y trouve. La figure 38 propose une illustration en stéréophonie.

Les avantages et inconvénients de la restitution par enceintes répondent souvent à ceux de la restitution au casque.

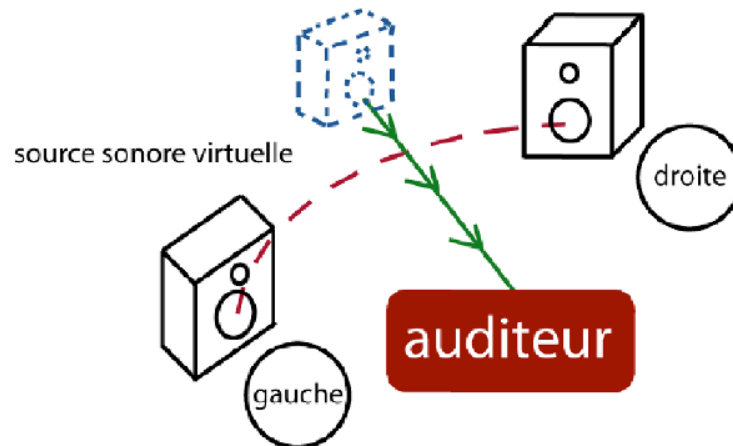


FIG. 38: Une source sonore virtuelle est positionnée entre deux enceintes

Avantages de la restitution par enceintes

Ainsi les avantages de la restitution par enceintes sont :

- Le dispositif est non intrusif et ne provoque ni gêne ni fatigue.
- Les enceintes stimulent l'ensemble du corps de l'utilisateur. Ainsi, une partie de l'onde sonore se propage aussi par l'intermédiaire de la mâchoire et de la boîte crânienne [VTJL⁺08].
- Les basses fréquences sont bien restituées. Celles-ci sont d'ailleurs plus ressenties qu'entendues.

Inconvénients de la restitution par enceintes

Bien entendu la restitution par enceintes s'accompagne d'un certain nombre d'inconvénients :

- La maîtrise des signaux au niveau de chaque oreille est moins fine.
- Si la salle de restitution n'est pas anéchoïque, il faut compenser l'effet de salle en calculant la réponse impulsionnelle propre à la salle.
- La zone d'écoute optimale est limitée. Pour palier à cela il faut rendre celle-ci soit mobile [AS09] soit plus large [RA01].
- Si l'expérience est multi-utilisateurs, leur présence perturbe la restitution sonore en provoquant des réflexions et diffractions non reliées à l'environnement virtuel.

Voyons maintenant les différentes méthodes de spatialisation sonore exploitant une restitution par enceintes.

11.2.3 Méthodes binaurales

En théorie, deux enceintes (une pour chaque oreille) sont suffisantes pour la spatialisation d'un son. Pour cela, il faut que la méthode de restitution exploite conjointement des fonctions de transfert (présentées section 11.1.2) et un mécanisme d'annulation des tra-

jets croisés [TN02], [TN08]. La figure 39 présente une illustration de ce mécanisme. Cette dernière méthode est utilisée afin qu'une oreille ne perçoive les stimuli que de l'enceinte qui lui est dédiée. Sans cela, chaque oreille perçoit les signaux émis par les deux enceintes. L'inconvénient de cette méthode est que la zone de restitution optimale est très étroite. Elle peut par contre être exploitée dans des situations où l'auditeur est statique. Cette méthode est par exemple utilisée dans les simulateurs puisque l'utilisateur demeure assis dans son siège.

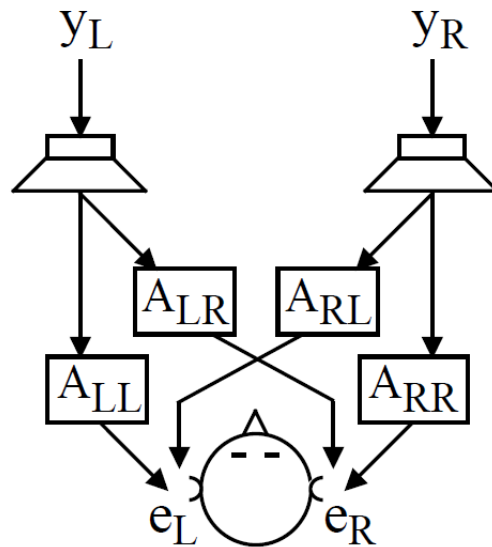


FIG. 39: Transmission directe et croisée des signaux aux oreilles de l'auditeur. Source : [Gar99]

11.2.4 La méthode des Wave Field Synthesis

La méthode des Wave Field Synthesis (WFS) initiée à l'Université de Delft [BdVV93], vise à reconstruire l'ensemble du champ sonore. Cette méthode se base sur le principe de Huygens selon lequel, à chaque instant, tout point du premier front d'onde peut être vu comme un émetteur de secondes ondelettes qui, combinées ensemble, forment un nouveau front d'onde (voir figure 40 schéma de gauche pour une illustration). Cette méthode permet en théorie une restitution parfaite. Malheureusement, pour cela elle requiert de disposer d'un très grand nombre de haut-parleurs. En effet, il faut que la distance entre chaque haut-parleur soit inférieure à la moitié d'une longueur d'onde. Or, pour les hautes fréquences celle-ci n'est que de quelques centimètres. D'où la nécessité de disposer d'un grand nombre de haut-parleurs pour rendre les hautes fréquences. Vorlander [Vor08] donne l'exemple suivant : pour reproduire un champ sonore dont les fréquences peuvent monter jusqu'à 10 kHz à l'intérieur d'un espace de 3m x 3m x 3m près de 50000 enceintes de taille 3 cm sont théoriquement nécessaires.

Une restitution sonore par WFS consiste à simuler la propagation d'une onde en jouant sur les délais et les gains de chaque enceinte (voir figure 40 schéma de droite

pour une illustration). Pour éviter tout conflit entre les fronts d'onde créés et les fronts d'ondes réfléchis par les murs de la salle de restitution, il est primordial que cette dernière soit anéchoïque. Compte tenu de ces différentes contraintes, cette méthode, bien que théoriquement parfaite, est difficilement exploitable dans le cadre d'un dispositif de réalité virtuelle.

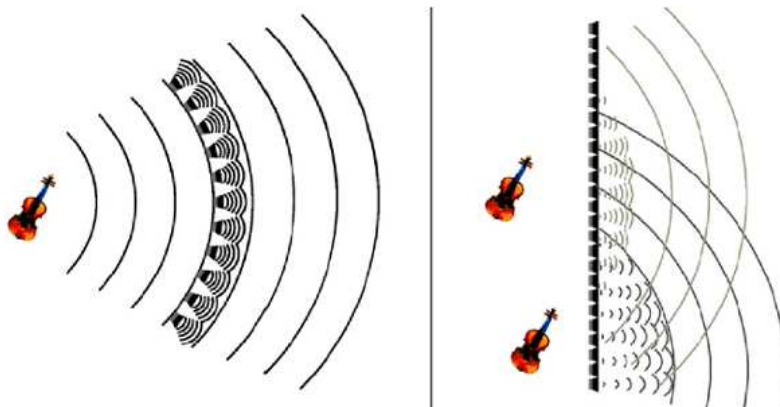


FIG. 40: A gauche. Principe de Huygens : les fronts d'ondes émis par la source se comportent comme un ensemble de sources secondaires localisées le long du front d'onde. A droite. Restitution par WFS : Les variations de gain et de délai entre les enceintes permettent de simuler la propagation des ondes. *Source* : [CC04]

11.2.5 La méthode Ambisonic

La méthode ambisonic est à l'origine une technique de prise de son exploitant le microphone *soundfield* [Far79]. Celui-ci exploite quatre canaux, le premier enregistre les variations de pression de façon omnidirectionnelle, les trois autres enregistrent les gradients de pression au niveau des trois axes X , Y et Z . La restitution sonore par méthode Ambisonic est initiée par Gerzon [Ger73], [Ger85]. Elle consiste à faire correspondre le signal émis par chaque enceinte, au signal qui aurait pu être enregistré par un microphone faisant face à l'enceinte. La méthode peut être utilisée avec quatre, six ou huit enceintes placées de façon symétrique autour de l'auditeur. Le même signal sonore est émis par toutes les enceintes mais avec des gains différents. Aussi, dès lors que l'auditeur sort de la zone optimale d'écoute et du fait de la loi du premier front d'onde, la source virtuelle semble localisée au niveau de l'enceinte la plus proche de l'auditeur. De fait, la précision de la localisation n'est plus assurée en dehors de cette zone d'écoute optimale.

Dans une étude récente, Guastavino et al [GLCB07] ont comparé les qualités spatiales (notamment la sensation d'enveloppement) et les qualités de localisation des méthodes Ambisonic, transaurale (composée de quatre enceintes : deux devant l'auditeur et deux derrière) et stéréophonique auprès de onze participants. Les résultats montrent que la méthode Ambisonic offre la meilleure sensation d'enveloppement. Par contre, la localisation de la source virtuelle est beaucoup plus efficace avec les deux autres méthodes.

11.2.6 La méthode des Vector Base Amplitude Panning

La méthode des Vector Base Amplitude Panning (VBAP) initiée par Ville Pulkki [Pul97] positionne une source virtuelle à l'intérieur d'un triplet d'enceintes. Pour cela, un facteur de gain propre à chaque enceinte du triplet est calculé. La localisation de la source virtuelle est possible grâce aux différences interaurales de temps et d'intensité induites par la sélection du triplet d'enceintes et la variation d'amplitude entre celles-ci. Si le dispositif de restitution exploite plus de trois enceintes une méthode de triangulation est employée pour déterminer le triplet optimal d'enceintes [PL98].

Trois vecteurs I_1 , I_2 et I_3 pointant en direction des trois enceintes sont définis (voir figure 41 pour une illustration). La provenance de la source virtuelle est elle représentée par un vecteur $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$. Le vecteur P est exprimé comme une combinaison linéaire des trois vecteurs enceintes I_1 , I_2 et I_3 :

$$P^T = gI_{123}$$

avec $g = [g_1 \ g_2 \ g_3]^T$, où g_1 , g_2 , g_3 sont les gains appliqués à chaque enceinte et $I_{123} = [I_1 \ I_2 \ I_3]^T$. Le vecteur g peut alors être déterminé en résolvant :

$$g = P^T I_{123}^{-1}$$

I_{123}^{-1} existe dès lors que I_{123} définit bien un espace en trois dimensions. L'équation précédente calcule les coordonnées barycentriques du vecteur P dans la base vectorielle définie par I_{123} . Une dernière étape consiste à normaliser ces gains puis à les appliquer aux enceintes.

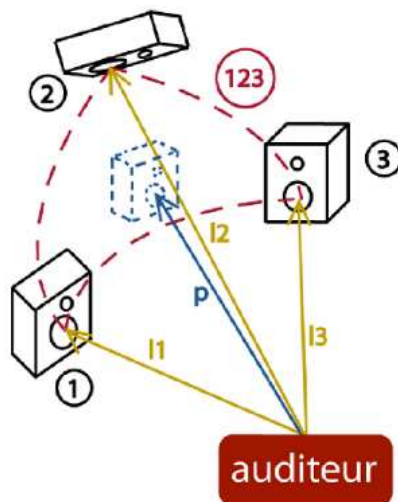


FIG. 41: Positionnement de la source sonore virtuelle par la méthode des Vector Base Amplitude Panning.

Du fait de sa base vectorielle, la technique des VBAP est indépendante de la disposition des enceintes dès lors que celles-ci sont à la surface d'une sphère dont le centre est la tête de l'auditeur. Cette méthode offre une localisation très précise dans le plan azimutal mais

elle l'est moins pour la perception de l'élévation. Si l'utilisateur sort de la zone d'écoute optimale alors la précision de la localisation décroît mais reste limitée à la zone définie par le triplet d'enceintes [Pul01]. De fait, la perte de qualité est moindre qu'avec d'autres méthodes telle que Ambisonic où l'ensemble des enceintes émettent un signal sonore. Enfin, la technique des VBAP a l'avantage d'offrir une grande flexibilité au niveau du placement des enceintes.

Grohn [Gro02] a comparé la précision de la localisation entre une restitution par casque exploitant des fonctions de transfert génériques (voir section 11.2.1) et une restitution par enceintes utilisant la technique des VBAP. Les résultats montrent que la VBAP permet une localisation plus précise que celle par écouteurs.

Chapitre 12

Les algorithmes de réverbération

Nous présentons dans ce chapitre les différentes méthodes exploitables en réalité virtuelle pour calculer en temps réel la propagation du son dans l'environnement virtuel. Comme l'explique la figure 42, la réverbération inclut un nombre de phénomènes physiques très importants. Une simulation complète de la réverbération devrait donc simuler l'ensemble de ces événements physiques.

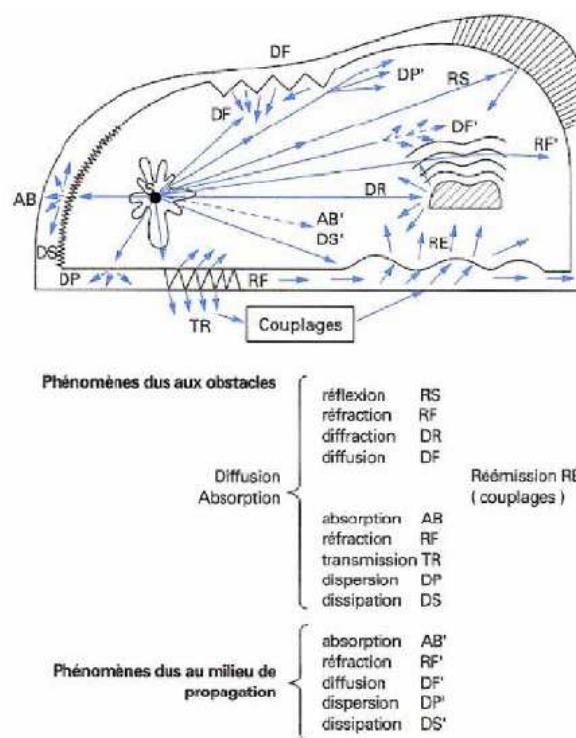


FIG. 42: Les différents modes de propagation des ondes sonores. *Source : [Jou97]*

En réalité virtuelle il n'est pas possible (ni nécessaire pour restituer un environnement sonore crédible) de simuler en temps réel l'ensemble de ces phénomènes. Aussi les différentes méthodes existantes se restreignent aux phénomènes suivants (voir figure 43 pour une illustration) :

- **La réflexion.** Si l'obstacle est une paroi parfaitement plane et rigide, de taille bien supérieure aux longueurs d'onde alors la réflexion est spéculaire et suit la loi de Snell-Descartes²². Il en est de même si les aspérités de l'obstacle sont de tailles très inférieures aux longueurs d'onde. Si la surface n'est pas plane ou que ses aspérités sont d'une taille de l'ordre de (ou supérieurs à) la longueur d'onde alors la réflexion est diffuse et suit la loi de Lambert²³. Rappelons que les longueurs d'onde dans le spectre de l'audible vont de 1,7 cm (pour une fréquence de 20 kHz) à 17 m (pour une fréquence de 20 Hz) dans l'air. Ces ordres de grandeur indiquent que dans notre environnement courant, les réflexions spéculaires et diffuses sont présentes. Pourtant, comme nous le verrons dans les prochaines sections de ce chapitre, pour des raisons de temps de calculs, les réflexions diffuses sont très souvent négligées. C'est notamment le cas pour les méthodes dites géométriques.
- **La diffraction.** Celle-ci intervient lorsque la longueur d'onde est similaire à la taille des obstacles et plus généralement lorsque les longueurs d'ondes sont de taille supérieure à celle des obstacles. Compte tenu des longueurs d'ondes du spectre sonore ce phénomène est très présent dans notre environnement. C'est notamment le cas dans les intérieurs des domiciles (à cause du mobilier). C'est grâce à ce phénomène qu'il est par exemple possible d'entendre une source sonore située derrière un bâtiment. L'auditeur est très habitué à ce phénomène, il est donc important de pouvoir le simuler pour augmenter le réalisme ou la crédibilité de la simulation. Tsingos et al [TFNC01] furent les premiers à proposer une méthode efficace capable d'approximer la diffraction.
- **L'absorption dans l'air.** Dans l'air, l'intensité de la radiation décroît de façon inverse au carré de la distance entre la source sonore et l'auditeur. La cause de l'absorption est la suivante. Le front d'onde en s'éloignant de la source, augmente de diamètre, et *contraint* l'énergie sonore à se répartir sur une surface sphérique de plus en plus grande. Les hautes fréquences sont atténuées plus rapidement, un filtrage peut donc être appliqué.
- **L'absorption des matériaux.** Lorsque une onde sonore rencontre un obstacle une partie de l'énergie acoustique est absorbée et transformée en énergie mécanique (vibrations).

Les méthodes permettant de sonoriser des environnements virtuels complexes et interactifs sont les méthodes géométriques. L'acoustique géométrique [Kut00] est fondée sur le concept suivant : les ondes sonores sont considérées non plus comme des ondes mais comme des rayons. Le principe est le suivant : les ondes sonores se déplacent en ligne droite, si elles rencontrent un obstacle alors les ondes sont réfléchies, réfractées et transmises de manière identique et ce, quelle que soit leur longueur d'onde. Ainsi, les ondes sonores sont réfléchies par les surfaces de façon exclusivement spéculaire. En théorie, l'acoustique géométrique n'est applicable que dans les cas où les longueurs d'onde sont petites par rapport aux dimensions des surfaces réfléchissantes. La longueur d'onde d'une onde sonore de fréquence 1000 Hz est d'environ 34 cm. Aussi, pour que cette onde soit réfléchi selon les lois de l'acoustique géométrique, les dimensions de la surface réfléchissante doivent

²²L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

²³L'énergie reçue est réémise de façon uniforme dans toutes les directions.

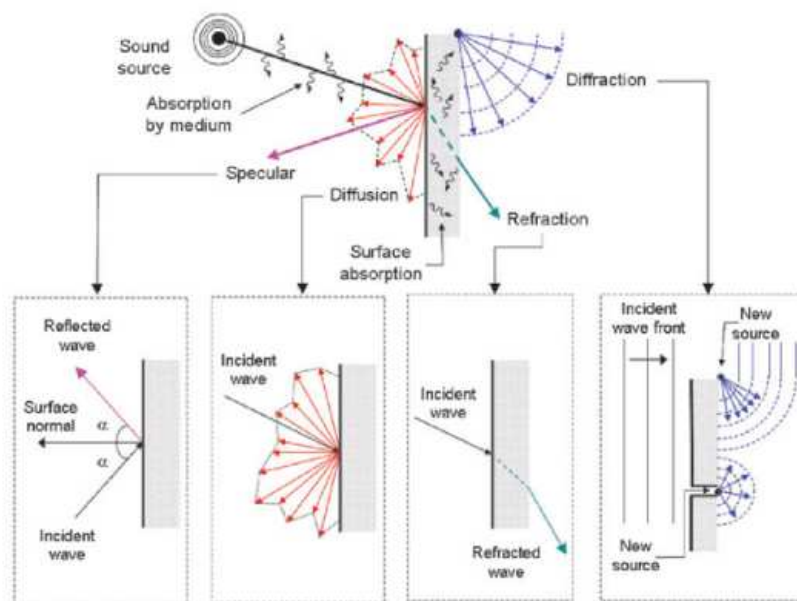


FIG. 43: Les phénomènes acoustiques simulés dans les environnements sonores interactifs.
 Source : [KJM04]

être deux à trois fois supérieures, soit 60 à 90 cm. L'acoustique géométrique n'est donc théoriquement plus applicable dès lors que les longueurs d'onde sont plus grandes que les dimensions des surfaces réfléchissantes. Elle est donc en théorie seulement valable pour les hautes fréquences.

Les méthodes géométriques sont au nombre de cinq et trouvent leurs inspirations dans des méthodes de synthèse d'images : les images sources, le lancer de rayon, le lancer de faisceaux, le lancer de frusta et le sonel mapping. Nous décrivons ces différentes méthodes dans les prochaines sections.

Afin d'être complet, précisons qu'il existe des méthodes numériques pour simuler la propagation des ondes sonores. Ces méthodes [CB91], [Leh03], [RGL08] cherchent à résoudre numériquement l'équation d'onde. Elles permettent d'obtenir des résultats très précis mais pour ce faire, elles nécessitent des temps de calculs absolument prohibitifs. De fait, elles ne sont pas adaptées pour des expériences interactives et se limitent à des environnements simples et statiques.

La finalité des différentes méthodes que nous présentons reste toujours la même : modéliser la propagation des ondes sonores dans l'environnement pour construire la réponse impulsionnelle de celui-ci. La réponse impulsionnelle est un filtre qui représente pour une source sonore donnée, les délais et atténuations correspondant aux différents chemins menant jusqu'à l'auditeur. À chaque chemin correspond une impulsion. Ces différents chemins sont essentiellement dûs aux phénomènes de réflexions, transmissions et diffractions qui constituent le phénomène de réverbération. La réponse impulsionnelle est composée de trois parties : le son direct, les réflexions précoces et les réflexions tardives (voir figure 44 pour une illustration). Enfin, une convolution entre cette réponse impulsionnelle et un flux sonore définit l'environnement sonore réverbéré qui est ensuite restitué à l'auditeur.

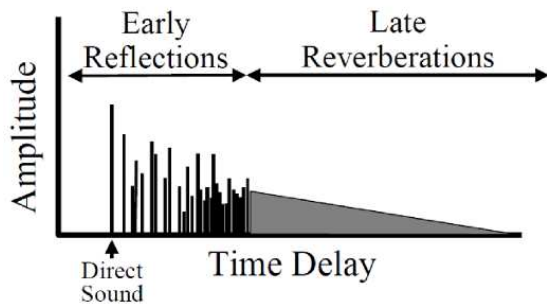


FIG. 44: Une réponse impulsionnelle est en trois parties : le son direct, les réflexions précoces et les réflexions tardives. La réponse impulsionnelle représente les propriétés acoustiques d'un environnement. *Source : [FTJ03]*

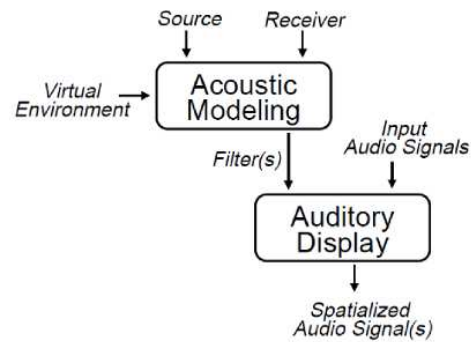


FIG. 45: Chaîne de rendu classique pour une spatialisation sonore. La réverbération sonore est calculée et aboutie à la construction d'une réponse impulsionnelle. Une convolution est alors effectuée entre la réponse impulsionnelle et le signal sonore de la source. Le résultat de cette convolution est alors spatialisé via le dispositif de restitution sonore. *Source : [FTJ03]*

La figure 45 décrit une chaîne de rendu classique pour une spatialisation sonore.

12.1 Méthodes des images sources

La méthode des images sources [Bor84] suit le principe suivant : une réflexion spéculaire peut être construite géométriquement en calculant la source symétrique par rapport au plan de la surface réfléchissante. Le déroulement est donc simple : pour chaque surface réfléchissante constituant l'environnement, des sources symétriques sont calculées (voir figure 46 pour une illustration). Ce processus est répété récursivement jusqu'à ce qu'un chemin menant à l'auditeur soit déterminé. Cette méthode garantit donc que tous les chemins spéculaires pour un degré donné de réflexion soient déterminés. Toutefois, cette garantie à un coût : $O(n^r)$ sources symétriques doivent être générées pour n surfaces réfléchissantes et un degré r de réflexion. Du fait de son coût, cette méthode n'est pas adaptée pour les environnements virtuels complexes dont les sources sonores et l'auditeur sont mobiles.

12.2 Méthode du lancer de rayon

La méthode du lancer de rayons acoustiques [KSS68] est similaire à celle employée en synthèse d'images. Pour déterminer les chemins spéculaires reliant une source sonore à un auditeur, des rayons sont émis dans différentes directions depuis la source puis réfléchis de façon spéculaire dans l'environnement jusqu'à rencontrer un auditeur (voir figure 47

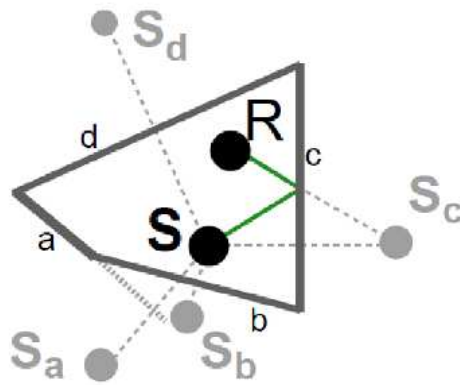


FIG. 46: La méthode des sources images calcule les sources symétriques S_i par rapport aux différentes surfaces réfléchissantes jusqu'à la rencontre avec un receveur R

pour une illustration). L'échantillonnage peut être régulier ou stochastique.

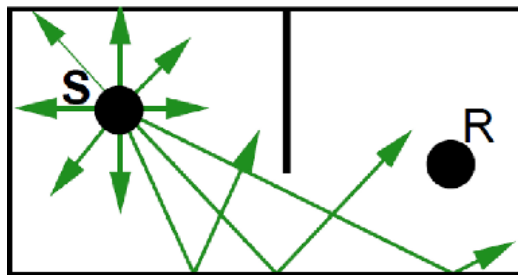


FIG. 47: La méthode du lancer de rayons. Des rayons sont émis depuis la source puis réfléchis de façon spéculaire jusqu'à rencontrer un auditeur.

À chaque réflexion, et en fonction d'un coefficient d'absorption, une partie de l'énergie des rayons est absorbée par la surface réfléchissante. De fait, un rayon peut s'éteindre sans avoir rencontré d'auditeur. Cette méthode présente différents avantages. Premièrement elle est simple à implanter. Deuxièmement elle ne requiert que des calculs assez simples d'intersection entre un rayon et une surface. Enfin, il est facile d'adapter le lancer de rayons pour gérer des réflexions diffuses, la diffraction et la réfraction en fonction des propriétés physiques de la surface [Kaj86].

Toutefois, cette méthode souffre de plusieurs inconvénients. L'émission discrète des rayons peut mener à des problèmes d'échantillonnages et d'erreurs [Leh93], les rayons peuvent passer à côté de l'auditeur. Pour remédier à cela, une solution possible consiste à affiner la discrétisation du lancer mais ceci a pour conséquence d'augmenter le nombre de calculs. Aussi, la solution consistant à associer l'auditeur à une sphère d'un diamètre suffisant est préférée. Enfin, obtenir une réponse acoustique précise requiert d'envoyer un nombre très important de rayons [Dal96], ce qui, du fait du temps de calcul requis rend cette méthode difficilement utilisable dans des environnements complexes et ce d'autant plus si les sources sonores et/ou les auditeurs sont mobiles.

12.3 Méthode du lancer de faisceaux

Une solution pour répondre au problème d'échantillonnage du lancer de rayons consiste à envoyer non plus des rayons mais des faisceaux de rayons de forme pyramidale [FCE⁺98], [FTC⁺04]. Ainsi, contrairement au lancer de rayon, l'émission est réellement omnidirectionnelle. Cette méthode consiste en quatre phases successives. Le processus global de cette méthode est représenté sur la figure 48. Durant une phase de pré-calcul l'espace est partitionné en cellules convexes. Puis, pour chaque source sonore, des faisceaux sont émis et parcourent la subdivision spatiale. Ceci permet de construire un arbre de faisceaux qui représente, pour une source sonore donnée, l'ensemble des cellules ou régions de l'espace qui sont accessibles par réverbération (réflexion, transmission, diffraction). Ainsi, lorsque l'auditeur se déplace, l'arbre de faisceaux est parcouru pour déterminer ceux qui atteignent l'auditeur et ainsi identifier les chemins menant d'une source à l'auditeur. Ces derniers définissent la réponse impulsionnelle associée, celle-ci est alors exploitée pour la restitution sonore. Les deux premières étapes sont pré-calculées, les deux autres fonctionnent en temps réel lors des déplacements de l'auditeur.

Voyons maintenant plus en détail ces quatre étapes.

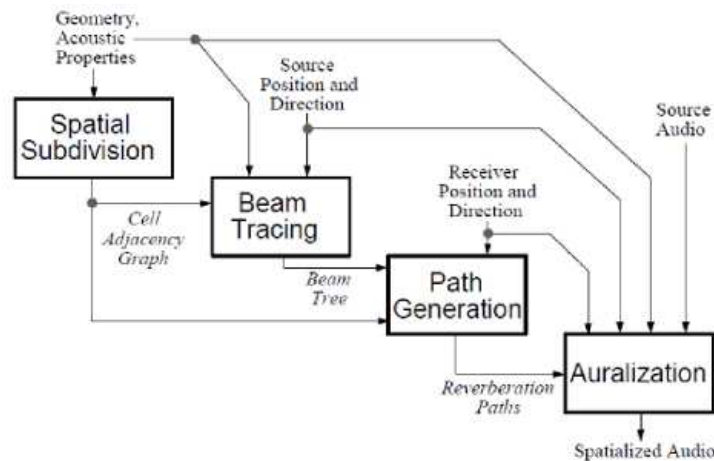


FIG. 48: Méthode des lancers de faisceaux. La méthode consiste en quatre phases successives : l'espace est subdivisé, les faisceaux sont émis, les chemins menant de la source sonore à l'auditeur sont déterminés puis le son est spatialisé en conséquence. *Source* : [FCE⁺98]

12.3.1 Première phase : conception d'un arbre BSP

La première étape consiste en une subdivision de l'espace sous forme d'arbre BSP ²⁴ [FKN80]. Cette phase divise l'espace en polyèdres convexes dont les frontières collent aux faces (typiquement les murs) constituant l'environnement 3D. Un graphe d'adjacence représentant

²⁴La partition binaire de l'espace (Binary Space Partitioning) est une méthode qui subdivise récursivement l'espace en ensembles convexes. L'espace peut alors être représenté sous la forme d'un arbre d'ensembles convexes ou arbre BSP.

les relations de voisinages entre les cellules de l'espace est intégré dans l'arbre BSP. Ces trois étapes sont représentées sur la figure 49. L'arbre est ensuite stocké.

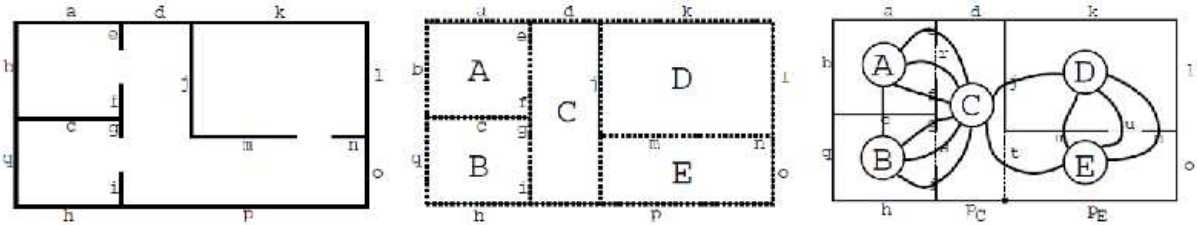


FIG. 49: Méthode des lancers de faisceaux, le partitionnement binaire de l'espace.

À gauche, le modèle géométrique d'entrée.

Au centre, le partitionnement binaire de l'espace, celui-ci colle à la configuration géométrique de l'espace.

À droite, le graphe d'adjacence représente les relations de voisinage entre les différentes cellules. *Source : [FTC⁺ 04]*

12.3.2 Deuxième phase : émission des faisceaux

Le lancer de faisceaux constitue la deuxième étape. L'arbre créé à l'étape précédente est exploité pour accélérer la traversée de l'espace. Pour chaque source sonore, les faisceaux sont émis et propagés (par réflexion, transmission et diffraction [TFNC01]) dans l'environnement. Cette phase aboutit à la construction d'un arbre de faisceaux. Celui-ci constitue en quelque sorte un arbre de visibilité sonore pour une source statique donnée. Le processus est le suivant : les faisceaux sont lancés puis un test d'occlusion est effectué en partant des faces proches puis en allant vers les plus lointaines. Cet ordonnancement est possible grâce à l'arbre construit à la phase précédente. Quand un faisceau rencontre un réflecteur, la portion du faisceau qui illumine ce réflecteur est subdivisée en un ensemble de sous-faisceaux. La taille d'un sous-faisceau correspond exactement à la taille d'une portion plane du réflecteur (voir la figure 50 pour une illustration). Au fur et à mesure de la propagation, l'énergie d'un faisceau s'amointrie jusqu'à disparaître. Lorsqu'un faisceau passe d'une cellule à une autre, celui-ci est élagué pour adopter la taille de la zone de passage (voir la figure 51 pour une illustration).

Contrairement aux deux phases précédentes qui sont effectuées lors d'un pré-calcul, les deux étapes suivantes se déroulent en cours d'expérience.

12.3.3 Troisième phase : détermination des chemins menant de la source à l'auditeur

La troisième phase identifie, pour une source sonore statique donnée, les faisceaux qui atteignent l'auditeur lorsque celui-ci se déplace dans l'environnement. Les chemins reliant une source à l'auditeur sont déterminés grâce à l'arbre de faisceaux construit à l'étape précédente. Dans un premier temps, une recherche dans l'arbre BSP permet d'identifier

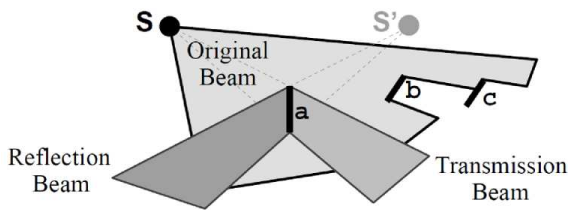


FIG. 50: Lancer de faisceaux. Le faisceau original est subdivisé en sous-faisceaux lors de sa rencontre avec des réflecteurs. La taille d'un sous-faisceau correspond exactement à celle d'une portion plane du réflecteur. *Source : [FCE⁺ 98]*

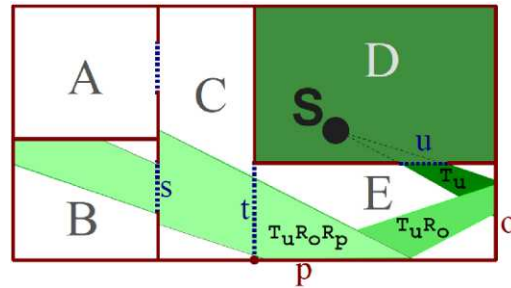


FIG. 51: Lancer de faisceaux. Les faisceaux exploitent le graphe d'adjacence obtenu à la première étape pour parcourir l'environnement. Les faisceaux sont élagués pour adopter la taille de la zone de passage. *Source : [FCE⁺ 98]*

la cellule dans laquelle se trouve l'auditeur. Dès lors, l'algorithme remonte l'arbre des faisceaux pour déterminer l'ensemble des faisceaux menant de la source à l'auditeur.

12.3.4 Quatrième phase : construction de la réponse impulsionnelle

La dernière étape consiste à déterminer la réponse impulsionnelle associée à la position de l'auditeur. Celle-ci est générée en ajoutant une impulsion par chemin menant de la source à l'auditeur. Chaque impulsion se voit appliquer un délai correspondant au temps de parcours entre la source et l'auditeur. Il ne reste plus alors qu'à effectuer une convolution entre la réponse impulsionnelle et le signal sonore puis à réaliser la restitution sonore.

12.3.5 Bilan de la méthode de lancer de faisceaux

Cette méthode permet de gérer avec beaucoup plus d'efficacité les environnements statiques et les auditeurs mobiles que les deux méthodes précédentes. Toutefois, la méthode des lancers de faisceaux ne peut être exploitée dans le cas où les sources sont mobiles. En effet, à chaque déplacement de la source il faut relancer l'ensemble du processus (i.e les quatre phases). Or, les deux premières étapes ne sont pas réalisables en temps réel. Précisons que des optimisations récentes [LSLS08], [AFST08] autorisent le déplacement de la source sonore en cours d'exécution mais l'environnement doit rester simple et bien sur statique.

Par rapport aux deux approches géométriques précédentes cette méthode est moins facilement implantable car les opérations d'intersection et d'élagage (clipping en anglais) sont plus complexes. Notons enfin que cette méthode souffre de quelques contraintes supplémentaires. Pour être réellement exploitable il est nécessaire que l'environnement présente

un grand nombre d'occlusions (comme les environnements urbains ou l'intérieur d'un bâtiment). De plus, il est préférable que l'environnement soit défini de manière grossière, c'est-à-dire défini par de grandes surfaces planes. Dans le cas contraire, un nombre trop important de faisceaux est généré et de fait les temps de calcul explosent.

12.4 Méthode du lancer de frustum

L'avant-dernière méthode géométrique que nous présentons est la méthode du lancer de frustum. Un frustum est une pyramide à base quadrilatère, il est donc composé de quatre faces plus une face avant. Un frustum est défini par ses quatre rayons formant les arêtes de la pyramide. Cette méthode est dérivée de la méthode du lancer de faisceaux et cherche à en conserver les avantages tout en supprimant ses inconvénients. Ainsi, les frusta émis par la source sonore recouvrent entièrement l'espace, cette méthode ne souffre donc pas des problèmes d'échantillonnage des méthodes par sources images et lancer de rayons.

Par contre, contrairement à la méthode de lancer de faisceaux, cette méthode permet de gérer en temps interactif des scènes complexes complètement dynamiques : des éléments de la scène peuvent se déplacer, les sources sonores et les auditeurs sont mobiles. Nous allons donc voir comment procède cette méthode pour arriver à ce résultat particulièrement intéressant. La figure 52 décrit le processus global de cette méthode. Nous décrirons par la suite les étapes principales de cette méthode.

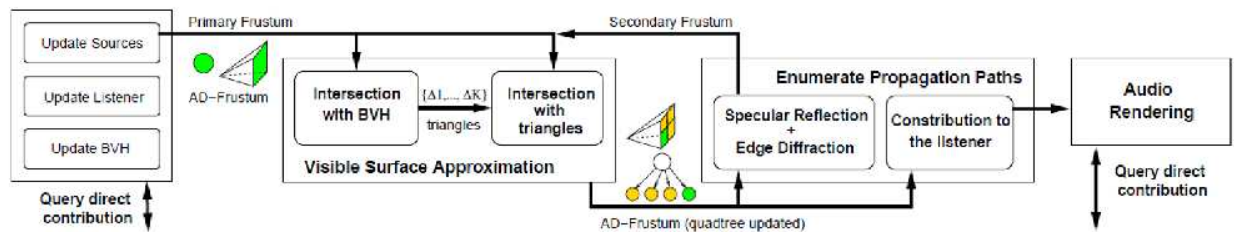


FIG. 52: Lancer de frustum, le processus global. Des frusta sont émis depuis une source puis propagés dans la scène. Lors de cette propagation des réflexions spéculaires et des diffractions peuvent intervenir. Chaque frustum rencontrant un auditeur participe alors au rendu sonore. *Source* : [CLT⁺08a]

12.4.1 Procéder par analogie

Les auteurs ont su tirer partie des dernières avancées en synthèse d'images par lancer de rayons. Deux nouvelles méthodes ont été utilisées conjointement : la méthode des paquets de rayons et celle des volumes englobants hiérarchiques (*Bounding Volume Hierarchies* en anglais). La première provient de l'observation suivante : les rayons d'origine et de direction proches ont globalement le même comportement et interceptent les mêmes facettes. L'idée est donc de regrouper les rayons par paquets en fonction de leur cohérence

afin d'optimiser les calculs : les traitements sont effectués sur un ensemble (un paquet) de rayons et non plus rayon par rayon [WSBW01], [RSH05].

La seconde optimisation provient de l'organisation de la scène. Alors que la méthode précédente du lancer de faisceaux exploitait un arbre BSP pré-calculé, la méthode de lancer de frustum utilise celle des volumes englobants hiérarchiques. Une hiérarchie de volumes englobants est un arbre de volumes englobants. La racine de l'arbre contient l'ensemble de la scène et chaque nœud à l'intérieur de l'arbre correspond à un volume englobant qui contient ses fils. Une feuille de l'arbre correspond à un objet non décomposable appelé primitive. Cette structure de données est très efficace pour les calculs d'intersection entre des objets et un rayon. Si un rayon ne rencontre pas un volume englobant donné alors on peut être certain qu'il ne rencontrera pas les volumes fils contenus dans celui-ci. Enfin, cet arbre peut être construit à la volée et mis à jour rapidement.

Enfin, les travaux de Lauterbach et al [LYM06] et Wald et al [WBS07] ont montré qu'il était possible de combiner efficacement la cohérence des paquets de rayons et les volumes englobants hiérarchiques. La technique de lancer de frustum exploite donc ces avancées pour calculer efficacement les intersections entre un frustum et les différentes surfaces géométriques qui composent la scène.

12.4.2 Faire des concessions sur la précision

Dans l'optique de proposer une méthode fonctionnant avec des environnements entièrement dynamiques, un compromis a été effectué entre temps de calcul et précision de la réverbération. Alors que la méthode de lancers de faisceaux effectuent des intersections exactes entre les faisceaux et les réflecteurs, les frusta sont eux subdivisés en sous-frusta de manière automatique [LCM07]. Il est évidemment plus rapide de procéder à une subdivision automatique qu'à un élagage exact. La figure 53 pointe les différences entre les deux méthodes pour le calcul des réflexions et transmissions.

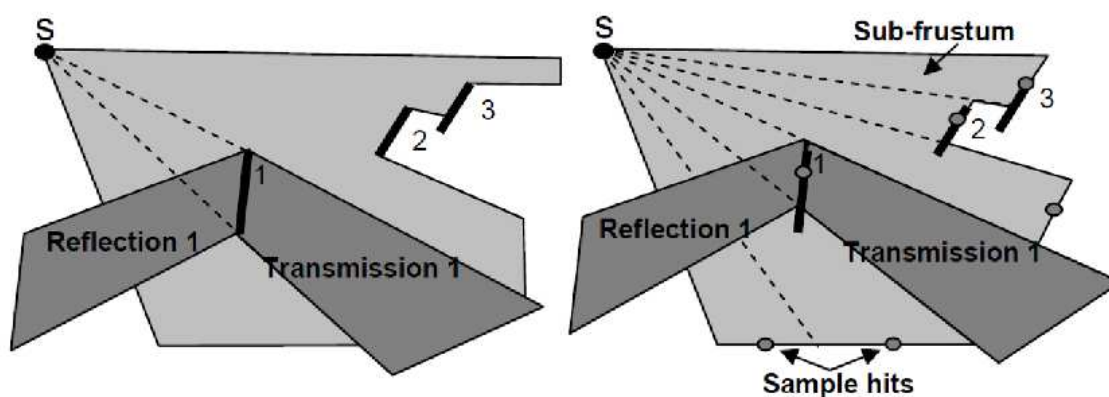


FIG. 53: Lancer de faisceaux VS lancer de frustum : comparaison pour la précision. À gauche, les faisceaux sont élagués pour correspondre exactement à la forme des réflecteurs. À droite, un frustum est subdivisé automatiquement en sous-frusta indépendamment de la taille des réflecteurs. *Source* : [LCM07]

Le compromis choisi par la méthode du lancer de frustum a donc pour conséquence une précision moindre et l'apparition d'artefacts. Il est certes possible d'échantillonner plus finement les sous-frusta mais cela augmente d'autant la complexité de l'algorithme. Les différentes optimisations que nous venons de présenter permettent donc de gérer une réverbération (prenant en compte les réflexions et les transmissions) dans un environnement moyennement complexe mais complètement dynamique et en temps interactif. En plus de la baisse de qualité, une limite supplémentaire à cette méthode, est qu'elle ne gère que les surfaces planes. Enfin, mais c'est le cas pour la plupart des méthodes géométriques, seules les réflexions spéculaires sont gérées. Des réflexions diffuses peuvent être effectuées en générant de nouveaux frusta en fonction du coefficient de diffusion.

Une version récente de la méthode [CLT⁺08a] permet de répondre à un certain nombre de ces limites. Les principales évolutions sont une subdivision adaptative (et non plus automatique) des frusta et la gestion de la diffraction.

12.4.3 Subdivision adaptative d'un frustum

A chaque frustum est maintenant associé une structure particulière appelée quadtree²⁵. Cette association frustum-quadtree permet d'adapter la subdivision d'un frustum en sous-frusta pour effectuer des intersections plus précises avec les réflecteurs. La figure 54 schématise cette association frustum-quadtree.

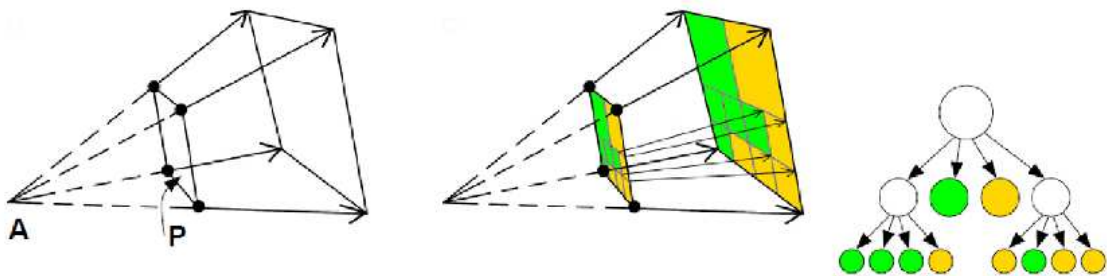


FIG. 54: Association frustum-quadtree.

À gauche, un frustum classique représenté par un sommet et quatre rayons.

Au centre, un frustum est associé à un quadtree.

À droite, une représentation du quadtree sous forme d'arbre. *Source* : [CLT⁺08a]

Chaque feuille du quadtree représente le plus petit sous-frustum généré par l'intersection avec un obstacle de la scène. Afin de limiter la complexité de l'algorithme un coefficient maximum de subdivision est défini. La figure 55 compare les différences de précision entre le lancer de faisceaux, le lancer de frustum à subdivision automatique et le lancer de frustum adaptatif. La représentation (a) montre à nouveau l'élagage parfait du lancer de faisceaux. Le lancer de frustum à subdivision automatique grossière (b) montre que des erreurs apparaissent. Le lancer de frustum à subdivision automatique fine (c) montre que

²⁵Un quadtree est une structure de données de type arbre dans laquelle chaque nœud peut compter jusqu'à quatre fils. Un quadtree permet donc de subdiviser récursivement une surface en quatre sous-espaces.

les erreurs ont disparu mais un nombre important de sous-frusta ont été générés ce qui, de fait, va augmenter le temps de calcul. Le lancer de frustum adaptatif avec subdivision grossière (d) montre que des erreurs persistent (comme en (b)) mais on peut noter que le nombre de frusta est inférieur. Ainsi, cette solution présente elle-aussi des erreurs mais un certain nombre de calculs a été évité. Enfin, le lancer de frustum adaptatif avec subdivision fine (e) minimise les erreurs et se rapproche de la précision obtenue avec le lancer de faisceaux. On note alors que le nombre de frusta devient supérieur au nombre de beam, toutefois, bien que la complexité augmente la subdivision adaptative reste toujours plus rapide à effectuer qu'une subdivision exacte. Précisons qu'afin de diminuer la complexité de l'algorithme une phase de simplification de maillage [JMT03] est appliquée à la scène en pré-calcul. Celle-ci permet d'une part de supprimer les détails trop fins qui de toutes façons ne modifient le champ sonore qu'à la marge (seules les très hautes fréquences sont impactées) et d'autre part de disposer d'une scène plus grossièrement définie. De fait ce dernier point permet de diminuer le nombre de calculs d'intersection frustum-facette.

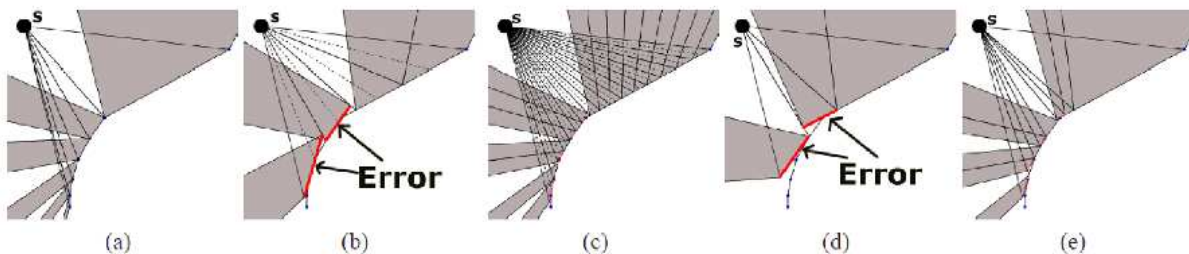


FIG. 55: Lancer de frustum : différences de précision entre différentes méthodes. (a) lancer de faisceaux, (b) lancer de frustum avec subdivision automatique grossière, (c) lancer de frustum avec subdivision automatique fine, (d) lancer de frustum adaptatif avec subdivision grossière, (e) lancer de frustum adaptatif avec subdivision fine. *Source* : [CLT⁺08a]

12.4.4 Lancer de frustum et diffraction

La dernière version du lancer de frustum [CLT⁺08a] gère la diffraction. Pour cela, les auteurs se basent sur la théorie uniforme de la diffraction (TUD) [Kel62] déjà appliquée par Tsingos et al [TFNC01] dans une méthode de lancer de faisceaux. Cette théorie indique que si un rayon intersecte un angle, alors le point d'intersection devient une source secondaire et un cône de rayons diffractés est généré (voir figure 56 a) pour une illustration). L'angle d'ouverture du cône est égal à l'angle formé par le rayon incident avec le côté impacté. Le cône de diffraction généré est subdivisé en un cône visible et un cône qui se propage dans l'*ombre* de l'obstacle (voir figure 56 b) pour une illustration). C'est grâce à ce cône d'ombre que des sources sonores situées de l'autre côté de l'angle d'un bâtiment sont audibles.

Dans les faits, l'implantation de la diffraction est légèrement différente puisque seul le frustum propagé dans la zone d'ombre est émis. Cette restriction permet de ne pas trop augmenter le nombre de frusta parcourant la scène. Comme le montre la figure 57 le frustum incident est en quelque sorte prolongé au delà de l'angle de l'obstacle, cela

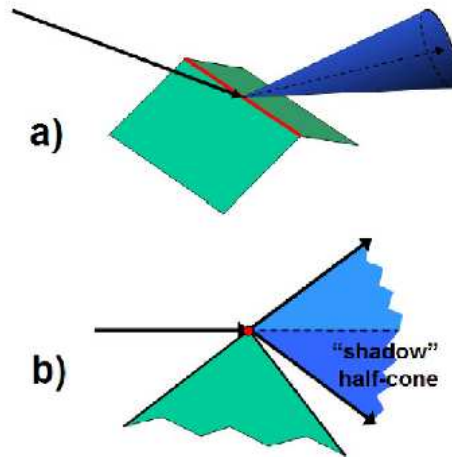


FIG. 56: Lancer de frustum.

- a) Le cône de diffraction selon la théorie uniforme de la diffraction. L'angle d'ouverture du cône est égal à l'angle d'incidence.
- b) Le cône de diffraction est subdivisé en un cône visible et un cône qui se propage dans l'ombre de l'obstacle. *Source : [CLT⁺08b]*

permet de prendre en compte dans le frustum d'ombre la part de la contribution directe de la source. La forme et la direction du frustum d'ombre sont déterminées par la TUD et l'angle formé avec le côté dans l'ombre de l'obstacle. Le frustum d'ombre couvre en grande partie la zone d'ombre.

On note que pour proposer une gestion de la diffraction la méthode requiert une phase de pré-calcul pour identifier les facettes formant des angles à l'origine de la diffraction (i.e. des facettes adjacentes mais non coplanaires). Le détail de la méthode est présenté dans Taylor et al [TCR⁺09]. Cette phase de pré-calcul empêche donc de gérer la diffraction pour des environnements totalement dynamiques.

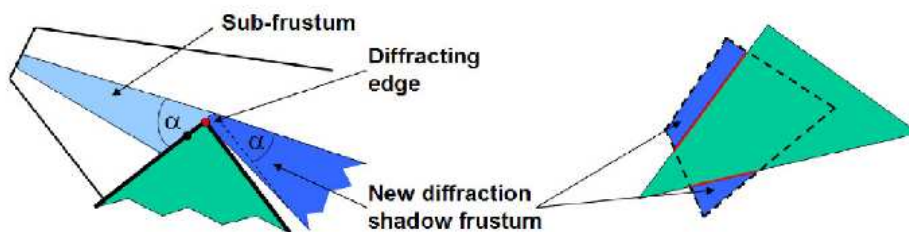


FIG. 57: Lancer de frustum et diffraction : seul le frustum diffracté dans la zone d'ombre est émis. Le frustum incident est en parti prolongé par le frustum d'ombre. *Source : [CLT⁺08a]*

Cette version du lancer de frustum avec subdivision adaptative [CLT⁺08a] et gestion de la diffraction permet de calculer la propagation sonore en temps interactif pour des environnements moyennement complexes et dynamiques. Par exemple, une scène de ville définie par 78000 facettes avec gestion de la diffraction, 80000 frusta générés, avec 3

niveaux de subdivisions maximum et 4 niveaux de réflexions requiert 206 ms pour être calculée. La simulation a été effectuée sur un ordinateur à 2.66 GHz de type Intel Corde2Duo avec 2 Gb de mémoire et les calculs sont répartis sur sept threads. Notons qu'un certain nombre de pré-calculs a été effectué : simplification du maillage et identification des zones génératrices de diffraction. La modification de l'environnement au cours de l'expérience n'est donc pas possible mais la présence d'objets mobiles l'est. En diminuant la précision des calculs (un seul niveau de subdivision, deux niveaux de réflexions et un nombre limité de frusta et la diffraction non gérée) permet d'atteindre un temps d'actualisation des calculs acceptable. La fréquence d'actualisation est estimée à 10 Hz par Sandvad [San96] et à 20 Hz par Lokki et al [LSV⁺02].

Cette méthode souffre donc d'un certain nombre de limitations, voici celles qui nous semblent les plus importantes : le nombre de sources sonores est limité, la méthode n'est pas encore exploitable pour des scènes de grande taille et globalement un gain en performance est nécessaire pour disposer d'un temps d'actualisation acceptable. Enfin, un grand nombre de frusta est propagé inutilement c'est-à-dire ne rencontre pas d'auditeur. Nous proposerons dans la section 13.3 une solution qui répond en partie à certaines de ces limites.

12.5 Méthode du sonel mapping

La méthode suivante trouve elle aussi son inspiration dans la synthèse d'images, mais cette fois-ci il s'agit d'une méthode d'illumination globale ²⁶ nommée photon mapping. Cette méthode n'est pour l'instant pas applicable en réalité virtuelle car elle demande des temps de calcul beaucoup trop importants. Néanmoins, cette approche propose des résultats intéressants et nous pensons disposer d'une méthode qui pourrait accélérer cette méthode. La méthode des sonels mapping [KJM04], [KJM08] reprend les deux passes du photon mapping. Mais dans cette méthode les photons sont remplacés par leurs pendants sonores appelés *sonels*. Dans un premier temps nous allons présenter brièvement la méthode du photon mapping.

12.5.1 Méthode du photon mapping

Le photon mapping [Jen96], [Jen01] est une méthode d'illumination globale employée en synthèse d'images. Parce qu'elle tient compte des réflexions diffuses cette méthode permet de générer des images de synthèse très réalistes.

Le photon mapping fonctionne en deux passes dont nous allons maintenant présenter les grandes lignes.

Première passe : émission des photons

La première passe vise à peupler la scène de photons. Suivant les propriétés des sources lumineuses, les photons sont émis soit uniformément soit dans des directions privilégiées.

²⁶On appelle illumination globale le fait de tenir compte de l'ensemble des échanges énergétiques entre toutes les facettes d'une scène.

Chaque photon contient les informations suivantes : une position (les coordonnées x,y,z correspondant au point d'intersection entre le photon et la surface rencontrée), sa direction d'incidence (définie par les informations angulaires azimut et élévation) et sa puissance. L'énergie globale de la source est divisée équitablement entre tous les photons émis. Les photons sont propagés au sein de la scène de façon similaire au lancer de rayons.

Lorsqu'un photon rencontre une surface, celui-ci est réfléchi, transmis ou absorbé par la surface. Le choix est fortement influencé par les propriétés de la surface puis déterminé par une approche probabiliste de type roulette russe. Quand la surface est diffuse, les informations contenues dans le photon (coordonnées du point d'incidence et la direction d'incidence) sont mises à jour puis ce photon (avec les informations actualisées) est stocké dans une carte de photons. Le photon est alors réfléchi dans une direction choisie au hasard dans l'hémisphère au dessus du point d'intersection.

Si la surface est spéculaire, le photon n'est pas stocké dans la carte de photons mais réfléchi de façon spéculaire c'est-à-dire avec un angle égal à l'angle d'incidence.

Cette première passe est donc indépendante du point de vue de l'observateur, par contre elle dépend de la géométrie de la scène et de la position des sources.

Deuxième passe : calcul du rendu

Cette phase consiste en un lancer de rayons. Pour chaque pixel de l'image calculée, un rayon est émis depuis la position de l'observateur. Celui-ci se propage alors dans la scène. La radiance de chaque pixel affiché à l'écran est déterminée en moyennant la valeur de la radiance rencontrée par plusieurs rayons au point d'intersection avec la scène. Cette opération de moyennage permet d'éviter un rendu de type pointilliste dû à l'échantillonnage effectué lors de la première passe. Pour déterminer la valeur de la radiance au niveau du point d'intérêt (i.e. le point d'intersection entre un rayon et la scène), plusieurs méthodes sont possibles mais la solution classique consiste à s'intéresser aux voisins de ce point d'intérêt pour calculer une valeur moyenne de radiance. Cette dernière étape peut se révéler couteuse.

A la lecture de cet algorithme on comprend aisément que celui-ci est très couteux et n'est pas exploitable dans le cas d'environnement virtuel complexe et dynamique. Toutefois, cette méthode présente un certain nombre de propriétés très intéressantes. Contrairement aux méthodes par lancers de faisceaux ou de frusta, elle peut opérer sur les surfaces courbes. De plus, une intersection rayon-surface est bien plus simple et rapide à calculer qu'une intersection faisceau/frustum-surface. Si les sources et la géométrie de la scène sont statiques, la première passe n'est faite qu'une fois et est effectuée en pré-calcul. Enfin, cette technique gère les réflexions diffuses et la diffraction ce qui permet d'accroître le réalisme de la scène. C'est donc pour toutes ces raisons que cette méthode de synthèse d'images a été appliquée à la méthode de spatialisation sonore que nous allons maintenant présenter. La méthode du sonel mapping a un déroulement en deux passes similaire à la méthode du photon mapping.

12.5.2 Méthode du sonel mapping, première passe : émission des sonels

Un sonel possède les informations internes suivantes : sa position dans l'espace, sa direction d'incidence (au niveau du point d'intersection entre le sonel et la surface), son énergie (correspond à l'énergie globale de la source divisée par le nombre de sonels émis), la distance globale parcourue par le sonel et enfin sa fréquence. La figure 58 décrit le processus de la première passe chargée d'émettre les sonels.

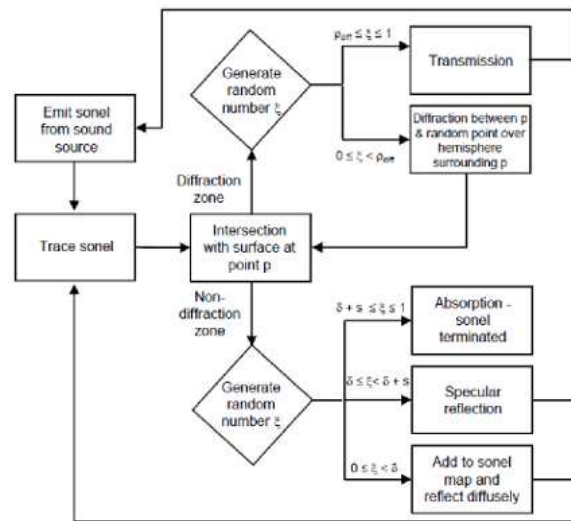


FIG. 58: Sonel mapping. Déroulement de la première passe chargée de l'émission des sonels. *Source* : [Kap06]

Pour chaque source, un nombre pré-déterminé de sonels est émis par bande de fréquence et parcourt l'environnement jusqu'à rencontrer une surface. Pour chaque bande de fréquence les sonels sont émis indépendamment. De fait, plus le nombre de sonels émis est important, plus la méthode converge vers la réverbération exacte. Chaque sonel propage une portion de l'énergie de la source. Il s'en suit la construction d'une carte de sonels où sont stockés les sonels qui sont réfléchis de façon diffuse, cette carte est exploitée lors de la deuxième passe pour fournir une estimation de l'énergie sonore incidente en un point particulier de la scène. La carte de sonels suit le même principe que la carte de photons et permet de connaître une estimation statistique de l'énergie contenue en un point de la scène. Cette carte dépend donc exclusivement des propriétés de l'environnement et de la position des sources sonores. Si ces dernières sont statiques la carte n'a plus besoin d'être recalculée.

Dans un premier temps, lors de l'intersection entre un sonel et une surface, l'algorithme évalue si le sonel est dans une zone de diffraction ou non. La taille de la zone de diffraction dépend de la fréquence portée par le sonel (voir figure 59 pour une illustration). Cette zone de diffraction s'étend à l'intérieur de la surface sur une distance égal à la longueur d'onde associée au sonel divisée par deux et est dilatée à l'extérieur de la surface sur une distance égale là encore, à la longueur d'onde associée au sonel divisée par deux [KJM07].

Si l'intersection a lieu dans une zone de diffraction alors le sonel est soit diffracté soit tout simplement transmis. Dans ce dernier cas le sonel traverse la zone de diffraction sans être altéré et poursuit son chemin. Si le sonel est diffracté alors il est réémis en choisissant une direction au hasard dans l'hémisphère centrée sur le point d'incidence, le sonel perd alors une partie de son énergie selon un facteur de visibilité entre la source et le receveur.

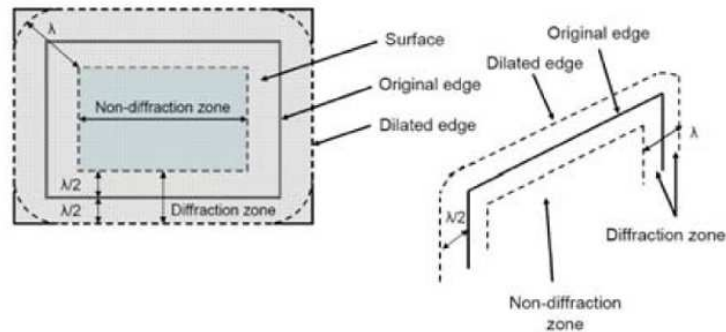


FIG. 59: Sonel mapping : définition des zones de diffraction et de non-diffraction. Source : [KJM07]

Si l'intersection n'a pas eu lieu dans une zone de diffraction alors trois types d'interaction sont possibles. Le choix dépend des caractéristiques de la surface (fort coefficient d'absorption, de diffusion ou de spécularité) mais aussi de la fréquence du sonel.

- Le sonel est absorbé totalement, son parcours est terminé.
- La réflexion est spéculaire. Le sonel n'est pas stocké dans la carte de sonels mais ses données internes sont mises à jour.
- La réflexion est diffuse. Le sonel est stocké dans la carte de sonels, ses données internes sont mises à jour puis un nouveau sonel est réémis selon un modèle lambertien. La direction de réémission est tirée au hasard à l'intérieur d'une hémisphère dont le centre est le point d'incidence.

Dans les 2 cas précédents, les réflexions se font sans perte d'énergie, il n'y a pas d'absorption due à la rencontre avec un matériau. Les différents choix effectués au cours de cette passe sont effectués selon une approche probabiliste de type roulette russe.

Dans la carte de sonels ne sont stockés que les sonels qui sont incidents sur une surface diffuse. Stocker les sonels rencontrant des surfaces spéculaires est inutile car la probabilité que l'auditeur *rencontre* un sonel issu de la direction spéculaire est très faible. Pour traiter ce cas il est alors plus efficace de procéder à une troisième passe de lancer de rayons.

12.5.3 Méthode du sonel mapping, deuxième passe : calcul du rendu

La figure 60 décrit le processus de la deuxième passe chargée du calcul du rendu. Le but de cette deuxième phase est d'établir la réponse impulsionnelle perçue au niveau de l'auditeur. Cette passe consiste en une phase de lancer de rayons : des rayons de *visibilité acoustique* sont émis depuis les auditeurs. Bien entendu, il est nécessaire que les sources soient statiques sinon il faut relancer la première passe. Par contre, si seul l'auditeur

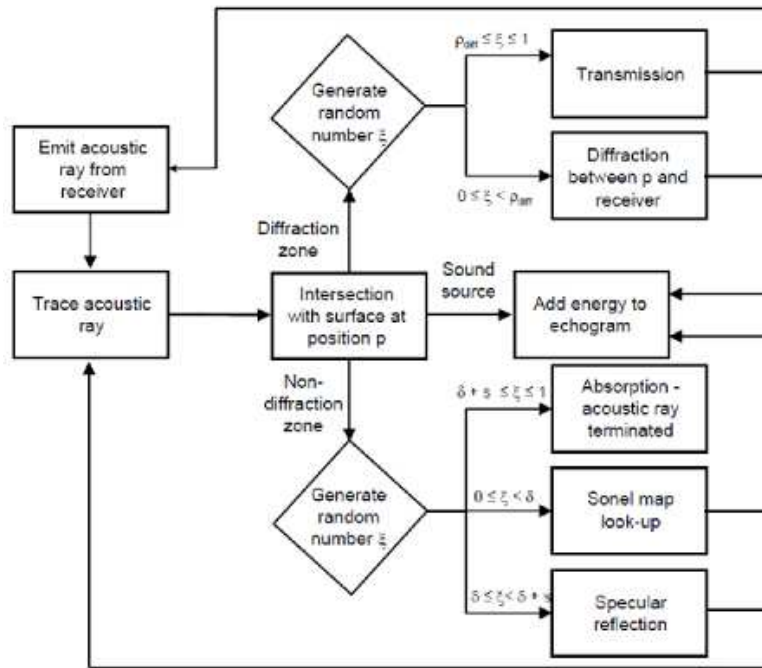


FIG. 60: Sonel mapping, deuxième passe : calcul du rendu. *Source* : [Kap06]

est mobile alors il suffit de réitérer cette deuxième passe. Les rayons contiennent comme information la distance parcourue et la bande de fréquence.

Les rayons de visibilité acoustique sont émis depuis la position de l'auditeur dans l'environnement virtuel. Si un rayon rencontre directement une source, la fraction de l'énergie quittant la source et arrivant à l'auditeur est déterminée. Cette énergie directe est calculée en divisant l'énergie globale de la source sonore par le nombre total de rayons de visibilité émis. L'absorption de l'air est prise en compte puis une impulsion est ajoutée dans la réponse impulsionnelle.

Lorsqu'un rayon de visibilité acoustique rencontre une surface, un test est effectué pour déterminer si le point d'incidence se situe dans une zone de diffraction ou non. Si il ne s'agit pas d'une zone de diffraction alors trois cas sont possibles. Le rayon peut être absorbé et détruit ou réémis de façon spéculaire. Troisième possibilité, si la surface est déterminée comme diffuse alors le lancer de ce rayon s'interrompt et la carte de sonels est exploitée pour fournir une estimation de l'énergie quittant le point d'incidence et arrivant au receveur. Pour cela, une moyenne est calculée sur les n sonels les plus proches du point d'incidence. Une fois l'énergie calculée, celle-ci est diminuée pour tenir compte de l'absorption dans l'air (celle-ci dépend de la distance globale parcourue) puis ajoutée à la réponse impulsionnelle.

Si le point d'incidence est situé dans une zone de diffraction alors soit le rayon traverse la zone de diffraction de façon transparente et un nouveau rayon est émis, soit l'énergie reçue par l'auditeur est estimée selon une version simplifiée du principe de Huygens-Fresnel. Ce dernier fournit une expression de la quantité d'énergie qui quitte une source sonore et qui arrive à l'auditeur. La quantité d'énergie arrivant au receveur dépend notamment

d'un coefficient de visibilité. Cette quantité d'énergie est alors ajoutée à la réponse impulsionnelle. Les différents choix effectués au cours de cette passe sont déterminés selon une approche probabiliste de type roulette russe.

La méthode du sonel mapping permet en théorie (avec une infinité de sonels émis) de simuler parfaitement la propagation des fronts d'ondes sonores. Cette méthode fournit des résultats plus précis que les méthodes de lancers de faisceaux ou de frusta. Toutefois, dans une optique de sonorisation d'environnement virtuel complexe et dynamique, cette méthode n'est pas exploitable. Nous verrons dans la section 13.3 que nous pensons pouvoir accélérer cette méthode grâce aux optimisations que nous proposons.

Chapitre 13

Notre chaîne de rendu pour la spatialisation sonore et algorithme de réverbération

Nous présentons dans ce chapitre la chaîne de rendu sonore qui a été implantée dans notre atelier de réalité virtuelle. Cette chaîne doit permettre de définir des environnements sonores, proposer un système de réverbération simple puis spatialiser le son. Dans une deuxième section, nous proposons une évolution de la méthode de lancer de frustum. Celle-ci vise à en accélérer les calculs dans l'optique d'être appliquée dans un environnement totalement dynamique et interactif. Cet algorithme original consiste à initier le lancer de frustum depuis l'auditeur et non depuis les sources sonores. Une optimisation supplémentaire tire parti de connaissances sur la perception sonore humaine.

13.1 Notre chaîne de rendu pour la spatialisation sonore

Pour notre système de restitution sonore, notre choix s'est porté sur une restitution par enceintes. A cela plusieurs raisons. La première est que la philosophie suivie par notre équipe a toujours été d'équiper l'utilisateur avec des interfaces les moins intrusives possibles. C'est pourquoi le système de restitution visuelle consiste en un écran polarisé nécessitant le simple port de lunettes polarisées très légères. Pour les outils d'interaction notre première solution fut de disposer des diodes sur un doigt de l'utilisateur, ces diodes sont suivies par deux caméras qui, par triangulation, permettent de connaître leurs positions dans l'espace. Cet outil d'interaction permet des opérations telles que la navigation et la sélection. La restitution par casque va donc à l'encontre de cette philosophie. De plus, une mise en balance des avantages et inconvénients des deux systèmes nous a semblé aller dans le sens de la restitution par haut-parleurs (voir la section 11.2 page 112 qui traite de ce sujet).

Enfin, des études comme celle de Grohn [Gro02] montrent qu'une restitution par écouteurs avec des fonctions de transfert génériques offre une finesse de localisation moindre qu'une solution à base d'enceintes comme la VBAP (voir section 11.2.6 page 118).

Concernant la méthode de restitution, deux possibilités s'offrent à nous : l'Ambisonic et la VBAP. Bien que la première méthode semble plus probante en terme de sensation et d'enveloppement [GLCB07], elle pêche au niveau de la qualité de la localisation [GLCB07]. De plus, elle est moins fiable dès lors que l'utilisateur sort de la zone optimale d'écoute. C'est donc pour des raisons d'efficacité (tant pour le résultat que pour le développement informatique) et de stabilité (la zone optimale d'écoute est plus large que pour l'Ambisonic) que nous avons choisi d'implanter la méthode des VBAP présentée dans la section 11.2.6 (page 118).

Notre atelier de réalité virtuelle se compose donc d'un écran polarisé et de huit enceintes placées aux sommets d'un cube virtuel dont le centre est la tête de l'auditeur (voir figure 61 pour une illustration).

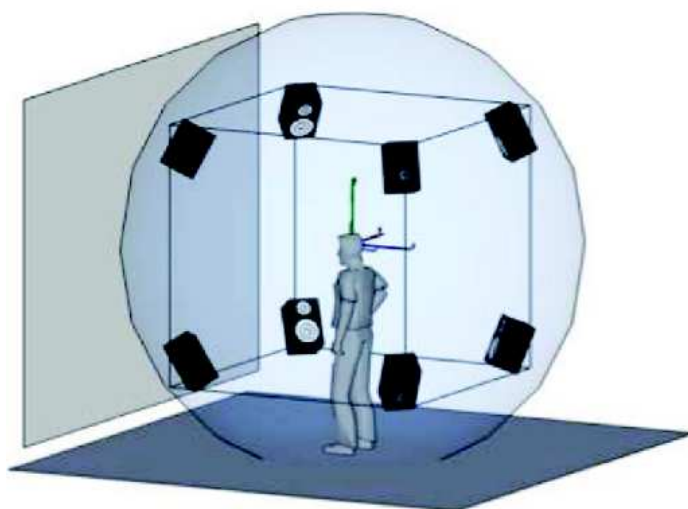


FIG. 61: Organisation de notre atelier de réalité virtuelle. L'utilisateur est face à un écran polarisé, la restitution sonore est assurée par huit enceintes.

Notre chaîne de rendu est composée de trois grands modules. Le premier est dédié à la description d'une scène sonore en trois dimensions, le deuxième gère la propagation du son à l'intérieur de cette scène et enfin le troisième s'occupe de la restitution sonore. Pour suivre la philosophie de développement que s'est fixée notre équipe de recherche notre chaîne de rendu doit respecter les contraintes suivantes : implantation sous Linux, les briques logicielles sont *fait-maison* ou alors ont un code source libre.

13.1.1 Description d'un monde sonore

Premier maillon de notre chaîne, la description d'un monde sonore dynamique. Pour cela nous avons défini une norme de description nommée XAC qui possède une structure arborescente classique de type XML. Les différents nœuds de notre arborescence représentent les objets qui composent le monde (voir l'annexe A page 223 pour un exemple de fichier XAC). Ces objets sont les sources sonores, les obstacles et le microphone qui

représente l'auditeur. Le format de fichier XAC suit le formalisme de COLLADA ²⁷. Sans entrer dans les détails, précisons que chaque objet a un certain nombre de propriétés dont nous présentons maintenant les plus importantes. Les obstacles ont une position et des dimensions et sont associés à un matériau. Les propriétés d'absorption et de réflexion de ce matériau sont utilisées lors de la phase de propagation des ondes sonores. Les sources sonores peuvent être ambiantes et sont alors diffusées par l'ensemble des enceintes ou au contraire ponctuelles et sont positionnées dans l'espace. Ces sources ponctuelles peuvent être mobiles et possèdent, entre autres, une propriété précisant leur portée. Cette dernière information pouvant servir de critère d'optimisation des calculs. Enfin, le microphone possède une position et une orientation.

Cette modélisation du monde sonore est conçue par l'utilisateur. Le fichier XAC est ensuite analysé et interprété pour créer la scène qui sert de support à la propagation sonore. L'ensemble des objets est ainsi instancié au lancement de l'application et définit la scène globale.

13.1.2 Modèle de propagation des ondes sonores

Une fois la scène construite, la phase de propagation des ondes sonores à l'intérieur de l'environnement est lancée. Celle-ci s'attache à calculer les réflexions et l'atténuation dues à la transmission dans l'air. La prise en compte des réflexions permet de gérer des occlusions.

Le but de ce travail étant, dans un premier temps, d'implanter une chaîne de traitement complète (de la description d'une scène jusqu'à la spatialisation), le modèle de propagation retenu est du type lancer de rayons (voir section 12.2 page 124) et ne gère pour l'instant que la réflexion et l'absorption dans l'air. Notons néanmoins que l'absorption des matériaux est prise en compte dans notre format de description XAC. La gestion des réflexions nous permet de gérer les occlusions entre les sources sonores et l'auditeur. Le calcul de réverbération est donc pour l'instant simple. À terme, nous souhaitons pouvoir gérer un environnement complètement dynamique (sources, configuration de la scène et auditeurs mobiles), aussi, nous souhaitons nous orienter vers une méthode de type lancer de frustum (présentée section 12.4) mais inversée (nous présentons notre algorithme en section 13.3). Les frusta sont initiés depuis l'auditeur et non depuis les sources sonores.

13.1.3 Gestion des flux sonores et spatialisation

Dans cette section nous nous intéressons à la gestion des flux sonores. L'analyse du fichier de description XAC permet de créer la scène globale. Lors de cette précédente phase les fichiers sonores sont chargés et copiés. La réverbération est calculée à la volée en tenant compte de paramètres tels que le chemin parcouru et les réflexions. Le calcul de la propagation est renouvelé à une fréquence de 10 Hz [San96], les flux sonores sont découpés sous forme d'échantillons sonores d'une durée équivalente. Les traitements relatifs à la réverbération sont alors appliqués à ces échantillons. L'étape suivante consiste à spatialiser

²⁷COLLADA est un format de fichier de type XML. Il permet de décrire des scènes visuelles en trois dimensions : géométrie de la scène, effets visuels, prise en compte des propriétés physiques, animation etc.

ces échantillons sonores selon la méthode des VBAP (voir section 11.2.6 page 118). Enfin, pour pouvoir exploiter huit haut-parleurs sous Linux, il est nécessaire de passer par l'intermédiaire du serveur de sons JACK [D⁺]. Celui-ci permet d'établir un lien direct et avec une très faible latence entre les entrées audio et l'ensemble des sorties audio connectées à la carte son. L'annexe B (page 227) présente une version simplifiée de l'architecture logicielle de notre chaîne de rendu sonore.

13.2 Capacité de localisation et de discrimination humaine

Nous avons précédemment cité deux études [GLCB07, Gro02] qui évaluent la qualité du système de restitution sonore au travers de sa capacité à permettre une bonne localisation des sources sonores virtuelles. Les différentes méthodes de calcul de réverbération que nous avons présentées précédemment visent à calculer la réponse impulsionnelle correspondant à la position de l'auditeur dans l'environnement virtuel. Une fois celle-ci calculée, il reste à spatialiser les différentes impulsions pour que l'auditeur perçoive et localise le son direct mais aussi les réflexions précoces. Les réflexions tardives, trop nombreuses, ne permettent en général pas de distinguer une localisation particulière.

Suivant l'approche perceptive et centrée utilisateur que nous défendons depuis le début de ce document, il nous semble important de s'intéresser aux capacités auditives de l'homme. Plus particulièrement, ce sont les capacités humaines relatives à la localisation d'une source sonore dans l'espace qui nous intéressent. Si cette capacité de localisation ou de discrimination est de plusieurs degrés voire plusieurs dizaines de degrés alors, pour proposer un environnement sonore crédible, il nous semble inutile de calculer une réponse impulsionnelle dont on connaîtrait, pour chaque impulsion, la direction d'incidence par rapport à l'auditeur au degré près.

Nous allons donc nous intéresser dans cette section à l'acuité sonore. Derrière ce terme peut se cacher plusieurs notions correspondant chacune à différents seuils de la perception auditive humaine. Listons et précisons ces notions :

- **La localisation absolue.** Représente la précision absolue avec laquelle un auditeur détecte l'origine spatiale d'un son. Les mesures effectuées consistent à positionner des sources sonores (typiquement des haut-parleurs) à différentes positions autour d'un sujet dont les yeux sont bandés puis, de lui demander d'indiquer d'où lui semble provenir le son.
- **Le minimum séparable.** Se réfère au plus petit angle séparant deux sources qu'un auditeur peut discriminer. Dans la littérature ce seuil est nommé angle minimum audible [Mil58], [HR89]. On parle également de localisation relative. L'expérimentation peut consister à indiquer si une seconde source se trouve à gauche ou à droite d'une première.
- **Le mouvement d'angle minimum audible.** Correspond au plus petit angle dont doit se déplacer une source sonore pour que la direction de déplacement soit correctement déterminée. Cette capacité de discrimination varie et augmente avec la vitesse [PT88] mais dépend aussi de la fréquence du stimulus [CG92]. Le flou de

localisation est pour cette capacité de l'ordre de 10° .

- **Le minimum audible.** Indique le niveau sonore minimum pour qu'un son soit entendu. Comme l'ont montré les travaux de Fletcher et Munson [FM33] ce seuil minimum dépend de la fréquence du son (voir figure 62 pour une illustration).
- **Le minimum légible.** Représente la faculté de pouvoir reconnaître un son, par exemple comprendre un mot.

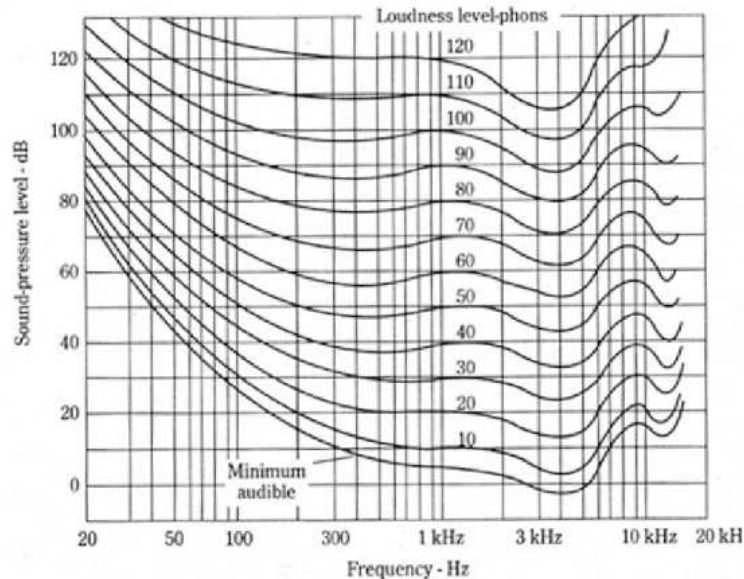


FIG. 62: Courbes isosoniques de Fletcher et Munson. Les courbes représentent les mesures de pression sonore en dB qu'une personne perçoit comme étant de même niveau, en fonction de la fréquence. On peut remarquer que la partie du spectre sonore associée à la parole humaine (300 Hz–4000 Hz) correspond aux pressions les plus faibles. *Source : [FM33]*

L'acuité sonore, quelque soit le seuil mesuré, dépend d'un grand nombre de facteurs : l'azimut et l'élévation de la source, son volume, sa plage de fréquence, son enveloppe, son timbre, son attaque, le niveau sonore ambiant, la présence d'une ou plusieurs sources, la présence d'écho, la connaissance a priori de la source, l'attention de l'auditeur, la corrélation avec un stimulus visuel, les capacités intrinsèques de l'auditeur, la durée du stimulus sonore etc...

Il est important de connaître ces facteurs car les informations sur la précision de la localisation d'une source sonore que l'on retrouve dans la littérature pourront dépendre de ces facteurs.

Bien qu'elles reposent sur les mêmes facteurs, la relation entre localisation absolue et relative n'est pas encore clairement établie [RMG98], [MTY08]. Les études montrent que les humains possèdent une localisation relative de quelques degrés (1–10 degrés) [PS90] et une localisation absolue plus large (2–30 degrés) [OP84]. Dans l'idée de s'appuyer sur les capacités de localisation de l'homme pour accélérer les calculs de réverbération, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la localisation absolue. Nous considérons celle-ci comme l'information la plus pertinente dans une optique de spatialisation so-

nore puisqu'elle mesure la capacité à localiser une source sonore. La localisation relative concerne elle la capacité à détecter des changements dans l'environnement sonore. Ainsi, quand bien même la localisation relative peut distinguer que deux stimuli proviennent de deux sources spatialement différentes, l'auditeur peut ne pas être capable de localiser précisément ces stimuli. Toutefois, nul doute que cette information ainsi que celle relative au mouvement d'angle minimum peuvent être exploitées efficacement en réalité virtuelle.

Mener des expérimentations sur la localisation est très contraignant. Il faut disposer d'une salle anéchoïque puis, pour varier les positions de la source sonore, soit disposer d'un grand nombre d'enceintes disposées autour de l'auditeur soit employer un mécanisme de type bras articulé sur lequel est disposé un haut-parleur. De plus, il faut mettre en place une méthode pour collecter les estimations de localisation [GGE⁺95]. Or il est montré [Car96a], [CLH97] que ces deux derniers points peuvent induire un certain nombre de biais dans l'étude et donc mener à des erreurs.

Nous nous sommes donc retournés vers les expérimentations existantes : Makous et Middlebrooks [MM90], Middlebrooks et Green [MG91], Oldfield et Parker [OP84] sont les plus complètes. Il est en effet compliqué de trouver des résultats complets et correspondant à des évaluations en écoute naturelle (c'est le cas lorsque l'auditeur ne porte pas de casque) et ne présentant pas des conditions particulières : [MB02] utilise comme stimulus sonore le prénom de l'auditeur, [KBSC07] étudie l'impact d'un élément perturbateur etc.

Les résultats de l'expérimentation de Oldfield et Parker [OP84] sont ceux que nous avons retenus car ce sont les plus complets. La figure 63 décrit le dispositif employé pour cette étude. Le sujet est assis sur une chaise, sa tête est immobilisée, ses yeux sont bandés. Au dessus de lui une arche métallique orientable porte à ses extrémités deux enceintes. Les enceintes peuvent être positionnées en tout point d'une sphère de 94 cm de diamètre dont le centre est la tête de l'auditeur. Le sujet tient dans sa main un pistolet qu'il utilise pour indiquer la position de la source sonore. Lorsque le pistolet est pointé, deux appareils photographiques prennent des clichés qui sont exploités par la suite pour évaluer la direction indiquée en trois dimensions. Enfin, le son produit par les enceintes est un bruit blanc ²⁸.

En dehors des erreurs que nous avons déjà évoquées (possiblement introduites par le dispositif et par la méthode de collecte des informations), deux autres biais sont à pointer. Premièrement, les stimuli sonores sont des bruits blancs or les sources sonores entendues dans un environnement virtuel ont rarement cette caractéristique. De plus, l'utilisateur a la tête immobilisée or la liberté de pouvoir tendre l'oreille pour obtenir une image sonore différente est un moyen important pour affiner la localisation.

Enfin, notons que les résultats obtenus et présentés sur la figure 64 présentent des résultats conséquents mais incomplets. Les mesures sont restreintes en élévation à l'intervalle $[-40^\circ, +40^\circ]$. Les erreurs en azimut (voir figure 64 (a)) s'échelonnent de 2° (erreur obtenue par exemple pour une azimut de 0° et une élévation de 10°) à 38° (erreur obtenue pour une azimut de 150° et une élévation de 40°). Nous pouvons observer qu'en dessous d'une azimut de 90° et quelque soit l'élévation, l'erreur en azimut est rarement au dessus de 10° . Au dessus d'une azimut de 90° et quelque soit l'élévation, l'erreur en azimut est comprise entre 10° et 38° .

²⁸Un bruit blanc est un son qui contient toutes les fréquences et chaque fréquence a la même énergie.

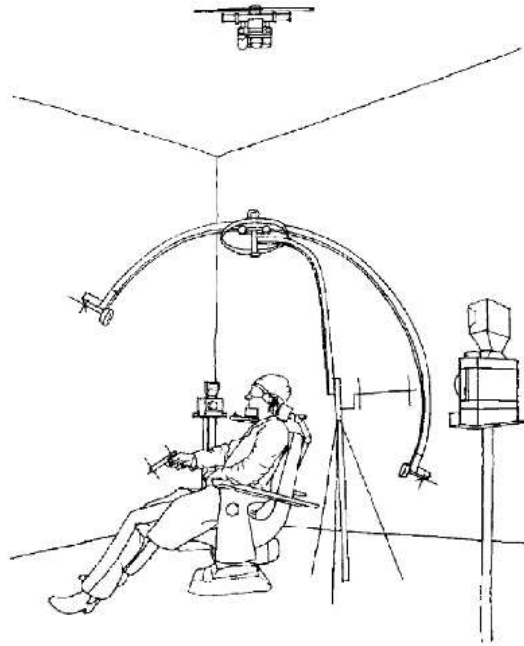


FIG. 63: Dispositif employé par Oldfield et Parker pour évaluer la capacité de localisation absolue. *Source : [OP84]*

Les erreurs en élévation (voir figure 64 (b)) s'échelonnent de 2° (erreur obtenue par exemple pour une azimuth de 0° et une élévation de -30°) à 22° (erreur obtenue pour une azimuth de 170° et une élévation de 30°). Nous pouvons observer qu'en dessous d'une azimuth de 90° et quelque soit l'élévation, l'erreur en élévation est rarement au dessus de 10° . Au dessus d'une azimuth de 90° et quelque soit l'élévation, l'erreur en élévation est comprise entre 10° et 26° .

Ainsi, pour un couple azimuth-élévation donné, le flou de localisation est dans le meilleur des cas de 2° d'azimut pour 4° d'élévation (à la position 0° d'azimuth et -40° d'élévation) et dans le pire des cas de 38° d'azimut pour 16° d'élévation (à la position 150° d'azimut et 40° d'élévation).

On constate donc de fortes disparités pour les erreurs en azimuth. Globalement, il existe des zones spatiales importantes où le flou de localisation est de l'ordre de 10° à 20° . De plus, on peut considérer que pour des élévations plus extrêmes les erreurs seraient encore plus importantes. L'importance de ce flou de localisation est une information qui nous conforte dans l'idée de proposer des environnements virtuels crédibles et non pas physiquement réalistes.

Une fois ces différents résultats collectés, nous pouvons nous servir de ceux-ci pour établir une carte d'acuité sonore relative à la localisation absolue. Si les informations étaient complètes, il nous serait possible de définir une sphère d'acuité sonore formée de facettes rectangulaires dont la taille et la position correspondraient aux erreurs en azimuth et en élévation pour un couple d'azimut et élévation donné. La surface de cette sphère d'acuité sonore est donc recouverte de facettes rectangulaires qui parfois laissent des trous

et parfois se chevauchent. Les trous apparaissent dans les zones d'acuité fine où les facettes sont de petite taille, ce sera le cas principalement au niveau de l'équateur (élévation nulle). Il faut alors effectuer une interpolation entre les flous de localisation connus pour des positions voisines. Par contre, dans les zones où l'acuité est plus grossière, les facettes rectangulaires se chevaucheront, ce sera notamment le cas en direction des pôles. Il faut alors effectuer un redécoupage pour éviter ces chevauchements.

Le point important est de disposer d'une sphère d'acuité sonore dont la surface ne présente pas de trous. Il est donc nécessaire en amont de disposer de données sur les erreurs de localisation qui soient complètes et probablement réactualisées. Dans la prochaine section nous présentons différentes exploitations possibles de la sphère d'acuité sonore.

13.3 Calcul de réverbération et rendu perceptif

Dans la section précédente nous avons expliqué comment nous procéderions, si nous avions l'ensemble des données en notre possession, pour créer une sphère d'acuité sonore. Celle-ci permet de connaître le flou de localisation absolue pour un couple azimut-élévation donné. Nous avons également constaté que ce flou est parfois très important.

Comme le montre Gaver [Gav93], une approche écologique peut aussi s'appliquer à l'audition. Dans son article l'auteur fait la distinction entre l'écoute musicale et l'écoute quotidienne usuelle. Alors que la première écoute s'intéresse aux propriétés du son tels que le timbre, l'attaque ou l'enveloppe, l'écoute usuelle se focalise sur l'évènement qui est à l'origine du son et par extension aux actions qui peuvent s'offrir. L'approche écologique de l'audition indique que l'homme n'entend pas des signaux acoustiques ou des ondes sonores mais des évènements sonores. Lorsque dans la rue un piéton entend le bruit d'une voiture, il lui importe plus d'en déterminer la provenance et la distance le séparant d'elle que d'étudier le timbre du moteur. La vision écologique de l'audition nous pousse à réfléchir sur comment un évènement sonore est perçu puis interprété plutôt que produit. Cette approche nous incite également à développer des environnements sonores composés de sons clairement identifiables plutôt qu'à s'attacher à la physique du son.

Dans le chapitre 12 nous avons présenté différentes méthodes permettant de simuler la réverbération sonore. Dans une optique de réverbération crédible, il est préférable de disposer d'une méthode qui permette de calculer la réverbération dans un environnement dynamique. Nous appelons environnement dynamique un environnement où les sources sonores, les auditeurs mais également des éléments de l'environnement sont mobiles. La méthode de lancer de frustum (voir section 12.4 page 129) est celle qui répond le mieux à ces contraintes. Toutefois, des optimisations sont encore nécessaires pour en accélérer le déroulement tout en complexifiant la scène simulée.

13.3.1 Rendu perceptif pour le lancer de frustum

Un grand nombre des frusta émis et propagés dans l'environnement l'est en vain, c'est-à-dire que ceux-ci ne rencontrent aucun receveur. Ceci implique qu'un grand nombre de

calculs de propagation et d'intersection avec les surfaces est inutile. Nous allons maintenant présenter les solutions que nous proposons pour remédier à ceci.

Lancer de frusta depuis l'auditeur

Nous proposons comme première optimisation d'émettre puis propager les frusta depuis l'auditeur et non plus depuis la source sonore. Dans un premier temps, assurons-nous que cette proposition a un sens. Les phénomènes physiques simulés dans la méthode du lancer de frustum sont les réflexions, la transmission et la diffraction. Les réflexions sont considérées comme spéculaires donc répondent à la loi de Snell-Descartes qui indique que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. La réciproque étant vraie, il n'y a pas d'objection par rapport à une réflexion spéculaire, d'émettre les frusta depuis l'auditeur. Pour les mêmes raisons, il n'y a pas d'objection à émettre les frusta depuis l'auditeur pour gérer les transmissions.

Nous rappelons que la méthode de lancer de frustum se base sur la théorie uniforme de la diffraction pour gérer cette dernière (voir section 12.4.4). Le frustum incident est prolongé en partie dans la zone d'ombre. La forme et la direction du frustum d'ombre (voir figure 57 page 133 pour une illustration) sont déterminées par la théorie uniforme de la diffraction et par l'angle formé avec le côté dans l'ombre de l'obstacle. Le frustum d'ombre couvre une grande partie de la zone d'ombre. Avec notre méthode, lorsque le frustum émis depuis l'auditeur rencontre un obstacle, le processus est similaire et un frustum d'ombre est généré. Puisque la technique employée ici prolonge en partie le frustum incident et que la zone d'ombre est en grande partie couverte, la source sonore positionnée de l'autre côté de l'obstacle est bien incluse dans le frustum d'ombre. En conclusion, émettre les frusta depuis l'auditeur est tout à fait valide.

On peut alors s'interroger sur le critère choisi pour stopper la propagation des frusta. En effet, dans la méthode classique il est possible, en cours de propagation, de diminuer l'énergie portée par un frustum. Pour cela il suffit, pour un frustum donné, de tenir compte de la distance parcourue pour estimer l'absorption de l'air. Pour chaque réflexion ou diffraction subie par le frustum, il est également possible de diminuer en conséquence l'énergie portée par le frustum. Ainsi, l'énergie d'un frustum s'amenuise au cours de sa propagation dans l'environnement jusqu'à potentiellement disparaître. Dans les faits, la solution employée par les auteurs est de choisir un nombre de rebonds maximum. Cette solution a l'avantage de supprimer un certain nombre de calculs et permet une plus grande maîtrise de la complexité de la méthode. Nous pensons pouvoir faire nous aussi ce choix d'un nombre maximum de réflexions ou de diffractions pour la raison suivante : Kuttruff [Kut95] montre qu'au dessus du seuil de deux ou trois rebonds, l'énergie reçue par l'auditeur provient principalement des réflexions diffuses (voir figure 65 pour une illustration). Or, les méthodes géométriques ne gèrent que les réflexions spéculaires. Le rayonnement diffus correspond essentiellement à la partie des réflexions tardives de la réponse impulsionnelle, celles-ci dépendent principalement de la taille de l'environnement et des coefficients d'absorption des matériaux le composant [Eyr30]. Une solution plus efficace que de multiplier le nombre de réflexions pour déterminer la partie tardive de la réponse impulsionnelle, consiste à utiliser des filtres de réverbération artificielle. Ces réflexions tardives n'apportent plus d'informations de localisation par contre elles apportent en

réalisme en rendant le son moins sec. De plus, elles fournissent une information sur la nature et le volume de l'environnement virtuel.

Une objection possible à l'encontre de notre méthode est qu'une partie des frusta émis depuis l'auditeur l'est aussi en vain car ces derniers ne rencontreront aucune source sonore. Nous ne pouvons qu'accepter cette objection, toutefois nous pouvons remarquer que notre solution limite grandement le nombre de frusta émis. Ainsi, nous évitons de calculer la propagation de frusta qui seraient émis depuis des sources sonores dont la portée même en champ libre n'atteindrait pas l'auditeur. De plus, l'émission de frusta n'est faite que depuis une origine (l'auditeur) et non répétée autant de fois que de sources sonores sont présentes.

À notre connaissance, aucune méthode d'acoustique géométrique n'a appliqué ce principe d'émettre depuis l'auditeur plutôt que depuis la source. Pourtant, celui-ci est à la base de la méthode du lancer de rayons en synthèse d'images. Le cœur de cet algorithme est de simuler le parcours inverse de la lumière. Dans un parcours réel, les rayons de lumière sont émis depuis une source lumineuse puis propagés dans l'environnement jusqu'à rencontrer une caméra (les yeux d'un utilisateur). Si ce parcours naturel était simulé en synthèse d'images, le temps de calcul serait extrêmement long. Or, de fait il n'y qu'une infime partie de la lumière propagée qui parvient à l'oeil de l'utilisateur. Aussi, l'algorithme de lancer de rayons émet les rayons depuis la caméra pour déterminer la couleur des pixels affichés à l'écran [WSBW01].

On pourra alors nous faire observer que la taille du champ de vision est limitée alors que l'audition est omnidirectionnelle. Effectivement devoir envoyer des frusta dans toutes les directions a un coût. Heureusement, l'acuité visuelle est beaucoup plus fine que l'acuité sonore, il n'est donc pas nécessaire d'émettre autant de rayons en acoustique qu'en synthèse d'images. Voyons maintenant comment nous pouvons exploiter les limites de l'acuité sonore.

Exploitation de la sphère d'acuité sonore pour l'émission des frusta

L'optimisation précédente consiste à émettre les frusta depuis l'auditeur. Alors que dans la méthode du lancer de frustum ceux-ci sont initialement de taille uniforme, nous proposons d'employer la sphère d'acuité sonore comme patron pour définir la taille des frusta à envoyer. Nous avons vu (section 13.2) qu'il existe des zones de flou de localisation. Aussi, il nous semble inutile d'émettre des frusta de même taille pour toutes les directions. En se servant de la sphère d'acuité sonore comme masque pour les frusta, nous échantillonons plus finement les frusta dans les directions où l'acuité est la plus performante et émettons des frusta plus larges dans les directions où l'acuité est plus grossière.

Le principe d'émettre depuis l'auditeur des frusta dont la taille dépend de l'acuité sonore nous permet de facto d'appliquer des optimisations supplémentaires. La première peut être utilisée lorsque le nombre de sources dans l'environnement est important. Dans cette configuration un phénomène perceptif de masquage [Moo03] peut intervenir empêchant l'auditeur de percevoir l'ensemble des sources sonores. Ce masquage peut avoir plusieurs facteurs comme une forte différence de volume, le spectre des sources [BvSJC05] et/ou leur localisation spatiale [BSK05]. Cet effet de masquage a déjà été exploité avec succès pour la sonorisation d'environnement virtuel [TGD04, vdDKP04] afin de sortir de

la chaîne de traitement des sources sonores qui n'auraient pas été perçues par l'auditeur. Nous proposons d'effectuer ce filtrage parmi les sources sonores présentes au sein d'un même frustum. Le fait d'émettre les frusta depuis l'auditeur simplifie cette étape car les sources sonores sont déjà regroupées au sein d'un frustum, cela nous dispense donc d'une phase de regroupement des sources avant d'effectuer les éventuels masquages.

L'optimisation précédente a permis de supprimer un certain nombre de sources sonores inaudibles. Il est alors possible d'utiliser une optimisation supplémentaire parmi celles qui demeurent audibles. Lorsque plusieurs sources sont situées à l'intérieur d'un même frustum il est possible de les regrouper (donc de les mixer) pour ne former qu'une unique source sonore globale représentant toutes les sources qu'elle contient [TGD04, MBT⁺07]. Ceci permet par la suite de factoriser les traitements nécessaires à la détermination de la réponse impulsionnelle. Cette source globale peut être associée au centre du frustum. Alors que réaliser le regroupement des sources peut être coûteux [TGD04, MBT⁺07], le fait que les sources appartiennent à un même frustum indique qu'il existe une cohérence spatiale entre elles. Il reste alors à tenir compte pour le mixage de la distance entre l'auditeur et les différentes sources pour tenir compte de l'atténuation dans l'air.

Le dispositif employé pour la restitution sonore ne peut positionner une source virtuelle dans l'espace qu'approximativement [PK01]. Encore une fois il n'est probablement pas nécessaire d'effectuer une simulation plus précise que ce que peut rendre le dispositif de restitution. Aussi, il pourrait être intéressant de modifier la sphère d'acuité sonore pour qu'elle tienne compte des capacités du dispositif à positionner une source dans l'espace.

Exploitation de la sphère d'acuité sonore et imprécisions

Dans les zones de flou de localisation important, les facettes rectangulaires servant de patron pour les frusta sont très larges. Aussi, même en appliquant une subdivision en sous-frusta, il est probable que des erreurs interviennent dans la propagation, ces erreurs de précisions sont en partie inhérentes à la méthode du lancer de frustum puisque, contrairement à la méthode du lancer de faisceaux, les frusta ne sont pas élagués pour correspondre exactement à la taille des réflecteurs. Notre méthode reposant sur celle du lancer de frustum nous exploitons la propriété de subdivision adaptative (voir section 12.4.3). Pour les frusta les plus larges (i.e. ceux correspondant aux zones où le flou de localisation est le plus important), deux solutions se proposent à nous. Soit accepter un surcout et décider d'effectuer une subdivision adaptative plus importante. Soit accepter ces erreurs en considérant qu'elles se situent principalement en direction des pôles. Or, en règle générale, ces directions ne correspondent pas aux zones où l'utilisateur porte son attention et son intérêt. Si des erreurs de localisation apparaissent dans le champ de vision de l'utilisateur et que celles-ci sont limitées à quelques degrés, l'effet ventriloque [AB04] que nous avons déjà mentionné incitera l'utilisateur à percevoir de façon unifiée les stimuli visuels et sonores correspondant au même objet ou au même évènement. De fait, le son semblera provenir de la représentation visuelle de l'objet ou évènement.

La méthode originale de lancer de frustum exploite une technique de subdivision adaptative d'un frustum en sous-frusta pour minimiser les erreurs (voir section 12.4.3 page 131). Parallèlement à cette technique il semble intéressant de tenir compte de l'angle minimum audible pour définir différentes zones à l'intérieur des frusta de premier niveau. Ces zones

n'ont pas d'impact sur la propagation des frusta car elles n'interviennent pas dans le processus de subdivision des frusta. Ces zones sont exploitées pour s'adapter à la capacité de discrimination de l'auditeur. En effet, même si un auditeur n'est pas capable de déterminer avec précision l'origine d'une source (flou de localisation dont nous avons principalement parlé jusqu'à présent) il est capable de discriminer des sources sonores à l'intérieur d'une zone de flou de localisation. En tenant compte de l'angle minimum audible nous souhaitons conserver cette capacité de discrimination lors de la restitution sonore.

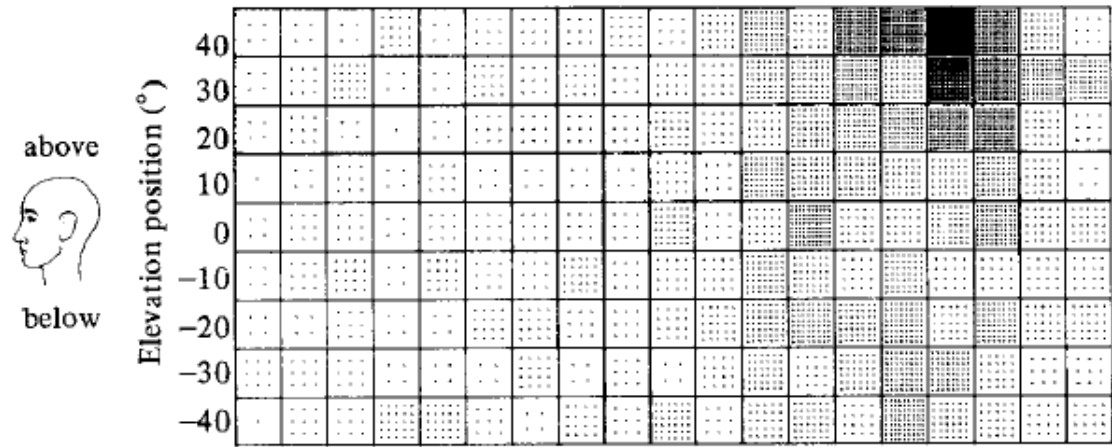
Notre méthode suit une approche écologique de l'acoustique c'est-à-dire que nous nous intéressons plus à ce que l'auditeur perçoit et comprend de la scène sonore qu'à la représentation physiquement réaliste de l'environnement sonore. Cette approche se concrétise dans notre méthode au travers des caractéristiques suivantes : notre référence est la perception humaine plutôt que la réalité physique. De plus, contrairement aux méthodes existantes qui suivent le déroulement physique de la propagation, notre processus de calcul de propagation sonore est initié au niveau de l'auditeur et non au niveau de la source sonore. Enfin, nous acceptons un certain niveau d'erreur dans la réverbération du moment que celles-ci n'empêchent pas l'identification des sources sonores et une bonne compréhension de la scène.

Dans le cadre d'un environnement virtuel multimodale et interactif, de multiples stimuli sont proposés à l'utilisateur. Ses capacités perceptives et d'attention sont donc partagées et non pas focalisées sur un seul stimulus comme c'est le cas lors des études sur la localisation sonore. Aussi, nous pensons que l'information pertinente pour l'utilisateur est qu'une voiture arrive derrière lui sur sa droite et non pas que celle-ci arrive avec un azimut de -70° . Reste à notre charge d'être capable de calculer et de lui faire parvenir cette information.

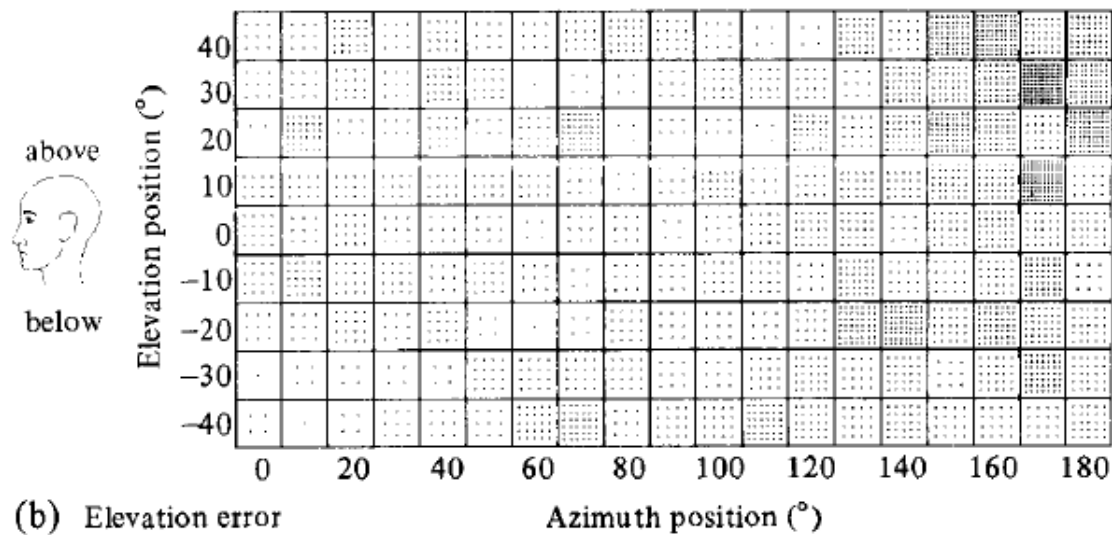
13.3.2 Rendu perceptif et sonel mapping

Rappelons que la méthode du sonel mapping (voir section 12.5) est une application à l'acoustique de la méthode du photon mapping. Celle-ci se déroule en deux passes, une première d'émission et de propagation de sonels depuis la source sonore puis une deuxième passe consistant à émettre des rayons depuis l'auditeur pour déterminer l'énergie acoustique reçue par l'auditeur. Cette méthode vise à réaliser une simulation très précise de la réverbération. La première passe est la plus coûteuse et doit être réitérée à chaque changement de position des sources sonores, c'est pourquoi elle ne peut être actualisée en cours d'expérience. La deuxième passe est elle mise à jour à la volée à chaque déplacement de l'utilisateur. Nous pensons que la sphère d'acuité sonore peut être avantageusement exploitée lors de cette deuxième passe pour en accélérer les calculs. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné les capacités auditives de discrimination sont assez faibles, aussi nous pensons qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des calculs fins comme ceux effectués dans la méthode du sonel mapping. Ainsi, plutôt que d'envoyer des rayons depuis l'auditeur pour déterminer les sources sonores incidentes, nous proposons d'envoyer des frusta dont la forme dépend de la sphère d'acuité sonore. Le nombre de frusta à envoyer sera alors bien inférieur au nombre de rayons émis (ce nombre doit être très grand pour éviter les problèmes d'échantillonnage inhérents à la méthode du lancer de rayons). Enfin,

lors de cette deuxième passe, des calculs coûteux sont effectués pour détecter les sonels situés dans le voisinage du point d'impact entre un rayon et une surface. Cette phase est simplifiée puisque sont pris en compte les sonels internes au frustum, de plus, la notion de voisinage employée aura une base perceptive plutôt qu'empirique.



(a) Azimuth error



(b) Elevation error

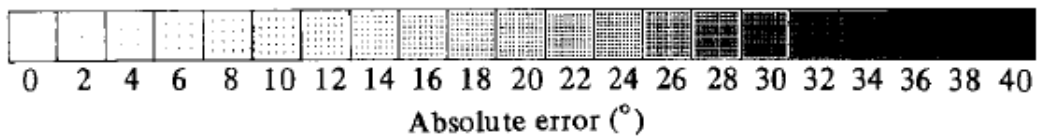


FIG. 64: Erreurs moyennes de localisation absolue. En haut l'erreur en azimuth. Au milieu l'erreur en élévation. En bas l'échelle de mesure d'erreur. *Source : [FM33]*

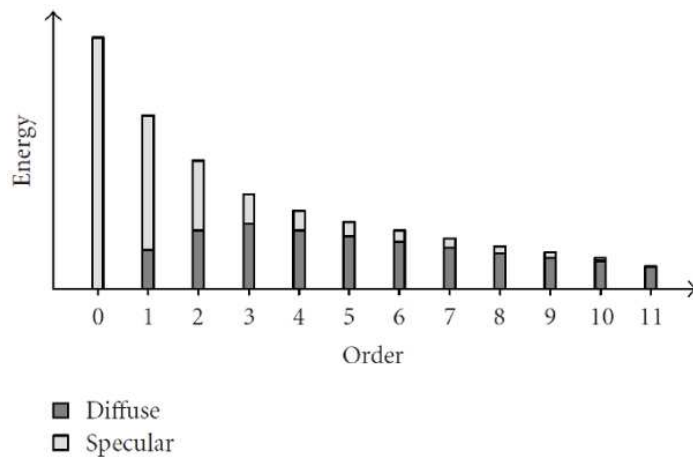


FIG. 65: Énergie sonore issue des réflexions spéculaires et diffuses. Après deux niveaux de réflexion, la part de l'énergie diffuse dans la réponse impulsionnelle de la salle prédomine. *Source : [Kut95]*

Quatrième partie

Évaluation du sentiment de présence

Cette quatrième partie représente la troisième et dernière phase de la conception d'une expérience en réalité virtuelle. Les deux premières phases consistent en l'élaboration d'un cadre théorique puis au développement logiciel et technique de l'expérience. Cette troisième phase correspond à l'évaluation de l'expérience. Typiquement celle-ci sert à vérifier qu'un sentiment de présence a bien été ressenti par les participants.

Dans le premier chapitre nous présentons les différentes méthodes existantes pour effectuer cette évaluation. Deux grandes familles de mesures sont disponibles. Les premières sont qualifiées de subjectives car elles reposent sur des méthodes d'auto-évaluation a posteriori de type questionnaire. Les deuxièmes sont présentées comme objectives car elles examinent les réponses inconscientes du participant. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des résultats de notre étude.

Pour cette phase nos contributions sont premièrement l'élaboration d'un questionnaire comportant soixante-quatre questions. Un tiers de ces questions a été créé pour cette évaluation, les autres proviennent de questionnaires présents dans la littérature. Cette évaluation a un spectre d'hypothèses très large. Le premier résultat de cette évaluation valide le bien fondé de notre définition de la présence et des notions avancées de sentiment d'existence et d'incarnation de rôle. Le deuxième résultat indique que la présence d'action a sa place comme composante de la présence. Le troisième résultat confirme la relation vertueuse entre émotions et présence. Le quatrième résultat pointe que la satisfaction des attentes, l'acceptation de se prendre au jeu et l'implication sont des étapes essentielles sur le chemin menant à la présence. Le jugement de la crédibilité est validé comme un critère pertinent. Enfin, un cinquième résultat montre la cohérence globale de notre modèle de la présence.

Chapitre 14

Les méthodes d'évaluation de la présence

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes d'évaluation du sentiment de présence. Nous rappelons que nous avons défini le sentiment de présence comme *le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où notre corps se trouve*.

Il existe deux grandes familles de méthodes d'évaluation. La première est dite subjective [SSKM01] car elle consiste en une auto-évaluation a posteriori menée par l'utilisateur. La deuxième est considérée comme objective [Mee01] car elle évalue les réactions inconscientes qui se manifestent [SVS05] lorsque l'utilisateur ressent un sentiment de présence. Ces réactions peuvent être physiologiques (accélération du rythme cardiaque, transpiration etc.), comportementales (modification de la posture, etc.), émotionnelles (peur, joie, tristesse, anxiété etc.), intellectuelles (conversation avec un avatar) ou sentimentales (empathie etc.).

14.1 Protocole et recommandations diverses

14.1.1 Protocole et vocabulaire

Très souvent, une expérimentation consiste en la création de situations qui vont différer selon un certain nombre de facteurs, ceux-ci sont appelés les variables indépendantes de l'étude. Les variables indépendantes sont les propriétés qui sont estimées être les causes des variations d'une variable dépendante. Dans l'étude présentée au prochain chapitre, les variables indépendantes sont les différentes interfaces de restitution visuelle employées : écran stéréoscopique et écran autostéréoscopique. On recueille alors des données sur les manifestations ou les éléments (qualité de l'immersion, sentiment de présence etc.) qui doivent changer d'une situation à l'autre, ces manifestations sont appelées les variables dépendantes. La comparaison des deux groupes de données obtenues à partir des deux situations doit idéalement, permettre de conclure quant à l'effet de la variable indépendante sur la variable dépendante.

Par ailleurs, on appelle variables indépendantes *provoquées* les variables indépendantes

pouvant être manipulées ou contrôlées par l'expérimentateur (dans notre cas il s'agit des différents systèmes de restitution visuelle).

Les variables indépendantes *invoquées* sont des caractéristiques naturelles sur lesquelles l'expérimentateur ne peut agir, ce sera par exemple l'âge ou le sexe des participants ou les expériences préalables dans les environnements virtuels.

14.1.2 Recommandations

L'expérience tirée de plusieurs années d'évaluation du sentiment de présence a permis d'identifier un certain nombre de critères permettant de s'assurer de la validité de la méthode employée [IJs04]. Voici ces critères :

- **La fiabilité.** La mesure doit être stable et cohérente au cours du temps, autrement dit elle doit donner des résultats comparables pour des conditions similaires. Une façon de s'assurer de la fiabilité de la mesure est par exemple de proposer plusieurs questions ciblant la même variable dépendante au sein d'un même questionnaire. On peut alors calculer le coefficient alpha de Cronbach [Cro90] qui traduit le degré d'homogénéité des différentes réponses. Cet indice varie de 0 (fiabilité nulle) à 1 (fiabilité excellente). Il est considéré qu'un score de 0,80 est un minimum dans le cadre d'une recherche avancée, alors qu'un score de 0,60 peut être considéré comme suffisant dans le cadre d'une recherche exploratoire.
- **La validité.** Il faut s'assurer que l'expérimentation mesure bien le facteur escompté. De plus, il faut que l'expérimentation repose sur une base théorique solide et une compréhension précise des tenants et aboutissants sous-jacents au concept mesuré. Il faut enfin confronter les résultats obtenus avec d'autres expérimentations similaires.
- **La sensibilité.** La mesure doit pouvoir distinguer différents niveaux de présence. Notons, que ce point peut se discuter si l'on considère que la présence est binaire : l'utilisateur est soit présent dans l'environnement réel soit dans le virtuel mais pas entre les deux.
- **La robustesse.** La méthode employée pour la mesure doit pouvoir être transposée à différents systèmes de réalité virtuelle et différents contenus et contextes.
- **La mesure ne doit pas être intrusive.** La méthode employée ne doit pas perturber le déroulement de l'expérience.
- **La commodité.** Il est préférable que la méthode soit simple à comprendre, à mettre en place et à administrer.

14.2 Les méthodes subjectives

Les méthodes subjectives reposent essentiellement sur les ressentis de l'utilisateur que ce dernier doit auto-évaluer. La majeure partie de ces méthodes repose sur des questionnaires.

14.2.1 Principe de l'évaluation par questionnaire

Tous les questionnaires traitant de la présence ou de ses différentes composantes utilisent une échelle de Likert [Lik32]. Cette mesure psychométrique consiste à proposer des affirmations tranchées à l'utilisateur. Celui-ci exprime alors son degré d'accord ou de désaccord en choisissant parmi cinq ou sept niveaux progressifs de réponses qui vont d'un fort rejet à une forte acceptation. Proposée des affirmations très tranchées et des réponses aux extrémités verbalement marquées permet de limiter la variabilité des réponses. Pour s'assurer de la fiabilité du résultat plusieurs questions ciblant le même concept (la même variable dépendante) peuvent être proposées, le coefficient alpha de Cronbach est alors calculé.

14.2.2 Les principaux questionnaires

Dans cette section nous présentons les principaux questionnaires développés dans l'optique de mesurer la présence et/ou les facteurs sous-jacents à celle-ci. Une partie des questions de notre étude provient de ces questionnaires.

Le Presence Questionnaire

Ce questionnaire conçu par Witmer et Singer [WS98] entend mesurer la présence via quatre facteurs de la présence. Ces facteurs sont les suivants : le niveau de contrôle (ou d'interaction) sur l'environnement, des facteurs sensoriels (la qualité de l'immersion), le niveau de distraction qui peut perturber l'expérience et le degré de réalisme de l'environnement virtuel. Le questionnaire comporte dans sa version finale dix-neuf questions. Ce questionnaire est un des plus anciens traitant de la présence. Toutefois, comme le fait remarquer Slater [Sla99], il est critiquable sur plusieurs points. Premièrement, la base théorique sur laquelle repose le questionnaire est contestable. Ainsi, comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 7.1.1 (page 55) la distinction entre immersion et présence n'y est pas claire. Les auteurs définissent l'immersion comme *un état psychologique caractérisé par le sentiment de se sentir enveloppé par, inclus dans, et d'interagir avec un environnement qui fournit un flux continu de stimuli et d'expériences*. Au delà de cette considération théorique, Slater [Sla99] note que ce questionnaire évalue la perception des propriétés du système qu'a l'utilisateur et non pas son expérience ou la présence comme un état psychologique. Prenons deux exemples de question (traduits de l'anglais) : *Avec quelle facilité pouviez-vous déplacer ou manipuler des objets dans l'environnement virtuel ?* et *Dans quelle mesure aviez-vous conscience des évènements se déroulant autour de vous dans le monde réel ?* Si ces questions permettent effectivement de mesurer les qualités du dispositif (qualités évaluées par l'utilisateur), elles ne correspondent pas à l'expérience d'un sentiment de présence. De fait, on peut considérer que ce questionnaire ne répond pas au critère de validité décrit dans la section précédente.

L'ITC-Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI)

Ce questionnaire, conçu par Lessiter et al [LFKD01], comporte 44 questions et souhaite mesurer la présence au travers des quatre facteurs de la présence suivants : la présence

spatiale ressentie, l'engagement de l'utilisateur, la perception de l'aspect naturel de l'environnement et les effets négatifs générés par le dispositif. Ce questionnaire est intéressant pour plusieurs points. Les auteurs ont tenu à ne pas poser des questions directes sur la présence comme par exemple *avec quelle intensité étiez-vous présent ?* Ce point est important car il est préférable que le sujet ne puisse pressentir la variable dépendante ciblée par une question. De plus, la présence est un concept abstrait or il est fort probable que expérimentateurs et sujets n'appréhendent pas la présence de la même façon. Les auteurs de ce questionnaire ont ainsi établi un certain nombre de recommandations quant à la formulation des questions. Nous énoncerons ces recommandations ultérieurement (section 14.2.4). Ce questionnaire est très complet et pose des questions concrètes comme *Je me suis senti nauséeux* pour mesurer les effets négatifs ou plus indirectes comme *J'ai eu l'impression que la température avait changé pour correspondre à la scène virtuelle* pour évaluer la présence spatiale ou *J'ai perdu la notion du temps* pour mesurer l'engagement de l'utilisateur.

Le Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

Ce questionnaire, conçu par Schubert et al [SFR01], comporte quatorze questions dont certaines proviennent du Presence Questionnaire [WS98] et du SUS Questionnaire [SUS94]. Ce questionnaire vise à évaluer les trois variables dépendantes suivantes identifiées comme des facteurs de la présence : la présence spatiale, l'implication et le jugement du réalisme de l'environnement virtuel. Notons que dans la version mise à jour du questionnaire une question sur la présence générale a été intégrée. Ce questionnaire est complet et représente en quelque sorte une synthèse des questionnaires précédents. On peut toutefois lui reprocher d'employer des questions directes comme par exemple *Je ne me suis pas senti présent dans l'espace virtuel*. Il n'est pas sûr que les notions sous-jacentes à la présence soient partagées par les sujets de l'expérience et par les expérimentateurs (voir section 14.2.4 sur les recommandations relatives à la formulation des questions). Par contre, nous apprécions tout particulièrement la présence d'une question qui fait écho à notre proposition d'une quatrième composante de la présence (voir section 6.4 page 53), à savoir la présence d'action. Cette dernière est évaluée par la question suivante : *J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci*.

Le Slater-Usuh-Steed (SUS) questionnaire

Ce questionnaire, conçu par Slater et al [SUS94], comporte six questions chargées d'évaluer la présence spatiale ressentie. Rappelons que la présence spatiale est le sentiment d'être dans un environnement considéré comme réel (voir section 6.4 page 53). Les auteurs identifient les trois notions suivantes comme étant des marqueurs de la présence spatiale : le sentiment d'être là (i.e. dans l'environnement virtuel), dans quelle mesure l'environnement virtuel devient la réalité de l'utilisateur et enfin dans quelle mesure l'expérience dans l'environnement virtuel est remémorée comme étant un lieu que l'utilisateur a visité et non simplement vu. L'idée conductrice sous-jacente aux trois marqueurs de la présence précédents est que, si un utilisateur ressent un sentiment de présence spatiale alors l'environnement virtuel a été perçu comme un environnement réel. Les questions

visent donc à évaluer le degré de *réalité* de l'environnement virtuel, perçu par l'utilisateur. Ainsi la question suivante *Quand vous vous remémorez l'expérience, est-ce que vous repensez à l'environnement virtuel plus comme des images que vous avez vues ou plus comme un endroit que vous avez visité ?* indique que si l'utilisateur a le sentiment d'avoir fait un voyage dans l'environnement virtuel alors cela indique que l'environnement virtuel a été accepté et considéré comme un environnement réel. Contrairement aux trois questionnaires précédents, le but de celui-ci n'est pas d'identifier des facteurs sous-jacents à la présence mais bien d'évaluer le sentiment de présence ressenti. En cela ce questionnaire est original et particulièrement intéressant. Enfin, citons une dernière particularité de ce questionnaire. Alors que les autres méthodes effectuent des moyennes sur les réponses aux questions pour interpréter les résultats, les auteurs ne comptabilisent dans le cas présent que les scores élevés (c'est-à-dire les réponses 6 et 7 sur une échelle allant de 1 à 7). Ceci est en accord avec la conception binaire de la présence défendue par les auteurs : un utilisateur est soit présent dans l'environnement réel soit présent dans l'environnement virtuel, mais il ne peut être entre les deux.

Observation sur la validité de l'utilisation d'un questionnaire pour valider une analyse théorique

A l'exception du SUS Questionnaire [SUS94], la conception des questionnaires précédents a été la suivante. En amont, une phase de réflexion et d'identification a priori des facteurs de la présence a été menée. Les différents auteurs ont alors créé des questionnaires comportant un nombre conséquent de questions puis ont effectué plusieurs expérimentations afin de mesurer l'impact effectif de ces facteurs sur la présence. A l'issue de ces expérimentations, les questions évaluées comme étant les plus pertinentes (c'est-à-dire les meilleurs marqueurs d'un facteur) ont été conservées pour constituer le questionnaire final. Il est possible de remarquer que globalement, les facteurs identifiés a priori ont été validés par ces différentes expérimentations. On peut alors légitimement se poser la question suivante : jusqu'à quel point, même inconsciemment, la conception du questionnaire et l'interprétation des résultats ne pouvaient que tendre vers la validation des facteurs pré-identifiés ? Bien entendu, cette remarque s'applique aussi à notre propre expérimentation.

14.2.3 Les limites des évaluations par questionnaire

Pour évaluer la pertinence de mesurer la présence via des questionnaires, Usoh et al [UCAS00] ont fait passer le *test de la réalité* à deux questionnaires. L'expérience fut la suivante. Soit vingt participants répartis en deux groupe de dix sujets. Le premier groupe doit réussir à trouver un objet dans l'environnement réel. Le deuxième groupe doit effectuer la même tâche mais dans un environnement virtuel. Les vingt participants sont ensuite soumis à deux questionnaires (le Presence Questionnaire [WS98] et le SUS Questionnaire [SUS94]) afin de comparer le sentiment de présence ressenti entre les deux environnements. Alors que l'on peut a priori s'attendre à un score de présence plus élevé pour le groupe ayant évolué dans l'environnement physique, il n'en est rien. Le Presence Questionnaire [WS98] ne pointe aucune différence, le SUS Questionnaire [SUS94] une très

légère. Aucun des deux questionnaires n'a donc pu réussir le *test de la réalité*. Notons que parmi les auteurs de ce test de la réalité [UCAS00], deux sont à l'origine du SUS Questionnaire [SUS94].

Mania et Chalmers [MC00] ont eux aussi mené une étude comparant le sentiment de présence dans trois environnements : un réel, un virtuel combinant images de synthèse en trois dimensions et sons et un troisième environnement uniquement sonore. Le questionnaire employé est là encore le SUS Questionnaire [SUS94]. Cette fois-ci l'environnement réel a suscité un sentiment de présence plus important que dans les deux environnements virtuels. Il existe donc une certaine incertitude quant à la fiabilité de la mesure par questionnaire.

Slater [Sla04] a mené une étude sur 74 personnes pour évaluer un état mental inventé pour l'occasion et intitulé *la couleur d'une expérience*. Pour évaluer cet état mental fictif quatorze questions ont été posées dont la suivante : *Dans quelle mesure votre journée d'hier était colorée ?* L'expérience a montré qu'il était tout à fait possible d'obtenir des résultats scientifiquement valables (par exemple le coefficient alpha de Cronbach vaut 0.84) alors que l'objet de l'étude n'a pas de sens réel puisque inventé. Selon l'auteur la présence est un état mental non encore identifié, qui n'est peut-être pas observable et qui par conséquent, ne peut être évalué seulement par un questionnaire. L'auteur invite donc les chercheurs, non pas à abandonner les questionnaires, mais à croiser ceux-ci avec d'autres formes d'évaluation comme les mesures physiologiques.

L'évaluation par questionnaire présente en effet un certain nombre de biais et limites. Par exemple la formulation des questions peut induire des ambiguïtés. De plus, les questionnaires ne permettent pas de mesurer les variations du sentiment de présence au cours de l'expérience. Il est pourtant intéressant de savoir pourquoi un utilisateur ressent un sentiment de présence au cours de l'expérience et pourquoi celui-ci peut disparaître à d'autres moments. Le principe de mesure par auto-évaluation peut souffrir d'un manque d'introspection de la part de l'utilisateur. De plus, rien ne garantit que l'expérience mémorisée soit identique à l'expérience réellement vécue. Pourtant, le questionnaire reste la solution favorite pour évaluer la présence. A cela plusieurs raisons, malgré ces biais et limites, il est possible d'espérer que ceux-ci donnent de bonnes indications à défaut de certitudes. De plus, ils ne sont pas chers à mettre en place et sont faciles à administrer puis à analyser. Enfin, ceux-ci n'interfèrent pas avec l'expérience.

14.2.4 Recommandations pour la formulation des questions

Pour tenter de palier aux différents biais inhérents à l'évaluation par questionnaire, plusieurs recommandations ont été établies notamment par Lessiter et al [LFKD01]. Ainsi, avant d'utiliser un questionnaire l'expérimentateur doit se poser les questions suivantes :

- Est-ce que la question posée est bien en rapport étroit avec l'objet de la recherche ?
- Est-ce que la question ne cible qu'un unique concept ?
- Est-ce que la formulation de la question est adéquat ? Question ouverte ou question fermée ?
- Est-ce que la question est claire ou ambiguë ? Il faut alors veiller à la précision et la simplicité du langage.

- Est-ce que la question est conductrice ? Ne contient-elle pas implicitement quelques éléments susceptibles d’orienter la réponse dans un sens ou dans l’autre ?
- Est-ce que la question requiert des connaissances ou des informations que le sujet n’a pas ? On évitera alors de poser des questions telles que *Dans quelle mesure vous êtes-vous senti présent dans l’environnement virtuel ?* car cette dernière requiert une compréhension a priori du concept de présence.
- Est-ce que la question implique la désirabilité sociale ? Autrement dit, parmi les réponses possibles, y en a-t-il qui correspondent à une meilleure image de soi que le sujet souhaiterait donner ?

Hormis les questionnaires, d’autres méthodes permettent une évaluation subjective du sentiment de présence. Nous en présentons maintenant trois exemples.

14.2.5 Les études qualitatives

Les mesures qualitatives constituent une autre solution pour évaluer la présence. Celles-ci consistent à interviewer le participant [Ret03] ou à organiser a posteriori une discussion avec un petit groupe de participants [FA00] ou à demander au sujet d’écrire et de décrire son expérience [TTC⁺03]. Ce type d’étude permet de disposer de résultats très complets, il est possible d’aborder les concepts avec plus de finesse et de sensibilité qu’avec un questionnaire. Cependant, la quantité de données collectées fait que les résultats sont plus difficiles à administrer puis à interpréter. Ce type de mesure est donc beaucoup moins courant que les questionnaires.

14.2.6 Mesure subjective et continue

Nous avons indiqué qu’une des limites des questionnaires est qu’ils ne permettent pas de rendre compte des variations de présence au cours de l’expérience. IJsselsteijn et al [IdRH⁺98] ont proposé la solution suivante pour pouvoir mesurer en continu la présence ressentie. Les participants disposent d’un levier dont ils ajustent la position afin d’indiquer en permanence au cours de l’expérience l’intensité de la présence ressentie. Les problèmes inhérents à cette méthode sont multiples. Premièrement le fait de devoir analyser son sentiment de présence en continu a de fortes chances d’entraver l’émergence du sentiment de présence. L’utilisateur n’est pas libre de vivre pleinement l’expérience. De plus, l’utilisateur doit en quelque sorte sortir de l’expérience pour communiquer son évaluation. Enfin, ce levier raccroche l’utilisateur à l’environnement réel, par conséquent il lui est probablement très difficile d’oublier qu’il se trouve dans un laboratoire.

Selon certaines études [MIWB01], [SBS03] les mesures physiologiques peuvent être une solution pour mesurer les variations de présence ressentie.

14.2.7 Mesure du temps qui passe

Selon les études de IJsselsteijn [IBSdK01] et Hägni et al [HEHR⁺07], il existe une corrélation entre la perception du temps écoulé lors d’une expérience et le sentiment de présence et/ou le degré d’implication dans la tâche à réaliser. Plus ce temps est estimé court, plus intense est le sentiment de présence. Rappelons (voir section 8.1 page 81) que

l'implication peut se définir comme *un état de forte concentration dans lequel l'utilisateur n'a plus conscience des distractions extérieures, oublie l'environnement réel dans lequel il se situe et ne fait plus attention au temps qui passe* [LFKD01]. Aussi, l'évaluation de la durée d'une expérience peut effectivement mesurer le degré d'implication. Toutefois, il ne faut pas confondre implication et présence, l'implication n'est selon nous (voir section 8.2 page 87) qu'une étape en direction de la présence. Aussi, il est tout à fait possible d'être impliqué, d'oublier le temps qui passe mais pour autant ne pas ressentir la présence.

14.3 Les méthodes objectives

Les mesures objectives entendent évaluer les manifestations incontrôlées ou irréfléchies de l'utilisateur. Ces manifestations peuvent être des réponses physiologiques ou comportementales.

14.3.1 Évaluation des réponses physiologiques

Les réponses physiologiques qui peuvent être mesurées sont le rythme cardiaque, le pouls, le rythme respiratoire, la température de la peau, le taux d'humidité ou l'activité électrique à la surface de celle-ci. L'idée sous-jacente à ce type de mesure est que, si l'utilisateur ressent la présence, ses réactions physiologiques dans l'environnement virtuel sont les mêmes que dans l'environnement réel.

Selon Lang et al [LGBA93], un changement dans le rythme cardiaque traduit souvent l'intensité d'une émotion. Une accélération indiquerait le plaisir, une émotion négative le ralentirait. En cas de stress, de la sueur apparaît dans la paume de la main, ce qui de fait, augmente la conductance de la peau. Le changement de température de la peau se mesure au niveau des extrémités du corps (les doigts la plupart du temps). Quand le stress augmente, la chaleur fuit les extrémités pour se recentrer sur le corps et donc la température baisse au niveau des extrémités.

L'expérience menée par Meehan et al [MIWB02] consiste à proposer aux participants un environnement stressant. Dans le cas présent les participants avancent au bord d'un trou situé dans le plancher d'une maison virtuelle. La figure 66 propose une vue de l'environnement virtuel stressant. La figure 67 présente le dispositif vu de l'extérieur. Le rythme cardiaque, la réponse électrodermique et la température de la peau sont mesurées en cours d'expérience. Les résultats de l'étude montrent que la variation du rythme cardiaque et les résultats obtenus par un questionnaire sont corrélés. Les auteurs concluent que le rythme cardiaque est une mesure valide de la présence. Les résultats indiquent également que la réponse électrodermique peut aussi être un marqueur de la présence mais dans une moindre mesure. La température de la peau n'a elle pas donné de résultats probants. Précisons que d'autres études corroborent ces résultats : Wiederhold [WJK⁺03] montre qu'il existe une forte corrélation entre le rythme cardiaque, la réponse électrodermique et le sentiment de présence évaluée avec le Presence Questionnaire [WS98]. L'environnement virtuel proposé consiste en un vol en avion d'une durée de six minutes puis se conclut par un atterrissage. La situation dépeinte par cet environnement est donc elle aussi susceptible de susciter des émotions.

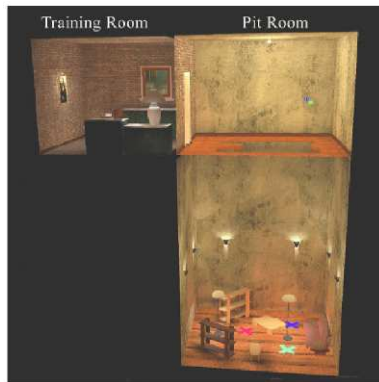


FIG. 66: Mesure physiologique pour la présence. Vue de côté de l'environnement virtuel stressant. On peut remarquer en haut à droite le trou dans le plancher. *Source : [MIWB02]*



FIG. 67: Mesure physiologique pour la présence. Le participant porte un visiocasque et l'équipement nécessaire pour les mesures physiologiques. Le sujet marche sur une planche pour simuler la sensation de vide. *Source : [MIWB02]*

Plusieurs remarques peuvent être faites quant à l'exploitation des mesures physiologiques pour évaluer la présence. Comme le note les auteurs la première limite de cette mesure est qu'elle requiert que l'environnement virtuel soit porteur d'émotions pour susciter des réponses physiologiques. Cette méthode dépend donc du contenu de l'expérience et ne peut s'appliquer à l'ensemble des applications en réalité virtuelle. Nous apportons également l'objection suivante, si les réponses physiologiques n'apparaissent que lorsque des émotions sont suscitées par l'expérience alors cela peut signifier que les réponses physiologiques ne sont que la manifestation physique de la réponse émotionnelle. De fait, la mesure des réponses physiologiques pourrait très bien ne correspondre qu'à une mesure de la réponse émotionnelle et non pas à une mesure du sentiment de présence. Le nœud du problème est donc de pouvoir clairement identifier la cause de ce changement physiologique. Enfin, on peut ajouter que ce type de mesure a un coût supérieur à celui des questionnaires et qu'il faut veiller à ce que le dispositif de mesure ne soit pas intrusif. La présence de câbles comme l'indique la figure 67 nous incite à penser que ce type d'équipement peut, par exemple, entraver les déplacements de l'utilisateur.

14.3.2 Évaluation des réponses comportementales

Les mesures comportementales visent à évaluer les actions, postures ou expressions du visage qu'un utilisateur effectue inconsciemment lorsque celui-ci se sent présent dans l'environnement virtuel [IJs04]. L'idée sous-jacente est que les réactions comportementales des participants sont semblables, que les stimuli et événements soient virtuels ou réels [FAM⁺00], [SVS05]. Si un utilisateur esquive une balle virtuelle se dirigeant vers lui, on peut alors considérer que différentes composantes de la présence sont bien suscitées (voir section 6.4 traitant des composantes de la présence page 53). Puisque l'utilisateur cherche à se protéger de la balle virtuelle cela signifie d'une part qu'il accepte cette balle

virtuelle comme étant réelle, la présence environnementale est donc bien perçue. Et d'autre part cela indique que l'utilisateur s'est bien projeté dans l'environnement puisqu'il perçoit un danger, la présence de soi est donc bien ressentie.

L'étude menée par Lepecq et al [LBP⁺09] (dont nous avons précisé le contexte section 8.2.3 page 91) montre que l'évaluation des réactions comportementales en réponse aux affordances perçues dans l'environnement virtuel constitue une solution pour mesurer la présence.

Les mesures comportementales ont plusieurs avantages. Premièrement, elles permettent d'évaluer le sentiment de présence en continu au cours de l'expérience. De plus, ces mesures ne souffrent pas des limites et écueils inhérents à l'évaluation par questionnaire (voir section 14.2.3). Enfin elles n'interfèrent pas avec le déroulement de l'expérience.

Néanmoins, cette méthode souffre elle aussi de quelques limites. Il est possible par exemple que les participants, comprenant le but de l'expérience, décident de *surjouer* leurs réactions comportementales. De plus, lors de la phase d'analyse des résultats, l'expérimentateur peut interpréter certaines réactions pour aller dans le sens de l'étude. Enfin, la limite la plus contraignante des mesures comportementales est que celles-ci sont dépendantes du contenu. Il faut donc créer des situations qui suscitent des réactions comportementales. Malgré ces quelques limites, l'évaluation des réponses comportementales nous semble être une mesure très pertinente de la présence. De plus, comme le montre l'étude de Lepecq et al [LBP⁺09], il est possible d'intégrer facilement dans l'environnement virtuel des affordances permettant une mesure comportementale.

14.4 Bilan

Malgré les limites et les biais possibles, l'évaluation par questionnaire est la plus courante. Cette méthode présente en effet un certain nombre d'avantages qui peut se révéler décisif : elle n'est pas coûteuse et est facile à mettre en place, à administrer puis à analyser. Enfin, celle-ci peut donner de bonnes indications à défaut de certitudes.

Nous avons quelques réserves quant aux mesures physiologiques car elles dépendent du contenu mais surtout, il n'est pas clair qu'elles mesurent effectivement le sentiment de présence et non seulement des réponses émotionnelles.

Enfin, pour les raisons énoncées précédemment et bien qu'elles dépendent également du contenu, nous pensons comme très pertinentes les mesures comportementales pour évaluer le sentiment de présence.

En conclusion, il nous semble qu'une bonne solution consiste à combiner évaluation par questionnaire et mesure comportementale. La première permet d'évaluer la présence mais aussi certains facteurs ou composants sous-jacents. La deuxième permet de s'assurer que la présence et ses quatre composantes (voir section 6.4 page 53) sont bien ressenties.

Chapitre 15

Notre phase d'évaluation

Ce chapitre présente la phase d'évaluation que nous avons menée. Celle-ci a un double objectif. Le premier consiste à valider certaines hypothèses que nous avons avancées pour l'élaboration de notre cadre théorique de la présence. Le deuxième objectif vise à évaluer l'impact sur la présence de deux systèmes de restitution visuelle. Les dispositifs testés sont un écran polarisé de grande dimension permettant une vision stéréoscopique et un écran autostéréoscopique à réseau lenticulaire. Pour cela, nous avons élaboré un questionnaire composé de soixante-quatre questions et identifié dix-sept variables dépendantes. Le support de l'évaluation est un environnement virtuel en trois dimensions de type jeu vidéo créé pour l'occasion.

Ce chapitre comporte quatre parties. La première présente l'élaboration du questionnaire, la deuxième le déroulement de l'expérimentation, la troisième présente les résultats obtenus. Enfin, nous proposons un rapide retour d'expérience.

15.1 Élaboration de l'étude

Pour mener cette évaluation nous avons exploité un questionnaire dont deux tiers des questions proviennent d'autres questionnaires présents dans la littérature. Les questionnaires dont nous nous sommes servis sont les suivants : *l'ITC-Sense of Presence Inventory (ITC-SOPI)* conçu par Lessiter et al [LFKD01], le *Slater-Usoh-Steed (SUS) Questionnaire* conçu par Slater et al [SUS94] et l'*Igroup Presence Questionnaire (IPQ)* conçu par Schubert et al [SFR01]. Certaines de ces questions ont été adaptées pour adhérer plus efficacement au contexte de l'évaluation. Enfin, d'autres questions ont été créées pour ce questionnaire. Celui-ci comprend au final 64 questions. L'annexe C présente le questionnaire tel qu'il a été communiqué aux participants. Pour les questions que nous avons créées nous avons veillé à suivre les différentes recommandations énoncées dans le chapitre précédent (voir section 14.2.4).

La présence étant un concept multidimensionnel, nous avons souhaité élaborer un questionnaire qui cible l'ensemble des dimensions que nous avons identifiées dans notre modèle de la présence (voir section 8.2 page 87). C'est pourquoi, ce questionnaire comporte un nombre conséquent de questions et de variables dépendantes.

15.1.1 Les variables indépendantes

Les deux variables indépendantes provoquées sont l'écran polarisé et l'écran autostéréoscopique. Nous ne revenons pas sur le fonctionnement de l'écran polarisé. Rappelons juste qu'il permet une vision stéréoscopique et qu'il présente une taille d'affichage conséquente puisqu'il mesure quatre mètres de longueur pour trois mètres de hauteur. Les participants portent des lunettes polarisées et sont situés à environ un mètre quatre-vingts de l'écran. L'image affichée recouvre donc le champ de vision de l'utilisateur. La figure 15 (page 30) présente une illustration de cet écran.



FIG. 68: Écran autostéréoscopique. À gauche l'image affichée. À droite la carte de profondeur en niveau de gris associée à l'image affichée. La carte de profondeur permet de connaître la profondeur de chaque pixel affiché. *Source : [Phi08]*

Comme son nom l'indique, l'écran autostéréoscopique permet une vision stéréoscopique sans que l'observateur n'ait besoin de porter d'équipement supplémentaire. L'écran dont nous disposons est de marque Philips (modèle WOWvx) et propose une diagonale de quarante-deux pouces soit environ 107 cm. Son fonctionnement est le suivant. Chaque image à afficher est associée à une carte de profondeur. Cette carte de profondeur est une image en niveau de gris qui permet de connaître la profondeur de tout point de l'image affichée (voir la figure 68 pour une illustration). Grâce à cette carte de profondeur, l'écran calcule neuf points de vue légèrement décalés d'une même scène. Les pixels formant ces neuf points de vue sont combinés d'une façon adéquate et affichés à l'écran. Le réseau de lentilles placé devant l'écran fonctionne comme une multitude de loupes et permet d'associer un point de vue distinct à chaque œil. L'observateur reçoit donc deux points de vue légèrement décalés de la même scène, le cerveau n'a plus alors qu'à intégrer ceux-ci pour construire une vision en trois dimensions. Pour notre écran, le réseau lenticulaire offre huit positions observateurs. Une fois bien positionné, l'observateur peut décaler légèrement sa tête pour passer d'un point de vue autostéréoscopique à un autre. Puisque neuf points de vue sont calculés, l'observateur dispose de huit points de vue autostéréoscopique légèrement différents de la scène (voir figure 69 pour une illustration). Si l'utilisateur se décale trop, il peut se retrouver à *cheval* entre deux positions observateurs. De fait, les deux points de vue qu'il perçoit ne seront plus appareillés. C'est-à-dire qu'ils seront trop différents pour que le cerveau puisse fusionner les deux images et reconstruire une vision en trois dimensions. Enfin, précisons que l'utilisateur doit être à une distance d'au moins

3 mètres de l'écran pour que la vision autostéréoscopique opère.

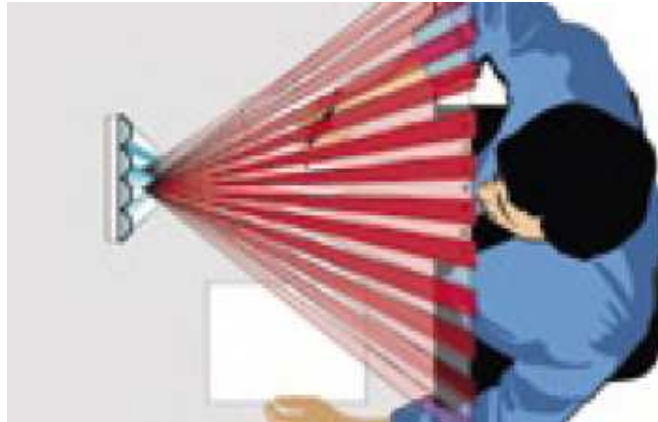


FIG. 69: Écran autostéréoscopique. Le réseau lenticulaire permet d'associer un point de vue distinct à chaque œil. En rouge vif sont représentés les neuf points de vue légèrement décalés d'une même scène. Les points de vue disponibles pour les autres positions observateurs sont en rouge clair. En se décalant légèrement l'observateur peut passer d'un point de vue autostéréoscopique à un autre. Si l'utilisateur se décale trop il peut voir un point de vue rouge vif et un point de vue rouge clair. Le cerveau ne peut alors fusionner les deux vues car celles-ci sont trop décalées, l'image paraît brouillée. *Source : [Phi08]*

15.1.2 Les variables dépendantes

Les variables dépendantes sont très nombreuses, certaines correspondent au sentiment de présence général ou à ses différentes composantes (présence environnementale, présence de soi, présence sociale et présence d'action). D'autres variables sont associées à trois des piliers de la présence (immersion, interaction, émotions). Enfin, les dernières ciblent les différentes étapes intermédiaires sur le chemin de la présence comme la réponse aux attentes de l'utilisateur, les jugements de la crédibilité de l'environnement et de l'expérience, l'acceptation de se prendre au jeu ou l'implication.

Pour plus de clarté, nous présentons les variables dépendantes sous forme de liste. Les listes numérotées correspondent à la variable dépendante principale. Les listes par puces correspondent aux variables dépendantes internes à la variable dépendante principale. La présence de ces variables dépendantes internes a été explicitée notamment dans les deux premières parties de cette thèse.

1. jugement de l'immersion ;
 - compréhension de la scène ;
 - auto-évaluation de la performance ;
 - réalisme du monde virtuel ;
 - prégnance de la vision stéréoscopique ;
 - permanence de l'effet vision stéréoscopique ;
2. jugement des émotions ;

- plaisir à jouer ;
- intensité des émotions ressenties ;
- 3. jugement de l'importance de l'imagination ;
- 4. jugement de la réponse aux attentes de l'utilisateur ;
- 5. jugement de la crédibilité du monde virtuel ;
- 6. qualité de l'interaction ;
 - qualité de la jouabilité ;
 - possibilité d'interaction avec l'environnement ;
- 7. jugement du réalisme de l'expérience ;
- 8. jugement de la crédibilité de l'expérience ;
- 9. jugement de la conscience de la virtualité de la situation ;
- 10. jugement de l'acceptation de se prendre au jeu ;
- 11. jugement de l'absorption et de l'implication ;
- 12. jugement de la présence spatiale ;
 - avec projection de l'utilisateur ;
 - sans projection de l'utilisateur ;
- 13. jugement de la présence de soi ;
- 14. jugement de la présence sociale ;
- 15. jugement de la présence d'action ;
- 16. jugement de la présence générale ;
 - sentiment d'exister ;
 - émotions ressenties similaires à celles ressenties si la situation était réelle ;
 - émotions ressenties similaires à celles ressenties si la situation était imaginée ;
 - sensations similaires à celles ressenties si la situation était réelle ;
 - comportement proche de celui que l'utilisateur aurait eu face à une situation réelle ;
 - comportement proche de celui que l'utilisateur aurait eu face à une situation imaginée ;
- 17. jugement des effets négatifs générés par le système ;
 - désorientation ;
 - fatigue oculaire ;
 - maux de tête ;
 - vertige ;
 - fatigue ;
 - nausée ;

L'annexe D précise les correspondances entre les variables dépendantes et les différentes questions du questionnaire.

15.2 Déroulement de la phase d'évaluation

15.2.1 Contexte de l'expérimentation

L'expérimentation a comme support un jeu vidéo en trois dimensions de type *first person shooter* créé pour l'occasion lors d'un projet de deuxième année d'étudiants de l'Ecole d'Ingénieur IMAC (voir figure 70 pour une illustration). Le contexte du jeu est le suivant. En l'an 3072, la Terre est surpeuplée et manque de ressources. L'espèce humaine se livre donc un combat sans merci pour le contrôle des planètes de la galaxie. Nous sommes dans le secteur XP3-44. Une bataille fait rage entre un vaisseau de l'alliance et un vaisseau de la confédération. Une violente pluie d'astéroïdes endommage gravement les deux vaisseaux qui s'écrasent sur la planète Magmos, mais la guerre pour le contrôle de la nouvelle planète continue. Le joueur pilote un robot, le but de sa mission est de détruire le plus d'ennemis possibles et de récupérer des munitions. Les outils d'interactions respectent les standards du genre : les déplacements du robot sont gérés au clavier, le changement de point de vue et les tirs utilisent la souris.

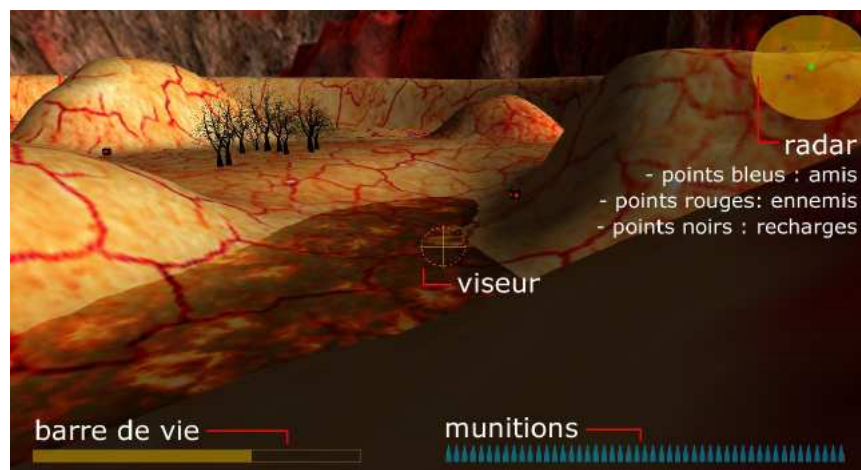


FIG. 70: Capture d'écran du jeu ayant servi de support à la phase d'évaluation.

15.2.2 Protocole de l'expérimentation

Les participants sont des étudiants en informatique dont l'âge varie de 20 à 24 ans, la répartition homme, femme est respectivement de 17 pour 13. Les participants n'ont pas été rétribués à l'exception de bonbons offerts à la fin de l'expérience. Les participants ne connaissent pas le but de l'expérience. Avant de commencer l'expérimentation, nous nous sommes assurés qu'aucun participant ne souffrait de photosensibilité. Puis, nous avons vérifié via une expérience préalable, que la vision stéréoscopique des participants était fonctionnelle. L'expérimentation s'est déroulée sur deux jours. Les diverses contraintes matérielles et temporelles ont eu pour conséquence que l'écran autostéréoscopique a été expérimenté par trente participants contre dix-huit pour l'écran polarisé. Certains participants auront testé les deux systèmes.

Les étudiants sont introduits dans la salle d'expérimentation, une fiche explicative est fournie pour présenter le contexte, les règles du jeu ainsi que les contrôles. Cette fiche est consultable dans l'annexe E. Les participants ne connaissent pas la durée de l'expérience. Ces derniers sont assis à une table sur laquelle sont posés le clavier et la souris qui servent aux interactions (navigation, orientation du point de vue et tirs). Les participants font face à l'écran. L'expérience ne comporte pas d'autres stimulations que les stimuli visuels.

L'expérience est interrompue après cinq minutes d'expérience. Le questionnaire est alors communiqué de suite aux participants. Le temps nécessaire pour répondre aux questions est de moins de cinq minutes. Ce questionnaire est consultable en annexe C. Sur la première page du questionnaire, différentes questions générales correspondant aux variables indépendantes invoquées sont posées : âge, sexe, expériences préalables, fréquence de jeu au jeu vidéo, goût pour la science-fiction etc. Différents conseils et recommandations sont également indiqués. La façon de répondre aux questions est toujours la même afin de faciliter la compréhension de l'utilisateur. L'échelle d'évaluation propose cinq niveaux dont les extrémités sont *pas du tout d'accord (1)* et *tout à fait d'accord (5)*.

15.3 Résultats

15.3.1 Notre définition de la présence et les différentes composantes de la présence

Nous rappelons que nous avons défini la présence comme *le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où le corps se trouve*. (voir section 5.2 page 49). Nous associons notamment au sentiment d'existence l'idée d'incarner le rôle que dédie l'application de réalité virtuelle à l'utilisateur. Nous souhaitons donc, dans un premier temps, vérifier que les sentiments d'existence et d'incarnation sont bien corrélés aux différentes composantes de la présence. Nous rappelons que ces différentes composantes sont la présence environnementale (plus communément appelée présence spatiale), la présence de soi et la présence sociale. Nous avons par ailleurs proposé d'introduire une quatrième composante que nous avons intitulée présence d'action (voir section 6.4 page 53).

Notre questionnaire comporte donc des questions relatives à la présence globale et d'autres en relation avec les quatre composantes de la présence. Les questions relatives à la présence globale font ressortir les notions d'*existence* et d'*incarnation*. Toutes les questions sont disponibles en annexe C (page 229). Les relations entre questions et variables dépendantes sont définies en annexe D (page 239). Pour les mesures relatives au sentiment de présence (quel qu'il soit) nous avons suivi la méthode d'analyse utilisée par le SUS Questionnaire (voir section 14.2.2). Ainsi, plutôt que de calculer des moyennes, nous n'avons retenu que les évaluations positives du sentiment de présence. Par conséquent, nous avons dans un premier temps isolé les participants ayant donné une évaluation de valeur 4 ou 5 aux trois questions relatives à la présence générale (nous rappelons que l'échelle de notation varie de 1 à 5). Nous appliquons cette méthode pour l'ensemble des mesures relatives au sentiment de présence. Notre hypothèse est la suivante.

Les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale ont égale-

ment ressenti un sentiment de présence pour les quatre composantes, supérieur à la moyenne de leur groupe

Pour vérifier que les évaluations positives de la présence globale sont bien corrélées avec les évaluations ciblant les différentes composantes, nous avons calculé pour chaque composante la moyenne des évaluations données aux différentes questions par les participants. La présence environnementale est évaluée par trois questions, la présence de soi par une question, la présence sociale par trois questions et la présence d'action par deux questions. La présence globale est elle évaluée via trois questions.

Nous avons effectué cette analyse sur les résultats des deux expérimentations. À partir de l'étude sur l'écran polarisé nous obtenons les résultats suivants. Sur les dix-huit participants ayant expérimenté cet écran, seuls cinq ont fourni une évaluation de 4 ou 5 aux trois questions relatives à la présence globale. Le tableau 15.1 présente les résultats obtenus pour cette expérimentation. Nous appelons groupe marqueur les cinq participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale. Le groupe global représente les moyennes calculées pour l'ensemble des participants à l'expérimentation. Les valeurs numériques correspondent aux moyennes obtenues pour les questions relatives au facteur ciblé.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	4.2	3.39
Présence environnementale	3.2	2.86
Présence de soi	3.8	3.33
Présence sociale	3.5	2.57
Présence d'action	4.1	3.86

TAB. 15.1: Corrélacion entre présence globale et les quatre composantes de la présence. Résultats pour l'écran polarisé

Pour l'étude ayant comme support l'écran autostéréoscopique, seuls cinq participants sur trente ont ressenti un fort sentiment de présence (évaluation de 4 ou 5 aux trois questions relatives à la présence globale). Notons que sur ces cinq participants ayant ressenti un sentiment de présence, trois ont également ressenti un sentiment de présence lors de l'expérience sur l'écran polarisé. Les deux autres participants n'ont pas expérimenté l'écran polarisé. Le tableau 15.2 présente les résultats obtenus.

Au travers de ces deux résultats nous pouvons constater que les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale (donc un sentiment d'existence dans l'expérience et d'incarnation de rôle) ont également ressenti une présence environnementale, de soi, sociale et d'action fortement supérieures aux moyennes du groupe. Il y a donc bien homogénéité entre la présence globale et ses différentes composantes. Ce résultat semble donc valider notre vision et définition de la présence.

De plus, les valeurs obtenues pour la présence d'action sont cohérentes avec celles des autres composantes. Ceci parait donc confirmer le bien fondé de notre composante présence d'action.

Par ailleurs, nous avons mené une analyse inverse. C'est-à-dire que nous nous sommes intéressés aux évaluations des participants ayant noté 1 ou 2 les trois questions de la

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	4.53	3.24
Présence environnementale	3.8	2.7
Présence de soi	5	3.57
Présence sociale	4.15	2.65
Présence d'action	4.6	3.72

TAB. 15.2: Corrélacion entre présence globale et les quatre composantes de la présence. Résultats pour l'écran autostéréoscopique

présence globale. Seule l'expérimentation ayant comme support l'écran autostéréoscopique présente ce cas de figure pour quatre participants sur trente. Le tableau 15.3 présente les résultats obtenus.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	2	3.24
Présence environnementale	2.75	2.7
Présence de soi	3	3.57
Présence sociale	2.25	2.65
Présence d'action	3.25	3.72

TAB. 15.3: Corrélacion entre présence globale et les quatre composantes de la présence. Résultats pour l'écran autostéréoscopique avec les participants n'ayant pas ressenti de présence

Nous pouvons constater qu'hormis pour la présence environnementale, les participants n'ayant pas ressenti de présence globale ont ressenti une présence de soi, sociale et d'action plus faible que la moyenne du groupe. Ce dernier résultat semble apporter une nouvelle confirmation quant à la cohérence de notre vision et définition de la présence mais également semble confirmer la pertinence de la composante présence d'action. Enfin, le résultat *à contre-sens* sur la présence environnementale peut être dû à la marge d'erreur inhérente à la méthode d'évaluation. Toutefois, ces participants ont pu effectivement ressentir une présence environnementale moyenne. Ceci est tout à fait possible et cohérent avec notre modèle puisque la présence globale n'est pas qu'une simple combinaison linéaire de ses différentes composantes.

15.3.2 Notre définition de la présence et les manifestations associées

Le sentiment de présence se traduit par des réactions physiologiques, comportementales, émotionnelles, intellectuelles ou sentimentales [SVS05]. Nous avons souhaité confronter notre définition de la présence à ces manifestations. Des mesures physiologiques ou comportementales n'ayant pu être mises en place, nous nous sommes appuyés sur les

perceptions des participants. Ainsi, certaines questions de notre évaluation ciblent les émotions, les sensations et le comportement du participant. Ce dernier doit estimer si ses ressentis sont similaires à ceux qu'il aurait eu face à une situation réelle ou imaginaire. Nous avons introduit cette considération imaginaire car le contexte de l'expérience étant la guerre, il est *délicat* d'extrapoler sur ses émotions et son comportement face à une telle situation. Ces questions étant relatives au sentiment de présence, nous n'avons cette fois encore considéré que les évaluations des seuls participants ayant ressenti un fort sentiment de présence (choix 4 ou 5 aux trois questions relatives à la présence globale). Notre hypothèse est la suivante.

Les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale ont l'impression d'avoir eu des réponses émotionnelles, sensibles et comportementales plus intenses que la moyenne de leur groupe

Pour l'expérimentation ayant comme support l'écran polarisé, seuls cinq des dix-huit participants ont ressenti un fort sentiment de présence globale. Le tableau 15.4 présente les résultats obtenus.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	4.2	3.39
Émotions similaires réalité	3.1	2.56
Émotions similaires imaginé	3.1	2.53
Sensations similaires réalité	2.1	1.75
Comportement similaire réalité	3.2	2.69
Comportement similaire imaginé	4	2.83

TAB. 15.4: Corrélacion entre présence globale et les réactions associées. Résultats pour l'écran polarisé

Pour l'étude ayant comme support l'écran autostéréoscopique seuls cinq participants sur trente ont ressenti un fort sentiment de présence. Le tableau 15.5 présente les résultats obtenus.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	4.53	3.24
Émotions similaires réalité	3.1	2.3
Émotions similaires imaginé	3.11	2.41
Sensations similaires réalité	2.11	1.82
Comportement similaire réalité	4.1	2.69
Comportement similaire imaginé	3.5	2.46

TAB. 15.5: Corrélacion entre présence globale et les réactions associées. Résultats pour l'écran autostéréoscopique

Les résultats de ces deux études valident notre hypothèse. En effet, les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence estiment avoir eu des émotions, des sensations et un comportement proche de la réalité ou de ce qu'ils peuvent en imaginer. Il est possible de remarquer que pour les deux expériences il n'y a pas de différence entre émotions réelles et émotions imaginées. Concernant l'évaluation du comportement, la comparaison entre comportement réel ou imaginaire n'est pas stable.

Par ailleurs, nous avons mené à nouveau une analyse inverse. Cette fois encore nous nous sommes intéressés aux évaluations des participants ayant noté 1 ou 2 les trois questions de la présence globale. Seule l'expérimentation ayant comme support l'écran autostéréoscopique présente ce cas de figure pour quatre participants sur trente. Le tableau 15.6 présente les résultats obtenus.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	2	3.24
Émotions similaires réalité	2.38	2.3
Émotions similaires imaginé	2.29	2.41
Sensations similaires réalité	1.38	1.82
Comportement similaire réalité	2.38	2.69
Comportement similaire imaginé	2.25	2.46

TAB. 15.6: Corrélacion entre présence globale et les réactions associées. Résultats pour l'écran autostéréoscopique avec les participants n'ayant pas ressenti de présence

Les participants n'ayant pas ressenti de présence globale ont, en règle général, estimé leurs émotions et leurs comportements comme moins intenses que la moyenne des participants de leur groupe. Ce dernier résultat semble encore une fois conforter notre hypothèse. Les participants n'ayant pas éprouvé un sentiment de présence estiment ne pas avoir ressenti d'émotions réelles ou eu un comportement réel.

Faisons un premier bilan des résultats obtenus jusqu'à présent. Nous pouvons constater que notre définition de la présence (sentiment d'exister et d'incarner un rôle) obtient des résultats en cohérence avec ceux obtenus pour les différentes composantes de la présence (voir section 15.3.1). De plus, les participants ayant expérimenté un sentiment de présence tel que nous l'avons défini, ont également eu des réponses émotionnelles et comportementales supérieures à la moyenne des participants. Or, ces réactions sont les manifestations physiques du sentiment de présence [SVS05].

Ces résultats semblent donc indiquer que notre vision et définition de la présence sont valides. C'est pourquoi dans les mesures suivantes faisant intervenir le sentiment de présence, nous exploiterons les résultats relatifs à notre définition de la présence et non ceux relatifs aux différentes composantes de la présence.

15.3.3 Notre définition de la présence et les jugements portant sur la crédibilité ou le réalisme

Nous souhaitons confirmer la pertinence du critère jugement de la crédibilité introduit dans notre modèle (voir section 8.2 page 87). Notre hypothèse est donc la suivante.

Les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale ont jugé l'environnement et l'expérience crédibles.

Le jugement de la crédibilité de l'environnement dépendant de la satisfaction des attentes intellectuelles et perceptives de l'utilisateur, nous avons introduit une question pointant la satisfaction des attentes. Notre hypothèse est reliée au sentiment de présence, nous décidons donc une nouvelle fois, de ne tenir compte que des évaluations des participants ayant ressenti un fort sentiment de présence. Dans cette étude ayant pour support l'écran polarisé seuls cinq des dix-huit participants ont, selon notre évaluation, ressenti un fort sentiment de présence. Le tableau 15.7 présente les résultats obtenus.

	Groupe marqueur	Groupe global
Présence globale	4.2	3.39
Jugement du réalisme de l'environnement	3.6	3.17
Jugement de la crédibilité de l'environnement	4.1	3.44
Jugement de la satisfaction des attentes	5	3.89
Jugement du réalisme de l'expérience	3.8	3.36
Jugement de la crédibilité de l'expérience	4	3.5

TAB. 15.7: Corrélacion entre présence globale et les jugements portant sur la crédibilité ou le réalisme. Résultats pour l'écran polarisé avec les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence

Les résultats montrent que les participants ayant ressenti un fort sentiment de présence ont évalué positivement la crédibilité mais aussi le réalisme de l'environnement et de l'expérience. Ceci semble donc indiquer que le jugement de la crédibilité est un critère recevable. On peut remarquer que le jugement de la crédibilité obtient des notes plus élevées et plus en rapport avec l'évaluation de la présence. Toutefois, ce constat reste assez mince pour pouvoir confirmer que le jugement de la crédibilité est plus fiable que celui du réalisme. Des études complémentaires sont donc nécessaires. Enfin, on peut constater que ces cinq participants ont eu leurs attentes comblées. Ce dernier résultat montre que la satisfaction des attentes est une étape importante.

Même si cette évaluation semble indiquer que le jugement de la crédibilité est un critère pertinent, nous ne sommes pas pleinement satisfait de cette évaluation. Comme nous l'avons indiqué dans la section 8.2 (page 87) présentant notre modèle, le jugement de la crédibilité de l'expérience dépend de la satisfaction des affordances perçues. Or, l'évaluation que nous avons menée ne permet pas de varier les schémas d'interaction. De fait cette phase d'évaluation n'autorise aucune conclusion sur l'importance des affordances assumées. Nous pensons qu'une étude comme celle menée par Usoh et al [UAW⁺99] que

nous avons décrite dans la section 8.2.2 (page 89) est un exemple pertinent de ce que nous pourrions faire.

15.3.4 Cercle vertueux entre émotions ressenties et présence

Dans la section 7.4.5 dédiée au pilier émotion de notre framework (page 74) nous avons émis les hypothèses suivantes.

Une personne ressentant des émotions durant une expérience virtuelle éprouvera un sentiment de présence plus élevé

et

Une personne ressentant un sentiment de présence élevé, ressentira au cours de l'expérience des émotions plus intenses

Nous avons alors cité plusieurs études qui allaient dans le sens de ces hypothèses. Nous souhaitons maintenant voir si notre évaluation les confirme également.

Pour vérifier la première hypothèse, nous sélectionnons les participants ayant eu une moyenne supérieure à trois sur les cinq questions relatives à l'intensité des émotions ressenties. Nous avons choisi la valeur moyenne de trois comme critère car les évaluations relatives aux émotions ressenties supérieures à quatre sont trop rares. Pour l'étude exploitant l'écran autostéréoscopique, dix participants sur trente ont rempli cette condition. Pour l'écran polarisé, six participants sur dix-huit l'ont remplie également. Puis, nous calculons la moyenne en présence globale pour ces participants (i.e. la moyenne de leurs évaluations sur les trois questions ciblant la présence globale). Le tableau 15.8 présente les résultats obtenus.

	Écran autostéréoscopique		Écran polarisé	
	Gr. marqueur	Gr. global	Gr. marqueur	Gr. global
Émotions ressenties	3.2	2.38	3.46	2.66
Présence globale	3.8	3.24	3.78	3.39

TAB. 15.8: Corrélation entre émotions ressenties et présence. Le groupe marqueur est constitué des participants ayant ressenti de fortes émotions. Les valeurs affichées correspondent aux moyennes des évaluations pour un facteur et un groupe de participants

On peut donc constater que, pour les deux expériences, les personnes ayant ressenti de fortes émotions ont également éprouvé un sentiment de présence globale plus fort que la moyenne des participants. Ce résultat indique donc que notre première hypothèse est valide.

Pour vérifier notre deuxième hypothèse, nous comptabilisons les évaluations des seuls participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale (notes supérieures à quatre pour les trois questions relatives à la présence globale). Puis nous calculons la moyenne des évaluations des questions ciblant les émotions ressenties pour ces participants. Pour l'étude exploitant l'écran autostéréoscopique, cinq participants sur trente ont

	Écran autostéréoscopique		Écran polarisé	
	Gr. marqueur	Gr. global	Gr. marqueur	Gr. global
Présence globale	4.53	3.24	4.2	3.39
Émotions ressenties	3.15	2.38	3.1	2.66

TAB. 15.9: Corrélacion entre présence globale et émotions ressenties. Le groupe marqueur est constitué des participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale. Les valeurs affichées correspondent aux moyennes des évaluations pour un facteur et un groupe de participants

rempli cette condition. Pour l'écran polarisé, cinq participants sur dix-huit l'ont remplie également. Le tableau 15.9 présente les résultats obtenus.

Nous constatons donc que, pour les deux expériences, les personnes ayant ressenti un fort sentiment de présence ont également ressenti des émotions de façon plus intense que la moyenne des participants. Ce résultat semble donc indiquer que notre deuxième hypothèse est valide.

Plus globalement, il est possible de considérer que ces deux résultats confortent l'idée qu'émotions et présence s'entretiennent dans un cercle vertueux : les émotions aident à ressentir la présence puis une fois le sentiment de présence atteint, les émotions sont ressenties avec plus d'intensité. Cette idée est également avancée par Riva et al [RMC⁺07].

15.3.5 Lien entre présence et plaisir à jouer

Nous avons souhaité vérifier l'hypothèse suivante :

Une personne ressentant un sentiment de présence élevé, ressentira au cours de l'expérience un plaisir à jouer plus intense

Pour juger de la pertinence de cette hypothèse, nous comptabilisons les évaluations des seuls participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale (notes supérieures à quatre pour les trois questions relatives à la présence globale). Puis, nous calculons la moyenne des évaluations des questions ciblant le plaisir à jouer ressenti pour ces participants. Pour l'étude exploitant l'écran autostéréoscopique, cinq participants sur trente ont rempli cette condition. Pour l'écran polarisé, cinq participants sur dix-huit l'ont remplie également. Le tableau 15.10 présente les résultats obtenus.

Nous pouvons constater que, pour les deux expériences, les personnes ayant ressenti un fort sentiment de présence globale ont également ressenti un plaisir à jouer plus élevé que la moyenne des participants. Ce résultat semble donc indiquer que notre hypothèse est pertinente.

15.3.6 Lien entre implication et présence

Les trois modèles de la présence que nous avons décrit, pointent l'importance de l'implication (voir section 8.1 page 81). Dans notre propre modèle de la présence, nous avons cité l'implication comme étant la dernière étape préalable à l'émergence de la présence

	Écran autostéréoscopique		Écran polarisé	
	Gr. marqueur	Gr. global	Gr. marqueur	Gr. global
Présence globale	4.53	3.24	4.2	3.39
Plaisir à jouer	4.5	3.86	4.77	4.05

TAB. 15.10: Corrélation entre présence globale et plaisir à jouer. Le groupe marqueur est constitué des participants ayant ressenti un fort sentiment de présence globale. Les valeurs affichées correspondent aux moyennes des évaluations pour un facteur et un groupe de participants

(voir section 8.2.3 page 91). Par notre évaluation nous souhaitons confirmer le rôle de l'implication. Notre hypothèse est donc la suivante.

Les personnes ayant expérimenté une forte implication ont globalement ressenti un fort sentiment de présence.

Pour vérifier cette hypothèse, nous sélectionnons les participants ayant éprouvé une forte implication (moyenne supérieure à quatre) sur les cinq questions relatives au degré d'implication. Pour l'étude exploitant l'écran autostéréoscopique, onze participants sur trente ont rempli cette condition. Pour l'écran polarisé, six participants sur dix-huit l'ont remplie également. Puis, nous calculons le moyenne de présence globale pour ces participants. Le tableau 15.11 présente les résultats obtenus.

	Écran autostéréoscopique		Écran polarisé	
	Gr. marqueur	Gr. global	Gr. marqueur	Gr. global
Degré d'implication	4.25	3.43	4.33	3.64
Présence globale	3.45	3.24	3.83	3.39

TAB. 15.11: Corrélation entre le degré d'implication ressenti et la présence globale. Le groupe marqueur est constitué des participants ayant ressenti un fort degré d'implication (moyenne supérieure à quatre pour les cinq questions relatives à l'implication). Les valeurs affichées correspondent aux moyennes des évaluations pour un facteur et un groupe de participants

On peut donc constater que, pour les deux expériences, les personnes ayant ressenti un fort degré d'implication ont également ressenti un sentiment de présence plus élevé que la moyenne des participants. Ce résultat semble donc confirmer la place de l'implication dans l'émergence de la présence. Par ailleurs, on peut remarquer que les évaluations de la présence sont plus faibles que celles de l'implication. Ce point est cohérent avec notre vision de l'implication comme une étape menant vers la présence et non comme une composante de la présence.

15.3.7 Écran autostéréoscopique et écran polarisé au crible de notre modèle

Afin de comparer les capacités de nos deux systèmes de restitution visuelle, nous les avons passés au crible de notre modèle de la présence (voir section 8.2 page 87). Les résultats de ce test sont présentés dans le tableau 15.12. Pour tous les facteurs autres que la présence, nous avons calculé la moyenne des évaluations des participants. Pour les facteurs relatifs à la présence, nous indiquons la moyenne des évaluations des participants et le pourcentage des évaluations de niveau 4 ou 5 (signifie qu'un sentiment de présence a été ressenti).

Comme indiqué dans l'annexe D certains de ces facteurs sont composés de sous-facteurs. Pour une meilleure lisibilité nous ne présentons que les résultats pour les facteurs principaux. Toutefois, nous commenterons par la suite les éventuelles différences intéressantes qui pourraient apparaître au niveau des sous-facteurs.

	Écran autostéréoscopique	Écran polarisé
Qualité de l'immersion	3.67	3.65
Émotions ressenties et plaisir de jouer	3.09	3.28
Satisfaction des attentes	4.3	3.89
Crédibilité de l'environnement	3.23	3.44
Qualité de l'interaction	3.79	3.64
Crédibilité de l'expérience	3.3	3.5
Acceptation de se prendre au jeu	4.3	4.5
Implication	3.43	3.64
Présence environnementale	2.7 - 31%	2.86 - 37%
Présence de soi	3.57 - 53%	3.44 - 44%
Présence sociale	2.71 - 29%	2.57 - 22%
Présence d'action	3.72 - 60%	3.86 - 61%
Présence globale	3.24 - 42%	3.39 - 56%
Effets négatifs	1.92	1.86

TAB. 15.12: Écran autostéréoscopique et écran polarisé au crible de notre modèle

Nous reprenons point par point les résultats présentés dans le tableau 15.12. Nous constatons que le jugement de la qualité de l'immersion est quasiment identique. L'écran polarisé présentant une taille suffisante pour couvrir le champ de vision des participants, nous aurions pu penser que ce dernier reçoive une meilleure évaluation. Par ailleurs une différence intéressante entre les deux systèmes apparaît au niveau des sous-facteurs (voir l'annexe D). Pour le facteur prégnance de la vision stéréoscopique, l'écran autostéréoscopique obtient un résultat de 4.2 contre 4 pour l'écran polarisé. On constate donc que l'effet de profondeur et de relief a été perçu avec beaucoup de force pour les deux dispositifs. Par contre, lorsque l'on interroge les participants sur la permanence de cet effet au cours de l'expérience, l'écran autostéréoscopique obtient le résultat de 3.4 contre 3.5 pour le deuxième écran. Nous remarquons donc que l'effet stéréoscopique a été oublié en cours

d'expérience par un grand nombre de participants. Ce constat est encore plus vrai pour l'écran autostéréoscopique. Notons que l'expérience n'a duré que cinq minutes, si celle-ci avait duré une heure, quelle aurait été l'évaluation relative à la permanence de l'effet stéréoscopique ? Il est possible que celui-ci ne soit plus perçu en cours d'expérience. Il serait donc intéressant de mener une expérience plus longue pour évaluer la permanence de l'effet stéréoscopique avec le temps. Notons que, quand bien même celui-ci ne serait plus perçu consciemment au bout d'un certain temps, cela ne signifie pas que le bénéfice espéré concernant la compréhension spatiale de l'environnement, ne perdure pas durant toute l'expérience.

Concernant le jugement des émotions ressenties, l'avantage est à l'écran polarisé. On remarque notamment que les participants ont éprouvé plus de plaisir à jouer sur l'écran polarisé que sur le deuxième écran. Nous verrons au dernier point que les effets négatifs sont plus présents pour l'écran autostéréoscopique, il est possible que ceux-ci soient une raison du déficit de plaisir à jouer.

Pour le jugement de la satisfaction des attentes, l'avantage est à l'écran autostéréoscopique. Il est possible que celui-ci ait bénéficié d'un bonus à la nouveauté. Beaucoup de participants découvraient ce type d'écran alors que l'écran polarisé était lui déjà connu de la plupart des participants.

Le jugement de la crédibilité de l'environnement est plus élevé pour l'écran polarisé.

L'écran polarisé perd la bataille de l'interaction. Il perd l'essentiel de ses points à cause du jugement de la jouabilité. Rappelons que les interfaces sont les mêmes (souris et clavier) pour les deux expérimentations. Nous pensons qu'une raison de cette évaluation est la taille de l'écran polarisé. En effet, ce dernier présente une taille suffisante pour recouvrir complètement le champ de vision de l'observateur. Or, pour le type de jeux qui sert de support à notre évaluation, il est important de pouvoir regarder facilement en tout point de l'écran pour y détecter des éventuels ennemis. La taille de l'écran polarisé demande donc aux participants d'effectuer des mouvements de la tête pour appréhender l'ensemble de l'environnement. Ce dernier point a donc peut-être pénalisé la jouabilité.

La crédibilité de l'expérience offre un léger avantage à l'écran polarisé. Dans le cadre de cette étude il n'est pas possible de faire de lien entre interaction et crédibilité de l'expérience. De fait, aucune analyse sur les affordances assumées ou non assumées n'est possible avec cette évaluation. Bien que les schémas d'interaction ne soient pas directs, ils correspondent la norme pour ce type de jeu : déplacement au clavier, orientation du point de vue et tirs à la souris.

L'acceptation de se prendre au jeu a été très positive et est à l'avantage de l'écran polarisé. Il est possible qu'il y ait eu une confusion entre l'expression *accepter de se prendre au jeu* reprise dans les deux questions dédiées et le support de l'étude qui est un jeu. Il est probable que l'*acceptation de se prendre au jeu* nécessite des chemins détournés comme des questions indirectes ou une méthode de type interview pour son évaluation.

L'implication donne là encore l'avantage à l'écran polarisé. Une méthode autre que celle des questionnaires pour évaluer l'implication consiste à proposer des stimuli perturbateurs provenant de l'environnement réel (bruits, lumière etc.). Si le participant ne fait pas attention à ces éléments perturbateurs alors on peut en conclure probablement plus efficacement qu'avec un questionnaire, que le participant est impliqué fortement dans l'expérience.

On peut remarquer que le score sur la présence sociale est plus élevé pour l'écran autostéréoscopique mais est surtout le plus faible des composantes de la présence. Comme indiqué dans le chapitre 6 (page 51) décrivant les différentes composantes de la présence, la présence sociale dépend notamment des possibilités d'interaction avec les autres agents mais également de la perception de l'intelligence de ces derniers. Or, même si un effort a été effectué pour doter les robots ennemis d'une intelligence suffisante pour gérer des situations comme la fuite ou la chasse, ceux-ci n'ont pas l'intelligence tactique d'un humain. De plus, aucune possibilité de communication n'est proposée dans la version actuelle du jeu. De fait, le sentiment de jouer en équipe est limité.

On peut également noter que la présence environnementale est faible par rapport à la présence de soi ou d'action. Pourtant, une vision stéréoscopique est proposée, l'environnement est en trois dimensions et les participants ont la possibilité de se déplacer librement dans le monde virtuel. Nous pensons que la raison de ce déficit est que l'immersion repose dans le cas présent, uniquement sur une représentation visuelle. Il est très probable qu'avec une stimulation sonore rendant les bruits des explosions et du moteur et en proposant comme outil d'interaction, un volant ou une manette à retour d'effort, la présence environnementale aurait été meilleure.

La présence de soi a obtenu un bon score. Nous pensons que ce bon résultat est dû à la vision à la première personne offerte mais également à l'aspect ludique et compétitif du jeu.

La présence d'action a obtenu le meilleur score. Pourtant, les schémas d'interaction ne permettent ni d'assumer les affordances ni d'assurer des sensations proprioceptives valides. Pour autant, nous ne pensons pas que ce constat remette en cause notre théorie sur la présence d'action. En effet, même si les schémas d'interaction (clavier, souris) sont basiques, ils correspondent à la norme du moment pour ce type de jeux. Or, les participants de notre étude ont tous l'habitude de jouer aux jeux vidéo. Nous pensons donc que ces derniers trouvent *naturel* d'interagir avec le jeu via ce type d'interface.

La présence globale obtient un score dans la moyenne des scores des quatre composantes de la présence. Ceci est parfaitement cohérent avec notre modèle. Enfin, notons que la présence globale, la présence d'action et la présence spatiale donne l'avantage à l'écran polarisé. La présence de soi et la présence sociale sont elles favorisées par l'écran autostéréoscopique.

Les effets négatifs sont légèrement plus présents avec l'écran autostéréoscopique. Notons que celui-ci obtient une évaluation égale à 2.37 pour la fatigue oculaire et 1.67 pour les nausées contre respectivement 1.94 et 1.5 pour l'écran polarisé. Une discussion informelle avec certains participants à l'issue de l'évaluation a montré que le principe de multivues, c'est-à-dire la possibilité de passer d'une vue à l'autre en décalant légèrement son point de vue (voir section 15.1.1 pour plus de détails sur ce sujet), perturbe l'expérience et est également source de fatigue oculaire. Ce point est peut-être à régler en vue d'une commercialisation grand public de ce type d'appareil.

Une interprétation linéaire de ces résultats est la suivante. Le niveau immersif est quasiment équivalent pour les deux systèmes. L'écran polarisé a l'avantage sur les points suivants : émotions ressenties, jugement de la crédibilité de l'environnement, jugement de la crédibilité de l'expérience, acceptation de se prendre au jeu, implication, présence spatiale, présence d'action et présence globale.

L'écran autostéréoscopique a l'avantage sur les points suivants : réponse aux attentes, qualité de l'interaction, présence de soi et présence sociale.

On peut donc constater que l'écran polarisé a l'avantage sur une grande majorité des points. Le fait que l'avantage de l'écran polarisé soit régulièrement observé le long du déroulement de notre modèle, nous encourage à penser que cette évaluation est une première validation de la cohérence de notre modèle. Il est bien évident que cette évaluation en appelle d'autres pour pouvoir valider ou infirmer définitivement notre modèle.

Les résultats présentés dans le tableau 15.12 semblent donc indiquer que l'écran polarisé est mieux à même de susciter un sentiment de présence que l'écran autostéréoscopique. Cependant, si l'on compare les résultats proposés par les tableaux 15.1 et 15.2, on constate que parmi les personnes qui ont ressenti un sentiment de présence (évaluation supérieure à quatre pour les trois questions relatives à la présence globale), ce sentiment est plus intense pour les participants ayant expérimenté l'écran autostéréoscopique. Peut-être que ce dernier aura bénéficié d'un bonus à la nouveauté qui aura suscité un plus grand enthousiasme chez les sujets? Est-ce que le fait de ne pas porter de lunettes aura joué? Nous ne sommes pour l'instant pas à même de répondre à cette question.

15.4 Bilan et retour d'expérience

Cette phase d'évaluation nous a permis de valider plusieurs de nos hypothèses. La pertinence de notre définition de la présence et de notre proposition de la composante présence d'action semble validée. Par ailleurs, cette étude confirme la relation vertueuse entre émotions et présence. La satisfaction des attentes, l'acceptation de se prendre au jeu et l'implication semblent être confirmées comme des étapes essentielles sur le chemin menant à la présence. De plus, notre évaluation indique que le jugement de la crédibilité est un critère pertinent. Enfin, plus globalement cette étude pointe la cohérence de notre modèle.

Cependant, il est bien évident que d'autres études sont requises. Nous pensons également qu'il est nécessaire de compléter les évaluations par questionnaire avec des études comportementales. Ces dernières permettront de palier aux défauts de l'évaluation par questionnaire (voir section 14.2.3 page 163). De plus, certaines notions comme le jugement de la crédibilité de l'expérience mais aussi la présence sont probablement évaluées avec plus de véracité avec ce type d'étude qu'avec des questionnaires.

Cette étude nous a donc permis d'obtenir plusieurs résultats particulièrement intéressants pour valider le cadre théorique de la présence que nous proposons. Toutefois, cette phase d'évaluation n'est pas exempte de défauts. Initialement, nous voulions ajouter un écran d'ordinateur classique comme troisième variable indépendante. Malheureusement, des contraintes matérielles et temporelles nous en ont empêché. Ceci nous aurait permis par exemple, d'évaluer l'impact de la vision stéréoscopique sur le plaisir de jouer mais également de mesurer l'influence de la vision stéréoscopique sur l'émergence du sentiment de présence.

Par ailleurs, pour une prochaine étude, la formulation de certaines questions est à revoir et nous cibleront un nombre de variables dépendantes plus restreint. De plus, le contexte

du jeu n'était pas idéal. Premièrement, celui-ci a été perçu comme violent par certains participants et ceci a perturbé leur expérience. Deuxièmement, le contexte guerrier ne permet, ni de ressentir des émotions réalistes ni d'avoir un comportement véritablement cohérent avec la situation. De fait, une situation plus classique aurait été plus profitable dans l'optique de valider notre cadre théorique de la présence.

Par ailleurs, il serait intéressant de varier également la durée de l'expérimentation. Nous avons limité l'expérience à cinq minutes pour ne pas que les participants ressentent de lassitude mais il est probable que plusieurs facteurs sont influencés par la durée de l'expérience. Enfin, dans l'avenir nous veillerons à disposer d'un groupe de participants moins homogène. Par exemple tous nos participants aiment la science-fiction et jouent aux jeux vidéos. Pourtant, il aurait été intéressant de voir si l'intérêt pour la science-fiction avait une influence sur les attentes intellectuelles, sur l'acceptation de se prendre au jeu et par extension sur la présence ressentie.

Bilan et perspectives

BILAN

Cette thèse aborde toutes les phases nécessaires à la conception d'une expérience en réalité virtuelle. Nous considérons la réalité virtuelle comme une expérience médiatisée qui plonge un ou plusieurs utilisateurs au cœur d'un environnement artificiel dans lequel l'utilisateur peut ressentir et interagir en temps réel via des interfaces sensori-motrices. L'utilisateur juge crédible l'expérience, accepte de se prendre au jeu et en réponse ressent un sentiment de présence. Ce dernier consiste en un sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où son corps se trouve.

Dans cette définition nous décrivons la présence comme un sentiment subjectif qui est donc propre à l'utilisateur et qui ne peut jaillir sans son aval. Nous associons cet aval à une acceptation de se prendre au jeu. L'utilisateur est donc au centre du processus menant à la présence. L'idée directrice de notre recherche est donc la suivante : en réalité virtuelle nous devons nous focaliser sur l'utilisateur.

Cette définition traduit notre vision globale de la réalité virtuelle et de la présence. Cette vision s'appuie sur une phase de réflexion qui nous l'espérons apporte un éclairage nouveau sur la présence. Celui-ci consiste en une nouvelle définition de la présence et en l'identification d'une quatrième dimension de la présence intitulée présence d'action. Cette dernière se traduit par le fait d'avoir conscience de ses actes et de leurs portées. Comme nous l'avons écrit précédemment, l'émergence de la présence ne peut se faire tant que l'utilisateur n'accepte pas de se prendre au jeu de l'expérience. Grâce à notre modèle de la présence, nous avons identifié les processus menant au sentiment de présence. Le travail du concepteur d'expérience en réalité virtuelle va donc consister à créer les conditions nécessaires pour que l'utilisateur accepte de se prendre au jeu. Selon notre modèle cette acceptation dépend de la crédibilité de l'environnement et de la crédibilité de l'expérience dans sa globalité. La crédibilité de l'environnement dépend de la satisfaction des attentes intellectuelles et perceptives de l'utilisateur. La crédibilité de l'expérience est acceptée si les affordances perçues dans l'environnement sont assumées par les schémas d'interactions de l'expérience. Nous avons insisté sur le fait de parler de crédibilité et non de réalisme.

Pour proposer une expérience crédible à l'utilisateur nous pouvons nous appuyer sur notre framework de conception d'applications en réalité virtuelle. Puisque l'objectif est la crédibilité et non le réalisme, nous remplaçons la réalité physique par la réalité perceptive. C'est-à-dire que ce n'est pas la réalité physique de l'environnement qui nous intéresse mais sa perception par l'Homme. C'est pourquoi notre framework a pour socle les connaissances sur la cognition humaine. Nous parlons de connaissances sur la cognition et non pas de connaissances sur la perception car une expérience dans un environnement ne se limite pas

qu'à sa perception. Nous considérons ce socle de connaissances comme un vivier d'idées pour les quatre piliers qui servent à concevoir une application. Ces quatre piliers sont l'immersion, la cohérence de la boucle sensori-motrice, les émotions et l'interaction. Les trois premiers piliers servent à la perception de l'environnement virtuel et à lui donner du sens.

Concernant le pilier immersion nous avons proposé une évolution de l'algorithme du lancer de frustum. Celui-ci permet le calcul de la réverbération des ondes sonores dans l'environnement virtuel. Ce calcul est impossible à effectuer dans des environnements complexes et dynamiques. Nous nous servons du socle de connaissances sur la cognition humaine pour déterminer une sphère d'acuité sonore. Celle-ci nous sert de cadre pour lancer les frusta depuis l'auditeur et non depuis les sources sonores. Cette dernière optimisation diminue le nombre de calculs à effectuer et doit permettre de calculer une réverbération en temps réel avec une qualité suffisante pour leurrer l'audition de l'utilisateur.

Notre approche de la présence a donc une dimension technique puisqu'elle prend en compte le rôle de l'immersion et de l'interaction. Elle a aussi une considération psychologique puisque nous prenons en compte des processus cognitifs et les caractéristiques de l'utilisateur dans l'émergence de la présence. De plus nous estimons le contenu, les émotions portées et l'imagination comme des facteurs pouvant influencer sur la présence. Enfin, le cœur de notre approche est écologique car nous considérons d'une part que l'important n'est pas la réalité physique de l'environnement mais la crédibilité de l'expérience, et d'autre part que les affordances perçues et assumées sont une étape clé du chemin menant à la présence. C'est pourquoi nous pensons avoir proposé une approche unifiée de la présence.

Les principes de crédibilité et d'affordances assumées sont au cœur de notre modèle et conditionnent l'émergence du sentiment de présence. Ce point implique notamment de repenser complètement la façon de concevoir et programmer l'environnement virtuel. Alors que dans un processus de développement classique le concepteur/développeur va réfléchir à l'apparence de la scène virtuelle, nous incitons dorénavant les développeurs à penser en terme d'affordances perçues dans l'environnement virtuel. Plus largement il est nécessaire de s'intéresser à la signification de l'environnement virtuel pour l'utilisateur plutôt que uniquement à l'apparence de cet environnement. Cette préconisation incite donc à introduire l'utilisateur très tôt dans la phase de développement du logiciel. Enfin, lors de la conception de l'application en réalité virtuelle, il faut veiller à minimiser les affordances que les schémas d'interaction ne peuvent assumer.

Parallèlement à la construction de cette base théorique, cette thèse a participé au développement des systèmes de réalité virtuelle de notre équipe de recherche. Enfin, une phase d'évaluation a été menée, celle-ci consistait en un questionnaire comportant soixante-quatre questions. Le premier objectif de cette phase était de valider certaines hypothèses de notre modèle de la présence. Le premier résultat de cette évaluation valide le bien fondé de notre définition de la présence et les notions avancées de sentiment d'existence et d'incarnation de rôle. Le deuxième résultat indique que le jugement de la crédibilité est un critère pertinent. Enfin, le troisième résultat pointe la cohérence de notre modèle dans sa continuité.

PERSPECTIVES

Au cours de cette thèse un grand nombre d'hypothèses a été avancé. Nous souhaitons dans un premier temps mener une étude pour déterminer si les affordances perçues dans l'environnement virtuel dépendent du contexte médiatisé et des expériences préalables de l'utilisateur ou sont similaires à celles perçues dans l'environnement réel. Si les affordances perçues sont bien similaires à celles perçues dans l'environnement réel alors cela indique que notre hypothèse d'affordances assumées est pertinente. Il nous reste alors à mener une autre étude pour évaluer le rôle des affordances assumées (ou non) dans l'émergence de la présence. Ces hypothèses ont été énoncées lors de l'élaboration de notre modèle de la présence (voir section 8.2.2 page 89).

Une seconde étude est nécessaire pour valider l'hypothèse que, dans une optique de présence, suggérer peut être plus efficace que montrer. L'évaluation consiste à proposer un environnement dont le niveau de définition est suffisant pour que des affordances soient perçues. L'environnement est donc dépourvu d'informations uniquement descriptives et ne comporte que celles permettant la perception de ces affordances. L'expérience ainsi construite laisse donc la place à l'imagination de l'utilisateur pour *compléter* l'environnement. Toujours dans la même optique, nous souhaitons vérifier que proposer des environnements symboliques ou sémantiques permet une compréhension suffisante de l'environnement et des événements s'y déroulant pour que l'imagination complète la perception.

La troisième étude s'attache à évaluer l'influence de l'esthétisme de l'environnement sur l'émergence du sentiment de présence.

L'étude suivante vise à confirmer la pertinence de la présence d'action et que celle-ci dépend bien des affordances assumées et de la validité des sensations proprioceptives ressenties.

Une étude complémentaire est nécessaire pour confirmer que la crédibilité de l'expérience est bien le critère qui prime et non pas son réalisme.

Il reste également à implanter et évaluer notre algorithme perceptif de calcul de réverbération. Toutefois celui-ci nécessite en amont que des études sur l'acuité de la perception sonore soient à nouveau menées.

Il est également intéressant de mener des études sur la perception multimodale et intermodale en vue d'effectuer un rendu perceptif. Par ailleurs nous pensons intéressant de tirer parti des communications scientifiques sur ce type de perception.

Enfin, le Saint Graal de la présence qui consiste à identifier les seuils minimaux à atteindre pour susciter la présence est toujours d'actualité. Cette identification nous permettra de concevoir les diagrammes mâles et femelles relatifs à une expérience en réalité virtuelle.

Bibliographie

- [AB04] David ALAIS et David BURR : The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current Biology*, 14(3):257–262, February 2004.
- [AFST08] Fabio ANTONACCI, Marco FOCO, Augusto SARTI et Stefano TUBARO : Fast tracing of acoustic beams and paths through visibility lookup. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, 16(4):812–824, May 2008.
- [AFT03] Bruno ARNALDI, Philippe FUCHS et Jacques TISSEAU : *Le traité de la réalité virtuelle*, chapitre 1, page 8. Les Presses de l’Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [AKMHP09] Xavier AMATRIAIN, Joann KUCHERA-MORIN, Tobias HOLLERER et Stephen T. POPE : The allosphere : Immersive multimedia for scientific discovery and artistic exploration. *IEEE MultiMedia*, 16(2):64–75, 2009.
- [AMR⁺07] Jérémie ALLARD, Clément MENIER, Bruno RAFFIN, Edmond BOYER et François FAURE : Grimage : markerless 3d interactions. *In SIGGRAPH ’07 : ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, page 9, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [AMS08] Murat AYTEKIN, Cynthia F. MOSS et Jonathan Z. SIMON : A sensorimotor approach to sound localization. *Neural Computation*, 20(3):603–635, 2008.
- [AS09] Jens AHRENS et Sascha SPORS : An analytical approach to sound field reproduction with a movable sweet spot using circular distributions of loudspeakers. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on*, 0:273–276, 2009.
- [BA91] L. BUCK et R. AXEL : A novel multigene family may encode odorant receptors : a molecular basis for odor recognition. *Cell*, 65(1):175–187, 1991.
- [BA06] David BURR et David ALAIS : Combining visual and auditory information. *Progress in brain research*, 155:243–285, 2006.
- [Bat67] DW BATTEAU : The role of the pinna in human localization. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, pages 158–180, 1967.
- [BBA⁺04] RM BAÑOS, C. BOTELLA, M. ALCAÑIZ, V. LIAÑO, B. GUERRERO et B. REY : Immersion and emotion : their impact on the sense of presence. *CyberPsychology & Behavior*, 7(6):734–741, 2004.

- [BBB98] W. BARFIELD, K.M. BAIRD et O.J. BJORNESETH : Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate. *Displays*, 19(2):91–98, 1998.
- [BBG⁺04] RM BAÑOS, C. BOTELLA, B. GUERRERO, V. LIAÑO, B. REY et M. ALCAÑIZ : Sense of presence in emotional virtual environments. In *PRESENCE 2004 : The 7th Annual International Workshop on Presence*, pages 13–16, Valencia, Spain, 2004.
- [BBG⁺05] Rosa María BAÑOS, Cristina BOTELLA, Belén GUERRERO, Víctor LIAÑO, Mariano Alcañiz RAYA et Beatriz REY : The third pole of the sense of presence : Comparing virtual and imagery spaces. *PsychNology Journal*, 3(1):90–100, 2005.
- [BBR⁺08] Rosa M. BAÑOS, Cristina BOTELLA, Isabel RUBIÓ, Soledad QUERO, Azucena GARCÍA-PALACIOS et Mariano ALCAÑIZ : Presence and emotions in virtual environments : the influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, 11(1):1–8, Feb 2008.
- [BC93] Grigore BURDEA et Philippe COIFFET : *La réalité virtuelle*. Hermès, 1993.
- [BC98] Matthew BOTVINICK et Jonathan COHEN : Rubber hands feel touch that eyes see. *Nature*, 391:756, février 1998.
- [BCK⁺02] Eric BADIQUÉ, Marc CAVAZZA, Gudrun KLINKER, Gordon MAIR, Tony SWEENEY, Daniel THALMANN et Nadia M. THALMANN : Entertainment applications of virtual environments. In Kay M. STANNEY, éditeur : *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*, chapitre 55, pages 1143–1166. Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
- [BCL⁺04] Tom BEIGBEDER, Rory COUGHLAN, Corey LUSHER, John PLUNKETT, Emmanuel AGU et Mark CLAYPOOL : The effects of loss and latency on user performance in unreal tournament 2003®. In *NetGames '04 : Proceedings of 3rd ACM SIGCOMM workshop on Network and system support for games*, pages 144–151, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [BCL⁺06] Patrice BOUVIER, Pascal CHAUDEYRAC, Raphael LOYET, Benoît PIRANDA et François de SORBIER : Immersive visual and audio world in 3D. In Qasim MEDHI, Fred MTENZI, Bryan DUGGAN et Hugh MCATAMNEY, éditeurs : *9th International Conference on Computer Games : AI, Animation, Mobile, Educational & Serious Games (CGAMES'06)*, pages 159–165, Dublin, Ireland, nov 2006.
- [BCS⁺07] Patrice BOUVIER, Pascal CHAUDEYRAC, Sidi SOUEINA, Jocelyne KISS et Adel S. EL ELMAGHRABY : Intentionality Analysis in 3D Games. In Quasim MEHDI et Adel ELMAGHRABY, éditeurs : *10th International Conference on Computer Games : AI, Animation, Mobile, Educational and Serious Games (CGAMES'07)*, pages 39–43, Louisville, Kentucky, USA, juillet 2007.
- [BDL⁺90] John BARLOW, Esther DYSON, Timothy LEARY, William BRICKEN, Warren ROBINETT et Jaron LANIER : Hip, hype and hope—the three faces

-
- of virtual worlds (panel session). In *SIGGRAPH '90 : ACM SIGGRAPH 90 Panel Proceedings*, pages 1001–1029, New York, NY, USA, 1990. ACM. Chairman-Jacobson, Bob.
- [BdSCB08] Patrice BOUVIER, François de SORBIER, Pascal CHAUDEYRAC et Venceslas BIRI : Cross-benefits between virtual reality and games. In *International Conference on Computer Games, Multimedia and Allied Technology (CGAT'08)*, pages 0–8, Singapore, mai 2008.
- [BdVV93] A.J. BERKHOUT, D. de VRIES et P. VOGEL : Acoustic control by wave field synthesis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93:2764–2778, 1993.
- [Beg94] Durand R. BEGAULT : *3-D sound for virtual reality and multimedia*. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1994.
- [Ben95] Maurice BENAYOUN : *Le tunnel sous l'atlantique*, 1995.
- [BFFW03] Edwin BLAKE, Kuo-Chen FANG, Fu-Yao FENG et Ka Man WAI : Low-cost virtual reality system - pc driven system. Rapport technique CS03-17-00, University of Cape Town, 2003.
- [BFS00] J.A. BARCELÓ, M. FORTE et D.H. SANDERS : *Virtual reality in archaeology*. Oxford : Archaeopress, 2000.
- [BH95] Woodrow BARFIELD et Claudia HENDRIX : The effect of update rate on the sense on presence within virtual environments. *Virtual Reality : The Journal of the Virtual Reality Society*, 1(1):3–16, 1995.
- [BH96] Woodrow BARFIELD et Claudia HENDRIX : Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):274–289, 1996.
- [BHB99] Woodrow BARFIELD, Claudia HENDRIX et Karl-Erik BYSTROM : Effects of stereopsis and head tracking on performance using desktop virtual environment displays. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2):237–240, 1999.
- [BIL⁺02] Frank BIOCCA, Yasuhiro INOUE, Andy LEE, Heather POLINSKY et Arthur TANG : Visual cues and virtual touch : Role of visual stimuli and intersensory integration in cross-modal haptic illusions and the sense of presence. In *Presence 2002 : The 5th Annual International Workshop on Presence*, Porto, Portuga, Octobre 2002.
- [Bio97] Frank BIOCCA : The cyborg's dilemma : Progressive embodiment in virtual environments. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 1997.
- [Bio03] Franck BIOCCA : Can we resolve the book, the physical reality, and the dream state problems? From the two-pole to a three-pole model of shifts in presence, 2003.
- [BKH98] D.. BOWMAN, D. KOLLER et L. HODGES : A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. *Virtual Reality : Research, Development, and Applications*, 3(2):120–131, June 1998.

- [Bla97] J. BLAUERT : *Spatial hearing : the psychophysics of human sound localization*. MIT press, Cambridge, MA, 1997.
- [BLC⁺06] Patrice BOUVIER, Raphael LOYET, Pascal CHAUDEYRAC, Benoit PIRANDA et François de SORBIER : Immersion dans un monde visuel et sonore en 3d. In *19ème Journées de l'AFIG (AFIG'06)*, pages 277–283, Bordeaux, France, nov 2006. In french.
- [BM07] Doug A. BOWMAN et Ryan P. MCMAHAN : Virtual reality : How much immersion is enough ? *Computer*, 40(7):36–43, 2007.
- [Bor84] J. BORISH : Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75(6):1827–1836, 1984.
- [Bou08] Patrice BOUVIER : The five pillars of presence : Guidelines to reach presence. In *Presence 2008 : The 11th Annual International Workshop on Presence*, pages 246–249, Padoue, Italie, octobre 2008.
- [Bow99] Douglas A. BOWMAN : *Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments : design, evaluation, and application*. Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 1999. Adviser-Hodges, Larry F.
- [Bri91] Meredith BRICKEN : Virtual reality learning environments : potentials and challenges. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 25(3):178–184, 1991.
- [Bro99] Frederick P. BROOKS : What's real about virtual reality ? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6):16–27, 1999.
- [BSA96] M. BORILLO, A. SAUVAGEOT et R. ASCOTT : *Les cinq sens de la création : art, technologie et sensorialité*. Editions Champ Vallon, 1996.
- [BSK05] D.S. BRUNGART, B.D. SIMPSON et A.J. KORDIK : Localization in the presence of multiple simultaneous sounds. *Acta acustica United with Acustica*, 91(3):471–479, 2005.
- [BSVDD09] Nicolas BONNEEL, Clara SUIED, Isabelle VIAUD-DELMON et George DRETAKIS : Bimodal perception of audio-visual material properties for virtual environments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2009. accepté - publication en cours.
- [BT06] Ahmed BAYYARI et M. Eduard TUDOREANU : The impact of immersive virtual reality displays on the understanding of data visualization. In *VRST '06 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 368–371, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [Bur03] Jean-Marie BURKHARDT : Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66(1):65–91, 2003.
- [BvSJC05] V. BEST, A. van SCHAIK, C. JIN et S. CARLILE : Auditory spatial perception with sources overlapping in frequency and time. *Acta Acustica United with Acustica*, 91:421–428, 2005.
- [BVSS07] Andrea BROGNI, Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Anthony STEED et Mel SLATER : Responses of participants during an immersive virtual environment experience. *The International Journal of Virtual Reality*, 6(2):1–10, 2007.

-
- [Car96a] Simon CARLILE : Generation and validation of virtual auditory space. In Simon CARLILE, éditeur : *Virtual Auditory Space : Generation and Applications*, chapitre 4. Landes Bioscience, 1996.
- [Car96b] Simon CARLILE : The physical and psychophysical basis of sound localization. In Simon CARLILE, éditeur : *Virtual Auditory Space : Generation and Applications*, chapitre 2, pages 27–78. Landes Bioscience, 1996.
- [CB91] R.D. CISKOWSKI et CA BREBBIA : *Boundary element methods in acoustics*. Elsevier Applied Science, 1991.
- [CB08] Stéphanie CÔTÉ et Stéphane BOUCHARD : Virtual reality exposure for phobias : A critical review. *Journal of CyberTherapy & Rehabilitation*, 1(1):75–91, 2008.
- [CC04] Etienne CORTEEL et Terence CAULKINS : Sound scene creation and manipulation using wave field synthesis. Rapport technique, IRCAM, 2004.
- [CG92] D.W. CHANDLER et D.W. GRANTHAM : Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(3):1624–1636, 1992.
- [Chu02] Priscilla CHUENG : Designing sound canvas : the role of expectation and discrimination. In *CHI '02 : CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 848–849, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [CK05] Byoungwon CHOE et Hyeong-Seok KO : Analysis and synthesis of facial expressions with hand-generated muscle actuation basis. In *SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, page 15, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [CLH97] S. CARLILE, P. LEONG et S. HYAMS : The nature and distribution of errors in sound localization by human listeners. *Hearing research*, 114(1-2):179–196, 1997.
- [CLT⁺08a] Anish CHANDAK, Christian LAUTERBACH, Micah TAYLOR, Zhimin REN et Dinesh MANOCHA : Ad-frustum : Adaptive frustum tracing for interactive sound propagation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(6):1707–1722, 2008.
- [CLT⁺08b] Anish CHANDAK, Christian LAUTERBACH, Micah TAYLOR, Zhimin REN et Dinesh MANOCHA : Adaptive ray-frustum tracing for interactive sound propagation in complex environment. Rapport technique, University of North Carolina at Chapel Hill, 2008.
- [CMU05] H. CAKMAK, H. MAASS et Kuhnappel U. : Vs one , a virtual reality simulator for laparoscopic surgery. *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies*, 14(3):134–144, June 2005.
- [CNSD⁺92] Carolina CRUZ-NEIRA, Daniel J. SANDIN, Thomas A. DEFANTI, Robert V. KENYON et John C. HART : The cave : audio visual experience automatic virtual environment. *Commun. ACM*, 35(6):64–72, 1992.

- [Col69] Samuel Taylor COLERIDGE : *The collected works of Samuel Taylor Coleridge*. Routledge and K. Paul; Princeton University Press, [London] : [Princeton] :, 1969.
- [CP03] E. CHILDS et V. PULKKI : Using multi-channel spatialization in sonification : A case study with meteorological data. In E. BRAZIL et B. SHINN-CUNNINGHAM, éditeurs : *Proceedings of the 9th International Conference on Auditory Display (ICAD2003)*, pages 192–195, Boston, USA, 2003. Boston University Publications Production Department, Boston University Publications Production Department.
- [Cro90] Lee J. CRONBACH : *Essentials of psychological testing*. Harper Collins, New York, cinquième édition, 1990.
- [CRV] Centre de la Réalité Virtuelle de la Méditerranée de l'Université de la Méditerranée CRVM : Sas-cube de marseille. Site internet. http://www.realite-virtuelle.univmed.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=39&Itemid=44&lang=fr.
- [Cry09] CRYTEK : Crysis 2. Site internet, 2009. <http://www.crytek.com/>.
- [CS05] Daniel C. CLIBURN et Kevin STORMER : The hive : Hanover immersive virtual environment. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 20(4):6–12, 2005.
- [CSS04] Gemma A. CALVERT, Charles SPENCE et Barry E. STEIN : *The handbook of multisensory processes*. MIT Press, Cambridge, 2004.
- [CW01] C.I. CHENG et G.H. WAKEFIELD : Introduction to head-related transfer functions (HRTFs) : Representations of HRTFs in time, frequency, and space. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49:231–249, 2001.
- [D⁺] Paul DAVIS *et al.* : Jack audio connection kit. site internet. <http://jackaudio.org/>.
- [Dal96] Bengt-Inge L. DALENB
"ACK : Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(2):899–909, 1996.
- [Das] Systemes DASSAULT : 3dvia-virttools. Site internet. <http://a2.media.3ds.com/products/3dvia/3dvia-virttools/>.
- [Ded09] Chris DEDE : Immersive interfaces for engagement and learning. *Science*, 323(5910):66–69, January 2009.
- [DH96] Char DAVIES et John HARRISON : Osmose : towards broadening the aesthetics of virtual reality. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 30(4):25–28, 1996.
- [DHBD04] Robert DAY, Simon HOLLAND, David BOWERS et Anton DIL : Using spatial audio in minimal attention interfaces : Towards an effective audio gps navigation system. Rapport technique 2004/08, Department of Computing, Faculty of Mathematics and Computing, The Open University, 2004.

-
- [DPT⁺08] Matteo DELLEPIANE, Nico PIETRONI, Nicolas TSINGOS, Manuel ASSELOT et Roberto SCOPIGNO : Reconstructing head models from photographs for individualized 3d-audio processing. *Computer Graphics Forum*, 27(7):1719–1727, 2008.
- [dSBC⁺06] François de SORBIER, Patrice BOUVIER, Pascal CHAUDEYRAC, Vincent NOZICK et Benoit PIRANDA : Jim 3d : Jeu interactif par mosaïques 3d. *In 1ère Journées de l'AFRV*, pages 91–96, Rocquencourt, France, nov 2006. In french.
- [dSBH⁺08] François de SORBIER, Patrice BOUVIER, Adrien HERUBEL, Pascal CHAUDEYRAC, Venceslas BIRI et Jocelyne KISS : A virtual reality installation. *In Human System Interactions, 2008 Conference on*, pages 131–134, May 2008.
- [dSBHB09] François de SORBIER, Patrice BOUVIER, Adrien HERUBEL et Venceslas BIRI : A virtual reality installation. *In Juliusz L. KULIKOWSKI et Zdzislaw S. HIPPE, éditeurs : Human-Computer Systems Interaction. Backgrounds and Applications*, volume 60 de *Advances in Intelligent and Soft Computing*, pages 1–12. Springer-Verlag, septembre 2009.
- [EB04] Marc O. ERNST et Heinrich H. BÜLTHOFF : Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4):162–169, Avril 2004.
- [Ell91] Stephen R. ELLIS : Nature and origins of virtual environments : a bibliographical essay. *Computing Systems in Engineering*, 2(4):321–347, 1991.
- [Ell96] Stephen R. ELLIS : Presence of mind- a reaction to thomas sheridan's'further musings on the psychophysics of presence'. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 5(2):247–259, 1996.
- [Eyr30] Carl F. EYRING : Reverberation time in “dead” rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1(2A):217–241, 1930.
- [FA00] J. FREEMAN et S.E. AVONS : Focus group exploration of presence through advanced broadcast services. *In Proceedings of the SPIE, Human Vision and Electronic Imaging*, volume 3959, pages 530–539, San Jose CA , ETATS-UNIS, 2000.
- [FAM⁺00] Jonathan FREEMAN, S.E. AVONS, Ray MEDDIS, Don E. PEARSON et Wijnand IJSELSTEIJN : Using behavioural realism to estimate presence : A study of the utility of postural responses to motion-stimuli. *Presence : Teleoperators and Virtual Environment*, 9(2):149–164, 2000.
- [FAMD04] Schneider Edward F., Lang ANNIE, Shin MIJA et Bradley Samuel D. : Death with a Story. How Story Impacts Emotional, Motivational, and Physiological Responses to First-Person Shooter Video Games. *Human Communication Research*, 30(3):361–375, 2004.
- [FAPI99] Jonathan FREEMAN, S. E. AVONS, Don E. PEARSON et Wijnand A. IJSELSTEIJN : Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1):1–13, 1999.

- [Far79] K. FARRAR : Soundfield microphone. *Wireless World*, 85:99–102, 1979.
- [FBT04] Marta FAIRÉN, Pere BRUNET et Torsten TECHMANN : Minivr : a portable virtual reality system. *Computers & Graphics*, 28(2):289–296, 2004.
- [FCE⁺98] Thomas FUNKHOUSER, Ingrid CARLBOM, Gary ELKO, Gopal PINGALI, Mohan SONDHI et Jim WEST : A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments. In *SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 21–32, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [Fer01] James A. FERWERDA : Elements of early vision for computer graphics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(5):22–33, 2001.
- [FH98] John M. FLACH et John G. HOLDEN : The reality of experience : Gibson's way. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1):90–95, 1998.
- [FKN80] Henry FUCHS, Zvi M. KEDEM et Bruce F. NAYLOR : On visible surface generation by a priori tree structures. In *SIGGRAPH '80 : Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 124–133, New York, NY, USA, 1980. ACM.
- [FM33] Harvey FLETCHER et W. A. MUNSON : Loudness, its definition, measurement and calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 5(2):82–108, 1933.
- [FM03] Philippe FUCHS et Guillaume MOREAU : *Le traité de la réalité virtuelle*. Presse de l'École des Mines, seconde édition, 2003.
- [FR08] Zoltán FODRÓCZI et András RADVÁNYI : Localization of directional sound sources supported by a priori information of the acoustic environment. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008:6, 2008.
- [FTC⁺04] Thomas FUNKHOUSER, Nicolas TSINGOS, Ingrid CARLBOM, Gary ELKO, Mohan SONDHI, James WEST, Gopal PINGALI, Patrick MIN et Addy NGAN : A beam tracing method for interactive architectural acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2):739–756, février 2004.
- [FTJ03] Thomas FUNKHOUSER, Nicolas TSINGOS et Jean-Marc JOT : Survey of methods for modeling sound propagation in interactive virtual environment systems. *Presence and Teleoperation*, 2003.
- [Fuc03] Philippe FUCHS : Introduction à la réalité virtuelle. In *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1, chapitre 1. Les Presses de l'École des Mines de Paris, 2003.
- [Gar99] W.G. GARDNER : 3D audio and acoustic environment modeling. *Wave Arts, Inc*, 1999.
- [Gav93] William W. GAVER : What in the world do we hear ? An ecological approach to auditory event perception. *Ecological Psychology*, 5(1):1–29, 1993.
- [GBW⁺09] David GRELAUD, Nicolas BONNEEL, Michael WIMMER, Manuel ASSELOT et George DRETTAKIS : Efficient and practical audio-visual rendering for

-
- games using crossmodal perception. *In I3D '09 : Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages 177–182, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [GDPM08] Luigi GALLO, Giuseppe DE PIETRO et Ivana MARRA : 3d interaction with volumetric medical data : experiencing the wiimote. *In Ambi-Sys '08 : Proceedings of the 1st international conference on Ambient media and systems*, pages 1–6, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Ger73] Michael A. GERZON : Periphony : With-height sound reproduction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 21(1):2–10, 1973.
- [Ger85] Michael A. GERZON : Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video. *Journal of the Audio Engineering Society*, 33(11):859–871, 1985.
- [GGE⁺95] Robert H. GILKEY, Michael D. GOOD, Mark A. ERICSON, John BRINKMAN et John M. STEWART : A pointing technique for rapidly collecting localization responses in auditory research. *Behavior research methods, instruments & computers*, 27(1):1–11, 1995.
- [GGGKB07] Melita J. GIUMMARRA, Stephen J. GIBSON, Nellie GEORGIUKARISTIANIS et John L. BRADSHAW : Central mechanisms in phantom limb perception : the past, present and future. *Brain research reviews*, 54(1):219–232, 2007.
- [Gib86] James J. GIBSON : *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, 1 édition, October 1986.
- [GKKR05] Jeffrey I. GOLD, Alexis J. KANT, Seok H. KIM et Albert RIZZO : Virtual anesthesia : the use of virtual reality for pain distraction during acute medical interventions. *Seminars in Anesthesia, Perioperative Medicine and Pain*, 24(4):203–210, 2005.
- [GLCB07] Catherine GUASTAVINO, Véronique LARCHER, Guillaume CATUSSEAU et Patrick BOUSSARD : Spatial audio quality evaluation : Comparing transaural, ambisonics and stereo. *In Proceedings of the 13th International Conference on Auditory Display (ICAD2007)*, pages 53–59, Montreal, Canada, 2007. Schulich School of Music, McGill University.
- [GLT07] Matti GRÖHN, Tapio LOKKI et Tapio TAKALA : Localizing sound sources in a cave-like virtual environment with loudspeaker array reproduction. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 16(2):157–171, 2007.
- [GM94] Bill GARDNER et Keith MARTIN : Hrtf measurements of a kemar dummy-head microphone. Rapport technique, MIT Media Lab Perceptual Computing, 1994.
- [GMF08] Holly GRIMES, Karen R. MCMENEMY et R. S. FERGUSON : A transportable and easily configurable multi-projector display system for distributed virtual reality applications. *In The Engineering Reality of Virtual Reality 2008*, volume 6804, pages 68040G–68040G–9. SPIE, 2008.

- [GNEC07] Antoine GONOT, Stéphane NATKIN, Marc EMERIT et Noël CHATEAU : The roles of spatial auditory perception and cognition in the accessibility of a game map with a first person view. *International Journal of Intelligent Games & Simulation*, 4(2), 2007.
- [GR08] Alessandra GORINI et Giuseppe RIVA : Virtual reality in anxiety disorders : the past and the future. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 8:215–233, Février 2008.
- [Gro02] Matti GROHN : Is audio useful in immersive visualization ? *Proceedings of SPIE : Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX*, 4660(1):411–421, 2002.
- [GRWA⁺04] M. GARAU, H. RITTER-WIDENFELD, A. ANTLEY, D. FRIEDMAN, A. BROGNI et M. SLATER : Temporal and spatial variations in presence : A qualitative analysis. In *Proceedings of the 7th Annual International Workshop on Presence, PRESENCE'04*, pages 232–239, 2004.
- [GSV⁺03] Maia GARAU, Mel SLATER, Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Andrea BROGNI, Anthony STEED et M. Angela SASSE : The impact of avatar realism and eye gaze control on perceived quality of communication in a shared immersive virtual environment. In *CHI '03 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 529–536, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [GW95] Robert H. GILKEY et Janet M. WEISENBERGER : The sense of presence for the suddenly-deafened adult : Implications for virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 4(4):357–363, 1995.
- [HA99] M.P. HUANG et N.E. ALESSI : Mental health implications for presence. *CyberPsychology & Behavior*, 2(1):15–18, 1999.
- [Han97] Chris HAND : A survey of 3d interaction techniques. *Computer Graphics Forum*, 16(5):269–281, 1997.
- [HD92] RM HELD et N. DURLACH : Telepresence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environment*, 1(1):109–112, 1992.
- [Hee92] Carrie HEETER : Being there : the subjective experience of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2):262–271, 1992.
- [Hee03] Carrie HEETER : Reflections on real presence by a virtual person. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 12(4):335–345, 2003.
- [HEHR⁺07] Karin HÄGNI, Kynan ENG, Marie-Claude HEPP-REYMOND, Lisa HOLPER, Birgit KEISKER, Ewa SIEKIERKA et Daniel C. KIPER : The Effect of Task and Ownership on Time Estimation in Virtual Environments. In *Presence 2001 : The 4th Annual International Workshop on Presence*, pages 1–6, Barcelona, Spain, 2007.
- [Hei62] Morton L. HEILIG : Sensorama Stimulator, 1962. United States Patent and Trade Office, Virginia, USA, US-3,050,870.
- [HGAB08] David M. HOFFMAN, Ahna R. GIRSHICK, Kurt AKELEY et Martin S. BANKS : Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8(3):1–30, 3 2008.

-
- [HGR⁺96] H. HOFFMAN, J. GROEN, S. ROUSSEAU, A. HOLLANDER, W. WINN, M. WELLS et T. FURNESS : Tactile augmentation : Enhancing presence in virtual reality with tactile feedback from real objects. *In meeting of the American Psychological Society*, San Francisco, USA, 1996.
- [HKM⁺95] Larry F. HODGES, Rob KOOPER, Thomas C. MEYER, Barbara O. ROTHBAUM, Dan OPDYKE, Johannes J. de GRAAFF, James S. WILLIFORD et Max M. NORTH : Virtual environments for treating the fear of heights. *Computer*, 28(7):27–34, Juillet 1995.
- [HR89] W.M. HARTMANN et B. RAKERD : On the minimum audible angle—A decision theory approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(5):2031–2041, 1989.
- [HRF09] Everton HERMANN, Bruno RAFFIN et François FAURE : Interactive physical simulation on multicore architectures. *In Eurographics Workshop on Parallel and Graphics and Visualization, EGPGV'09, March, 2009*, Munich, Allemagne, 2009.
- [HRH06] David HECHT, Miriam REINER et Gad HALEVY : Multimodal virtual environments : response times, attention, and presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5):515–523, 2006.
- [HRVT02] Bruno HERBELIN, Françoise RIQUIER, Frédéric VEXO et Daniel THALMANN : Virtual Reality in Cognitive Behavioral Therapy : a preliminary study on Social Anxiety Disorder. *In 8th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, VSMM02*, 2002.
- [HTNS09] Takayuki HOSHI, Masafumi TAKAHASHI, Kei NAKATSUMA et Hiroyuki SHINODA : Touchable holography. *In SIGGRAPH '09 : ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, pages 1–1, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [HVRVO98] Paul M. HOFMAN, Jos G.A VAN RISWICK et John A. VAN OPSTAL : Relearning sound localization with new ears. *Nature Neuroscience*, 1(5):417–421, Septembre 1998.
- [IBSdK01] W. IJSSELSTEIJN, I. BIERHOFF et Y. Slangen-de KORT : Duration estimation and presence. *In Presence 2001 : The 4th Annual International Workshop on Presence*, pages 1–8, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2001.
- [IdRFA00] Wijnand A. IJSSELSTEIJN, H. de RIDDER, Jonathan. FREEMAN et S.E. AVONS : Presence : Concept, determinants and measurement. *In Proceedings of the SPIE, Human Vision and Electronic Imaging*, volume 3959 de *Proceedings of SPIE*, pages 520–529, 2000.
- [IdRH⁺98] W. IJSSELSTEIJN, H. de RIDDER, R. HAMBERG, D. BOUWHUIS et J. FREEMAN : Perceived depth and the feeling of presence in 3DTV. *Displays*, 18(4):207–214, 1998.
- [Ijs02] Wijnand IJSSELSTEIJN : Elements of a multi-level theory of presence : Phenomenology, mental processing and neural correlates. *In Presence 2002 : The 5th Annual International Workshop on Presence*, pages 245–259, Porto, Portugal, Octobre 2002.

- [IJs03] Wijnand IJSELSTEIJN : *Being There Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments*, chapitre 2, pages 17–40. Amsterdam : IOS Press, 2003.
- [IJs04] Wijnand A. IJSELSTEIJN : *Presence in depth*. Thèse de doctorat, Eindhoven, The Netherlands : Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- [IRF⁺01] Wijnand IJSELSTEIJN, Huib de RIDDER, Jonathan FREEMAN, S. E. AVONS et Don BOUWHUIS : Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):298–311, 2001.
- [IYFN05] H. IWATA, H. YANO, H. FUKUSHIMA et H. NOMA : Circulafloor [locomotion interface]. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 25(1):64–67, 2005.
- [IYT06] Hiroo IWATA, Hiroaki YANO et Hiroshi TOMIOKA : Powered shoes. *In SIGGRAPH '06 : ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies*, page 28, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [IYUM04] Hiroo IWATA, Hiroaki YANO, Takahiro UEMURA et Tetsuro MORIYA : Food simulator : A haptic interface for biting. *In VR '04 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2004*, page 51, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [Jen96] Henrik Wann JENSEN : Global illumination using photon maps. *In Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96*, pages 21–30, London, UK, 1996. Springer-Verlag.
- [Jen01] Henrik Wann JENSEN : *Realistic image synthesis using photon mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001.
- [JJM08] Dooho JUNG, Seongsik JO et Rohae MYUNG : A study of relationships between situation awareness and presence that affect performance on a handheld game console. *In ACE '08 : Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pages 240–243, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [JK03] Robert J. K. JACOB et Keith S. KARN : Eye tracking in human-computer interaction and usability research : Ready to deliver the promises. *The Mind's eye : Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*, pages 573–603, 2003.
- [JMT03] Chris JOSLIN et Nadia MAGNENAT-THALMANN : Significant facet retrieval for real-time 3d sound rendering in complex virtual environments. *In VRST '03 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 15–21, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [Joh04] Chris JOHNSON : Top scientific visualization research problems. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24(4):13–17, 2004.
- [Jot97] Jean-Marc JOT : Efficient models for reverberation and distance rendering in computer music and virtual audio reality. *In ICMC : International Computer Music Conference*, pages 236–243, Thessaloniki, Greece, Septembre 1997.

-
- [Jou97] Jacques JOUHANEAU : *Acoustique des salles et sonorisation*. Lavoisier Tec & Doc, 1997.
- [JP07] A. JIMENO et A. PUERTA : State of the art of the virtual reality applied to design and manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9):866–874, 2007.
- [Kaj86] James T. KAJIYA : The rendering equation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 20(4):143–150, 1986.
- [Kal00] Roy S. KALAWSKY : The validity of presence as a reliable human performance metric in immersive environments. *In Proceedings of the 3rd Annual International Workshop on Presence*, pages 27–28, 2000.
- [Kap06] Bill KAPRALOS : *The sonel mapping acoustical modeling method*. Thèse de doctorat, YORK UNIVERSITY TORONTO, ONTARIO, 2006.
- [KBSC07] N. KOPČO, V. BEST et B.G. SHINN-CUNNINGHAM : Sound localization with a preceding distractor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1):420–432, 2007.
- [KDU02] David B. KABER, John V. DRAPER et John M. USHER : Influence of individual differences on application design for individual and collaborative immersive virtual environments. *In Kay M. STANNEY, éditeur : Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*, chapitre 18, pages 379–402. Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
- [KEB⁺04] Merel KRIJN, Paul M. EMMELKAMP, Roeline BIEMOND, de WILDE, Martijn J. SCHUEMIE et Charles A. van der MAST : Treatment of acrophobia in virtual reality : The role of immersion and presence. *Behaviour Research and Therapy*, 42(2):229–239, Février 2004.
- [Kel62] Joseph B. KELLER : Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, 52(2):116–130, 1962.
- [KGT01] Stephen M. KOSSLYN, Giorgio GANIS et William L. THOMPSON : Neural foundations of imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, 2:635–642, 2001.
- [KHS89] Kevin. KELLY, Adam HEILBRUN et Barbara STACKS : Virtual reality : an interview with Jaron Lanier. *Whole Earth Review*, 64:108–120, 1989.
- [KJM04] Bill. KAPRALOS, Michael. JENKIN et Evangelos MILIOS : Sonel mapping : acoustic modeling utilizing an acoustic version of photon mapping. *In Proceedings of The 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications, HAVE 2004*, pages 1–6, Oct. 2004.
- [KJM07] Bill. KAPRALOS, Michael. JENKIN et Evangelos MILIOS : Acoustical modeling with sonel mapping. *In Proceedings of The 19th International Congress on Acoustics (ICA)*, pages 1–6, Madrid, Espagne, Septembre 2007.
- [KJM08] Bill. KAPRALOS, Michael. JENKIN et Evangelos MILIOS : Sonel mapping : A probabilistic acoustical modeling method. *Building Acoustics*, 15(4):289–313, Décembre 2008.

- [KSS68] A. KROKSTAD, S. STROM et S. SORSDAL : Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1):118–125, 1968.
- [Kut95] Heinrich KUTTRUFF : A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(1):288–293, 1995.
- [Kut00] Heinrich KUTTRUFF : *Room Acoustics*. Spon Press, quatrième édition édition, 2000.
- [KZJH04] B. KAPRALOS, D. ZIKOVITZ, M. JENKIN et L.R. HARRIS : Auditory cues in the perception of self-motion. In *116th AES convention*, Berlin, Allemagne, 2004.
- [LBP⁺09] Jean-Claude LEPECQ, Lionel BRINGOUX, Jean-Marie PERGANDI, Thelma COYLE et Daniel MESTRE : Afforded actions as a behavioral assessment of physical presence in virtual environments. *Virtual Reality*, 13(3):141–151, septembre 2009.
- [LCAA08] X. LARRODÉ, B. CHANCLOU, L. AGUERRECHE et B. ARNALDI : Openmask : an open-source platform for virtual reality. In *E VR workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS)*, Reno, USA, 2008.
- [LCK⁺00] Anatole LECUYER, Sabine COQUILLART, Abderrahmane KHEDDAR, Paul RICHARD et Philippe COIFFET : Pseudo-haptic feedback : Can isometric input devices simulate force feedback? In *VR '00 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2000 Conference*, page 83, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [LCM07] Christian LAUTERBACH, Anish CHANDAK et Dinesh MANOCHA : Interactive sound rendering in complex and dynamic scenes using frustum tracing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6):1672–1679, 2007.
- [LCYG99] R.Y. LITOVSKY, H.S. COLBURN, W.A. YOST et S.J. GUZMAN : The precedence effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106:1633, 1999.
- [LD97] Matthew LOMBARD et Theresa DITTON : At the Heart of It All : The Concept of Presence. *Journal of computer-mediated communication*, 3(2): 20, 1997.
- [Lee04] Kwan Min LEE : Presence, explicated. *Communication Theory*, 14(1):27–50, february 2004.
- [Leh93] H. LEHNERT : Systematic errors of the ray-tracing algorithm. *Applied Acoustics*, 38:207–221, 1993.
- [Leh03] J. LEHTINEN : Time-domain Numerical Solution of the Wave Equation. 2003.
- [LFKD01] Jane LESSITER, Jonathan FREEMAN, Edmund KEOGH et Jules DAVIDOFF : A cross-media presence questionnaire : The itc-sense of presence inventory. *Presence : Teleoperators and Virtual Environment*, 10(3):282–297, 2001.

-
- [LFLVD08] Joseph LAVIOLA, Andrew FORSBERG, David H. LAIDLAW et Andries VAN DAM : Virtual reality-based interactive scientific visualization environments. *Springer-Verlag London Limited*, pages 225–250, 2008.
- [LGBA93] P.J. LANG, M.K. GREENWALD, M.M. BRADLEY et Hamm A.O. : Looking at pictures : affective, facial, visceral and behavioural reactions. *Psychophysiology*, 30(3):261–273, 1993.
- [LGH⁺03] C. LENAY, O. GAPENNE, S. HANNETON, C MARQUE et C. GENOUËLLE : Sensory substitution, limits and perspectives. In Y. HATWELL, A. STRERI et E. (Eds.) GENTAZ, éditeurs : *Touching for Knowing, Cognitive psychology of haptic manual perception*, pages 275–292. John Benjamins Publishing Company, 2003.
- [Lik32] R. LIKERT : A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22(140):1–55, 1932.
- [LK04] S. J. LEDERMAN et R. L. KLATZKY : Multisensory texture perception. In Gemma A. CALVERT, Charles SPENCE et Barry E. (eds.) STEIN, éditeurs : *The handbook of multisensory processes*, pages 107–122. MIT Press, Cambridge, 2004.
- [LL06] N. N. LATYPOV et N. N. LATYPOV. : The virtosphere. Site internet, 2006. <http://www.virtosphere.com>.
- [LN07] Ilda LADEIRA et David NUNEZ : Story worlds and virtual environments : Learning from oral storytelling. In *Presence 2007 : The 10th Annual International Workshop on Presence*, Barcelone, Espagne, Octobre 2007.
- [LRP08] Maria LIMNIOU, David ROBERTS et Nikos PAPADOPOULOS : Full immersive virtual environment cavetm in chemistry education. *Computers and Education*, 51(2):584–593, 2008.
- [LSLS08] Samuli LAINE, Samuel SILTANEN, Tapio LOKKI et Lauri SAVIOJA : Accelerated beam tracing algorithm. *Applied Acoustics*, 70(1):172–181, Janvier 2008.
- [LSV⁺02] Tapio LOKKI, Lauri SAVIOJA, Riitta VÄÄNÄNEN, Jyri HUOPANIEMI et Tapio TAKALA : Creating interactive virtual auditory environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(4):49–57, 2002.
- [LV07] Pontus LARSSON et Aleksander VÄLJAMÄE : Auditory-visual perception of room size in virtual environments. In *Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Spain, Septembre 2007.
- [LYM06] Christian LAUTERBACH, Sung-eui YOON et Dinesh MANOCHA : RT-DEFORM : Interactive ray tracing of dynamic scenes using BVHs. In *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing 2006*, pages 39–46, 2006.
- [MB02] B.S. MULLER et P. BOVET : Performance and reaction times in monaural localization of first names in the horizontal plane. *Brain and Language*, 82(1):1–9, 2002.
- [MBD⁺04] M. MICHAUD, S. BOUCHARD, S. DUMOULIN, XW ZHONG et P. RENAUD : Manipulating presence and its impact on anxiety. *Journal of CyberTherapy and Rehabilitation*, 2004.

- [MBT⁺07] Thomas MOECK, Nicolas BONNEEL, Nicolas TSINGOS, George DRETTAKIS, Isabelle VIAUD-DELMON et David ALLOZA : Progressive perceptual audio rendering of complex scenes. *In I3D '07 : Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages 189–196, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [MC00] Katerina MANIA et Alan CHALMERS : A user-centered methodology for investigating presence and task performance. *In Proceedings of the 3rd Annual International Workshop on Presence*, Bristol, UK, UK, 2000. University of Bristol.
- [McK00] Barbara MCKENNA : Life, love and the pursuit of virtual reality : An interview with inventor jaron lanier. *Arts & Ideas magazine*, 1(3), 2000.
- [MD01] Hunter MURPHY et Andrew T. DUCHOWSKI : Gaze-contingent level of detail rendering. *In EGRW '01 : Proceedings of the 12th Eurographics workshop on Rendering*, pages 169–180. Eurographics Association, 2001.
- [Mee01] M. MEEHAN : *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments*. Thèse de doctorat, University of North Carolina, 2001.
- [MG91] J. C. MIDDLEBROOKS et D. M. GREEN : Sound localization by human listeners. *Annu Rev Psychol*, 42:135–159, 1991.
- [Mic09] MICROSOFT : Projet natal. Site internet, 2009. <http://www.xbox.com/en-US/live/projectnatal/>.
- [Mil58] A. W. MILLS : On the minimum audible angle. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 30(4):237–246, 1958.
- [Mil74] Stanley MILGRAM : *Obedience to authority : An experimental view*. Tavistock Publications Ltd, 1974.
- [Min80] Marvin MINSKY : Telepresence. *Omni*, pages 45–51, 1980.
- [Min95] Mark R. MINE : Virtual environment interaction techniques. Rapport technique, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 1995.
- [MIWB01] Michael MEEHAN, Brent INSKO, Mary WHITTON et Frederick BROOKS : Physiological responses to breaks in presence : A pilot study. *In Presence 2001 : The 4th Annual International Workshop on Presence*, pages 1–28, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2001.
- [MIWB02] Michael MEEHAN, Brent INSKO, Mary WHITTON et Frederick P. Jr. BROOKS : Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):645–652, 2002.
- [MK04] Taeyong MOON et Gerard J. KIM : Design and evaluation of a wind display for virtual reality. *In VRST '04 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 122–128, New York, NY, USA, 2004. ACM.

-
- [MK06] Ruiqi MA et David B. KABER : Presence, workload and performance effects of synthetic environment design factors. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 64(6): 541–552, 2006.
- [MM76] H. MCGURK et J. MACDONALD : Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264:746–748, Décembre 1976.
- [MM90] James C. MAKOUS et John C. MIDDLEBROOKS : Two-dimensional sound localization by human listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(5):2188–2200, 1990.
- [MMB08] Teresa MONAHAN, Gavin MCARDLE et Michela BERTOLOTTO : Virtual reality for collaborative e-learning. *Comput. Educ.*, 50(4):1339–1353, 2008.
- [Moo03] Brian C. J. MOORE : *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Academic Press, 5 édition, 2003.
- [MPP⁺06] Craig D. MURRAY, Emma PATCHICK, Stephen PETTIFER, Fabrice CAILLETTE et Toby HOWARD : Immersive virtual reality as a rehabilitative technology for phantom limb experience : A protocol. *CyberPsychology and Behavior*, 9(2):167–170, 2006.
- [MRB05] Katerina MANIA, Andrew ROBINSON et Karen R. BRANDT : The effect of memory schemas on object recognition in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 14(5):606–615, 2005.
- [MRWB03] Michael MEEHAN, Sharif RAZZAQUE, Mary C. WHITTON et Frederick P. BROOKS, Jr. : Effect of latency on presence in stressful virtual environments. In *VR '03 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2003*, pages 141–148, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [MSH04] T.S. MUJBER, T. SZECSEI et M.S.J. HASHMI : Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of materials processing technology*, 155(3):1834–1838, novembre 2004.
- [MTUK94] Paul MILGRAM, Haruo TAKEMURA, Akira UTSUMI et Fumio KISHINO : Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Proceedings of the SPIE Conference on Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351 de *Proceedings of SPIE*, pages 282–292, Boston, Massachusetts, USA, November 1994.
- [MTY08] J.M. MOORE, D.J. TOLLIN et T.C.T. YIN : Can measures of sound localization acuity be related to the precision of absolute location estimates? *Hearing research*, 238(1-2):94–109, 2008.
- [Nin05] NINTENDO : Wiimote. Site internet, 2005. <http://www.nintendo.com/wii>.
- [NIS] NIST : National institute of standards and technology. Site internet. <http://www.nist.gov>.
- [NSC08] Chang S. NAM, Joseph SHU et Donghun CHUNG : The roles of sensory modalities in collaborative virtual environments (cves). *Comput. Hum. Behav.*, 24(4):1404–1417, 2008.

- [NSVDW09] Khoa-Van NGUYEN, Clara SUIED, Isabelle VIAUD-DELMON et Olivier WARUSFEL : Spatial audition in a static virtual environment : the role of auditory-visual interaction. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 2009.
- [Nvi09] NVIDIA : 3d vision. Site internet, 2009. http://www.nvidia.fr/object/GeForce_3D_Vision_Main_fr.html.
- [NW08] Michael A. NEES et Bruce N. WALKER : Data density and trend reversals in auditory graphs : Effects on point-estimation and trend-identification tasks. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 5(3):1–24, 2008.
- [OHM⁺04] Carol O’SULLIVAN, Sarah HOWLETT, Yann MORVAN, Rachel McDONNELL et Keith O’CONOR : Perceptually Adaptive Graphics. In Christophe SCHLICK et Werner PURGATHOFER, éditeurs : *STAR-Proceedings of Eurographics 2004*, State of the Art Reports, pages 141–164. INRIA and the Eurographics Association, 2004.
- [OP84] Simon R. OLDFIELD et Simon P.A. PARKER : Acuity of sound localisation : a topography of auditory space. I. Normal hearing conditions. *Perception*, 13(5):581–600, 1984.
- [PA07] Matthew PRICE et Page ANDERSON : The role of presence in virtual reality exposure therapy. *Journal of Anxiety Disorders*, 21(5):742–751, 2007.
- [PDS⁺05] Ana PAIVA, Joao DIAS, Daniel SOBRAL, Ruth AYLETT, Sarah WOODS, Lynne HALL et Carsten ZOLL : Learning by feeling : Evoking empathy with synthetic characters. *Applied Artificial Intelligence*, 19(3-4):235–266, 2005.
- [PdSA05] Benoit PIRANDA, François de SORBIER et Didier ARQUES : Simulation of blur in stereoscopic image synthesis for virtual reality". In *13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2005 (WSCG'05)*, pages 51–52, Février 2005. Electronic version.
- [Pea] PEACH : Peach, presence reseach in action. Site internet. <http://www.peachbit.org>.
- [PFK⁺08] PRABHAT, Andrew FORSBERG, Michael KATZOURIN, Kristi WHARTON et Mel SLATER : A comparative study of desktop, fishtank, and cave systems for the exploration of volume rendered confocal data sets. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(3):551–563, 2008.
- [PGS08] Xueni PAN, Marco GILLIES et Mel SLATER : The impact of avatar blushing on the duration of interaction between a real and virtual person. In *Presence 2008 : The 11th Annual International Workshop on Presence*, Padoue, Italie, octobre 2008.
- [Phi08] Philips Electronics, Nederland B.V. *3D Interface Specifications. White Paper. Philips 3D Solutions*, 2008.
- [Pia52] Jean PIAGET : *The origins of intelligence in children (trans. M. Cook)*. New York : International Universities Press, 1952.

-
- [PK01] V. PULKKI et M. KARJALAINEN : Directional quality of 3-d amplitude panned virtual sources. In J. HIIPAKKA, N. ZACHAROV et T. TAKALA, éditeurs : *Proceedings of the 7th International Conference on Auditory Display (ICAD2001)*, pages 239–244, Espoo, Finland, 2001.
- [PL98] Ville PULKKI et Tapio LOKKI : Creating auditory displays with multiple loudspeakers using vbap : A case study with diva project. In S. BREWSTER, éditeur : *Proceedings of the 5th International Conference on Auditory Display (ICAD98)*, University of Glasgow, U.K., 1998. British Computer Society.
- [PLBR09] Benjamin PETIT, Jean-Denis LESAGE, Edmond BOYER et Bruno RAFFIN : Virtualization gate. In *SIGGRAPH '09 : ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, pages 1–1, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [PMC09] Andreas PUSCH, Olivier MARTIN et Sabine COQUILLART : Hemp-hand-displacement-based pseudo-haptics : A study of a force field application and a behavioural analysis. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(3):256–268, 2009.
- [PR08] Thomas D. PARSONS et 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.
- [PS90] D.R. PERROTT et K. SABERI : Minimum audible angle thresholds for sources varying in both elevation and azimuth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4):1728–1731, 1990.
- [PT88] David R. PERROTT et Juliana TUCKER : Minimum audible movement angle as a function of signal frequency and the velocity of the source. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83:1522, 1988.
- [Pul97] Ville PULKKI : Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(6):456–466, June 1997.
- [Pul01] Ville PULKKI : *Spatial sound generation and perception by amplitude panning techniques*. Thèse de doctorat, Helsinki University of Technology, 2001.
- [RA01] JA RODENAS et RM AARTS : Sweet spot widening for stereophonic sound reproduction. In *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the*, pages 191–194, New Platz, NY, USA, 21/10/2001 2001.
- [RBBM02] Giuseppe RIVA, Monica BACCHETTA, Margherita BARUFFI et Enrico MOLINARI : Virtual-reality-based multidimensional therapy for the treatment of body image disturbances in binge eating disorders : a preliminary controlled study. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 6(3):224–234, 2002.
- [Ree91] B. REEVES : Being there : Television as symbolic versus natural experience. Rapport technique, Stanford University, Institute for Communication Research, Standard, CA, 1991. Unpublished manuscript.

- [Ret03] Xavier RETAUX : Presence in the environment : theories, methodologies and applications to video games. *PsychNology Journal*, 1(3):283–309, 2003.
- [RFR08] Bernhard E. RIECKE, Daniel FEUEREISSEN et John J. RIESER : Auditory self-motion illusions ("circular vection") can be facilitated by vibrations and the potential for actual motion. *In APGV '08 : Proceedings of the 5th symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 147–154, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [RGL08] Nikunj RAGHUVANSHI, Nico GALOPPO et Ming C. LIN : Accelerated wave-based acoustics simulation. *In SPM '08 : Proceedings of the 2008 ACM symposium on Solid and physical modeling*, pages 91–102, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [RH98] Vilayanur S. RAMACHANDRAN et William HIRSTEIN : The perception of phantom limbs. the d. o. hebb lecture. *Brain*, 121(9):1603–1630, Septembre 1998.
- [RH00] Don Richard RISO et Russ HUDSON : *Understanding the Enneagram : The practical guide to personality types*. Mariner Books, 2000.
- [Rhe93] Howard RHEINGOLD : *La réalité virtuelle : quand l'illusion a toutes les apparences de la réalité*. Dunod, 1993.
- [Riv05] Giuseppe RIVA : Virtual reality in psychotherapy : Review. *CyberPsychology and Behavior*, 8(3):220–230, 2005.
- [RMC⁺07] Giuseppe RIVA, Fabrizia MANTOVANI, Claret Samantha CAPIDEVILLE, Alessandra PREZIOSA, Francesca MORGANTI, Daniela VILLANI, Andrea GAGGIOLI, Cristina BOTELLA et Mariano ALCANIZ : Affective interactions using virtual reality : The link between presence and emotions. *CyberPsychology & Behavior*, 10:45–56, 2007.
- [RMFS08] A. RHALIBI, M. MERABTI, P. FERGUS et Yuanyuan SHEN : Perceptual user interface as games controller. *In Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE*, pages 1059–1064, Jan. 2008.
- [RMG98] G.H. RECANZONE, S.D.D.R. MAKHAMRA et D.C. GUARD : Comparison of relative and absolute sound localization ability in humans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103:1085–1097, 1998.
- [RSH05] Alexander RESHETOV, Alexei SOUPIKOV et Jim HURLEY : Multi-level ray tracing algorithm. *In SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, pages 1176–1185, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [RST⁺06] Niklas RAVAJA, Timo SAARI, Marko TURPEINEN, Jari LAARNI, Mikko SALMINEN et Matias KIVIKANGAS : Spatial presence and emotions during video game playing : Does it matter with whom you play ? *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 15(4):381–392, 2006.
- [RvdH02] Bernhard E. RIECKE et Markus von der HEYDE : Qualitative modeling of spatial orientation processes using logical propositions : Interconnecting spatial presence, spatial updating, piloting, and spatial cognition. Rapport

-
- technique 100, Department Bülthoff, Max Planck Institute for Biological Cybernetics, Spemannstr. 38, 72076 Tübingen, Germany, Tübingen, Germany, Dec. 2002.
- [RVSP09] Bernhard E. RIECKE, Aleksander VÄLJAMÄE et Jörg SCHULTE-PELKUM : Moving sounds enhance the visually-induced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 6(2):1–27, 2009.
- [RXDJ07] Yang RUNDANG, Fan XIUMIN, Wu DIANLIANG et Yan JUANQI : A virtual reality-based experiment environment for engine assembly line workplace planning and ergonomics evaluation. In Randall SHUMAKER, éditeur : *ICVR 2007 - Virtual Reality - Second International Conference - Part 1*, pages 594–603. Springer, 2007.
- [SAD⁺06] Mel SLATER, Angus ANTLEY, Adam DAVISON, David SWAPP, Christoph GUGER, Chris BARKER, Nancy PISTRANG et Maria V. SANCHEZ-VIVES : A virtual reprise of the stanley milgram obedience experiments. *PLoS ONE*, 1(1):1–10, 12 2006.
- [San96] J. SANDVAD : Dynamic aspects of auditory virtual environments. *Proceedings of the 100th Audio Engineering Society Convention, preprint 4226*, 1996.
- [SB07] Philip SCHUCHARDT et Doug A. BOWMAN : The benefits of immersion for spatial understanding of complex underground cave systems. In *VRST '07 : Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 121–124, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [SBH⁺09] Frank STEINICKE, Gerd BRUDER, Klaus HINRICHS, Anthony STEED et Alexander L. GERLACH : Does a gradual transition to the virtual world increase presence ? In *VR '09 : Proceedings of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference*, pages 203–210, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [SBPT07] Christopher SEWELL, Nikolas H. BLEVINS, Sumanth PEDDAMATHAM et Hong Z. TAN : The effect of virtual haptic training on real surgical drilling proficiency. In *WHC '07 : Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 601–603, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [SBS03] Mel SLATER, Andrea BROGNI et Anthony STEED : Physiological responses to breaks in presence : A pilot study. In *Presence 2003 : The 6th Annual International Workshop on Presence*, pages 1–4, Aalborg, Denmark, 2003.
- [SC02] Thomas SCHUBERT et Jan CRUSIUS : Five theses on the book problem : Presence in books, film and vr. In *Proceedings of the Fifth Annual International Workshop on Presence*, pages 53–58, Porto, Portugal, 2002.
- [Sch09] Thomas W. SCHUBERT : A new conception of spatial presence : Once again, with feeling. *Communication Theory*, 19(2):161–187, May 09.

- [SCMW08] Sarah SHARPLES, Sue COBB, Amanda MOODY et John R. WILSON : Virtual reality induced symptoms and effects (vrise) : Comparison of head mounted display (hmd), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2):58 – 69, 2008. Health and Safety Aspects of Visual Displays.
- [SFR99a] Thomas. SCHUBERT, Franck. FRIEDMANN et Holger REGENBRECHT : Embodied presence in virtual environments. *Visual representations and interpretations*, pages 268–278, 1999.
- [SFR99b] TW SCHUBERT, F. FRIEDMANN et HT REGENBRECHT : Decomposing the sense of presence : Factor analytic insights. *In Proceedings of the 2nd Annual International Workshop on Presence*, pages 6–7, 1999.
- [SFR01] Thomas SCHUBERT, Frank FRIEDMANN et Holger REGENBRECHT : The experience of presence : Factor analytic insights. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 10(3):266–281, 2001.
- [SG07a] Torben SCHOU et Henry J. GARDNER : A wii remote, a game engine, five sensor bars and a virtual reality theatre. *In OZCHI '07 : Proceedings of the 19th Australasian conference on Computer-Human Interaction*, pages 231–234, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [SG07b] Mel SLATER et Maia GARAU : The use of questionnaire data in presence studies : Do not seriously likert. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 16(4):447–456, 2007.
- [She06] C.S. SHERRINGTON : *The integrative action of the nervous system*. Scribner, 1906.
- [She92] Thomas B. SHERIDAN : Musings on telepresence and virtual presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environment*, 1(1):120–126, 1992.
- [She99] Thomas B. SHERIDAN : Descartes, heidegger, gibson, and god : Toward an eclectic ontology of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):551–559, 1999.
- [SHH⁺03] Nobuyuki SHIBANO, P. V. HAREESH, Hiroshi HOSHINO, Ryo KAWAMURA, Atsuyuki YAMAMOTO, Masanori KAHIWAGI et Kazuya SAWADA : Cyberdome : Pc clustered hemi spherical immersive projection display. *In Proceeding of the 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, ICAT'03*, Tokyo, Japon, 2003.
- [SJ93] B. SCHMULDT et R. JEBENS : Application areas for a force-feedback joystick. *In Advances in Robotics, Mechatronics and Haptic Interfaces*, pages 47–54. American Society of Mechanical Engineers, 1993.
- [SJB07] Tarja SUSI, Mikael JOHANNESSON et Per BACKLUND : Serious games – an overview. Rapport technique HS- IKI -TR-07-001, School of Humanities and Informatics, University of Skövde, Skövde, Sweden, 2007.
- [SKC⁺06] Sidi O. SOUEINA, Jocelyne KISS, Pascal CHAUDEYRAC, Patrice BOUVIER, Ahmed H. SALEM et Adel S. ELMAGHRABY : Towards a multimodal framework for human behavior recognition. *In WI-IATW '06 : Proceedings of the 2006 IEEE/WIC/ACM international conference on Web Intelligence*

-
- and Intelligent Agent Technology*, pages 27–31, Hong Kong, 2006. IEEE Computer Society.
- [SKMY09] Mel SLATER, Pankaj KHANNA, Jesper MORTENSEN et Insu YU : Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 29(3):76–84, 2009.
- [SKS00] L. SHAMS, Y. KAMITANI et S. SHIMOJO : Illusions. what you see is what you hear. *Nature*, 408(6814), Decembre 2000.
- [Sla99] Mel SLATER : Measuring presence : A response to the witmer and singer presence questionnaire. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 8(5):560–565, 1999.
- [Sla03] Mel SLATER : A note on presence terminology. *Presence-Connect, En-ligne*, 3, Janvier 2003.
- [Sla04] Mel SLATER : How colorful was your day? why questionnaires cannot assess presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4):484–493, 2004.
- [SLU+96] Mel SLATER, Vasilis LINAKIS, Martin USOH, Rob KOOPER et Gower STREET : Immersion, presence, and performance in virtual environments : An experiment with tri-dimensional chess. In *ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, pages 163–172, 1996.
- [SMW93] B.E. STEIN, M.A. MEREDITH et S. WOLF : *The merging of the senses*. MIT Press Cambridge, MA, 1993.
- [Sno98] Michael Potter SNOW : *Charting presence in virtual environments and its effects on performance*. Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA, USA, 1998.
- [SO03] Corina SAS et Gregory M. P. O’HARE : Presence equation : an investigation into cognitive factors underlying presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5):523–537, 2003.
- [Son03] SONY : Eyetoy. Site internet, 2003. <http://www.eyetoy.com>.
- [SP07] Sudip K. SARKER et Barbara PATEL : Simulation and surgical training. *International Journal of Clinical Practice*, 61(12):2120–2125, Octobre 2007.
- [SPMESV08] Mel SLATER, Daniel PEREZ-MARCOS, Henrik EHRSSON et Maria V. SANCHEZ-VIVES : Towards a digital body : the virtual arm illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 2008.
- [SPS99] Mel SLATER, David-Paul PERTAUB et Anthony STEED : Public speaking in virtual reality : facing an audience of avatars. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 19(2):6–9, Mar/Apr 1999.
- [SRLT05] Timo SAARI, Niklas RAVAJA, Jari LAARNI et Marko TURPEINEN : Towards emotionally adapted games based on user controlled emotion knobs. In de CASTELL SUZANNE et Jenson JENNIFER, éditeurs : *Digital Games Research Conference 2005, Changing Views : Worlds in Play*, page 9, Vancouver, Canada, Juin 2005. University of Vancouver.

- [SS00] Mel SLATER et Anthony STEED : A virtual presence counter. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):413–434, 2000.
- [SSKM01] M.J. SCHUEMIE, P. van der STRAATEN, M. KRIJN et C.A. van der MAST : Research on presence in virtual reality : a survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):183–201, 2001.
- [SSL97] R. SEKULER, A.B. SEKULER et R. LAU : Sound alters visual motion perception. *Nature*, 385(6614), janvier 1997.
- [SSMM98] Mel SLATER, Anthony STEED, John MCCARTHY et Francesco MARINGELLI : The influence of body movement on subjective presence in virtual environments. *Human Factors*, 40(3):469–477, 1998.
- [ST07] Paul SKALSKI et Ron TAMBORINI : The role of social presence in interactive agent-based persuasion. *Media Psychology*, 10(3):385–413, Septembre 2007.
- [Ste92] Jonathan STEUER : Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4):73–93, 1992.
- [Str07] John W. STRUTT : On our perception of sound direction. *Philosophical Magazine*, 13:214–232, 1907.
- [STU07] M. SCHWAIGER, T. THUMMEL et H. ULBRICH : Cyberwalk : An advanced prototype of a belt array platform. *Haptic, Audio and Visual Environments and Games, 2007. HAVE 2007. IEEE International Workshop on*, pages 50–55, 2007.
- [Stu09] Bohemia Interactive STUDIO : arma2. Site internet, 2009. <http://www.arma2.com/>.
- [SU93] Mel SLATER et Martin USOH : Presence in immersive virtual environments. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*, pages 90–96, Sep 1993.
- [SU94] Mel SLATER et Martin USOH : Body centred interaction in immersive virtual environments. *Artificial life and virtual reality*, pages 125–147, 1994.
- [SUS94] Mel SLATER, Martin USOH et Anthony STEED : Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 3:130–144", 1994.
- [Sut65] I.E. SUTHERLAND : The ultimate display. In *Proceedings of the IFIP Congress*, volume 2, pages 506–508, 1965.
- [SVS05] Maria V. SANCHEZ-VIVES et Mel SLATER : From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4):332–339, 2005.
- [SW97] Mel SLATER et Sylvia WILBUR : A framework for immersive virtual environments (five) : Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6):603–616, 1997.
- [SWB08] Ajith SOWNRARAJAN, Rongrong WANG et Doug A. BOWMAN : Quantifying the benefits of immersion for procedural training. In *IPT/EDT*

-
- '08 : *Proceedings of the 2008 workshop on Immersive projection technologies/Emerging display technologies*, pages 1–4, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [SWM⁺08] William STEPTOE, Robin WOLFF, Alessio MURGIA, Estefania GUIMARAES, John RAE, Paul SHARKEY, David ROBERTS et Anthony STEED : Eye-tracking for avatar eye-gaze and interactional analysis in immersive collaborative virtual environments. *In CSCW '08 : Proceedings of the ACM 2008 conference on Computer supported cooperative work*, pages 197–200, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [TAI07] Lambooi Marc T.M., IJsselsteijn Wijnand A. et Heynderickx INGRID. : Visual discomfort in stereoscopic displays : a review. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIV*, 6490(1):1–13, 2007.
- [TBI09] Tim TIJS, Dirk BROKKEN et Wijnand IJSSELSTEIJN : Creating an emotionally adaptive game. *In ICEC '08 : Proceedings of the 7th International Conference on Entertainment Computing*, pages 122–133, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.
- [TCR⁺09] Micah TAYLOR, Anish CHANDAK, Zhimin REN, Christian LAUTERBACH et Dinesh MANOCHA : Fast edge-diffraction for sound propagation in complex virtual environments. *In EAA Symposium on Auralization*, pages 1–6, Otaniemi, Finland, juin 2009.
- [TDL07] Nicolas TSINGOS, Carsten DACHSBACHER, Sylvain LEFEBVRE et Matteo DELLEPIANE : Instant sound scattering. *In Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering*, 2007.
- [TFNC01] Nicolas TSINGOS, Thomas FUNKHOUSER, Addy NGAN et Ingrid CARLBOM : Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction. *In SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 545–552, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [TGD04] Nicolas TSINGOS, Emmanuel GALLO et George DRETTAKIS : Perceptual audio rendering of complex virtual environments. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):249–258, 2004.
- [TGL09] Carol A. THORNSON, Brian F. GOLDIEZ et Huy LE : Predicting presence : Constructing the tendency toward presence inventory. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 67(1):62–78, 2009.
- [TGSP06] Desney S. TAN, Darren GERGLE, Peter SCUPELLI et Randy PAUSCH : Physically large displays improve performance on spatial tasks. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 13(1):71–99, 2006.
- [TH92] Tapio TAKALA et James HAHN : Sound rendering. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2):211–220, 1992.
- [Tis01] Jacques TISSEAU : *Realité virtuelle—autonomie in virtuo*. Thèse de doctorat, Université de Rennes, 2001. Habilitation à Diriger des Recherches.

- [TKB⁺07] Robyn TAYLOR, Maryia KAZAKEVICH, Pierre BOULANGER, Manuel GARCIA et Walter F. BISCHOF : Multi-modal interface for fluid dynamics simulations using 3—d localized sound. *In SG '07 : Proceedings of the 8th international symposium on Smart Graphics*, pages 182–187, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [TLHW09] Leo TERZIMAN, Anatole LECUYER, Sebastien HILLAIRE et Jan M. WIENER : Can camera motions improve the perception of traveled distance in virtual environments? *In VR '09 : Proceedings of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference*, pages 131–134, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [TN02] T. TAKEUCHI et P.A. NELSON : Optimal source distribution for binaural synthesis over loudspeakers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112:2786–2797, 2002.
- [TN08] T. TAKEUCHI et P. A. NELSON : Extension of the optimal source distribution for binaural sound reproduction. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(6):981–987, 2008.
- [Tsi98] Nicolas TSINGOS : *Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, décembre 1998.
- [TTC⁺03] S. TURNER, P. TURNER, F. CARROLL, S. O'NEILL, D. BENYON, R. MCCALL et M. SMYTH : Re-creating the Botanic : towards a sense of place in virtual environments. *In 3rd UK Environmental Psychology Conference*, pages 1–10, Aberdeen, UK, 2003.
- [UAW⁺99] Martin USOH, Kevin ARTHUR, Mary C. WHITTON, Rui BASTOS, Anthony STEED, Mel SLATER et Frederick P. Jr. BROOKS : Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. *In SIGGRAPH '99 : Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 359–364, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [UCAS00] Martin USOH, Ernest CATENA, Sima ARMAN et Mel SLATER : Using presence questionnaires in reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):497–503, 2000.
- [vdDKP04] Kees van den DOEL, Dave KNOTT et Dinesh K. PAI : Interactive simulation of complex audio-visual scenes. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 13(1):99–111, 2004.
- [VDLS02] Andries VAN DAM, David H. LAIDLAW et Rosemary Michelle SIMPSON : Experiments in immersive virtual reality for scientific visualization. *Computers and Graphics*, 26(4):535–555, August 2002.
- [VDZB⁺08] Isabelle VIAUD-DELMON, Feryel ZNAÏDI, Nicolas BONNEEL, Clara SUIED, Olivier WARUSFEL, Khoa-Van N'GUYEN et George DRETTAKIS : Auditory-visual virtual environments to treat dog phobia. *In Proceedings 7th ICD-VRAT with ArtAbilitation*, Maia, Portugal, Septembre 2008.

-
- [VGS⁺06a] Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Marco GILLIES, Anthony STEED, Emmanuel TANGUY, Xueni PAN, Céline LOSCOS et Mel SLATER : Building expression into virtual characters. *In State of the Art Report, Proceedings of the Eurographics conference*, September 2006.
- [VGS⁺06b] Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Marco GILLIES, Anthony STEED, Emmanuel TANGUY, Xueni PAN, Céline LOSCOS et Mel SLATER : Building expression into virtual characters. *In State of the Art Report, Proceedings of the Eurographics conference*, September 2006.
- [Vis09] Yon VISELL : Tactile sensory substitution : Models for enaction in HCI. *Interact. Comput.*, 21(1-2):38–53, 2009.
- [VLVK05] A. VALJAMAE, P. LARSSON, D. VASTFJALL et M. KLEINER : Travelling without moving : Auditory scene cues for translational self-motion. *In Eoin BRAZIL, éditeur : Proceedings of the 11th International Conference on Auditory Display (ICAD2005)*, pages 9–16, Limerick, Ireland, 2005. Department of Computer Science and Information Systems, University of Limerick, Department of Computer Science and Information Systems, University of Limerick.
- [Vor08] Michael VORLANDER : *Auralization : Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Springer Verlag, 2008.
- [VRA] Virtual Reality Applications Center of Iowa State University VRAC : C6. Site internet. <http://www.vrac.iastate.edu/c6.php>.
- [VRR07] D. VILLANI, F. RIVA et G. RIVA : New technologies for relaxation : the role of presence. *International Journal of Stress Management*, 14(3):260–274, 2007.
- [VSS08] Vinoba VINAYAGAMOORTHY, Anthony STEED et Mel SLATER : The impact of a character posture model on the communication of affect in an immersive virtual environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(5):965–982, 2008.
- [VTJL⁺08] A. VALJAMAE, A. TAJADURA-JIMENEZ, P. LARSSON, D. VASTFJALL et M. KLEINER : Binaural bone-conducted sound in virtual environments : Evaluation of a portable, multimodal motion simulator prototype. *Acoustical Science and Technology*, 29(2):149–155, 2008.
- [VTR92] Francisco J. VARELA, Evan T. THOMPSON et Eleanor ROSCH : *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. The MIT Press, November 1992.
- [WBL⁺96] Robert B. WELCH, Theodore T. BLACKMON, Andrew LIU, Barbara A. MEL-
LERS et Laurence W. STARK : The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):263–273, 1996.

- [WBS07] Ingo WALD, Solomon BOULOS et Peter SHIRLEY : Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. *ACM Trans. Graph.*, 26(1):6, 2007.
- [Wel99] Robert B. WELCH : How can we determine if the sense of presence affects task performance? *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):574–577, 1999.
- [WHB⁺07] W. WIRTH, T. HARTMANN, S. BOCKING, P. VORDERER, C. KLIMMT, H. SCHRAMM, T. SAARI, J. LAARNI, N. RAVAJA, F.R. GOUVEIA *et al.* : A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media Psychology*, 9(3):493–525, 2007.
- [WJK⁺03] Brenda K. WIEDERHOLD, Dong P. JANG, Mayumi KANEDA, Irene CABRAL, Yair LURIE, Todd MAY, In Y. KIM, Mark D. WIEDERHOLD et Sun I. KIM : An investigation into physiological responses in virtual environments : an objective measurement of presence. In Giuseppe RIVA et Carlo (Eds.) GALIMBERTI, éditeurs : *Towards cyberpsychology : Mind, cognition, and society in the internet age*, chapitre 10, pages 175–184. Amsterdam : IOS Press, 2003.
- [WK97] F.L. WIGHTMAN et D.J. KISTLER : Monaural sound localization revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101:1050–1063, 1997.
- [WS98] Bob G. WITMER et Michael J. SINGER : Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240, 1998.
- [WSBW01] Ingo WALD, Philipp SLUSALLEK, Carsten BENTHIN et Markus WAGNER : Interactive rendering with coherent ray tracing. In *Computer Graphics Forum, Proceedings of EUROGRAPHICS 2001*, volume 20, pages 153–164, 2001.
- [WW03] J.A. WATERWORTH et E.L. WATERWORTH : The meaning of presence. *Presence-Connect, En ligne* 3, 3, 2003.
- [WW07] Mark D. WIEDERHOLD et Brenda K. WIEDERHOLD : Virtual reality and interactive simulation for pain distraction. *Pain Medicine*, 8(s3 Computer and Information Technology in the Assessment and Management of Patients with Pain):182–188, 2007.
- [YKN⁺04] Yasuyuki YANAGIDA, Shinjiro KAWATO, Haruo NOMA, Akira TOMONO et Nobuji TETSUTANI : Projection-based olfactory display with nose tracking. In *VR '04 : Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2004*, pages 43–50, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [YKT⁺06] Wang Y., Otitoju K., Liu T., Kim S. et Bowman D. : Evaluating the effect of real world distraction on user performance in virtual environments. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 19–26. ACM, 2006.
- [You07] Eric D. YOUNG : Physiological acoustics. In Thomas D. ROSSING, éditeur : *Springer Handbook of Acoustics*, chapitre 12, pages 429–457. Springer, 2007.

-
- [ZBS⁺06] P. ZAHORIK, P. BANGAYAN, V. SUNDARESWARAN, K. WANG et C. TAM : Perceptual recalibration in human sound localization : Learning to remediate front-back reversals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120:343–359, 2006.
- [Zel92] David ZELTZER : Autonomy, interaction, and presence. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):127–132, 1992.
- [ZHDD03] D.Y.N. ZOTKIN, J. HWANG, R. DURAISWAINI et L.S. DAVIS : Hrtf personalization using anthropometric measurements. In *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2003 IEEE Workshop on.*, pages 157–160, Oct. 2003.
- [Zim08] Peter ZIMMERMANN : Virtual reality aided design : A survey of the use of vr in automotive industry. In Doru TALABA et Angelos AMDITIS, éditeurs : *Product Engineering, Tools and Methods Based on Virtual Reality*, chapitre 3, pages 277–296. Springer, 2008.
- [ZJ98] Pavel ZAHORIK et Rick L. JENISON : Presence as being-in-the-world. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(1):78–89, 1998.
- [ZS04] Massimiliano ZAMPINI et Charles SPENCE : The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *Journal of Sensory Studies*, 19(5):347–363, 2004.

Annexe A

Notre chaîne de rendu sonore - Exemple de fichier XAC

La norme de description XAC permet de décrire un monde sonore. Son formalisme est inspiré de celui de COLLADA. Le fichier XAC est analysé puis interprété pour créer l'environnement sonore.

Test de l'occlusion

Ce XML modélise une source ambiante, une source sonore fixe ainsi qu'un obstacle. L'obstacle se trouve entre la source sonore et l'obstacle. Ainsi ce fichier permet de tester l'occlusion.

Tout d'abord voici une illustration de la scène.

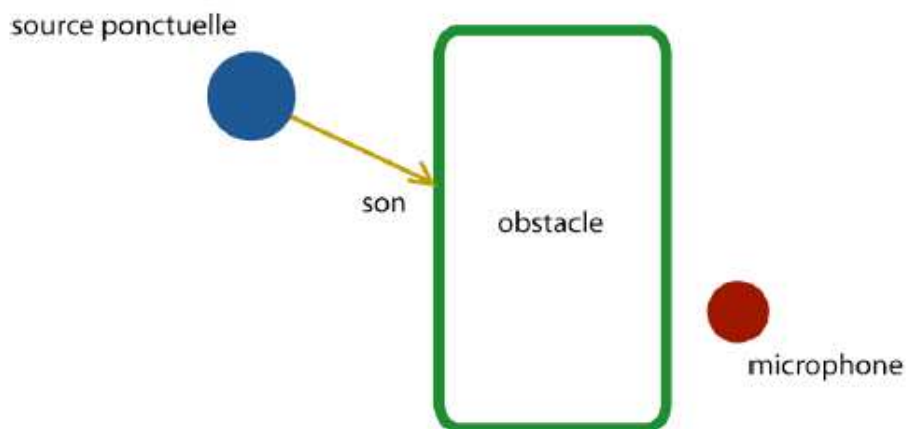


FIGURE 22 illustration du XAC

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<audiocity>
  <meta>
    <author> Regis Damon Nadine Dommanget Sophie Lequertier Jules Bertrand William
    Simkovitch Charlotte Bauer </author>
    <version> 0.1 </version>
    <date> lundi 13 mai 2009 </date>
    <comments>
      occlusion
      Elements de la scene :
      - une source ambiante
      - une source ponctuelle fixe
      - un obstacle
    </comments>
  </meta>
  <librarySetting>
    <comments>
      On definit le nombre de reverberations que l on autorise (plus celui-ci est eleve
      plus les calculs seront complexes et le realisme grand.
    </comments>
    <reverberation maxNumber="1" />
    <comments>
      L echelle de temps est a 1 : soit une seconde de l application correspond a une
      seconde réelle. 2 indiquerait que le temps s ecouait deux fois moins vite.
    </comments>
    <time scale="1.0" />
  </librarySetting>
  <librarySound>
```

```

<comments> Source ambiante ville </comments>
<sound id="SoundAmbianceVille" file="input/WAVE/ambiance_ville.wav"
loop="true" interval="0" />

<comments> Source ponctuelle bird </comments>
<sound id="SoundBird" file="input/WAVE/bird.wav"
loop="true" interval="0" />

</librarySound>

<libraryMaterial>

  <comments> MATERIAL PAS UTILISE ICI </comments>

  <comments> Definition du materiau pour le revêtement en brique : </comments>
  <material id="MaterialMurBrique">
    <comments> Definition des attributs de reflexion de la brique : </comments>
    <reflexion enable="true" >
      <point frequency="1000" amplitude="96" />
    </reflexion>
    <comments> Definition des attributs d attenuation de la brique : </comments>
    <extenuation enable="true" >
      <point frequency="1000" amplitude="4" />
    </extenuation>
    <comments> Definition de la celerite du son dans le materiau en metres par
seconde : </comments>
    <velocity value="1250" />
  </material>

</libraryMaterial>

<libraryBehavior>

  <comments> PATH PAS UTILISE ICI </comments>

  <comments>
    <path id="PathSourceBird" loop="true" interval="0" position="absolute" >

      <comments> Trajet bird </comments>
      <point time="0" >
        <position x="2" y="-2" z="-2" />
      </point>

      <point time="20" >
        <position x="2" y="-2" z="2" />
      </point>

      <point time="40" >
        <position x="-2" y="-2" z="2" />
      </point>

      <point time="60" >
        <position x="-2" y="-2" z="-2" />
      </point>
    </path>
  </comments>

  <comments> ENVELOPE PAS UTILISE ICI </comments>
  <comments>
    <enveloppe id="EnveloppeVilleAmbient" loop="true" interval="0" >
    <comments> Au depart le volume du son ambiant est celui d origine.
  </comments>
    <point time="0">
      <amplitude value="0"/>
    </point>
  </comments>

```



```

        <comments> Il est atténue de -30dB au bout de trente secondes. </comments>
        <point time="30">
            <amplitude value="-30"/>
        </point>
        <comments>
            Il revient a la normale a la fin (pour qu'il n'y ait pas de saut de niveau au
moment ou le son recommence, au bout de une minute)
        </comments>
        <point time="60">
            <amplitude value="0"/>
        </point>
    </enveloppe>
</comments>

</libraryBehavior>

<comments> Gestion des objets et de la scene. </comments>

<scene>

    <comments> SOURCE AMBIANTE VILLE. </comments>

    <ambientSource id="Source_ambiance_ville">
        <sound volume="50" id="SoundAmbianceVille" start="0"/>
        <enveloppe id="EnveloppeVilleAmbient" start="0"/>
    </ambientSource>

    <comments> SOURCE PONCTUELLE BIRD. </comments>

    <punctualSource id="Source_ponctuelle_bird">
        <sound volume="80" id="SoundBird" start="0" priority="0"/>
        <position x="1" y=".4" z="0" maxRange="0" />
        <comments> On attache un mouvement a cette source en specifiant l'id.
</comments>
        <comments><path id="PathSourceBird" start="0"/></comments>
    </punctualSource>

    <comments> OBSTACLE IMMEUBLE </comments>
    <obstacle id="ImmeubleBrique" density="0">
        <comments> On rattache le materiau verre. </comments>
        <material id="MaterialMurBrique" />
        <comments> On positionne son centre. </comments>
        <position x="1" y=".1" z="0" />
        <comments> On lui donne une taille. </comments>
        <size width="4" height="5" depth="2" />
    </obstacle>

    <comments> MICRO </comments>
    <microphone>
        <comments> La position d'origine du personnage est quasiment au bout de la rue
principale. </comments>
        <position x="0" y="0" z="0" />
        <comments> Le personnage regarde en direction de z. </comments>
        <direction x="0" y="0" z="0" />
        <comments> Le mouvement commence apres dix secondes. </comments>
        <comments><path id="PathMicro" start="10" /></comments>
    </microphone>
</scene>

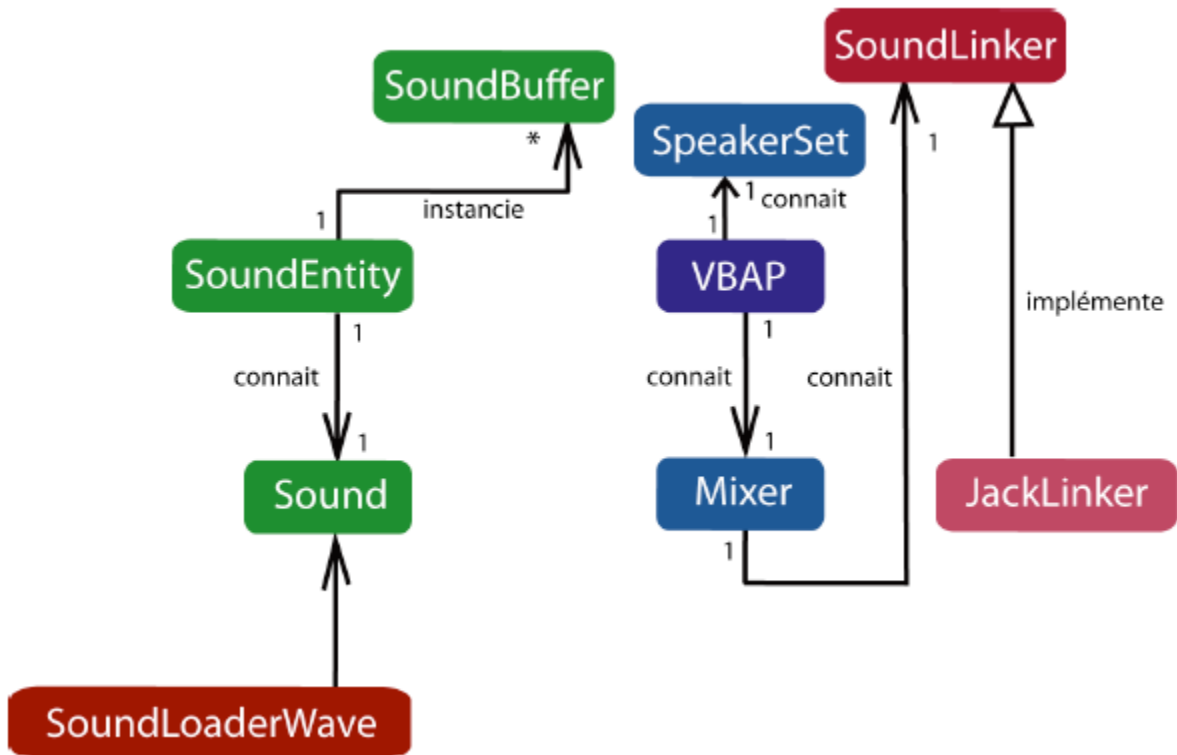
</audiocity>

```

Annexe B

Notre chaîne de rendu sonore - Architecture logicielle simplifiée

La figure suivante présente une version simplifiée de l'architecture logicielle de notre chaîne de rendu sonore. Le module de spatialisation sonore a été intégré à la bibliothèque de développement OpenKraken créée par notre équipe de recherche.



Annexe C

Le questionnaire communiqué aux participants de la phase d'évaluation

Information générales

Age : _____ **Sexe :** homme femme

Niveau d'étude : _____

Avez-vous déjà testé notre jeu ?

Oui Non

Si oui, vous avez joué sur :

L'écran autostéréoscopique

L'écran polarisé (avec lunettes)

Un ordinateur classique

Avez-vous déjà eu des expériences en réalité virtuelle ?

Oui Non

Avez-vous déjà eu des expériences de vision stéréoscopique ?

Oui Non

A quelle fréquence jouez vous aux jeux vidéo ?

Tous les jours Plusieurs fois/semaine Plusieurs fois/mois Moins

Aimez-vous la science-fiction (films, livre etc...) ?

Oui Non

Considérez-vous l'outil informatique comme familier ?

Très familier Moyennement familier Pas du tout familier

Questionnaire

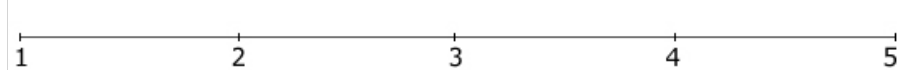
Voici plusieurs propositions qui peuvent s'appliquer à l'expérience que vous venez d'avoir. Indiquez, s'il vous plait, si chacune de ces propositions s'applique ou non à votre expérience. Vous pouvez utiliser n'importe quelle graduation. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse, seule votre opinion est importante. Il ne s'agit pas ici de d'évaluer la qualité du jeu (travail des étudiants) mais bien l'expérience que vous venez de vivre. Vous remarquerez que certaines questions se ressemblent. Ceci est nécessaire pour des raisons statistiques. Rappelez-vous que vous devez répondre à ces questions en vous référant seulement à l'expérience que vous venez juste d'avoir. Ce questionnaire n'est pas nominatif.

Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

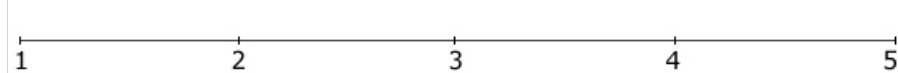
Sauf si une version différente est précisée dans la question, l'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

- 1 : pas du tout d'accord
- 2 : pas d'accord
- 3 : ni d'accord ni pas d'accord
- 4 : d'accord
- 5 : tout à fait d'accord

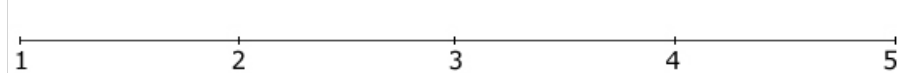
1. L'impression de profondeur m'a tout de suite sauté aux yeux



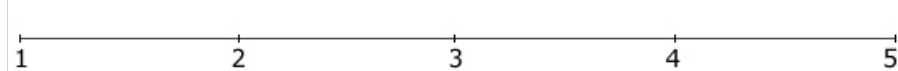
2. J'ai pris le jeu en main très facilement.



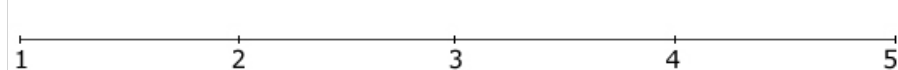
3. J'ai trouvé cette expérience virtuelle très réaliste.



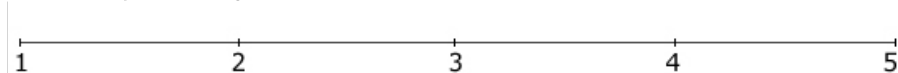
4. Vous avez joué pendant 5 minutes, l'expérience vous a-t-elle semblé durer :
(1 : beaucoup plus longtemps → 5 : beaucoup moins longtemps)



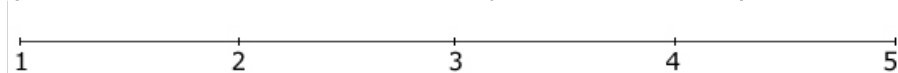
5. J'étais conscient du monde réel environnant alors que j'étais en train de jouer (par exemple : bruits, température de la pièce, présence d'autres gens, etc.).



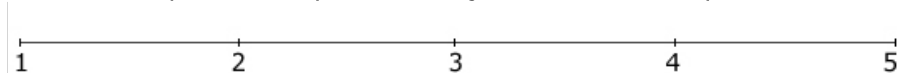
6. Mon plaisir à jouer a très vite diminué.



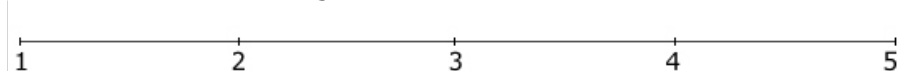
7. Comment le monde virtuel vous a-t-il semblé?
(1 : Pas du tout crédible → 5 : Complètement crédible)



8. J'ai accepté de me prendre au jeu avec beaucoup de facilité.



9. Les émotions que j'ai ressenties étaient quasiment aussi fortes que si la situation était issue de mon imagination.

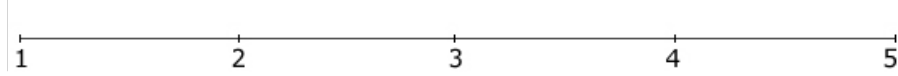


Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

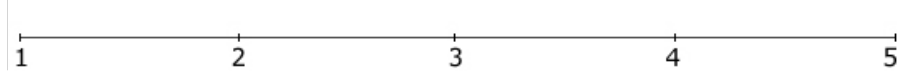
L'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

1 : pas du tout d'accord 2 : pas d'accord 3 : ni d'accord ni pas d'accord
4 : d'accord 5 : tout à fait d'accord

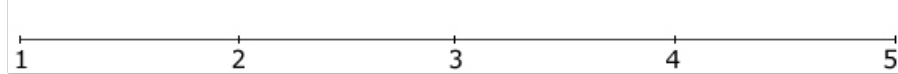
10. J'avais l'impression que je pouvais interagir avec l'environnement virtuel.



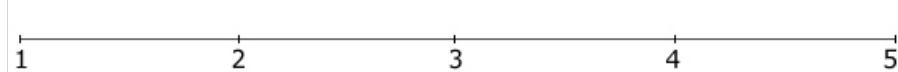
11. Au cours de l'expérience, dans quelle mesure avez-vous eu le sentiment de piloter un robot ? (1 : à aucun moment → 5 : presque tout le temps)



12. Bien que je savais que la situation était virtuelle je me suis surpris au cours de l'expérience à être stressé.

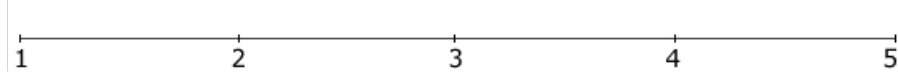


13. Je ressors déçu de mon expérience.

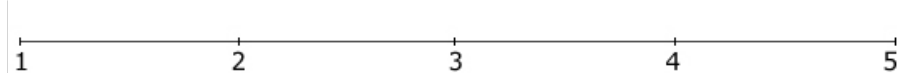


14. Quand vous repensez à l'expérience, est-ce que vous repensez à la planète plus comme des images que vous avez vues ou plus comme un endroit que vous avez visité ?

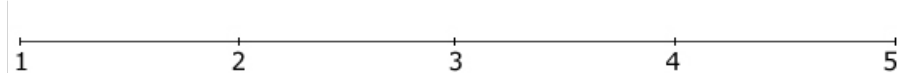
La planète semblait être plus... (1: des images que j'ai vu → 5: un endroit que j'ai visité)



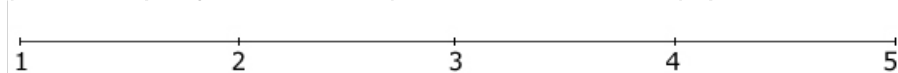
15. J'avais l'impression de participer aux évènements dans le monde virtuel.



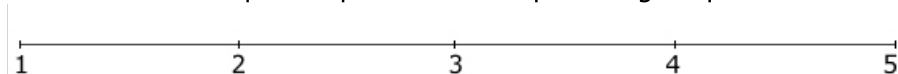
16. Je pouvais localiser avec précision les autres robots.



17. Il y a des moments au cours de l'expérience où le monde virtuel était la réalité pour moi (1 : jamais → 5 : quasiment tout le temps)



18. J'aurai voulu que l'expérience dure plus longtemps.

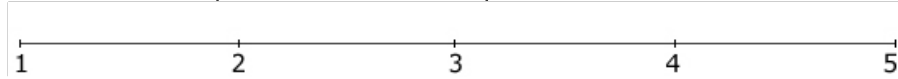


Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

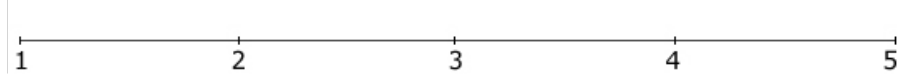
L'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

1 : pas du tout d'accord 2 : pas d'accord 3 : ni d'accord ni pas d'accord
4 : d'accord 5 : tout à fait d'accord

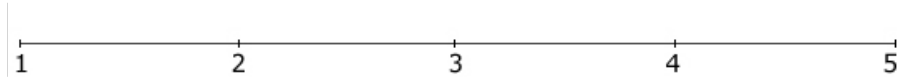
19. J'ai trouvé que mes tirs étaient précis.



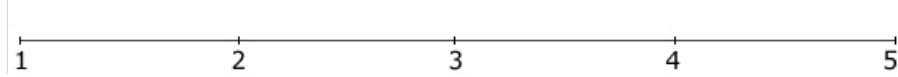
20. Ma réponse émotionnelle était la même que si la situation avait été réelle.



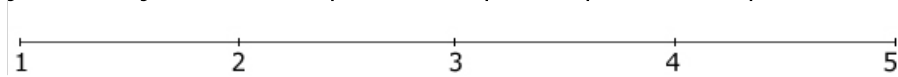
21. J'ai trouvé visuellement très crédible le monde affiché.



22. Mon attention se portait plus sur le monde virtuel que sur mes pensées (préoccupations personnelles, rêveries...).

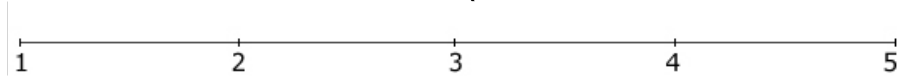


23. Si je me remémore mes sensations juste avant l'interruption de l'expérience, j'étais toujours aussi impressionné par l'impression de profondeur

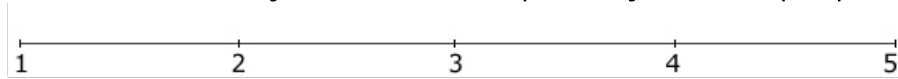


24. Au cours de l'expérience, quel sentiment était le plus fort, votre sentiment d'être dans un laboratoire de réalité virtuelle ou d'être sur la planète ?

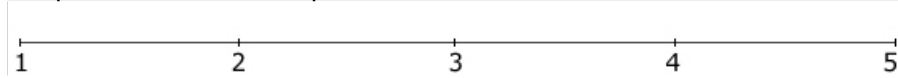
J'avais un fort sentiment d'être... (1 : dans le laboratoire → 5 : sur la planète)



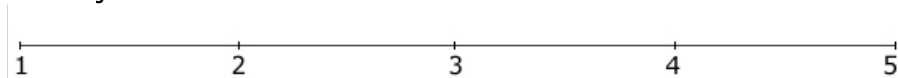
25. Si dans le futur j'atterris sur cette planète je ne serai pas perdu.



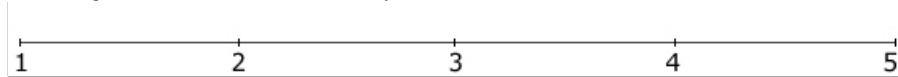
26. Bien que je savais que la situation était virtuelle je me suis surpris au cours de l'expérience à me comporter comme si cela avait été réel.



27. Le jeu en lui-même me semblait réaliste.



28. Je jeu en lui-même m'a plu.

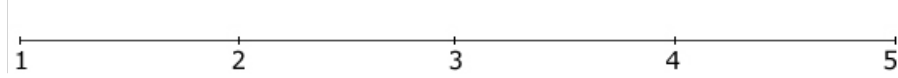


Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

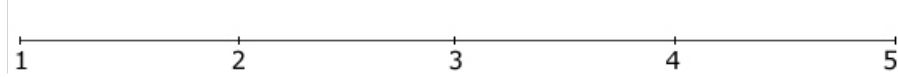
L'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

1 : pas du tout d'accord 2 : pas d'accord 3 : ni d'accord ni pas d'accord
4 : d'accord 5 : tout à fait d'accord

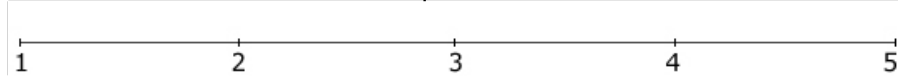
39. Je pouvais localiser rapidement les autres robots.



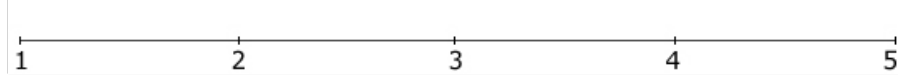
40. D'une certaine façon, j'ai eu l'impression que le monde virtuel me faisait face.



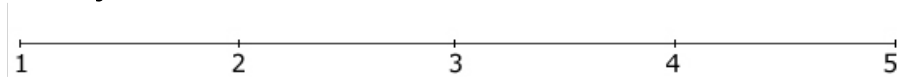
41. Au cours de l'expérience, est-ce que vous vous êtes souvent dit que vous étiez dans un laboratoire ou est-ce que l'environnement virtuel vous a submergé ?



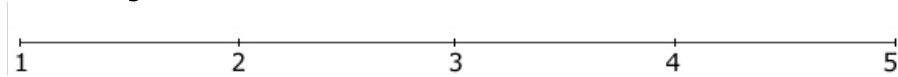
42. J'avais l'impression que les autres robots avaient conscience de ma présence.



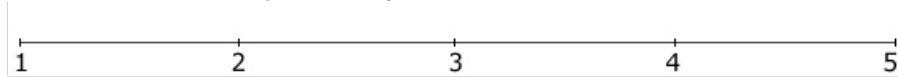
43. Le jeu en lui-même me semblait crédible.



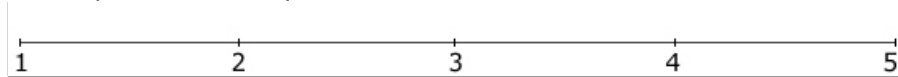
44. Je me suis comporté dans l'environnement comme si la situation était issue de mon imagination.



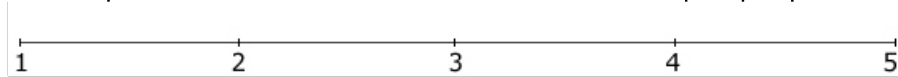
45. A l'issue de l'expérience j'avais mal à la tête.



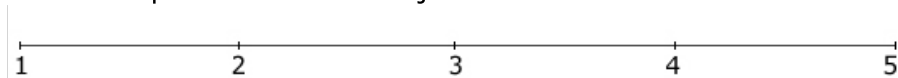
46. Je pouvais me repérer facilement dans l'environnement.



47. Estimez votre sentiment d'exister dans ce monde virtuel sur une échelle de 1 à 5 où 5 représente votre sensation habituelle d'être quelque part.



48. Mes déplacements dans le jeu étaient très faciles.

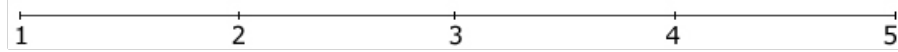


Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

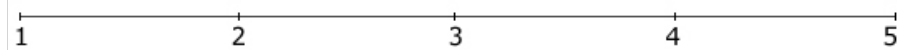
L'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

1 : pas du tout d'accord 2 : pas d'accord 3 : ni d'accord ni pas d'accord
4 : d'accord 5 : tout à fait d'accord

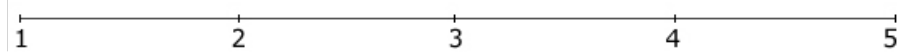
49. Les émotions que j'ai ressenties étaient quasiment aussi fortes que si la situation était réelle.



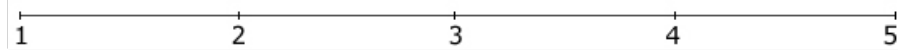
50. Je distinguais bien mes ennemis.



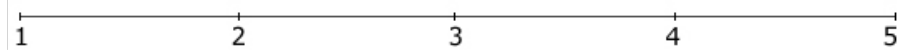
51. J'ai trouvé cette expérience virtuelle très crédible.



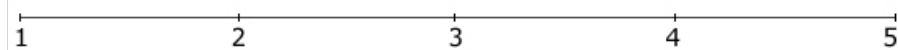
52. A l'issue de l'expérience j'avais une sensation de vertige.



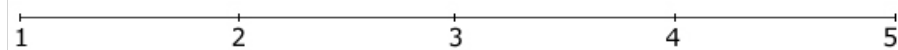
53. J'ai eu beaucoup de plaisir à jouer.



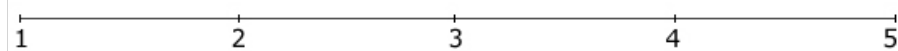
54. J'ai eu l'impression que la température réelle avait changé pour correspondre à celle de la planète.



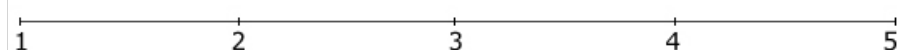
55. Au cours de l'expérience je me rappelais que j'étais en réalité dans un laboratoire. (1 : la plupart du temps → 5 : rarement)



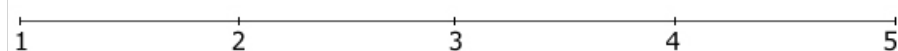
56. J'ai eu la sensation d'agir dans l'espace virtuel plutôt que d'agir sur un quelconque mécanisme à l'extérieur de celui-ci.



57. Je me suis souvent senti seul.



58. Ma réponse émotionnelle était la même que si les événements étaient le fruit de mon imagination.

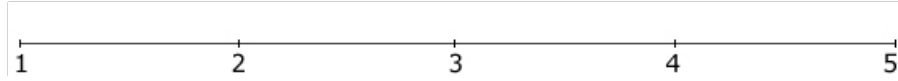


Projet Tuteuré StéréoRV
IMAC 2010

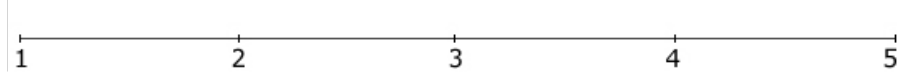
L'échelle d'évaluation est la suivante (faire une croix au dessus du chiffre choisi):

1 : pas du tout d'accord 2 : pas d'accord 3 : ni d'accord ni pas d'accord
4 : d'accord 5 : tout à fait d'accord

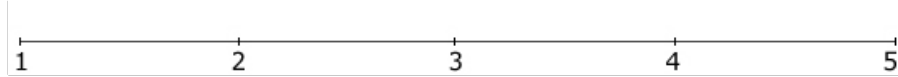
59. J'ai trouvé visuellement très réaliste le monde affiché.



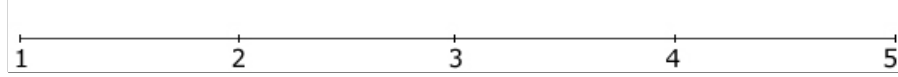
60. Durant le jeu j'ai eu l'impression que la température ambiante était montée.



61. A l'issue de l'expérience je me sentais fatigué.

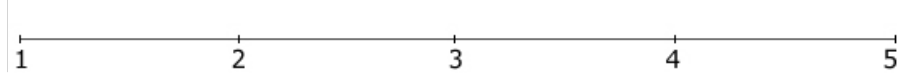


62. A l'issue de l'expérience je me sentais nauséux.

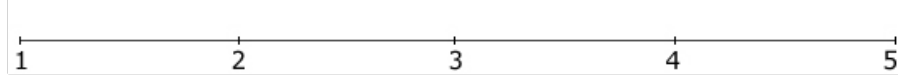


63. A quel point le monde virtuel vous a-t-il semblé réel ?

(1 : A peu près aussi réel qu'un monde imaginé → 5 : indistinguable du monde réel)



64. Je me suis tout le temps pris au jeu (1 : à aucun moment, 5 : presque tout le temps)



Annexe D

Phase d'évaluation. La table de correspondance entre les questions et les variables dépendantes.

Relations questions – variables dépendantes

Cette expérimentation a un double objectif. Le premier consiste à valider certaines hypothèses que nous avons avancées pour l'élaboration de notre modèle de la présence. Le deuxième objectif vise à évaluer l'impact sur la présence des deux systèmes de restitution visuelle.

Dans cette étude les écrans constituent les deux variables indépendantes.

Les variables dépendantes sont les facteurs qui doivent (ou non) changer d'une variable indépendante à l'autre.

Dans la liste ci-dessous nous présentons les liens entre question et variable dépendante.

Le premier niveau de la liste correspond à la variable dépendante principale.

Le deuxième niveau de la liste correspond aux variables dépendantes internes à la variable dépendante principale.

Le nombre correspond au numéro de la question dans le questionnaire final.

1. Jugement de l'immersion :
 - compréhension de la scène : 16, 25, 39, 40, 46, 50
 - auto-évaluation de la performance : 19
 - réalisme du monde virtuel : 34, 36, 59
 - prégnance de la vision stéréoscopique : 1
 - permanence de l'effet vision stéréoscopique : 23
2. Jugement des émotions
 - plaisir à jouer : 6 (score à inverser), 18, 28, 32, 38, 53
 - intensité des émotions ressenties : 9, 12, 20, 49, 58
3. Jugement de l'importance de l'imagination : 63
4. Jugement de la réponse aux attentes de l'utilisateur : 13 (score à inverser)
5. Jugement de la crédibilité du monde virtuel : 7, 21
6. Jugement de l'interaction
 - qualité de la jouabilité : 2, 48
 - possibilité d'interaction avec l'environnement : 10
7. Jugement du réalisme de l'expérience : 3, 27
8. Jugement de la crédibilité de l'expérience : 43, 51
9. Jugement de la conscience de la virtualité de la situation : 12
10. Jugement de l'acceptation de se prendre au jeu : 8, 64
11. Jugement de l'absorption et de l'implication : 4, 5 (score à inverser), 22, 41, 55
12. Jugement de la présence spatiale :
 - avec projection de l'utilisateur : 14, 24
 - sans projection de l'utilisateur : 17
13. Jugement de la présence de soi : 11
14. Jugement de la présence sociale : 37, 42, 57 (score à inverser)
15. Jugement de la présence d'action : 15, 56
16. Jugement de la présence générale :
 - sentiment d'exister : 29, 31, 47
 - émotions ressenties similaires à celles ressenties si la situation était réelle : 20, 49
 - émotions ressenties similaires à celles ressenties si la situation était imaginée : 9, 58
 - sensations similaires à si la situation était réelle : 54, 60
 - comportement proche de celui que l'utilisateur aurait eu face à une situation réelle : 26, 33
 - comportement proche de celui que l'utilisateur aurait eu face à une situation imaginée : 44
17. Jugement des effets négatifs :
 - désorienté : 30
 - fatigue oculaire : 35
 - maux de tête : 45
 - vertige : 52
 - fatigue : 61
 - nausée : 62

Annexe E

**Phase d'évaluation. Fiche explicative
communiquée aux participants.**

Informations sur le jeu

Histoire

En l'an 3072, la terre est surpeuplée et manque de ressources.

L'espèce humaine se livre donc un combat sans merci pour le contrôle des planètes de la galaxie.

Nous sommes dans le secteur XP3-44. Une bataille fait rage entre un vaisseau de l'alliance et un vaisseau de la confédération.

Une violente pluie d'astéroïdes endommage gravement les deux vaisseaux qui s'écrasent sur la planète Magmos, mais la guerre pour le contrôle de la nouvelle planète continue...

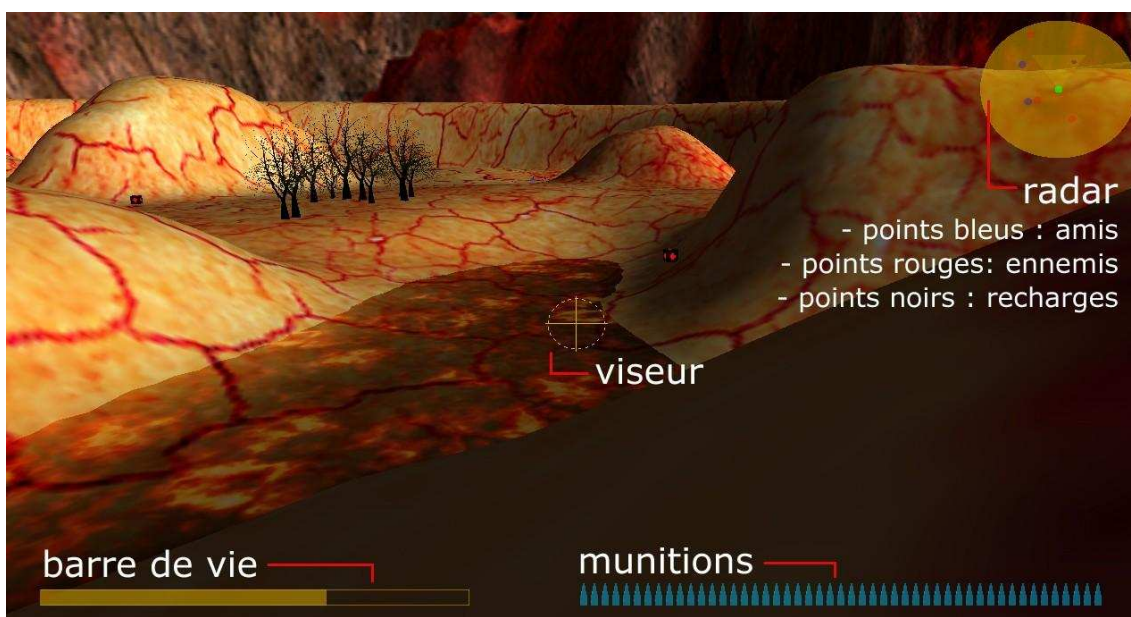
But du jeu

Vous contrôlez un robot, détruisez le plus d'ennemis possible (Robots Rouges). Les robots bleus sont dans votre équipe, évitez de les détruire !

Contrôles



Interface



TITRE : LA PRÉSENCE EN RÉALITÉ VIRTUELLE, UNE APPROCHE CENTRÉE UTILISATEUR

NOM : Bouvier Patrice

DISCIPLINE : Informatique

MOTS-CLÉS : réalité virtuelle, modèle de la présence, crédibilité, affordance, approche écologique, rendu perceptif

RÉSUMÉ :

Nous proposons une refondation théorique de la réalité virtuelle. Celle-ci est marquée par la conviction profonde de définir la réalité virtuelle comme une expérience médiatisée capable de susciter un sentiment de présence. Ce dernier est défini comme le sentiment authentique d'exister dans un monde autre que le monde physique où le corps se trouve.

Nous proposons un éclairage nouveau et global sur le sentiment de présence. Celui-ci consiste en une approche unifiée prenant en compte des considérations technologiques, psychologiques et écologiques. Nous avons élaboré un modèle qui identifie les processus menant au sentiment de présence. Les notions clés de notre modèle sont la crédibilité et les affordances assumées. Nous avons mené une phase d'expérimentation pour valider la pertinence et la cohérence de notre modèle. Notre vision globale de la réalité virtuelle et de la présence a été mise en pratique notamment lors de la conception de dispositifs de réalité virtuelle transportables et à bas coûts.

Sur la base de ce cadre théorique nous proposons un framework de conception d'applications en réalité virtuelle. Puisque l'objectif est la crédibilité et non le réalisme, nous nous intéressons à la réalité perçue de l'environnement et non pas à sa réalité physique. C'est pourquoi, le point de départ de notre framework consiste en un socle de connaissances sur la cognition humaine. Cette base de connaissances sert de vivier d'idées pour les quatre piliers sur lesquels peut s'appuyer le concepteur d'applications en réalité virtuelle. Ces piliers sont l'immersion, l'interaction, les émotions et un quatrième regroupant la boucle sensori-motrice et la multimodalité.

Concernant le pilier immersion nous proposons un nouvel algorithme pour le calcul de la réverbération sonore dans un environnement complexe et dynamique. Cette méthode repose sur l'algorithme existant du lancer de frustum mais propose deux optimisations. La première exploite le socle de connaissances sur la cognition humaine pour déterminer une sphère d'acuité sonore. Celle-ci nous sert de cadre pour lancer les frustra depuis l'auditeur et non depuis les sources sonores.

Laboratoire d'Informatique de l'Institut Gaspard-Monge
UMR CNRS 8049
Université Paris-Est
Cité Descartes
5, Boulevard Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée Cedex 2