



# Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distans d'immersion virtuelle

Hamid Hrimech

## ► To cite this version:

Hamid Hrimech. Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distans d'immersion virtuelle. domain\_stic. Arts et Métiers ParisTech, 2009. Français. NNT : 2009ENAM0027 . pastel-00005576

**HAL Id: pastel-00005576**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00005576>**

Submitted on 2 Apr 2010

**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.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

## THÈSE

pour obtenir le grade de

**Docteur**

de

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité "Informatique"**

*présentée et soutenue publiquement*

*par*

**Hamid HRIMECH**

le 21 Octobre 2009

**EVALUATION DE MÉTAPHORES D'INTERACTION POUR LE  
TRAVAIL COLLABORATIF ENTRE SITES DISTANTS  
D'IMMERSION VIRTUELLE**

*Directeur de thèse : Frédéric MERIENNE*

*Co-encadrement de la thèse : Leila ALEM*

**Jury :**

Mme. Indira THOUVENIN, Enseignant-chercheur, Heudiasyc, UTC  
M. Malik MALLEM, Professeur, IBISC, Université d'Every  
M. Christophe CHAILLOU, Professeur, LIFL, Université de Lille 1  
M. Pierre LOONIS, Professeur, Le2i, Université de Bourgogne  
M. Frederic MERIENNE, Professeur, Le2i, Arts et Métiers ParisTech  
Mme. Leila ALEM, Chercheur, ICT-center, CSIRO Australia

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Directeur de thèse  
Co-directeur de thèse

**Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image – UMR 5158  
Arts et Métiers ParisTech, centre de Paris**

*Arts et Métiers ParisTech (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers) est un Grand Etablissement  
dépendant du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, composé de huit centres :  
AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS*



*A ma mère*







## Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants d'immersion virtuelle

**RESUME :** Dans la phase de conception d'un environnement virtuel (EV), il est nécessaire de prendre en compte plusieurs facteurs comme les périphériques d'entrées/sorties, la métaphore d'interaction ou encore le domaine d'application. En plus de ces considérations, un environnement virtuel collaboratif (EVC) doit prendre en compte l'aspect collaboratif de la métaphore d'interaction. Tout d'abord, la métaphore d'interaction doit pouvoir apporter la performance de la tâche la meilleure possible. Ensuite, l'influence de la métaphore d'interaction sur l'expérience des utilisateurs (au sens psychologique et social) constitue une importante question de recherche. Dans ce contexte, deux études expérimentales ont été menées : la première vise à étudier l'effet de métaphores de navigation sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC et la seconde s'intéresse à l'effet de métaphores de manipulation sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC. Les résultats obtenus dans ce travail de thèse nous amènent à proposer un ensemble de critères et de règles de conception des EVCs.

**Mots-clés:** *interaction 3D, facteurs humains, EVC.*

## Evaluation of interaction metaphors for collaborative work distant immersive sites

**ABSTRACT:** The design of the virtual environment (VE) has to take into account several factors including the input and output devices, the design of the interaction metaphor or the application domain. In addition to these considerations, the design of a collaborative virtual environment (CVE) needs to take into account the collaborative aspect of the interaction metaphor. In one hand, the interaction metaphor has to be designed for the best possible task performance. In the other hand, the influence of the interaction metaphor on the user's experience (in terms of psychological and social aspects) constitutes an important research question. To address this research question, two experimental studies have been conducted: the first investigates the impact of 3D navigation metaphors on the user experience in a CVE and the second studies the effect of 3D manipulation metaphors on the user experience in a CVE. The obtained results can bring some criteria and design rules to be taken into account for the design of CVE.

**Keywords:** *3D interaction, human factors, CVE.*









## Table des matières

Chapitre I - Introduction .....	9
I.1 - Contexte de recherche .....	9
I.2 - Problématiques .....	10
I.3 - Questions de recherche .....	11
I.4 - Contributions .....	13
I.5 - Structure de la thèse .....	14
Chapitre II - État de l'art .....	15
II.1 - Introduction .....	15
II.2 - La réalité virtuelle .....	15
II.2.1 - Définitions .....	15
II.2.2 - Applications de la réalité virtuelle .....	17
II.2.3 - Interaction 3D .....	18
II.2.4 - Techniques et métaphores d'interaction 3D .....	20
II.2.5 - Périphériques d'entrée pour l'interaction .....	20
II.2.6 - Périphériques d'affichage pour l'interaction .....	29
II.3 - Communication .....	32
II.3.1 - Modèle de communication de Shannon et Weaver .....	32
II.3.2 - Communication interpersonnelle .....	33
II.3.3 - Collaboration .....	36
II.4 - Environnements virtuels collaboratifs EVCs .....	37
II.4.1 - Introduction .....	37
II.4.2 - Définition .....	37
II.4.3 - Affordances des EVCs pour la collaboration à distance .....	38
II.4.4 - Plateformes du travail collaboratif existantes .....	41
II.4.5 - Études empiriques dans les EVC .....	50
II.5 - Conclusion .....	52
Chapitre III - Approche scientifique .....	55

III.1 - Introduction .....	55
III.2 - Problématique scientifique.....	55
III.3 - Méthode d'évaluation.....	57
III.3.1 - Introduction.....	57
III.3.2 - Choix de la technique d'évaluation.....	59
III.4 - Mesures .....	60
III.4.1 - Mesures subjectives .....	60
III.4.2 - Mesure objective .....	62
III.4.3 - Description des mesures.....	62
III.5 - Conditions expérimentales.....	66
III.5.1 - Sélection/Manipulation.....	66
III.5.2 - Navigation.....	67
III.6 - Conclusion.....	67
Chapitre IV - Technologies développées .....	69
IV.1 - Introduction.....	69
IV.2 - Tracking 3D.....	70
IV.2.1 - Problématique.....	70
IV.2.2 - Description du système.....	70
IV.2.3 - Calibrage d'un système de stéréovision.....	71
IV.2.4 - Détection des marqueurs infrarouges .....	73
IV.2.5 - Mise en correspondance des marqueurs infrarouges.....	74
IV.2.6 - Stabilisation et performances .....	76
IV.2.7 - Matériel.....	79
IV.2.8 - Couplage tracking 3D Wiimote .....	80
IV.3 - Applications.....	80
IV.3.1 - Navigation.....	81
IV.3.2 - Manipulation.....	82
IV.4 - Plateforme Braccetto.....	83
IV.5 - Collaboration distante entre deux Braccettos.....	84

---

IV.5.1 - Architecture réseau.....	84
IV.5.2 - Distribution des données .....	86
IV.5.3 - Protocole de communication.....	87
IV.5.4 - Principe de fonctionnement.....	88
IV.6 - Conclusion .....	89
Chapitre V - Expérimentations .....	91
V.1 - Expérimentation sur la navigation 3D en EVC .....	91
V.1.1 - La navigation 3D.....	91
V.1.2 - L'étude expérimentale.....	94
V.2 - Expérience sur la manipulation 3D en EVC .....	115
V.2.1 - La manipulation 3D.....	115
V.2.2 - L'étude expérimentale.....	118
V.3 - Conclusion.....	132
Chapitre VI - Conclusion et perspectives.....	135
VI.1 - Introduction .....	135
VI.2 - Contributions.....	135
VI.2.1 - État de l'art .....	136
VI.2.2 - Système de tracking optique .....	136
VI.2.3 - Applications.....	136
VI.2.4 - Evaluations .....	137
VI.2.5 - Critères de conception.....	140
VI.3 - Limitations .....	142
VI.3.1 - Limitations technologiques .....	142
VI.3.2 - Limitations liées à l'évaluation.....	142
VI.4 - Perspectives.....	143
VI.4.1 - Retour d'effort à l'échelle 1 .....	143
VI.4.2 - Travail collaboratif asymétrique .....	143
VI.4.3 - Plateforme multiutilisateurs .....	144

---

VI.4.4 - Analyse linguistique et charge cognitive .....	144
VI.4.5 - Vers un modèle comportemental du travail collaboratif.....	144
Bibliographie.....	145
Annexe A : Questionnaires .....	166
Questionnaire d'entrée.....	166
Questionnaire de navigation .....	168
Questionnaire de manipulation .....	172
Annexe B : Protocole d'expérience.....	176
Annexe C : La Stéréovision.....	186

---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Frederic MERIENNE, mon directeur de thèse, d'avoir accepté la direction de cette thèse, un grand merci pour la qualité de son encadrement scientifique, sa disponibilité, mais aussi pour son soutien morale et matériel tout au long de cette thèse.

Merci à Leila ALEM qui, depuis le début de ma thèse, a pris le temps de co-encadrer mes travaux de recherche, je tiens également à lui dire un grand merci pour son accueil chaleureux typiquement marocain et pour son aide précieuse durant mon séjour à Sydney en Australie.

Je remercie également les membres de mon jury, en particulier :

Christophe Chaillou, Professeur à l'université de Lille I (Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille, UMR CNRS 8022 ), qui ma fait l'honneur tenir le rôle de président du jury.

Indira Thouvenin, enseignant-chercheur à l'Université de Technologie de Compiègne (Heudiasyc UMR CNRS 6599) et Malik Mallem Professeur à l'Université d'Evry au Laboratoire Informatique, Biologie Integrative et Systemes Complexes (IBISC CNRS FRE 3190) d'avoir accepté la lourde charge de rapporteur de la thèse.

Je remercie Pierre Loonis, Professeur à l'Université de Bourgogne (au Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image) d'avoir accepté d'être membre du jury.

Je m'en voudrais de négliger toutes les autres personnes qui ont contribué à faire cette thèse ,merci a tous les membres d'institut image pour leur amitié et leur bonne humeur (Géraldine, Samir pour son aide et ses remarques pour la rédaction, Jeong, Claudia, Manu, Christian, Philippe, Vladimir, Hanh, Jean-Luc, Florent) ainsi que les membres de ICT-center a Sydney pour leur accueil et leur gentillesse.



Je remercie mes parents sans qui je n'aurais jamais pu en arriver là. Merci à ma mère Malika, à mon père Ibrahim, à mes sœurs Kenza et Hassna, à mes frères Youssef et Otman, ainsi qu'à ma femme Meryem. Vous êtes dans mon cœur.

## Chapitre I - Introduction

### I.1 - Contexte de recherche

Les travaux présentés s'inscrivent dans le contexte du travail collaboratif entre sites distants. Nous constatons depuis quelque dizaines d'années une émergence des besoins en environnement virtuel collaboratif (EVC) dans un contexte socio-économique où les processus de travail ont évolué. Les équipes de travail sont de plus en plus amenées à regrouper des personnes provenant de lieux géographiques différents, souvent très distants les uns des autres, et de spécialités différentes, afin d'accomplir ensemble une tâche spécifique. Ainsi, des sociétés transnationales possèdent des équipes distantes travaillant sur le même projet. Les technologies émergentes actuelles (logiciels, réseaux et interfaces) permettent d'envisager le développement de telles technologies.

Les EVCs permettent à plusieurs utilisateurs géographiquement éloignés les uns des autres de collaborer et d'interagir en se retrouvant dans un environnement virtuel. Les EVCs sont devenus aujourd'hui un champ de recherche interdisciplinaire se situant à l'intersection de plusieurs grandes thématiques comme le réseau informatique, l'informatique graphique, la réalité virtuelle, la psychologie cognitive, les interfaces homme-machine (IHM), l'ergonomie et la sociologie.

De nombreux travaux de recherche visent à développer des solutions concernant le travail collaboratif dans le même lieu d'immersion virtuelle ou pour le travail collaboratif entre postes de travail pour la conception collaborative à distance de façon synchrone ou asynchrone. Certains travaux étudient l'impact des solutions proposées sur la performance de la tâche. En revanche, très peu de travaux ont été entrepris à ce jour sur l'évaluation de méthodes et outils d'un EVC du point de vue de l'expérience des utilisateurs en plus de celui de la performance de la tâche.

Nous nous intéressons dans notre travail de recherche aux environnements virtuels collaboratifs, et plus précisément à l'étude de l'interaction 3D dans un cadre collaboratif distribué. En effet, l'interaction 3D est l'un des facteurs les plus importants pour donner à l'utilisateur une immersion de bonne qualité. Dans ce cadre, nous nous proposons de travailler sur la question suivante :

***“Examiner comment les personnes travaillent ensemble en groupes et comment les technologies des collecticiels peuvent soutenir la collaboration”*** (Ishii, Kobayashi, & Arita, 1994)

***“Examines how people work together in groups and how groupware technologies can support collaboration”*** (Ishii, Kobayashi, & Arita, 1994)

En particulier, nous souhaitons focaliser nos travaux de recherche sur la problématique posée par Bowman :

***“Comment plusieurs utilisateurs peuvent collaborer efficacement dans une interface d'utilisateur 3D”*** (Bowman, Kruijff, Laviola, & Poupyrev, 2004).

***“How can multiple users collaborate effectively in a 3D UI”*** (Bowman, Kruijff, Laviola, & Poupyrev, 2004).

## I.2 - Problématiques

L'utilisation des EVCs crée une médiatisation de la collaboration ; c'est-à-dire que l'on passe d'une situation réelle de face-à-face à une situation où nous utilisons un monde virtuel artificiellement créé par des programmes informatiques pour travailler ensemble. Malheureusement, bien souvent ce nouveau mode de travail dégrade chez les utilisateurs des informations nécessaires pour le déroulement du processus collaboratif parmi lesquelles on peut citer :

- Les actions de l'autre utilisateur

- Les intentions de l'autre utilisateur
- Le point de vue de l'autre utilisateur

La conception d'un EVC est considérée aujourd'hui comme un vrai défi. Les problèmes posés sont nombreux et ont un caractère technologique, cognitif et social fortement couplé. Il s'agit d'échange des données, de la gestion de la maquette numérique, des interfaces, de la mise en contexte de la maquette virtuelle, des interactions entre les utilisateurs et les données numériques, la sensation de la coprésence dans un environnement virtuel.

Généralement dans la phase de conception d'un EV, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs facteurs comme les périphériques d'entrées/sorties, la technique d'interaction ou encore le domaine d'application (Bowman, Kruijff, Laviola, & Poupyrev, 2004). En plus de ces considérations, un EVC doit prendre en compte l'aspect collaboratif de la technique d'interaction. Bien entendu, le besoin requis concerne un système d'EVC qui permet aux utilisateurs de réaliser leur tâche correctement et de façon satisfaisante. Aussi, après avoir vérifié que l'EVC permet de réaliser pleinement la tâche pour lequel il est conçu, il est important de vérifier que les utilisateurs sont satisfaits de leur session de travail collaboratif en utilisant l'EVC.

Notre approche scientifique repose sur l'étude de l'effet des métaphores d'interaction 3D sur l'expérience vécue du travail collaboratif. En évaluant ces métaphores dans un cadre collaboratif, nous souhaitons mesurer à quel degré ces métaphores influencent la coprésence, l'implication, l'effort collaboratif...etc. L'objectif de ces travaux est de présenter une méthode permettant l'évaluation d'EVC vis-à-vis de critères liés à l'expérience des utilisateurs.

### I.3 - Questions de recherche

Dans un EVC, il est nécessaire de proposer aux participants des possibilités pour échanger et interagir entre eux et avec la maquette dans le cadre d'une tâche donnée. Généralement, l'interaction 3D est constituée de plusieurs tâches élémentaires. Dans cette hypothèse, nous

utilisons la classification de Bowman qui propose de classer ces tâches élémentaires en EV en quatre primitives comportementales virtuelles (Bowman, Koller, & Hodges, 1998): la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle de l'application.

De nombreux travaux ont été menés pour évaluer les techniques ou les métaphores d'interaction, en particulier dans le cadre des EVs mono-utilisateur ou focalisés sur la performance de la tâche dans le cadre des EVCs (Bowman et al., 1999a) (Poupyrev et al., 1997). Nous souhaitons étudier l'influence des métaphores d'interaction en EVC sur l'expérience de l'utilisateur.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à deux types de tâches dans un EVC : la tâche de navigation et la tâche de sélection/manipulation. Les problématiques que nous relevons pour ces deux tâches sont les suivantes :

Pour la navigation :

- Comment se déplacer dans un EVC ?
- Comment l'utilisateur interprète son point de vue ?
- Comment l'utilisateur interprète le point de vue de l'autre l'utilisateur ?

Pour la sélection/manipulation :

- Comment gérer la prise en main des objets (droit d'utilisation, gestion de conflit) ?
- Comment indiquer les actions de l'autre utilisateur ?

La question de recherche découlant de ces problématiques et que nous étudions est la suivante :

***« Quelle est l'influence des métaphores d'interaction 3D sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC orienté tâche ? »***

## I.4 - Contributions

Le sujet de cette thèse s'inscrit dans le domaine de la réalité virtuelle et porte sur le développement et l'évaluation de méthodes d'interaction 3D permettant l'optimisation du travail de collaboration entre deux sites distants dans un EVC. Ce travail se situe à l'intersection de plusieurs grandes thématiques de la réalité virtuelle : environnement 3D, travail collaboratif, métaphores d'interaction, évaluation.

Le travail réalisé pour cette thèse a été effectué dans le cadre d'une collaboration internationale entre :

- **L'institut image**, qui est une équipe du laboratoire Le2i – UMR 5158 du CNRS. Cette équipe développe ses activités à l'Institut de Chalon sur Saône qui est un service du centre de Cluny d'Arts et Métiers ParisTech ayant pour mission de développer et diffuser des méthodes et outils de la réalité virtuelle au service de l'ingénieur. L'objectif de l'équipe de recherche est de développer un savoir-faire dans les techniques d'immersion multisensorielle pour l'interaction avec un modèle numérique. Cet objectif est mené à travers trois axes de recherche : le modèle numérique, les interfaces multimodales et la perception en environnement virtuel immersif.
- Et l'équipe HFIT **Human Factors In Telepresence-Networking Technologies Laboratory** du CSIRO à Sydney en Australie, qui est une équipe du « Australian Commonwealth Scientific and Research Organization » (**CSIRO**). Cette équipe s'intéresse au développement et à l'évaluation de nouvelles techniques d'interaction afin d'optimiser la collaboration entre les utilisateurs des EVCs.

Cette étude a donné lieu à un important travail de développement technologique et à des contributions scientifiques, notamment :

- ✓ Un état de l'art sur les EVCs et les techniques d'interaction 3D
- ✓ Le développement d'un système de tracking 3D à faible coût

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

- ✓ Une plateforme technologique du travail collaboratif
- ✓ Deux séries d'expériences sur un grand nombre de participants (12 participants pour l'étude pilote de validation, 40 participants pour la première série d'évaluation, 32 participants pour la deuxième)
- ✓ Une méthodologie d'évaluation des EVCs
- ✓ Des publications scientifiques

## I.5 - Structure de la thèse

Ce mémoire de thèse est organisé en 7 chapitres. Le chapitre 2 de la thèse est dédié à un état de l'art sur la réalité virtuelle, l'interaction 3D et le travail collaboratif. Dans le chapitre 3, nous présentons notre approche scientifique ainsi que la démarche de recherche que nous avons entreprise afin de répondre à notre problématique de recherche. Le chapitre 4 est consacré à la présentation du développement technologique réalisé dans le cadre de cette thèse. Le chapitre 5 décrit la première expérimentation de navigation dans un EVC en détaillant les hypothèses et conditions expérimentales, le protocole de l'expérience ainsi que les résultats obtenus. Le chapitre 6 présente l'expérimentation de manipulation d'objets dans un EVC. Enfin, le chapitre 7 présente la conclusion générale ainsi que les perspectives des futurs travaux liés au sujet de cette thèse.

## Chapitre II - État de l'art

### II.1 - Introduction

Dans la section 2.2 de ce chapitre nous allons donner un bref état de l'art sur la réalité virtuelle (nommée RV dans la suite de ce document), ainsi que quelques applications de la RV. Dans la section 2.3, nous abordons la notion de l'interaction 3D avec les périphériques d'entrée et de sortie utilisés dans l'interaction en RV. La section 2.4 traite de la communication interpersonnelle et de la collaboration. Enfin, la section 2.5 détaille le concept des environnements virtuels collaboratifs (désignés par EVCs par la suite).

### II.2 - La réalité virtuelle

#### II.2.1 - Définitions

En 1965, Ivan Sutherland a décrit avant de le mettre en œuvre un dispositif de type visiocasque permettant à un utilisateur d'interagir avec un monde virtuel (Sutherland, 1965). Le terme RV a été inventé par Jaron Lanier (Lanier, 1988) pour décrire une technologie permettant de créer et appréhender une réalité synthétisée et partageable par plusieurs utilisateurs. Le terme anglophone « Virtual Reality » est sans doute plus pertinent car plus proche de la notion de réalité augmentée par le virtuel que la traduction française le laisse entendre (association de deux mots antinomiques).

La définition de la réalité virtuelle a longtemps fait l'objet d'intenses débats dans les communautés scientifiques, artistiques et philosophiques, les significations du terme RV changeant d'un groupe à l'autre. En effet, il n'existe pas de définition universelle. La RV peut être définie d'un point de vue technologique comme constituée d'une série de périphériques d'entrée qui stimulent à un niveau élevé nos sens (par exemple, les visiocasques qui offrent une visualisation immersive). Selon Ellis, la RV est une interface avancée d'interaction entre



l'homme et la machine. Cette interface simule un environnement réaliste et permet l'interaction avec cet environnement (Ellis, 1994).

La RV peut être également définie d'un point de vue psychologique comme un modèle sensoriel qui donne l'impression d'être dans un espace généré par ordinateur. Pour Slater (Slater & Usoh, 1994), la RV représente une réalité réelle ou simulée dans laquelle l'utilisateur croit qu'il est alors que son corps est dans un environnement qui reste physique. Cet environnement synthétique procure la sensation psychologique d'être présent dans l'environnement ("being there"). L'utilisateur perçoit l'information sensorielle comme étant corrélée avec sa proprioception (perception de son corps dans l'environnement).

Selon Fuchs, *“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, 1996).

Selon Arnaldi, *“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”*.(Arnaldi, Fuchs, & Tisseau, 2003).

Au-delà de toutes ces définitions, la RV est constituée d'interfaces informatiques permettant d'immerger une ou plusieurs personnes dans le même environnement, interagissant les uns avec les autres et/ou avec cet environnement en utilisant des périphériques spécialement dédiés.

## II.2.2 - Applications de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle trouve des applications dans de nombreux domaines différents que la liste non-exhaustive suivante illustre. Plus d'informations sont proposées dans le traité de la réalité virtuelle (volume 4) (Arnaldi et al., 2006).

### II.2.2.1 - Enseignement

La RV est un outil puissant pour l'éducation. En effet, des études ont montré que l'apprentissage était grandement facilité par l'accompagnement d'image par rapport à un texte brut. La RV offre en plus des images des environnements multi sensoriels immersifs qui favorisent l'implication et la participation des apprenants et facilitent ainsi le processus d'enseignement (Bowman, Hodges, Allison, & Wineman, 1999) (Bell & Fogler, 2004) (Juan De & Manuel , 2000).

### II.2.2.2 - Architecture et patrimoine

La RV permet la visualisation et l'inspection 3D d'une construction avant de commencer sa réalisation physique (Herder, Worzberger, Twelker, & Albertz, 2002) (Kahkonen & Whyte , 2003). Les technologies utilisées dans les applications de RV pour l'architecture sont une prolongation des techniques de CAO, par ajout de textures, de l'éclairage dynamique pour une simulation réaliste de la scène, du son. Il faut également noter que l'utilisation de dispositifs d'affichages immersifs (voir chapitre sur les dispositifs de sortie) permet de donner aux utilisateurs l'illusion de visualiser une vraie structure. Des travaux existent aussi pour restituer un bâti détruit ou partiellement détruit (De Luca, Véron, & Florenzano, 2006).

### II.2.2.3 - Santé

Les médecins ont accès de plus en plus à un volume d'information important et à des formats de données différents, par exemple les images de type IRM (imagerie par résonance magnétique), TAI (tomographie axiale informatisée), EEG (électroencéphalogramme), des ultrasons et des rayons X. Grâce à la RV, les utilisateurs peuvent visualiser de grandes

quantités d'informations en naviguant à travers des modèles 3D, par l'intermédiaire des dispositifs d'entrées et d'affichages adaptés.

La RV peut être utilisée pour l'analyse de mouvement, la réadaptation et la physiothérapie (Deutsch, Latonio, Burdea, & Boian, 2001). Par exemple le projet ANR SIMACTION vise à développer de nouvelles méthodes de rééducation afin d'améliorer en qualité et en rapidité la fonction motrice chez des sujets atteints de déficiences dues à des lésions centrales ou au vieillissement (Chevaldonne, Saimpont, Merienne, & Pozzo, 2006). Dans le même ordre d'idées, les environnements virtuels peuvent accompagner l'apprentissage d'un geste sportif ou technique. Par exemple, il est plus facile d'apprendre à jongler si les séances d'entraînement sont effectuées dans un environnement avec une gravité réduite (que seule permet la RV).

La Téléprésence permet à des chirurgiens de procéder à la chirurgie robotique à partir de n'importe où dans le monde, offrant une accessibilité accrue à des spécialistes (Satava, 1999) (Welch et al., 2004). La Téléprésence peut également être utilisée pour permettre l'accès à distance à des professionnels de la santé dans des situations dangereuses tels que les champs de bataille.

#### II.2.2.4 - Visualisation de données scientifiques

Les technologies de la RV offrent également de nouveaux moyens de visualisation de données scientifiques (Hedley, Billinghamurst, Postner, May, & Kato, 2002). Les mathématiciens peuvent voir en trois dimensions leurs équations. Les biologistes peuvent construire des modèles 3D des gènes (Férey, Gros, Hérisson, & Gherbi, 2004). La RV permet également aux chercheurs de créer des simulations interactives de phénomènes scientifiques (Avradinis, Vosinakis, & Panayiotopoulos, 2000).

### II.2.3 - Interaction 3D

L'interaction d'un utilisateur avec un environnement virtuel (EV) est considérée aujourd'hui comme un axe majeur de la RV. Les modalités d'interaction classique 2D atteignent vite leurs limites ; des tâches simples comme la navigation ou le déplacement d'un objet dans un EV 3D

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

se représentent comme des tâches complexes qui nécessitent encore beaucoup d'effort pour les accomplir. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles formes d'interaction en EV.

L'interaction 3D peut être définie comme une forme d'interaction entre l'homme et la machine dans un contexte tridimensionnel. Généralement, cette interaction nécessite trois éléments essentiels:

- Les périphériques d'entrée utilisés pour interagir avec l'EV
- Les techniques d'interaction qui traduisent les mouvements et actions de l'utilisateur dans l'EV
- Les périphériques de sortie qui permettent de restituer le résultat de l'interaction avec l'utilisateur

Mine a proposé la première classification de l'interaction 3D en se basant sur quatre primitives comportementales virtuelles (Mine, 1995) :

- Sélection : la sélection d'un objet est considérée par Mine comme l'action de pointer un objet puis le valider (Mine, 1995).
- Manipulation : la manipulation consiste à modifier l'état d'un objet. Cette modification se décompose en deux sous-tâches : la translation et la rotation.
- Navigation : selon Bowman, la navigation est l'action de déplacer ou de modifier les paramètres du point de vue d'un utilisateur dans un EV avec un déplacement physique limité (Bowman et al., 1998).
- Contrôle d'application : le contrôle d'application est une tâche élémentaire fondamentale à toute application car elle permet le dialogue entre l'utilisateur et l'application. En effet, le but du contrôle d'application est le déclenchement de fonctions et d'options de l'application.

Coquillart propose quatre tâches élémentaires, appelées primitives comportementales virtuelles PVCs, pour classer les techniques d'interaction. Ces PVC sont : observer le monde

virtuel, se déplacer dans le monde virtuel, agir sur le monde virtuel et communiquer avec l'environnement (Coquillart et al., 2006).

Dans notre travail de recherche, nous avons choisi la classification de Mine (Mine, 1995), qui considère que l'interaction 3d se décompose en quatre sous-tâches : navigation, sélection, manipulation et contrôle d'application, car c'est la décomposition qui s'adapte le mieux à notre contexte de recherche.

#### II.2.4 - Techniques et métaphores d'interaction 3D

D'après Coquillart, on peut considérer les techniques d'interaction 3D comme un ensemble de méthodes ou scénarii de l'utilisation d'une interface matérielle, permettant à l'utilisateur d'effectuer une tâche précise dans un EV (Coquillart et al., 2006).

Selon Fuchs, une métaphore d'interaction est une image symbolique d'une action ou d'une perception utilisée pour réaliser une tâche précise dans un EV. Il s'agit de la transposition d'un objet ou d'un concept réel dans le monde virtuel. On parle par exemple de métaphore de la main virtuelle (virtual hand) : il s'agit de la transposition de la main de l'utilisateur dans l'environnement virtuel (Coquillart et al., 2006).

#### II.2.5 - Périphériques d'entrée pour l'interaction

Les dispositifs d'entrée ont une influence très importante sur les performances des utilisateurs dans les EVs. Parmi les plus connues, il existe trois taxonomies permettant de classer les dispositifs d'entrée : la taxonomie de Buxton (Buxton, 1983) (figure 1), la taxonomie de Card, Mackinlay et Robertson (Card et al., 1991) (figure 2), et la taxonomie de Jacob et Sibert (Jacob & Sibert, 1992).

		Number of Dimensions							
		1		2			3		
		Rotary Pot	Sliding Pot	Tablet & Puck	Tablet & Stylus	Light Pen	Floating Joystick	3D Joystick	
Property Sensed	Position			Touch Tablet		Touch Screen			M
	Motion	Continuous Rotary Pot	Treadmill	Mouse			Trackball	3D Trackball	M
			Force-sat				X/Y Pad		T
	Pressure		Torque Sensor					Isometric Joystick	

Figure 1. La taxonomie des dispositifs d'entrée proposée par Buxton (Buxton, 1983)

Buxton a créé une taxonomie bidimensionnelle représentant le nombre de dimensions spatiales qu'un dispositif peut détecter (qui ne doit pas être confondu avec le nombre de degrés de liberté offerts par le dispositif), ainsi que les actions senties (position, mouvement ou pression) (Buxton, 1983). Cependant, cette taxonomie inclue seulement les dispositifs continus. Card et al, ont développé leur propre taxonomie pour inclure des entrées discrètes et continues, où les dispositifs discrets mesurent seulement une valeur booléenne et les dispositifs continus sont habituellement capables de mesurer un nombre « infini » de valeurs (Card et al., 1991). Cependant, ces taxonomies tendent à traiter les dispositifs qui produisent la même information et ignorent les qualités subjectives du dispositif. Jacob et Sibert ont ajouté un facteur important aux deux taxonomies précédentes en considérant deux composants d'interaction (Jacob & Sibert, 1992) : les propriétés physiques du dispositif d'entrée et la structure perceptuelle de l'espace de la tâche. En d'autres termes, comment la tâche est perçue joue un rôle crucial dans la façon dont le dispositif d'entrée est utilisé pour accomplir une tâche.

	Linear						Rotary			
	X	Y	Z	rX	rY	rZ				
Position	P								Volume	Angle
Movement	dP								dR	Delta Angle
Force	F								T	Torque
Delta Force	dF								dT	Delta torque
	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	1 10 100 Inf	
	Measure	Measure	Measure	Measure	Measure	Measure	Measure	Measure	Measure	

Figure 2. La taxonomie des dispositifs d'entrée proposée par Card, Mackinlay et Robertson  
(Card et al., 1991)

#### II.2.5.1 - Clavier

Le clavier est l'un des deux dispositifs d'entrée les plus communs d'interaction en EV, en grande partie parce qu'il est l'un des dispositifs standards d'entrée fournis avec des ordinateurs PCs. Une clef simple peut seulement être dans un des deux états, pressé ou libéré. Pris dans l'ensemble, un clavier est un dispositif composé qui comporte approximativement 100 clefs (Card et al., 1991).

#### II.2.5.2 - Souris

La souris est l'autre dispositif très commun d'interface, elle est également un autre exemple d'un dispositif composé. Deux ou trois boutons (chacun possédant un degré de liberté ddl) sont combinés avec un capteur qui mesure le mouvement dans les directions de x et de y à travers le plan horizontal (deux ddl).

#### II.2.5.3 - Joystick

Les joysticks sont maintenant utilisés dans une grande variété de situations d'interaction en EV (figure 3). La plupart des Joysticks d'ordinateur mesurent l'entrée en termes de deux ddl de

translation X et Y, ainsi que des boutons ou d'autres commutateurs sont habituellement fixés au joystick pour les entrées discrètes.



Figure 3. Image d'un joystick (Logitech Extreme 3D Pro)

#### II.2.5.4 - Spacemouse

La spacemouse (figure 4) est l'un des rares dispositifs d'entrée d'ordinateur de bureau spécifiquement conçus pour l'interaction 3D en EV. L'utilisateur peut manipuler des objets 3D dans une scène en appliquant une pression sur un petit joystick. La plupart des joysticks pivotent autour de leur base lorsqu'une pression est appliquée. La spacemouse peut détecter les mouvements de rotation des trois axes, et les neuf boutons disposés autour de la poignée peuvent être utilisés comme des entrées discrètes.



Figure 4. La spacemouse 3D Logicad3D



### II.2.5.5 - Wiimote

La Wiimote est le nom du contrôleur de la console Wii de Nintendo (figure 5). Elle est équipée de deux types de capteurs qui lui permettent de se repérer dans l'espace :

- des accéléromètres capables de retranscrire les mouvements qui lui sont appliqués.
- le pointeur infrarouge qui va repérer la position 3D de la Wiimote dans l'espace. Pour ce faire, Nintendo a équipé sa console d'une « sensor bar » qui va émettre un signal infrarouge capté par une petite camera infrarouge placée sur la Wiimote.

Également, la Wiimote dispose de plusieurs boutons pour les entrées discrètes.

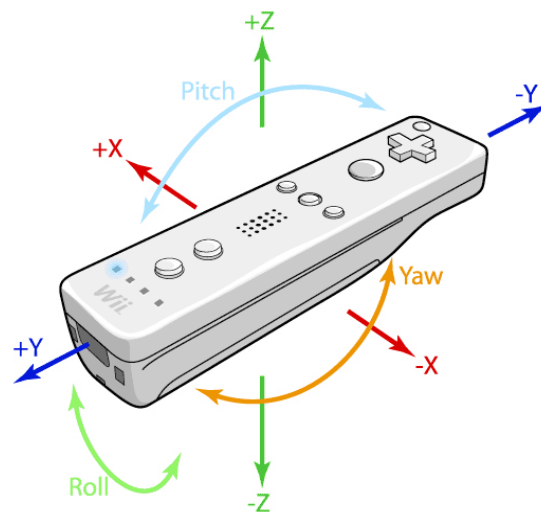


Figure 5. La manette Wiimote de Nintendo

### II.2.5.6 - Systèmes de tracking<sup>1</sup>

Beaucoup d'applications en RV exigent comme type d'informations, la position ou/et la rotation d'un objet ou de l'utilisateur dans l'espace. Les dispositifs d'entrées classiques comme : la souris, le clavier, le Joystick, ne permettent pas d'avoir ce genre d'information. Il est donc

<sup>1</sup> Tracking : positionnement spatial

nécessaire d'utiliser de nouveaux dispositifs mieux adaptés, appelés dispositifs de tracking ou traqueurs.

Il existe généralement trois types de traqueurs:

**a. Traqueurs du mouvement**

Il existe différentes technologies utilisées dans le tracking (figure 6).

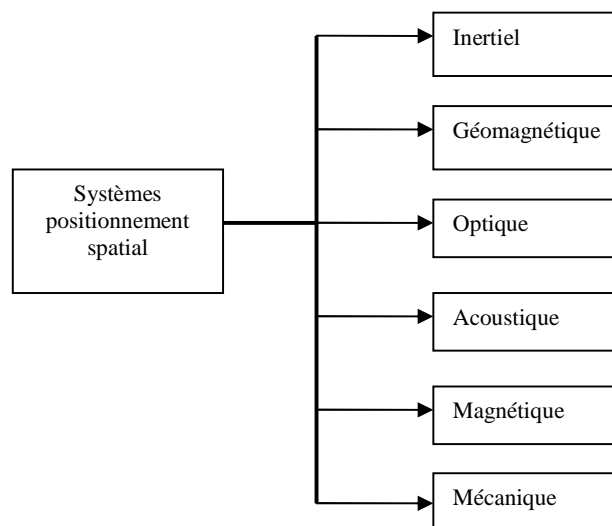


Figure 6. Classification des systèmes de tracking existants

- **Traqueurs mécaniques** : les dispositifs de tracking mécaniques mesurent la position et l'orientation grâce à un contact direct entre un point de référence et la cible. L'un des avantages majeurs de ce type de dispositifs est leur précision très élevée ainsi qu'un bas niveau de latence. En effet, le retard pour les traqueurs mécaniques est très court (moins de 5 ms), leur taux de mise à jour est assez haut (300 mises à jour par seconde) et ils sont précis. Leur inconvénient principal est que le mouvement de l'utilisateur est limité par des contraintes physiques (figure 7).



Figure 7. Système d'affichage de type BOOM utilisant le tracking mécanique

- **Traqueurs magnétiques** : les traqueurs magnétiques utilisent des émetteurs de basse fréquence de champ magnétique pour déterminer la position et l'orientation d'un petit capteur (récepteur). Généralement, ils peuvent fonctionner dans un volume d'approximativement 1.5 à 10 mètres. Malheureusement, les objets métalliques présents dans l'espace du tracking introduisent des distorsions dans la mesure (donc une perte de précision) et une latence du système.
- **Traqueurs inertiels** : les traqueurs inertiels utilisent de petits gyroscopes permettant de détecter des rotations. Ce type de dispositifs souffre d'une accumulation des erreurs une fois utilisé pendant de longues périodes. Cependant, les traqueurs comme l'IS900 (figure 8) utilisent des balises soniques pour corriger ces erreurs.



Figure 8. Le système de tracking ineriel IS-900 MiniTrax d'Intersense

- **Traqueurs optiques** : les systèmes de tracking optiques utilisent généralement deux caméras ou plus pour détecter la position et l'orientation d'une cible par l'intermédiaire d'un programme de vision par ordinateur (figure 9). Les traqueurs optiques proposent un espace de tracking plus élevé que les traqueurs mécaniques ou magnétiques. Ce type de tracking fournit également des taux élevés de mise à jour. Cependant, la présence d'un obstacle dans le champ de vision d'une des caméras rend la détection de la cible impossible.



Figure 9. Un système optique de motion capture

- **Traqueurs acoustiques** : les systèmes de tracking acoustiques émettent des ondes ultrasoniques à hautes fréquences et déterminent la position et l'orientation d'une cible

en utilisant le principe de la technique du temps de vol. En effet, la distance entre la cible et l'émetteur peut être déterminée en mesurant le temps de propagation d'une onde entre l'émetteur et la cible. Avec la distance, la position peut être estimée. De la même façon, l'orientation est calculée en utilisant plusieurs récepteurs (au minimum 3). Ce type de système présente l'avantage d'être peu coûteux et léger. Cependant, ils sont très sensibles aux bruits extérieurs.

### **b. Eye tracking**

L'eye tracking est employé afin de déterminer l'axe du regard de l'utilisateur (figure 10). La technologie employée dans ce type de dispositif est essentiellement basée sur les techniques de vision par ordinateur. Les eye trackers suivent la position de la pupille en utilisant les réflexions de la cornée détectées par une caméra.

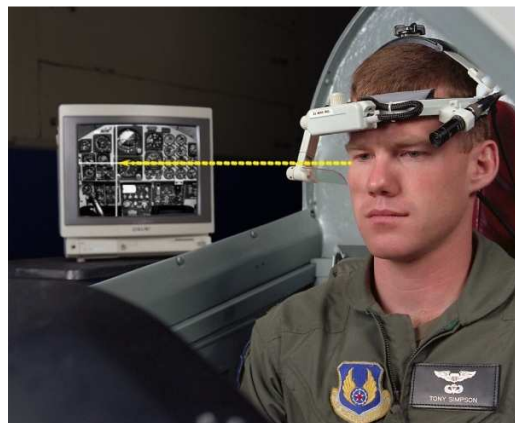


Figure 10. Dispositif d'Eye tracking de type EL-MAR

### **c. Gant de données**

Les gants de données sont des dispositifs qui peuvent être utilisés dans un EV afin de manipuler des objets en temps réel. Ces gants sont généralement composés de capteurs de type fibre optique ou de jauge de contrainte pour déterminer la flexion de chaque doigt. Certains

modèles mesurent l'écartement entre chaque doigt. Pour déterminer la position absolue de la main, les gants doivent être équipés de traqueurs de position dans l'espace (6 ddl).

Dans cette section, nous avons présenté les avantages et les inconvénients de plusieurs dispositifs d'entrée pour l'interaction 3D. La solution retenue consiste à utiliser un système optique de tracking 3D (dans ce contexte nous avons développé notre propre système de tracking optique explicité dans le chapitre 4). Également, nous avons combiné ce système à une wiimote pour avoir l'orientation 3D et les entrées discrètes.

### II.2.6 - Périphériques d'affichage pour l'interaction

Les dispositifs de sortie permettent de fournir des informations sensorielles à l'utilisateur. Ils incluent des dispositifs d'affichage, les dispositifs sonores et les dispositifs haptiques. Dans ce qui suit, nous présentons seulement les dispositifs d'affichage.

#### II.2.6.1 - Écrans d'ordinateur

Les écrans d'ordinateurs sont parmi les dispositifs d'affichage les plus communs en RV, principalement en raison de leur disponibilité et bas coût. Zheng et al décrivent le moniteur d'ordinateur de bureau comme un dispositif d'affichage espace-constant (Zheng, McConkie, & Schaeffe, 2003). C'est-à-dire que tout en navigant dans un EV, l'utilisateur peut changer la position et l'orientation de la caméra dans l'EV tandis que le moniteur et l'utilisateur restent stationnaires. Par conséquent, il n'y aura aucune rétroaction proprioceptive ou vestibulaire disponible à l'utilisateur.

#### II.2.6.2 - Workbench

Les workbenches fournissent habituellement une ou deux images de projection et offrent un champ de vision considérablement plus grand qu'un simple écran d'ordinateur (figure 11). L'affichage est souvent projeté d'une façon stéréoscopique pour visualiser la scène en relief. Généralement, les workbenches fournissent un niveau de résolution spatiale très élevé. Ils sont également intuitifs pour certains types d'application (comme par exemple la visualisation de

données scientifiques). Cependant, comme avec les écrans d'ordinateurs, la mobilité de l'utilisateur est limitée lorsqu'il utilise un workbench.

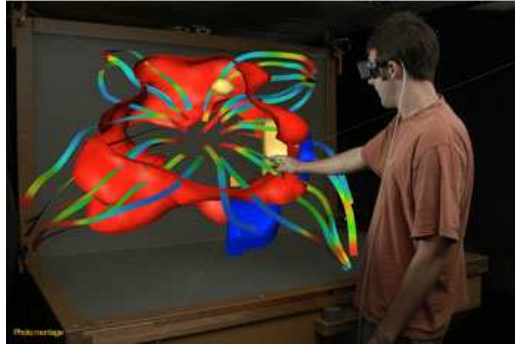


Figure 11. Exemple d'un workbench. Ici, une simulation d'un déplacement de fluide dans le sous-sol pour l'extraction de produits polluants. © J. Wallace/INRIA

#### II.2.6.3 - Murs de projection

La scène est projetée sur une surface à l'aide d'un ou plusieurs projecteurs pour avoir un grand volume d'affichage.

#### II.2.6.4 - CAVE

Ce dispositif utilise quatre à six écrans d'affichage disposés dans une configuration cubique qui entoure les utilisateurs. La scène est projetée sur les écrans depuis l'extérieur de l'espace de l'utilisateur (figure 12). Les utilisateurs peuvent se déplacer physiquement dans le CAVE (pour des petits déplacements cependant). Ce type de dispositif représente un investissement significatif limitant son accessibilité. Également, il nécessite un espace physique considérable.

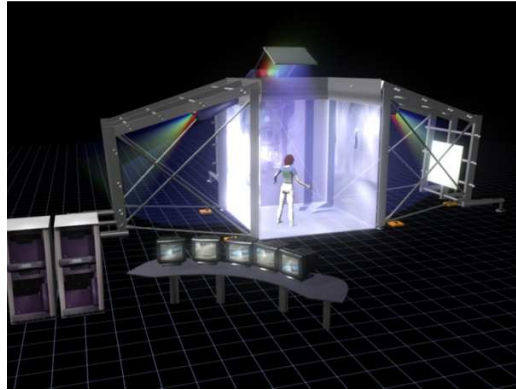


Figure 12. Exemple d'une salle d'immersion virtuelle MoVE™ (Modular Virtual Environment) à 4 faces

#### II.2.6.5 - Visiocasque

Le visiocasque (ou HMD pour Head Mounted Display) est un dispositif de vision stéréoscopique, doté de deux écrans miniatures, un devant chaque œil, permettant à l'utilisateur une perception en relief des images de synthèse générées par l'ordinateur et une immersion dans le monde virtuel. Les HMDs ne sont pas particulièrement confortables à l'usage. Ils sont non seulement relativement lourds (le HMD V8 pèse approximativement 1 kilogramme), mais le centre de gravité est souvent à l'avant et incline la tête vers l'avant donc. Cependant, le visiocasque est le seul dispositif de visualisation permettant une totale immersion tout en restant portable et compact d'utilisation (figure 13).



Figure 13. Modèle d'un visiocasque stéréoscopique



Plusieurs dispositifs d'affichage ont été présentés dans cette section, avec les avantages et les inconvénients de chaque dispositif. Deux solutions ont été envisagées pour nos travaux : soit l'utilisation d'un dispositif de type mur d'affichage, ou bien l'utilisation d'un système de type workbench. Finalement c'est la deuxième solution qui a été retenue. En effet, c'est ce type de système qui était disponible chez notre partenaire australien. Par ailleurs, les systèmes d'affichage de type workbench sont les mieux adaptés à des tâches d'inspection ou de manipulation 3D (D. A. Bowman et al., 2004).

## II.3 - Communication

### II.3.1 - Modèle de communication de Shannon et Weaver

L'un des premiers modèles de la théorie de l'information est le modèle de communication de Shannon et Weaver (figure 14). Les travaux menés par Shannon et Weaver ont été motivés par l'ambition d'avoir une efficacité et une fidélité entre la transmission et la réception d'un système de communication (Shannon & Weaver, 1949). Shannon et Weaver définissent la communication au sens large comme l'ensemble de la procédure par laquelle un esprit affecte un autre. Leur modèle de communication est composé d'une source d'information (la source du message), un émetteur, un signal et un récepteur (le récepteur du message), et une destination. Shannon et Weaver incluent aussi le facteur de bruit dans le modèle.

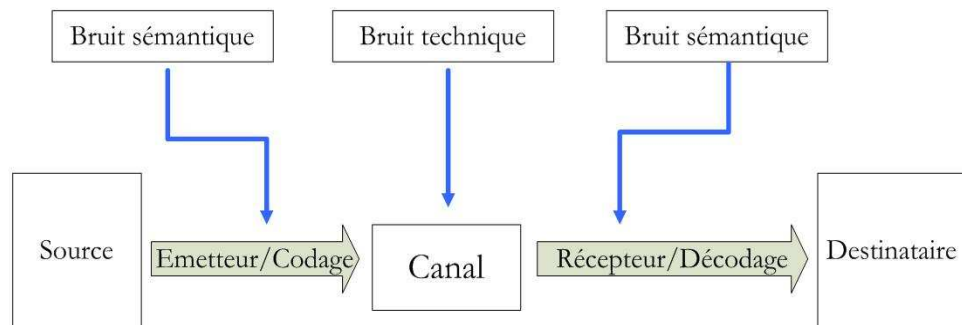


Figure 14. Modèle de transmission de communication de Shannon et Weaver (Shannon & Weaver, 1949)

La relation entre le bruit et l'information peut être décrite par l'équation simple :

$$\text{Canal} = \text{information} + \text{bruit}$$

Dans la théorie de l'information, l'information et l'incertitude sont étroitement liées. L'information se réfère au degré d'incertitude dans une situation. Plus cette incertitude est réduite par un message, plus la corrélation entre l'entrée et la sortie d'un canal de communication est significative. Aussi, plus les instructions particulières sont détaillées et plus l'information est transmise. L'incertitude est également liée à la notion de prévisibilité. Quand un signal est entièrement prévisible, il est tout à fait certain. Par conséquent, il ne contient très peu voire aucune information.

### II.3.2 - Communication interpersonnelle

Il y a un certain nombre d'éléments qui placent la communication interpersonnelle (CI) indépendamment d'autres formes de communication. Dans le processus de communication interpersonnelle, les participants impliqués sont généralement proches physiquement. Il est important de noter également que la CI sollicite l'utilisation de plusieurs canaux sensoriels.

Dans ce contexte le modèle de communication de Shannon et Weaver ne s'adapte pas à la CI pour deux raisons :

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

- Premièrement, la CI est une communication dynamique et bilatérale, et peut donc ne pas être conçue comme transmission linéaire et littérale d'information d'un expéditeur à un récepteur.
- Deuxièmement, la CI repose principalement sur l'échange de l'information.

Le schéma ci-dessous (figure 15) montre une version adaptée du modèle de Shannon et Weaver, en ajoutant plusieurs modifications afin de l'adapter à la CI. Un expéditeur code une idée dans un message et l'envoie par l'intermédiaire d'un canal à un récepteur qui décode le message et essaye de reconstruire une image de l'idée. La communication est réussie si l'image créée sur du côté du récepteur correspond à l'idée initiale de l'expéditeur.

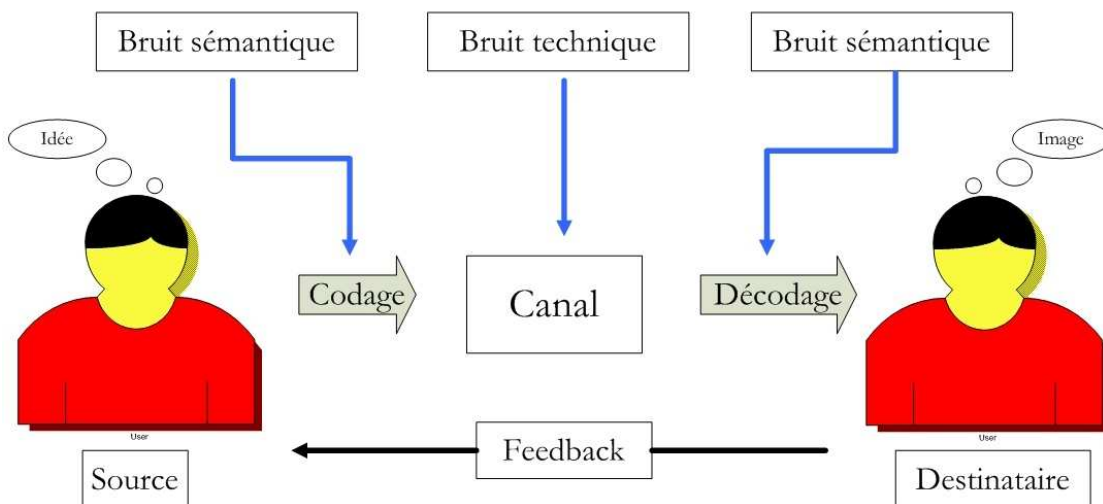


Figure 15. Modèle de Shannon et Weaver {{127 Shannon, C. E. 1949}} modifié pour la CI

On peut distinguer quatre types de communications selon la distance temporelle et la distance spatiale (figure 16) :

- Communications asynchrones colocalisées : communications où l'émission et la réception sont différées dans le temps mais les utilisateurs se trouvent dans le même site.

- Communications synchrones colocalisées : modèle d'échange d'information en direct nécessitant une réponse en temps interactif dans le même site
- Communications asynchrones délocalisées : communications où l'émission et la réception sont différées dans le temps et au moins entre deux sites différents
- Communications synchrones délocalisées : modèle d'échange d'information en direct nécessitant une réponse en temps interactif entre des sites différents

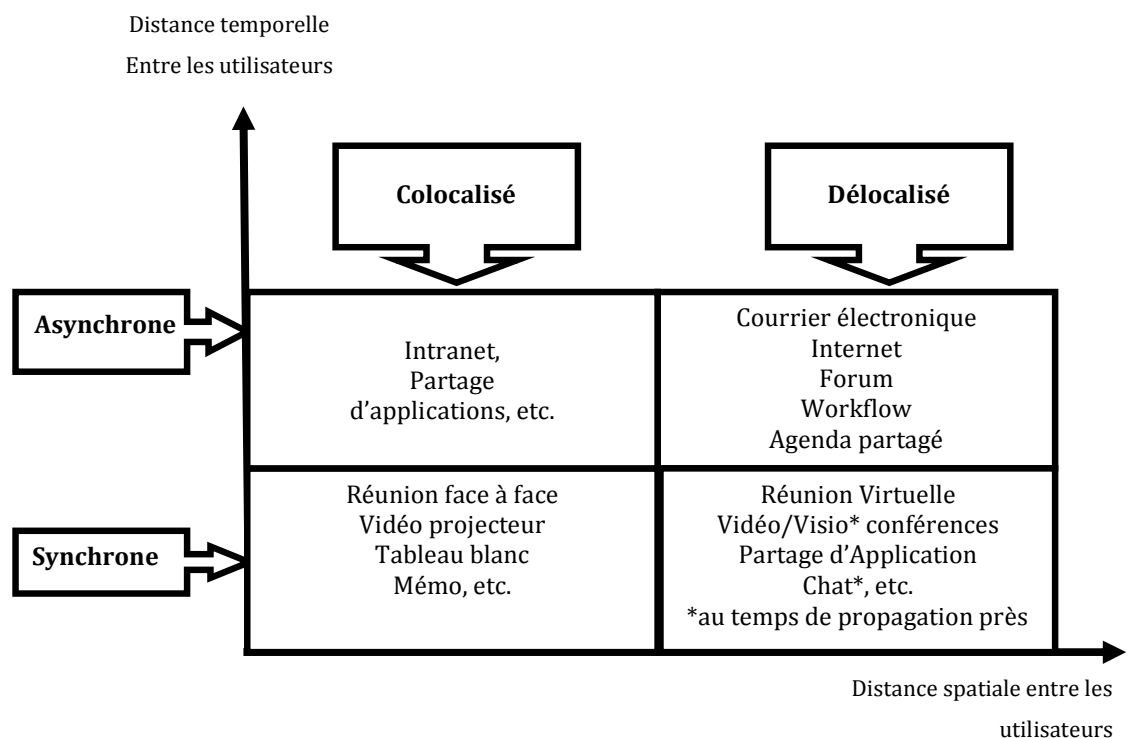


Figure 16. Types de communication selon la distance temporelle et la distance spatiale

Dans le contexte de la communication coopérative, on suppose que l'expéditeur et le récepteur ont un problème commun qu'ils essayent de résoudre. Les résultats désirés de communication dans ce cas seraient qu'un message est compris et aide finalement l'expéditeur et le récepteur pour atteindre leur but commun.

La section suivante explique le concept de la collaboration comme un cas particulier de communication interpersonnelle.

### II.3.3 - Collaboration

Dans le dictionnaire Larousse, le verbe « collaborer » est défini comme « Travailler de concert avec quelqu'un d'autre, l'aider dans ses fonctions ; participer avec un ou plusieurs autres à une œuvre commune ». Le travail collaboratif est donc à la fois : partager, communiquer, coordonner, organiser et produire. Tous les participants sont engagés dans les mêmes tâches en se coordonnant pour résoudre le même problème ; cela impose une équipe, un but et un projet en commun. Un exemple classique pour la collaboration colocalisée et synchrone est donné par les tables rondes de réunion, d'où les participants échangent leurs idées et travaillent ensemble sur différents documents afin de réaliser un but défini (trouver la meilleure solution/décision pour un problème) dans un espace et un temps limités.

Le schéma ci-dessous (figure 17) montre un modèle simple pour la collaboration, qui est une autre prolongation du modèle de Shannon et Weaver de communication interpersonnelle.

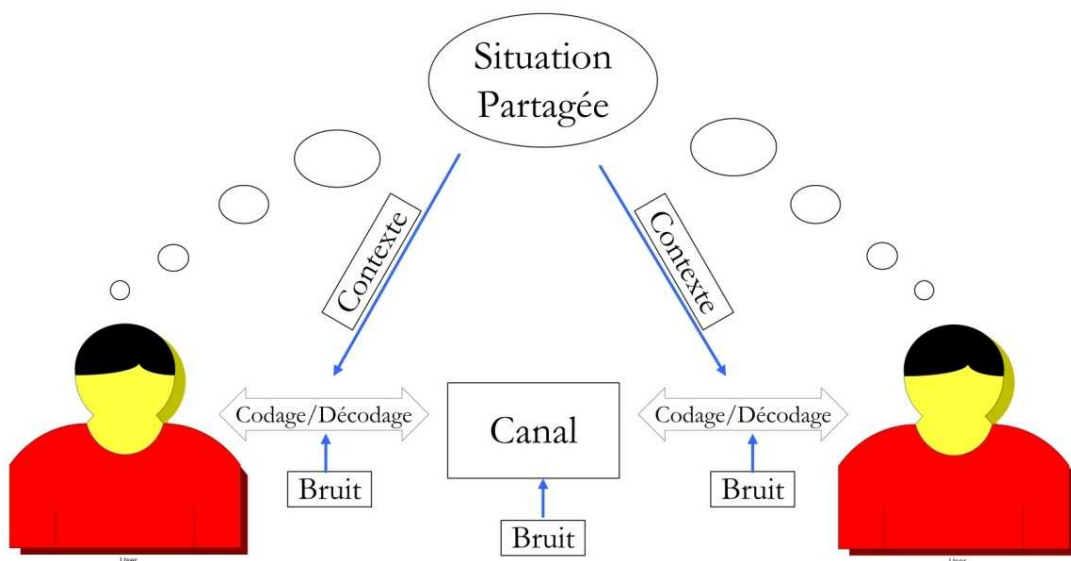


Figure 17. Modèle de collaboration.

La collaboration est conduite par l'échange de messages. Les participants jouent généralement les deux rôles expéditeur/récepteur et donc tous les deux codent/envoient des

messages et reçoivent/décodent des messages. Pendant le processus de la collaboration, chaque participant développe son propre modèle mental de la situation qui contient l'information disponible, les solutions alternatives possibles et l'évaluation des solutions alternatives.

## II.4 - Environnements virtuels collaboratifs EVCs

### II.4.1 - Introduction

Avec l'apparition d'internet qui permet de lier des ordinateurs éloignés géographiquement, une question s'est posée concernant l'utilisation d'internet et de la RV, afin de regrouper plusieurs utilisateurs, dans un EV, en créant un sens de présence « être là dans un espace différent », mais aussi un sentiment d'être avec d'autres personnes dans cet espace de coprésence. Ces mondes virtuels partagés par des participants à travers un réseau informatique sont appelés environnements virtuels collaboratifs (EVCs). La technologie des EVCs vise à transformer les réseaux informatiques en espaces navigables 3D et peuplés afin de permettre le travail de collaboration et le jeu social (Benford, Greenhalgh, Rodden, & Pycck, 2001). L'apparition des EVCs peut être vue comme le résultat d'une convergence d'intérêts de recherches entre la communauté de RV et de communauté du travail coopératif assisté par ordinateur (Computer Supported Cooperative Work CSCW).

### II.4.2 - Définition

Selon Gibson « Les EVCs sont des systèmes distribués de RV qui offrent des environnements graphiquement, potentiellement infinis, numériques. Dans ces environnements, les individus peuvent partager l'information par l'interaction les uns avec les autres et par l'interaction collaborative et individuelle la représentation de données » (Gibson, 1989).

Churchill trouve que cette définition est restrictive. Selon lui, un EVC est un espace virtuel créé par ordinateur et distribué. Dans cet espace, les utilisateurs peuvent se réunir et agir sur

des objets virtuels. L'espace virtuel peut être représenté par de simples environnements textuels ou même par de riches scènes 3D partagées (Churchill, Snowdon, & Munrr , 2001).

Nous pensons que les deux définitions sont exactes mais elles ne sont pas complètes. En effet, il existe une différence majeure entre les systèmes de RV distribuée et les systèmes de RV collaborative. Cette différence se justifie par le fait que la RV collaborative nécessite des échanges et des interactions entre les participants pour pouvoir réaliser une tâche. Dans une application de RV distribuée, les entités se côtoient, peuvent interagir ; mais le but de l'application peut être atteint par chacune d'entre elles séparément.

Dans ce contexte nous proposons la définition suivante : *« Un EVC est un espace virtuel de travail géré par un système informatique, permettant de regrouper plusieurs utilisateurs dans le même espace virtuel, les participants sont engagés dans les mêmes tâches en se coordonnant pour résoudre ensemble le même problème. Un EVC doit favoriser le partage des données, la communication et la production d'un résultat final »*

### II.4.3 - Affordances des EVCs pour la collaboration à distance

Le mot « affordance » signifie : « qualité d'un objet ou d'un environnement permettant à un individu d'effectuer une action » ; autrement dit la capacité d'un objet à suggérer sa propre utilisation. Dans cette section, nous allons présenter les affordances des EVCs, identifiés principalement selon le modèle spatial de l'interaction de Benford (Benford & Fahl'en , 1993) (Benford, Bowers, Fahl'en, & Mariani, 1994) et d'un état de l'art relatif aux domaines de la CSCW et de la RV (Gaver, 1992) (Gutwin, 1997) (Riva, 1999) (Fussell, Kraut, & Siegel, 2000) (Mantovani. et al, 2006).

#### II.4.3.1 - Affordances de l'espace virtuel

L'utilisation d'un espace virtuel 3D avec des objets soigneusement choisis et placés pour ressembler à des arrangements familiers aux utilisateurs permet de faciliter l'interaction chez les utilisateurs des EVCs (par exemple : des meubles de bureau comprenant les tables rondes, les bornes interactives ou les tableaux d'affichages partagés comme ceux vus sur la figure18). Les

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

références données par le positionnement de ces objets permettent aussi de restituer une intégration spatiale plus aisée.



Figure 18. Exemple de collaboration d'avatars utilisés dans une plateforme collaborative DIVE

#### II.4.3.2 - Affordances des avatars

Dans la mesure du possible, l'utilisation d'avatars permet d'avoir une information sociale dans l'environnement. Les avatars utilisés sont généralement de type humanoïde (figure 19), conçus en fonction des utilisateurs pour que les caractéristiques des ces avatars correspondent aux utilisateurs (en terme de sexe, âge, ...etc.). L'utilisation des avatars est un moyen d'identification et de communication non verbale. Il existe également des avatars qui offrent à l'utilisateur la capacité de déclencher une gamme d'animations expressives prédéfinies du corps, ou des avatars qui fournissent des informations visuelles sur l'humeur (visage heureux/visage triste).





Figure 19. Exemple d'avatars de type humanoïde utilisés dans Spin3D

#### II.4.3.3 - Affordances de la vision

Il existe des EVCs qui offrent la possibilité d'utiliser des moyens d'affichages immersifs, comme les visiocasques (HMD) ou le MoVe (Modular Virtual Environment). Cela permet de faciliter chez les utilisateurs la visualisation et l'exploration de l'EV.

#### II.4.3.4 - Affordances de l'audio

Dans un EVC, la relation spatiale entre les avatars ou entre un avatar et l'EV peut être basée sur une localisation basée sur la modulation du son. Cette modulation peut être réalisée de façon directionnelle ou bien basée sur l'ajustement du volume en fonction de la distance.

#### II.4.3.5 - Affordances de l'awareness<sup>2</sup> interpersonnelle

Les avatars donnent des informations sur la présence et l'identité d'un utilisateur dans EV. Cela permet d'avoir « awareness » rapide sur la présence d'autres utilisateurs dans le même environnement. De plus, les avatars permettent d'améliorer la gestion du point de vue, facilitant chez les utilisateurs l'interprétation du regard de leurs partenaires et favorisant une conscience du regard mutuel.

La relation spatiale entre les avatars dans un EV peut également informer les utilisateurs sur la disponibilité et l'activité de leurs partenaires. Par exemple, une situation où deux avatars se

---

<sup>2</sup> Awareness : prise de conscience

trouvent proches l'un de l'autre et face à face indique que ces deux avatars sont en conversation.

#### II.4.3.6 - Affordances de l'awareness de l'espace de travail

La conscience de l'espace de travail se rapporte à la connaissance des tâches réalisées par les autres utilisateurs dans l'espace virtuel partagé. Les EVCs permettent d'avoir ce type de conscience. La proximité d'un avatar d'une zone de travail informe les autres participants que cet avatar est engagé dans la zone de travail.

#### II.4.4 - Plateformes du travail collaboratif existantes

Les EVCs ont été employés dans différents domaines pour différentes applications telles que la réunion d'affaire virtuelle, la revue de projet, la co-visualisation scientifique, la thérapie virtuelle et le divertissement (R. Schroeder, 1996). La section suivante présente quelques exemples d'EVCs. La liste d'applications proposée n'est pas exhaustive mais elle permet de dépeindre quelques secteurs d'activités dans lesquels les EVCs jouent un rôle important.

##### II.4.4.1 - Projet MASSIVE

Le projet de recherche MASSIVE (Model, Architecture and System for Spatial Interaction in Virtual Environments), a été mis en place dans le but de développer un EVC pour les systèmes de téléconférences (Greenhalgh & Benford, 1995).

MASSIVE (figure 20) a été inspiré par le modèle spatial de l'interaction (Benford et al., 1994). Il donne accès à des outils de communication de type image, son et texte. Le principe de ce système repose sur la localisation des entités dans l'espace en utilisant les notions d'Aura (périmètre de conscience autour d'une entité), de nimbus (zone d'intérêt d'une entité susceptible d'attirer l'attention) et de focus (zone d'attention d'une entité). En fonction de ces notions, il est possible de rentrer en contact avec un participant ; la zone de communication s'établissant dès lors que les zones de nimbus et de focus se recouvrent.

MASSIVE a également été utilisé comme un banc d'essai pour plusieurs études qui portent sur les EVCs (par exemple (Bowers, Pycock, & O'Brien, 1996)). La suite de ce projet « MASSIVE-2 » a tenu compte de l'intégration de facteurs contextuels pour l'amélioration de la conscience (Benford & Greenhalgh, 1997).

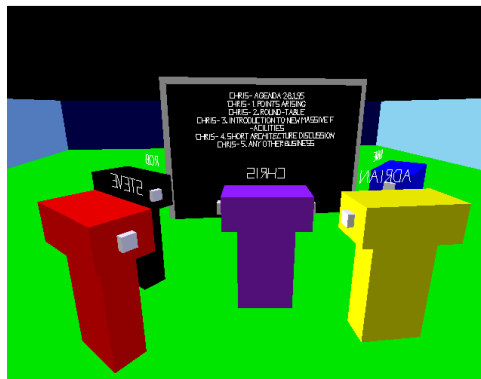


Figure 20. La plateforme collaborative MASSIVE

#### II.4.4.2 - Projet COVEN

Le but du projet européen COVEN (COLlaborative Virtual ENvironments) était de développer une plateforme sophistiquée pour les EVCs de la deuxième génération (Normand et al., 1999) (figure 21). Le projet a duré quatre années et a fait participer douze partenaires universitaires et industriels. Des prototypes d'EVC ont été développés en utilisant la boîte à outils DIVE (Distributed Interactive Virtual Environment) toolkit (Anelli, Olof, Kristian, Marten, & Olov, 1994).

Les améliorations principales que le projet COVEN a apportées concernent l'utilisation des avatars de type humanoïde comportant un niveau dynamique de détail, une infrastructure réseau pour la gestion de données et l'intégration du son spatialisé et de la vidéo.



Figure 21. Exemple de la plateforme de travail collaboratif COVEN

#### II.4.4.3 - Projet Immersive telepresence

Ce projet vise à réunir des personnes distantes dans le but de travailler ensemble comme s'ils étaient face à face (figure 22) en ajoutant la possibilité de travailler sur des modèles 3D communs. Cette application est basée sur la plateforme AVANGO (Avango,1999) développée par l'équipe Virtual Environments du Fraunhofer Institut Medienkommunikation. Le principe est de filmer en stéréoscopie un participant et de retransmettre ces images aux autres participants. Ceux-ci, équipés de lunettes de stéréovision, voient alors leur interlocuteur comme s'il était en face d'eux.

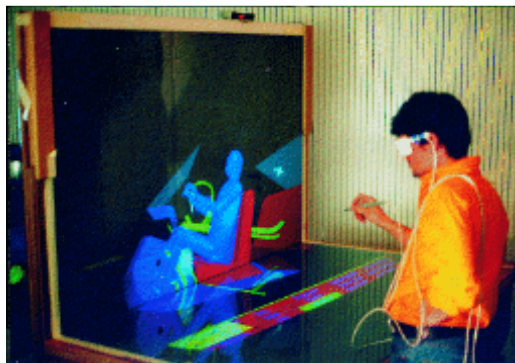


Figure 22. Interaction sur des objets virtuels dans Immersive telepresence.

Cette plateforme permet également de gérer la communication audio. Pour améliorer l'immersion, le son transmis est spatialisé, c'est-à-dire que le son reçu par un utilisateur est

modifié en fonction de la position 3D de l'utilisateur distant. En plus du retour visuel et sonore, il est possible de partager un même espace virtuel pour visualiser des modèles 3D ou travailler dessus en commun.

#### II.4.4.4 - Projet Blue-c

Blue-c est projet de l'Edgenossiche Technische Hochschule Zurich (ETZH) et de l'Universitat Zurich. Il permet de réunir plusieurs utilisateurs dans le même EV en utilisant des périphériques de type CAVE (Naef, Staadt, & Gross, 2005) (figure 23).

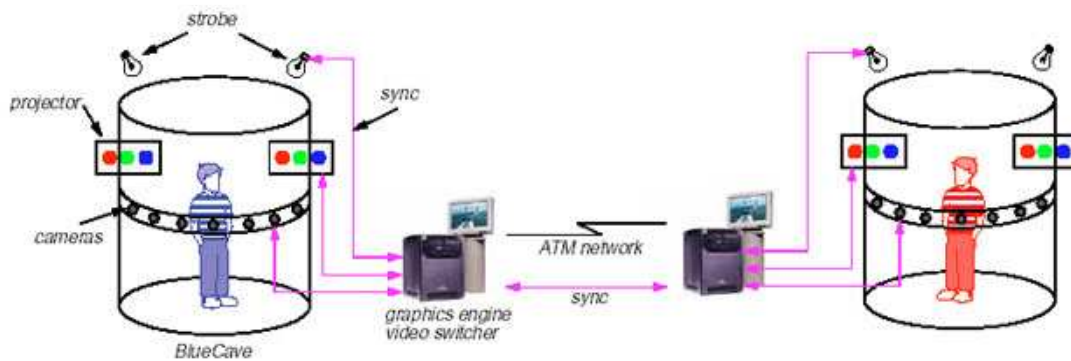


Figure 23. Principe du fonctionnement de la plate forme BLUE-C.

L'originalité de ce projet provient des moyens mis en œuvre afin de représenter les utilisateurs dans l'EV. Plusieurs caméras sont utilisées afin de construire un avatar ayant la forme de l'utilisateur. L'avatar reconstruit est affiché sous forme d'un nuage de points et donne une idée de l'aspect 3D de l'utilisateur. Deux applications collaboratives sont développées sur la base de cette plateforme : une application qui permet de visualiser des ensembles d'information à plusieurs et une application de peinture à plusieurs sur les objets du monde virtuel (sans représenter les utilisateurs).

#### II.4.4.5 - Projet CAVALCADE

Le projet européen CAVALCADE est une application de prototypage virtuel collaboratif bâtie sur la plateforme VIPER (VIPER., 1998) afin de tester, valider et documenter une

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants d'immersion virtuelle

maquette numérique. L'aspect collaboratif se traduit par la possibilité de manipuler à plusieurs une même maquette virtuelle au travers d'opérations de création, de déplacement ou de suppressions d'objets, d'assemblage ou de tests fonctionnels.

Les acteurs d'une session de travail collaboratif peuvent communiquer par le lien audio et/ou vidéo, grâce à un micro et une webcam. Une particularité de ce logiciel réside dans les moyens d'interaction mis en œuvre (figure 24). En effet, la manipulation de la maquette peut se faire à l'aide des traditionnels claviers et souris mais aussi par l'association de la commande vocale (Torguet et al., 1999)

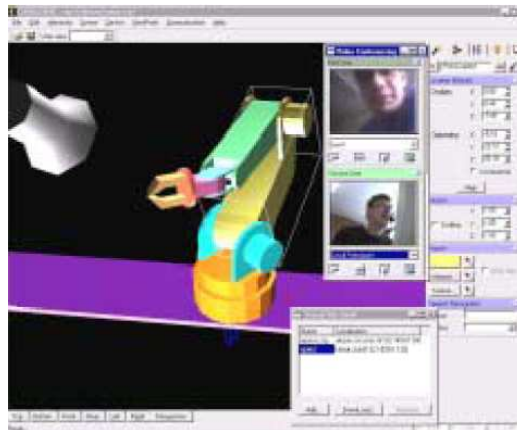


Figure 24. Logiciel de prototypage virtuel CAVALCADE

#### II.4.4.6 - Projet DIVIPRO

Le projet européen DIVIPRO est une application de prototypage CAO permettant à plusieurs utilisateurs de manipuler et d'interagir sur des maquettes virtuelles composées d'éléments rigides et flexibles (figure 25) (Divipro,2000). Son objectif est de pouvoir simuler des opérations d'assemblage et désassemblage afin de vérifier l'opérabilité et la validité des processus de maintenance sur des produits prototypés par les ingénieurs. Le projet DIVIPRO repose sur la plateforme DEVA pour la distribution des données et sur la plateforme MAVERIK pour le rendu.

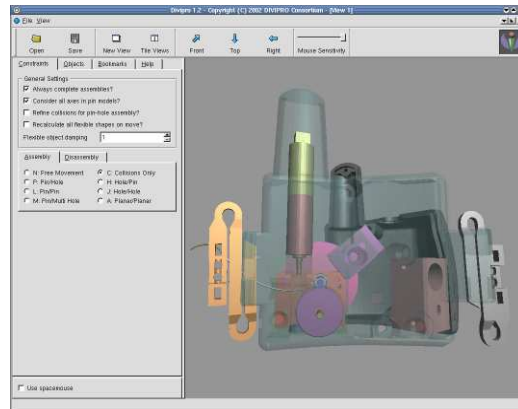


Figure 25. Assemblage d'une pièce CAO en mode collaboratif dans DIVIPRO

Cette application utilise deux architectures réseau. La première est une architecture client/serveur. Chaque client se connecte à un serveur contenant le moteur de contraintes de l'application, ce qui permet de maintenir plus facilement la cohérence. La deuxième architecture est adaptative et efficace dans le cas d'un réseau plus étendu comme Internet. Le serveur de contraintes se déplace de client en client en fonction des besoins en interaction.

#### II.4.4.7 - Produit CATIA

La suite logicielle CATIA (figure 26) de Dassault Systèmes propose elle aussi des modules autorisant le travail collaboratif sur les modèles CAO produits, notamment pour la revue de projet. Le module Instant Collaborative Design se charge de l'édition à plusieurs d'un même modèle. En outre, des outils offrent des fonctionnalités facilitant l'intégration de travaux effectués par plusieurs équipes.

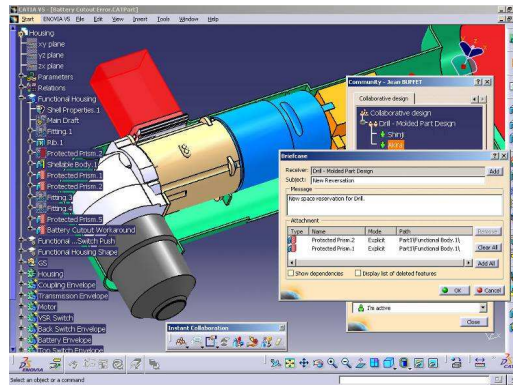


Figure 26. Exemple d'un prototype CAO collaboratif avec le logiciel CATIA.

#### II.4.4.8 - Produit DIVISION Mockup

Issu de la série de logiciels DIVISION de la société PTC, suite dédiée à la conception de modèles CAO et à la revue de projet, DIVISION Mockup est un outil de présentation collaboratif de maquettes virtuelles. Prenant en entrée des modèles CAO dans les formats standards, il permet une navigation tridimensionnelle dans l'environnement de la maquette. Des options rendent accessibles les modèles 3D au travers d'un navigateur Web, facilitant le travail en équipe.

La collaboration en temps réel autorise les utilisateurs à manipuler la maquette de sorte que tous les participants voient effectivement les changements. Pour ce faire, la maquette est distribuée et des messages de mise à jour sont envoyés sur le réseau. Ces fonctionnalités permettent de réaliser des revues de projet autour de maquettes numériques permettant de simuler des fonctionnalités du produit. Des méta-données sont associées aux composants de la maquette, réalisant ainsi une documentation du modèle accessible aux membres de l'équipe de conception.



#### II.4.4.9 - Projet perf-rv

Dans le cadre du projet français perf-rv, financé par le RNTL, des démonstrateurs ont montré la possibilité de collaborer à distance sur une même maquette numérique, avec utilisation de périphériques à retour d'effort.

La plate forme OpenMASK a été utilisée, les applications intégrant un moteur physique permettant les calculs de collisions entre les objets simulés, et la gestion de contraintes dynamiques.

#### II.4.4.10 - Argonaute 3D

Argonaute 3D se présente sous la forme d'un portail internet sécurisé, donnant accès aux données du dossier médical d'un patient, et à un module 3D reconstruit à partir des coupes 2D réalisées par scanner ou IRM.

Les médecins se retrouvent dans un salon virtuel, représentés par des avatars à forme humaine. Ils peuvent communiquer au travers des gestes et mouvements de ces avatars et également par un lien audio.

Le projet utilise la plateforme 3D collaborative appelée SPIN 3D (Degrande,2002) développée conjointement par France Telecom et le LIFL (Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille).

#### II.4.4.11 - Group-Slicer

L'objectif de Group-Slicer (Simmross-Wattenberg et al., 2005) est de donner la possibilité à plusieurs médecins sur différents postes de travail de partager les mêmes données et points de vue pour analyser une situation de façon collaborative. L'idée est d'ajouter une petite fenêtre à l'application originale qui va proposer les actions nécessaires à la prise de contrôle de l'application s'effectuant à tour de rôle. Lorsque l'application est sous le contrôle d'un participant, on peut demander à prendre le contrôle, que l'on obtiendra dès que l'utilisateur courant aura fini. Un mode « chat » permet aux participants de communiquer par texte.

Pendant la session, seuls les événements et les actions de l'utilisateur sont transmis par le réseau, en utilisant une architecture client-serveur assurant la synchronisation de l'affichage des informations.

#### II.4.4.12 - Projet VET

VET- Virtual Environment for Training (W. L. Johnson, 1995)(W. L. Johnson, 2000), est un projet destiné à la formation de personnels à la manipulation de machineries complexes utilisant un EV. Dans cet environnement, STEVE est un agent autonome dont le but est d'enseigner les modes opératoires des machines à un ou plusieurs participants. Les utilisateurs interagissent avec l'environnement simulé en utilisant un gant de données, des capteurs de position et un casque HMD.

#### II.4.4.13 - Projet SécuRéVi

Le projet français SécuRéVi est une application destinée à démontrer la faisabilité d'un environnement de formation basé sur des systèmes multi-agents, et à former des officiers au commandement pour la sécurité civile (Querrec. et al, 2003). Il s'agit d'une illustration du modèle MASCARET (multi-agent system for collaborative, adaptative and realistic Environments for Training) décrivant la façon dont les agents peuvent se comporter et interagir dans le contexte du travail collaboratif et procédural.

Le système permet de placer l'élève officier (l'application SécuRéVi est destinée à la formation à la gestion opérationnelle et au commandement pour les officiers sapeurs-pompiers) dans une situation difficilement réalisable de façon réelle, car demandant souvent trop de moyens, d'organisation ou bien présentant trop de danger.

L'application ne semble pas être multiutilisateurs, mais l'architecture, basée sur les systèmes multi-agents, permettrait de remplacer les personnages virtuels autonomes par des utilisateurs, qui pourraient être immergés dans l'environnement des formations et exécuter les gestes plus techniques nécessaires à la réalisation d'une tâche.

## II.4.5 - Études empiriques dans les EVC

### II.4.5.1 - Réalisme et l'apparence des avatars

Le niveau de réalisme des avatars dans les EVCs a été étudié sous différents angles afin d'évaluer l'impact de ce facteur sur l'interaction sociale dans les EVCs.

Parise a étudié l'impact du photoréalisme des agents virtuels sur la coopération dans le cadre de l'expérience "*My Partner is a Real Dog: Cooperation with Social Agents*" (Parise. et al, 1996). Les résultats de cette expérience montrent que les participants ont coopéré fortement avec les agents virtuels de type humain. Ils ont aussi apprécié les agents virtuels de type chien et la représentation de type « cartoon » de chien.

Gerhard a étudié l'influence de deux facteurs sur le degré de la présence dans les environnements virtuels de collaboration éducatifs. Le premier facteur est le modèle d'avatar (Gerhard, Moore, & Hobbs, 2001b). Dans cette expérience trois types d'avatars ont été utilisés : (i) avatars de type Shape, (ii) avatars de type cartoon et (iii) avatar de type humanoïde. Le deuxième facteur est la représentation continue des utilisateurs. Un modèle hybride d'avatar-agent comportant un agent conversationnel animé pour commander l'avatar pendant l'absence de son utilisateur a été mis en œuvre. Les résultats de cette étude montrent que le degré de la présence est plus élevé en utilisant les avatars de type humanoïde. On constate également que l'utilisation d'humanoïdes génère un niveau plus important d'immersion, de communication, d'implication et de conscience que les deux autres types d'avatars. Cette étude montre aussi que la représentation permanente des utilisateurs est un facteur important de coprésence. Elle donnerait aux autres participants une procuration persistante pour la communication et la collaboration.

Nowak montre qu'un faible niveau d'anthropomorphisme donne un niveau de coprésence et de présence sociale plus important qu'un anthropomorphisme plus élevé ou un anthropomorphisme nul (Nowak & Biocca, 2003). En effet, un niveau d'anthropomorphisme élevé crée chez les participants des attentes plus élevées en terme de fidélité de représentation.

Aussi, lorsque ces attentes ne sont pas respectées (ce qui est souvent le cas avec les niveaux de représentations relativement faibles des avatars actuels), le niveau de présence est réduit.

#### II.4.5.2 - Intuitivité

Greenhalgh a étudié la question de l'intuitivité dans la plateforme de téléconférence MASSIVE (Greenhalgh & Benford, 1995). Ce système permet aux utilisateurs de communiquer avec en utilisant des combinaisons arbitraires de type audio, graphique et texte. Les résultats de cette étude montrent le rôle important de la communication audio et du champ de vision dans la collaboration.

#### II.4.5.3 - Problèmes de Turn-taking<sup>3</sup>

Bowers (Bowers et al., 1996) a abordé les problèmes de turn-taking dans le cadre d'un EVC. Il a conclu que les utilisateurs de ce type d'environnement utilisent systématiquement leur représentant virtuel afin de résoudre ou d'anticiper les problèmes de turn-taking. Par exemple, les utilisateurs positionnent leur avatar en face de l'avatar de l'autre utilisateur pour créer un « face engaged ».

#### II.4.5.4 - Dynamique de groupe

Afin d'évaluer la dynamique des petits groupes, Slater (Slater. et al, 2000) a réalisé une expérience qui consiste à demander à un groupe de trois personnes de réaliser une tâche collaborative dans une situation réelle « face à face », puis dans une situation virtuelle (dans un EVC). Cette étude est importante car nous avons ici un modèle d'un EVC asymétrique. En effet, il y a deux participants qui utilisent un simple écran d'ordinateur, puis le troisième participant utilise un dispositif d'affichage de type HMD. Les résultats de cette étude montrent qu'il y a un phénomène de leadership qui apparaît chez l'utilisateur du casque HMD ; ce phénomène disparaît dans la situation de face à face.

---

<sup>3</sup> Turn-taking : prise de parole

Casanueva a également étudié l'effet de la collaboration de groupe sur la présence et la coprésence (Casanueva & Blake, 2000). Les résultats de son étude montrent que le niveau de la présence est plus élevé dans le cadre d'une collaboration élevée. Dans cette étude, on constate aussi que la coprésence augmente si le niveau de la collaboration est élevé.

#### II.4.5.5 - Cross media

Dans cette optique, on peut citer les travaux de Nakanishi (Nakanishi. et al, 1998), qui a comparé le discours et les déplacements des utilisateurs dans trois situations différentes : le face à face, le FreeWalk<sup>4</sup> et la vidéoconférence. Ses résultats montrent que les participants communiquent plus dans le cadre du FreeWalk par rapport aux autres situations. Également il a constaté que les participants se déplacent plus dans cette situation (FreeWalk).

L'effet des moyens de communication sur la présence sociale, la présence virtuelle et les performances dans un EVC a été abordé dans les travaux de Sallnas (Sallnas, 2005). Dans une première expérience, Sallnas a comparé trois types de communication : le chat, l'audio et l'audio-vidéo. Les résultats de cette première expérience montrent que le niveau de la présence sociale et la présence virtuelle est plus bas dans la condition du chat. De même, les utilisateurs de l'audio-vidéo dialoguent moins. Dans la seconde expérience, il a comparé la collaboration dans le web conférence et les EVCs. Cette expérience montre que les utilisateurs passent plus de temps dans la condition vidéo. Aussi dans la condition web, les participants ont tendance à échanger plus de mots par seconde. Suite à ces expériences, Sallnas a suggéré l'importance de choisir soigneusement le type de communication dans les EVCs car cela influence considérablement la collaboration.

## II.5 - Conclusion

la RV ne cesse de gagner du terrain dans de nouveaux champs d'applications diverses et variées allant de l'enseignement jusqu'à la création artistique en passant par l'architecture et la

---

<sup>4</sup> FreeWalk est une plateforme où les participants et les agents autonomes peuvent interagir socialement dans espace virtuel

médecine. Cependant, la RV induit toujours un intense débat philosophique, artistique et scientifique. Il y a deux catégories de définitions de la RV, une se situant d'un point de vue psychologique (M. Slater & Usoh, 1994) et une du point de vue technologique (Ellis, 1994). Nous pensons que les deux définitions sont intéressantes et complémentaires.

Malgré les avancées considérables de la RV au point de vue visuel, il reste encore des problématiques à étudier dans l'interaction 3D. Des tâches simples comme la navigation, la sélection, la manipulation, le contrôle d'application s'avèrent difficiles à réaliser (Mine, 1995) : la façon dont l'utilisateur interagit avec l'EV change par rapport au monde réel. Nous utilisons des périphériques d'entrées spécialement conçus afin de détecter les actions de l'utilisateur. Également, des métaphores d'interaction sont utilisées pour traduire les actions de l'utilisateur de ce monde virtuel.

Plusieurs questions se posent lors de l'utilisation des métaphores d'interaction dans le cadre d'une tâche collaborative dans un EVC, ces questions sont de nature psychologique, sociale ou encore liées à la performance de la tâche.

Fort de notre état de l'art sur la RV et sur les EVCs, de nos connaissances de l'interaction 3D et de la communication interpersonnelle, nous allons présenter dans le chapitre suivant notre approche scientifique.



## Chapitre III - Approche scientifique

### III.1 - Introduction

Le chapitre précédent a permis de faire un état de l'art sur les EVCs, les modèles fondamentaux de communication interpersonnelle, les résultats de principales études empiriques sur les EVCs ainsi qu'un état de l'art sur l'interaction 3D. Le but de ce chapitre est d'explicitier l'approche scientifique que nous avons adoptée dans ce travail de thèse afin de trouver des réponses à notre problématique de recherche.

Dans la section 3.2 de ce chapitre, notre question de recherche est exposée ainsi que la méthode adoptée pour étudier cette question. Un bref rappel sur les méthodes d'évaluation en RV sera présenté dans la section 3.3, ainsi que la méthode d'évaluation utilisée dans notre étude. La section 3.4 décrit les variables dépendantes mesurées dans nos expériences. Enfin, dans la section 3.5, les conditions (variables indépendantes) de chaque expérience sont présentées.

### III.2 - Problématique scientifique

En se basant sur la décomposition de Mine pour l'interaction 3D en EV (Mine Mark R., 1995), nous considérons que dans un EVC les utilisateurs ont besoin d'effectuer deux types de tâches. La première tâche est une tâche de sélection/manipulation, cette tâche consiste à sélectionner/désélectionner un objet et le manipuler c'est-à-dire changer sa position et son orientation. La deuxième tâche est une tâche de navigation qui consiste à se déplacer dans un EV. Pour chacune de ces tâches, les problématiques que nous relevons sont les suivantes :

Pour la navigation

- Comment se déplacer dans un EVC ?
- Comment l'utilisateur interprète son point de vue ?



- Comment l'utilisateur interprète le point de vue de ses partenaires ?

Pour la manipulation/sélection

- Comment gérer la prise en main des objets (droit d'utilisation, gestion des conflits) ?
- Comment indiquer son action et/ou les actions des autres utilisateurs ?

La question de recherche découlant de ces problématiques et que nous souhaitons étudier est la suivante :

**« Quel est l'effet des métaphores d'interaction sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC ? »**

Afin de contribuer à la résolution de cette question de recherche, nous proposons l'approche suivante schématisée par la figure 27.

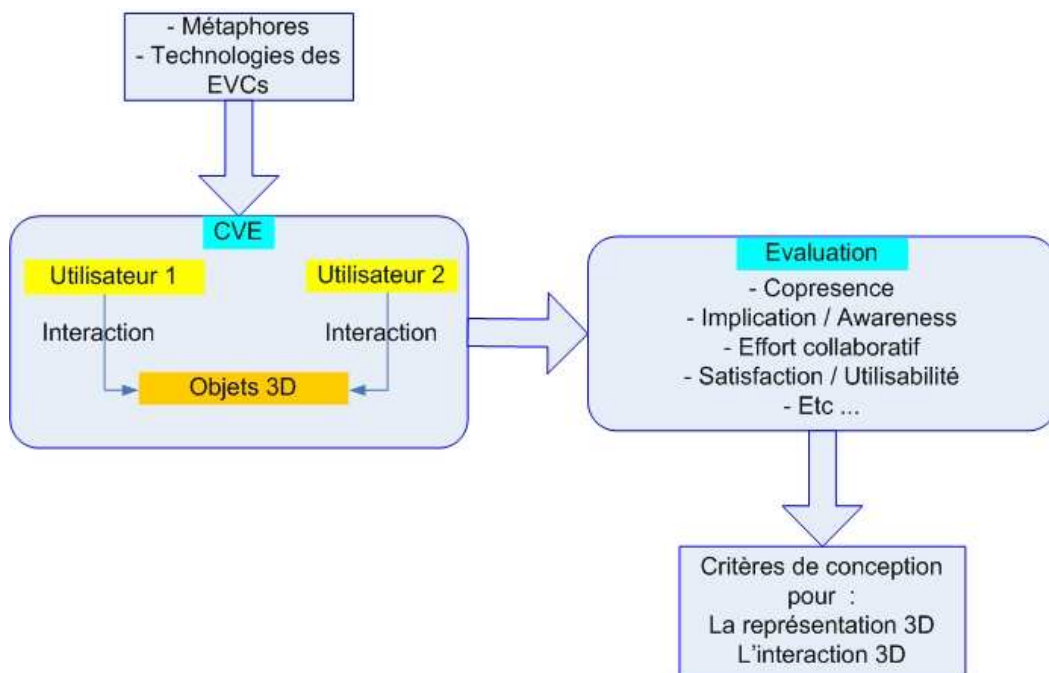


Figure 27. Approche scientifique proposée

L'approche proposée consiste à développer une méthodologie permettant l'évaluation de l'expérience de l'utilisateur en fonction de métaphores d'interaction pour les EVC. Afin d'améliorer le travail collaboratif entre sites distants utilisant des technologies de réalité virtuelle, des métaphores d'interaction sont mises en œuvre. L'expérience de l'utilisateur dans un EVC doit être évaluée à l'aide de critères qui sont ceux du travail collaboratif à distance couplé à la réalité virtuelle. Les critères utilisés, appuyés par la littérature de ces domaines, s'expriment par la coprésence, l'implication, l'effort collaboratif, l'awareness, l'utilisabilité, la satisfaction, la présence sociale. L'EVC nécessite des techniques pour rendre les interactions possibles avec la personne à distance et avec les données. L'évaluation de ces techniques est nécessaire pour définir des critères de représentation et d'interaction qui pourront servir à piloter la conception des nouvelles générations d'EVC. Il existe ainsi un couplage fort entre les considérations technologiques et les facteurs humains.

### III.3 - Méthode d'évaluation

#### III.3.1 - Introduction

Il y a quelques années, l'évaluation des EV était peu présente lors du processus de sa conception. En effet, les concepteurs des EV se contentaient de réaliser quelques évaluations superficielles (études de cas impliquant un nombre limité d'utilisateurs).

De nos jours, l'évaluation est un concept important qui permet de guider le processus de conception. La majorité des techniques d'évaluation des EVs sont des techniques adaptées du domaine de l'interaction homme machine (IHM). L'évaluation des EVs présente des différences par rapport à l'évaluation des IHM qui peuvent être classées en quatre éléments :

- **Aspects physiques** : l'EV existe dans un contexte réel. Par exemple, dans un EV de type CAVE, les murs physiques sont invisibles à cause du graphique projeté. Les mouvements de l'utilisateur doivent donc être restreints. Également l'évaluation en

ligne est une évaluation purement visuelle, cela devient difficile quand l'affichage graphique de la scène est centré sur l'utilisateur.

- **Aspect liés à l'évaluateur** : le processus d'évaluation peut perturber l'expérience. Cela peut influencer la sensation de présence de l'utilisateur. De même, les instructions données à l'utilisateur avant l'expérience doivent être détaillées, explicites et précises.
- **Aspects liés à l'utilisateur** : Quelle population de sujets faut-il choisir afin de réaliser une expérience en RV ?
- **Choix de la technique d'évaluation** : différentes techniques d'évaluation sont proposées dans la littérature. La figure suivante propose une classification de certaines d'entre elles (Bowman et al., 2004).

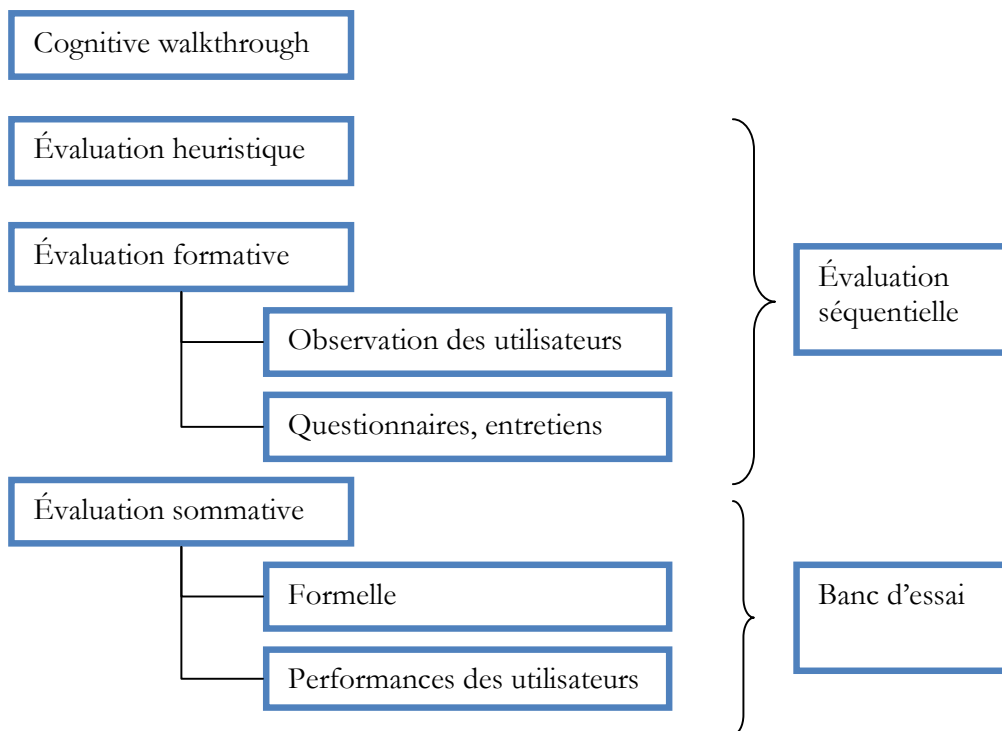


Figure 28. Classification des techniques d'évaluation

### III.3.2 - Choix de la technique d'évaluation

Il existe plusieurs techniques d'évaluation en RV. Le choix d'une technique d'évaluation est généralement lié au contexte de l'expérience. Dans cette partie, nous allons présenter les principales techniques d'évaluation.

**Cognitive walkthrough** - Il s'agit d'une technique d'évaluation où chaque tâche principale du système est analysée par des experts en utilisant des questionnaires détaillés sur chaque partie de la tâche. Par exemple : « Est-ce que l'utilisateur peut transformer ses intentions en actions ? ». Si la réponse est positive, les métaphores d'interaction sont suffisamment naturelles ou faciles à apprendre.

**Évaluation heuristique** - Elle est réalisée par des experts en conception des interfaces utilisateur qui utilisent un guide de conception. Par exemple, l'expert va tester si l'interface vérifie la règle de conception suivante : « éliminer tous les degrés superflus de liberté pour la technique de manipulation implantée dans l'EV ».

**Évaluation formative** - Cette évaluation est utilisée pour affiner la conception d'une technique d'interaction ou d'une métaphore d'interaction. Généralement, deux modes d'évaluation formative sont utilisés :

- En ligne : études d'observation réalisées sur des utilisateurs (la présence simultanée de l'utilisateur et de l'expert est requise)
- Hors ligne : questionnaires, entretiens, enregistrements audio et/ou vidéo.

**Évaluation sommative** - Cette évaluation consiste à comparer plusieurs techniques pendant une seule séance d'évaluation. On peut donner comme exemple l'étude de la technique la plus adéquate pour l'accomplissement d'une tâche spécifique. Dans ce cas, le contexte d'évaluation sommative est formel (protocole expérimental strict, sélection des utilisateurs etc.). Les résultats des expériences formelles sont habituellement quantitatifs et

sont analysés statistiquement (Bowman, Ohnson, & Hodges, 1999a). (Bowman et al., 1998) (Poupyrev et al., 1997).

Dans nos travaux de thèse, nous avons décidé d'utiliser la méthode sommative afin d'évaluer l'effet des métaphores d'interaction sur l'expérience de l'utilisateur car c'est la méthode qui s'adapte le plus à notre question de recherche.

Deux séries d'évaluation ont été conduites afin d'étudier notre question de recherche :

- Une première expérience pour la navigation en investiguant trois métaphores de navigation et en mesurant l'impact de ces métaphores de navigation sur l'ensemble des éléments qui sont liés à l'expérience de l'utilisateur dans le cadre d'une tâche collaborative.
- Une deuxième expérience pour la sélection/manipulation en investiguant l'impact de trois métaphores de sélection/manipulation sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC.

Dans les deux sections suivantes, nous allons présenter les variables mesurées (variables indépendantes) et les techniques de navigation et de sélection/manipulation utilisées (variables dépendantes) pour les deux expériences.

### III.4 - Mesures

Dans nos expériences, nous avons utilisé deux types de mesures en nous appuyant sur la littérature.

#### III.4.1 - Mesures subjectives

A l'aide d'un questionnaire, nous mesurons les variables décrites par le tableau suivant. Pour chaque mesure, nous choisissons des questions s'adaptant ou adaptées à notre question de recherche d'après des sources bibliographiques (tableau 1).

Tableau 1. Liste des variables mesurées par des questionnaires

Mesure	Source bibliographique	Description
Coprésence	(Schroeder et al., 2001)	Deux questions sont adressées pour évaluer la coprésence
Effort collaboratif	(Biocca, Harms, & Gregg, 2001)	Quatre questions sont adressées dans le questionnaire afin d'évaluer la perception de l'effort collaboratif
Implication/ Awareness'	(Gerhard, Moore, & Hobbs, 2001a)	Quatre questions sont adressées aux utilisateurs pour mesurer le degré de l'implication et trois questions pour l'awareness
Présence sociale	(Short, Williams, & Christie, 1978)	Pour mesurer la notion de la présence sociale, nous utilisons la sémantique différentielle selon la technique de Short & Christie
Utilisabilité	(Anneli et al., 1994)	Quatre questions visent à évaluer l'utilisabilité de chaque technique
Satisfaction	(Anneli et al., 1994)	Nous comparons également la satisfaction des utilisateurs pour les trois conditions à l'aide de trois questions
Préférences		Nous évaluons également les préférences des utilisateurs pour les trois techniques proposées en utilisant quatre questions

### III.4.2 - Mesure objective

Nous proposons de mettre en œuvre une mesure objective constituée de la performance de la tâche. Pour la performance de la tâche, nous mesurons le temps d'accomplissement de la tâche.

### III.4.3 - Description des mesures

#### III.4.3.1 - Coprésence/ Présence sociale

La présence en RV est définie comme un état psychologique « d'être là » dans un environnement virtuel dans lequel la personne est immergée (Held & Durlach, 1992). Selon Slater, la présence est la perception d'être dans un monde autre que le monde réel (Slater & Usoh, 1994). Généralement, il existe différents types de présence. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons à deux formes de présence : la coprésence et la présence sociale.

#### III.4.3.2 - Coprésence

La coprésence est le sentiment d'existence avec d'autres personnes dans le même environnement virtuel (Casanueva & Blake, 2001). Selon Harms (Harms & Biocca, 2004), la coprésence est le degré auquel un observateur présent dans l'environnement croit qu'il n'est pas seul ou isolé. Également, la coprésence est liée au niveau d'awareness de la présence de l'autre personne présente dans le même environnement. Ruth (Ruth, 2005) souligne que la coprésence est une notion liée à une awareness mutuelle des interactions des autres participants.

Il existe plusieurs questionnaires qui visent à mesurer le sentiment de coprésence dans un EVC. Dans notre travail de recherche, nous avons décidé d'utiliser le questionnaire de Schroeder qui s'adapte le mieux à notre contexte d'expérience. En effet, nous utilisons la même tâche de puzzle 3D que Schroeder a utilisé pour ce questionnaire (R. Schroeder et al., 2001) (voir chapitre 6).

### III.4.3.3 - Présence sociale

Selon IJsselsteijn, la présence sociale est le sentiment d'être ensemble avec une autre personne dans un EV (IJsselsteijn & Riva, 2003). Pour Sallnas, « la présence sociale se rapporte au sentiment d'être socialement présent avec une autre personne située dans un site éloigné » (Sallnas, 2005). Cette notion existe seulement si au moins deux personnes coexistent dans le même EV (cas d'un EVC). La présence sociale peut être définie aussi comme « le degré de prépondérance de l'autre personne » (Short et al., 1978).

Biocca a tenté d'intégrer toutes les définitions existantes de la présence sociale dans une théorie plus générale ; afin de faciliter aux chercheurs la mesure de la présence sociale (Biocca et al., 2001). Biocca et al définissent ainsi la présence sociale comme :

*« La conscience permanente de la coprésence d'une autre personne, sensiblement accompagnée d'un sentiment d'implication avec l'autre. La présence sociale varie d'un sentiment léger à un sentiment plus profond de la coprésence, de la participation psychologique, et de l'implication comportemental avec l'autre. Car un sentiment permanent de la présence sociale est le résultat de stimulations cognitives (inférences), émotives et comportementales ».*

La présence sociale est un sentiment subjectivement éprouvé par un utilisateur sous la forme « d'un état mental ». Ceci signifie que la présence sociale ne peut être mesurée que d'une façon subjective. Pour évaluer la présence sociale, nous utilisons la méthode de Short et Christie (voir annexe A). En effet, Short et Christie ont appliqué la technique de la sémantique différentielle pour mesurer la présence sociale (Short et al., 1978), qui a été développée par (Osgood, Suci, & Tannenbaum, 1957). Cette technique consiste à mesurer la signification subjective d'un concept (réel ou abstrait) en fonction des attributs bipolaires antinomiques sur une échelle de sept points.

### III.4.3.4 - Effort collaboratif

L'effort de collaboration est le travail que deux associés fournissent pour réaliser une tâche spécifique dans un contexte de collaboration. La qualité de l'effort de collaboration n'est pas

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle



forcément liée au succès de la tâche. Nous employons la mesure de Biocca pour évaluer cette notion (Biocca et al., 2001) (voir annexe A).

#### III.4.3.5 - Awareness

Dans un EVC, la connaissance des actions et intentions de l'autre personne est appelée awareness (en français « prise de conscience »). L'awareness est un concept très important dans le processus de collaboration.

Greenberg et al décrivent quatre types d'awareness que des personnes maintiennent lorsqu'ils travaillent en groupe (Greenberg, Gutwin, & Cockburn, 1996) :

- **Awareness informelle** ('informal awareness') qui concerne le groupe de travail, comme par exemple les personnes présentes.
- **Awareness sociale** ('social awareness') qui portent sur les aspects sociaux de la collaboration comme « l'attention que porte les participant » « leur motivation »,
- **Awareness de la structure du groupe** ('group-structural awareness'), comme par exemple le rôle de chaque participant.
- **Awareness de l'espace de travail** ('workspace awareness') qui concerne la connaissance d'une personne de l'espace de travail, comme par exemple ce que les autres participants sont en train de faire.

Dans notre contexte de recherche, nous proposons de considérer l'awareness comme le degré de connaissance qu'une personne a de l'environnement dans lequel il se trouve. Cette connaissance peut être divisée en deux types :

- interne (par exemple la perception par l'utilisateur de sa propre existence dans l'EV ou la perception de ses propres actions).
- externe (par exemple la perception de l'existence des autres participants dans l'environnement et la perception des actions des autres).

Pour mesurer cette notion d'awareness, nous utilisons un questionnaire de Gerhard (Gerhard et al., 2001a) (voir annexe A).

#### III.4.3.6 - Implication

L'implication peut être définie comme le niveau de motivation des participants dans leur activité. Selon Hofmann (Hofmann & Bubb, 1999), l'implication est une forme de présence qui décrit jusqu'à quel niveau attentionnel les utilisateurs sont dirigés vers l'EV.

Dans notre travail de recherche, nous considérons que l'implication est constituée de deux niveaux :

- Implication de l'utilisateur par rapport à l'EV (c.-à-d. l'acceptation de l'utilisateur de son existence dans l'environnement).
- Implication de l'utilisateur dans la réalisation de la tâche.

Afin d'évaluer cette notion d'implication, nous utilisons le questionnaire de Gerhard (Gerhard et al., 2001a) (voir annexe sur questionnaire).

#### III.4.3.7 - Utilisabilité

Selon Beth (Beth & Carroll, 2002), l'utilisabilité est la qualité qu'un système offre au niveau de la facilité d'apprentissage, la facilité d'utilisation et la satisfaction de l'utilisateur. Cela signifie qu'il y a trois facteurs qui contribuent à l'utilisabilité d'un système. Ces facteurs sont l'exécution humaine, l'effort cognitif et l'activité de collaboration. Beth souligne que ces facteurs sont complémentaires. Selon Schuemie (Schuemie, 2003). L'utilisabilité est l'efficacité et la satisfaction avec lesquelles un utilisateur réalise une tâche spécifique. Van Wyk (Van Wyk & de Villiers, 2008) indique que le contexte dans lequel un système ou un outil sont utilisés influence leur utilisabilité.

Nous avons adapté le questionnaire d'Anneli (Anneli et al., 1994), pour pouvoir l'utiliser afin d'évaluer l'utilisabilité dans nos expériences (voir annexe A).

#### III.4.3.8 - Satisfaction

La satisfaction signifie l'acceptation de l'utilisateur des performances d'un outil ou d'un système. Cette notion a été évaluée à l'aide d'un questionnaire de Anneli (Anneli et al., 1994) (voir annexe A).

#### III.4.3.9 - Préférences

Les préférences des utilisateurs ont également été évaluées afin de déterminer les préférences de chaque participant.

### III.5 - Conditions expérimentales

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'interaction 3D peut être divisée en deux sous-tâches : la navigation et la sélection/manipulation. Dans ce cadre, les métaphores que nous avons utilisées sont les suivantes (ces métaphores sont détaillées plus dans les chapitres 5 et 6).

#### III.5.1 - Sélection/Manipulation

##### III.5.1.1 - Main virtuelle

Cette métaphore consiste à utiliser un mapping linéaire entre la main réelle de l'utilisateur et la main virtuelle pour sélectionner ou manipuler des objets virtuels.

##### III.5.1.2 - Ray casting

Dans cette métaphore, l'utilisateur utilise un rayon virtuel attaché à la main virtuelle pour la sélection et la manipulation des objets.

##### III.5.1.3 - GoGo

Cette métaphore ressemble à la première métaphore (main virtuelle) sauf qu'il y a deux types de mapping entre la main virtuelle et la main réelle de l'utilisateur : un mapping linéaire pour toucher les objets les plus proches de l'utilisateur et un mapping non linéaire pour les objets qui sont loin de l'utilisateur.

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

### III.5.2 - Navigation

#### III.5.2.1 - CARTE

Dans cette métaphore, l'utilisateur se déplace en changeant la position d'une icône sur une petite carte qui représente l'EV. L'utilisateur peut également voir le point de vue de son partenaire dans une petite fenêtre dans la scène.

#### III.5.2.2 - AVATAR

L'utilisateur contrôle directement dans cette métaphore les déplacements de son avatar en utilisant une interface de contrôle (Wiimote) pour naviguer dans l'EV. Dans cette métaphore, on retrouve également le point de vue du partenaire à l'aide d'une petite fenêtre.

#### III.5.2.3 - LAMPE

Dans cette métaphore, l'utilisateur contrôle ses déplacements de la même façon que la métaphore de l'AVATAR. La différence entre cette métaphore et la métaphore précédente consiste dans le point de vue du partenaire. En effet, le point de vue du partenaire est représenté directement dans la scène 3D en utilisant un éclairage.

### III.6 - Conclusion

Notre problématique scientifique porte sur l'étude de l'influence des métaphores d'interaction 3D sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC orienté tâche. L'investigation de cet impact pourra être bénéfique pour la définition de nouveaux critères et règles de conception pour les EVCs. Également, la compréhension de cette influence nous permettra de mieux comprendre l'expérience de l'utilisateur dans les EVCs du point de vue de l'interaction sociale.

Malheureusement, les EVCs manquent aujourd'hui d'une approche méthodologique générale pour évaluer les facteurs humains dans ce type d'environnement. Cela introduit un changement considérable dans les processus et les méthodes d'évaluation d'un groupe

scientifique à l'autre. La majorité des études effectuées a été basée essentiellement sur les méthodes d'évaluation des EV mono utilisateur.

Dans notre travail de recherche la méthode d'évaluation que nous avons utilisée est basée sur l'évaluation sommative. Pour les variables indépendantes, nous avons utilisé un questionnaire pour évaluer des notions subjectives comme la coprésence, la présence sociale, l'implication ...etc. D'autres mesures de type numérique ont été utilisées pour mesurer des concepts objectifs comme la performance de la tâche. Les variables indépendantes (conditions) de nos expériences sont trois métaphores de navigation pour la première expérience et trois métaphores d'interaction/manipulation pour la seconde.

Ces métaphores seront plus détaillées dans les chapitres suivants (voir chapitre 5 et 6)

## Chapitre IV - Technologies développées

### IV.1 - Introduction

Une plateforme du travail collaboratif est composée de plusieurs éléments, ces éléments sont de nature hardware (en rouge dans le schéma ci-dessous) ou software (en bleu dans le schéma ci-dessous) voir figure 29.

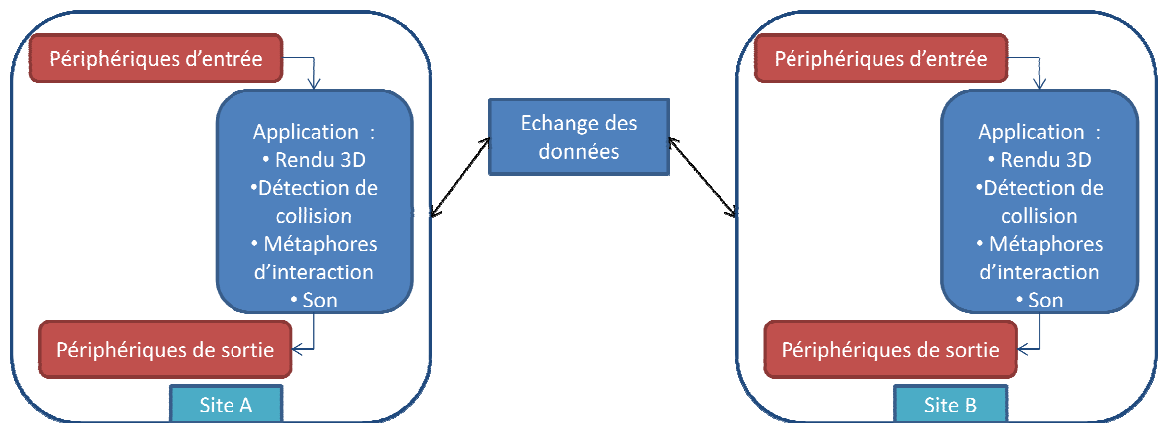


Figure 29. Architecture d'une plateforme collaborative

Dans ce chapitre, nous allons présenter les aspects techniques qui ont été développés dans ce travail de recherche. Ces aspects concernent pour les éléments hardware :

- Périphérique d'entrée : il s'agit des périphériques utilisés pour détecter les actions et les mouvements de l'utilisateur
- Périphérique de sortie : cela concerne le dispositif d'affichage.

Pour les éléments software :

- L'application : c'est l'implémentation informatique de l'environnement 3D.
- Les systèmes d'échange des données : il s'agit du protocole de communication utilisé pour le transfert des données entre les deux sites.

## IV.2 - Tracking 3D

### IV.2.1 - Problématique

La détection et le suivi d'un utilisateur ou d'une partie de son corps (par exemple la position et l'orientation de la main et de la tête) représentent une étape importante dans le processus d'interaction homme-machine (IHM) utilisant la réalité virtuelle (RV). Il existe plusieurs systèmes « classiques » (voire chapitre 2) utilisés pour réaliser cette fonction. On peut citer par exemple les systèmes magnétiques, les systèmes ultrasons ou encore les systèmes mécaniques. Certes, la majorité de ces systèmes fonctionnent avec de très bonnes précisions. Cependant, leurs coût est élevé et ils utilisent des accessoires disposés sur le corps de l'utilisateur pour faciliter la détection et le suivi (par exemple : câbles, capteurs, etc.). Par conséquent, ces dispositifs gênent l'utilisateur et limitent ses mouvements dans son expérience d'interaction 3D. Dans le cadre de la collaboration avec le CSIRO, les expériences devaient être réalisées au sein de l'équipe Human Factors du CSIRO à Sydney qui ne disposait pas de matériel de tracking 3D. Aussi, nous avons décidé de développer un système léger et de bas coût de tracking 3D dédié à nos expériences.

### IV.2.2 - Description du système

Notre système de tracking est basé sur la stéréoscopie (figure 30). Les deux caméras utilisées sont équipées de projecteurs de lumière qui émettent dans la gamme de l'infrarouge. Cette lumière est renvoyée par des marqueurs réfléchissants. Les images monochromes obtenues sont analysées par le système afin de reconstruire les positions spatiales des marqueurs en temps réel. La figure ci-dessous décrit le système développé (annexe C).

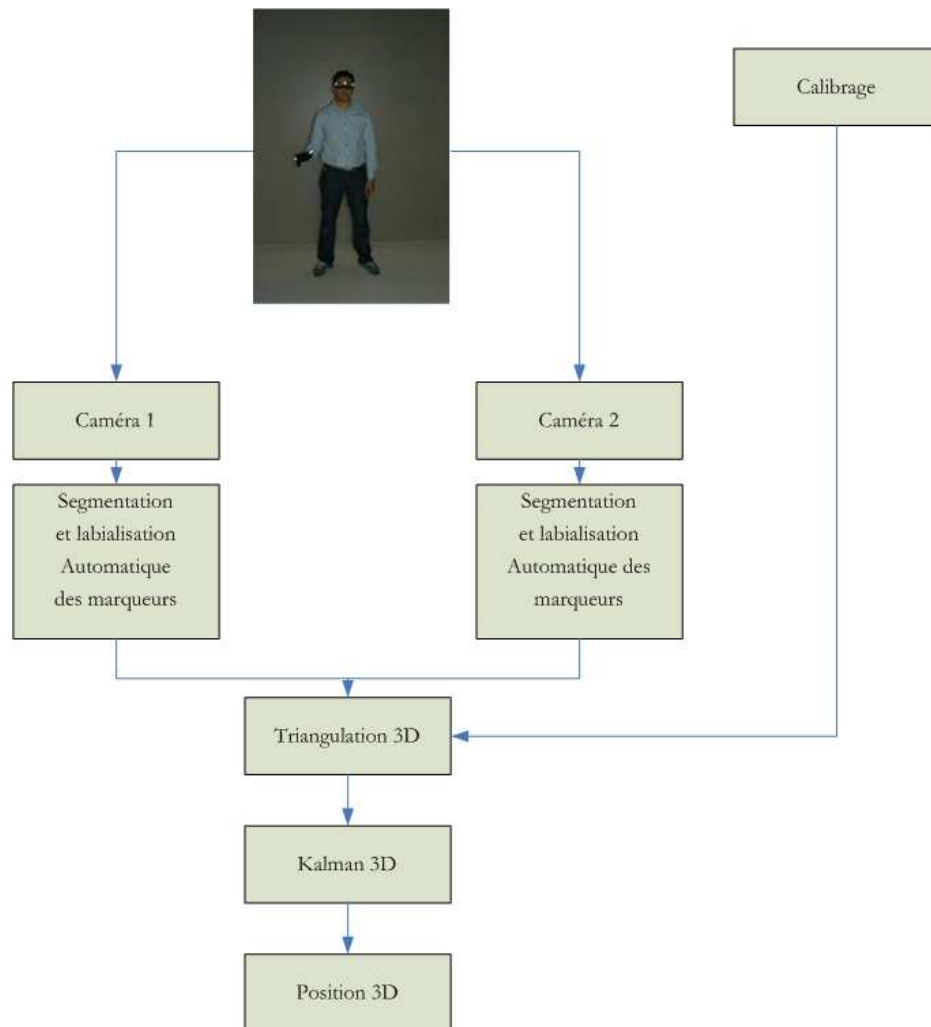


Figure 30. Principe du fonctionnement du système de tracking 3D

#### IV.2.3 - Calibrage d'un système de stéréovision

Le calibrage consiste à déterminer les paramètres d'une caméra ou d'un système de vision en utilisant une mire dont le modèle est connu. Notre système comporte deux caméras qu'il est nécessaire de calibrer pour obtenir les positions dans l'espace. Pour calibrer les deux webcams, nous utilisons une mire rigide composée de deux faces (figure 31). Chaque face est constituée de points remarquables dont on connaît exactement les positions les unes par rapport aux



autres. Les points remarquables sont dans notre cas des diodes infrarouges. Grâce à cette mire, on pourra obtenir par la suite les coordonnées précises des points voulus (figure 32).



Figure 31. Mire utilisée dans le calibrage

Soit  $[A]$  cette matrice de calibrage, qui est une matrice composée d'une matrice de rotation et une matrice de translation. Pour calibrer un système stéréoscopique :

- On commence par calibrer chaque caméra par rapport à une mire unique. Ceci nous fournit les coefficients de deux matrices  $[M1]$  et  $[M2]$ .
- On extrait ensuite les paramètres intrinsèques et extrinsèques de chaque caméra.
- A l'aide des paramètres extrinsèques, on construit deux matrices  $[A1]$  et  $[A2]$  ; la première étant la transformation du repère du monde au repère de la caméra gauche et la deuxième étant la transformation du repère du monde au repère de la caméra droite.
- On calcule ensuite  $[A]$

$$[A] = [A1]' \cdot [A2]^{-1}.$$

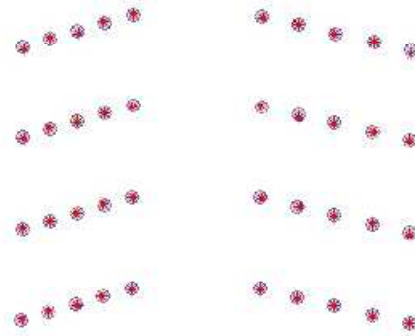


Figure 32. Résultat de points reconstruits après la calibration en rouge et des points théoriques en bleu

#### IV.2.4 - Détection des marqueurs infrarouges

Premièrement, chaque image capturée est binarisée en utilisant un seuil assez élevé (la couleur des marqueurs infrarouge est blanche dans l'image). Ainsi, on obtient dans l'image seulement les points correspondant aux marqueurs. Une fois cette image binarisée, elle est parcourue pixel par pixel pour détecter les "taches" de lumière. Dès qu'un pixel est détecté comme appartenant à un marqueur, le processus de détection de barycentre est déclenché : ce pixel est coloré en noir puis, chaque voisin du pixel est à son tour parcouru afin de vérifier son appartenance au marqueur. Si celui-ci est également blanc, on recommence la même opération sur lui. On parcourt ainsi tous les points du marqueur en cours de traitement. A chaque fois qu'un point est détecté comme appartenant au marqueur, ses coordonnées sont stockées dans un tableau. Une fois tous les pixels voisins parcourus, une moyenne des coordonnées est effectuée et on obtient ainsi les coordonnées du barycentre du marqueur. Une fois les coordonnées obtenues, le parcours de l'image reprend où il s'était arrêté. Chaque marqueur n'est détecté qu'une fois car chacun des pixels blancs d'un marqueur parcouru est coloré en noir. Les taches de couleur n'ayant pas une surface suffisamment importante sont ignorées (figure 33).

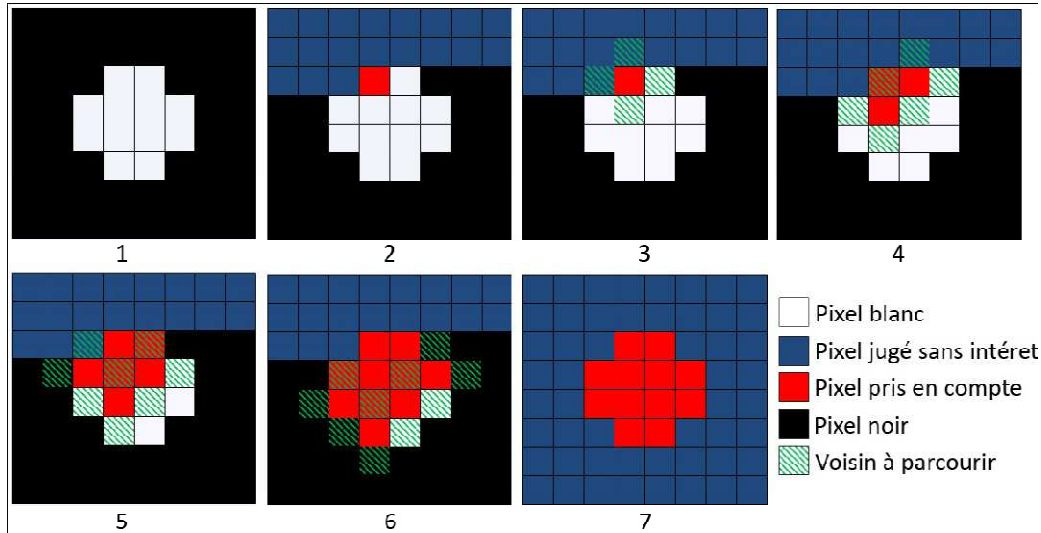


Figure 33. Principe de l'algorithme de détection des marqueurs

- 1 : Image de base avec un marqueur (pixels blancs).
- 2 : L'image est parcourue jusqu'à trouver le premier pixel blanc.
- 3 : On parcourt les voisins du pixel blanc.
- 4 : On parcourt les voisins des nouveaux pixels détectés.
- 5 : Idem.
- 6 : Idem.
- 7 : Le parcours des pixels est repris jusqu'à la fin.

#### IV.2.5 - Mise en correspondance des marqueurs infrarouges

Cette mise en correspondance est bien plus difficile du fait qu'ici tous les marqueurs sont identiques vues des caméras. Il faut donc réaliser un post-traitement permettant d'effectuer cette opération sous la forme d'un étiquetage. A chaque marqueur est affecté un numéro propre qui ne changera pas au cours du temps.

Il existe plusieurs méthodes de suivi de point. On peut rappeler par exemple les méthodes itératives qui se basent sur l'estimation de la prédiction de la position des objets (Bar-Shalom &

Li, 1995), les méthodes heuristiques (Haritaoglu, Harwood, & Davis, 1998), le mean shift (Comaniciu & Meer, 1999) ou encore le Multiple Hypothesis Tracker MHT (Reid, 1979). La majorité de ces méthodes explorent différentes sources d'information afin d'être utilisées pour le suivi des objets. On peut citer la cinématique, la forme de l'objet ...etc. Dans notre approche, nous allons utiliser une méthode d'optimisation simple, utilisant comme information la position, la vitesse et le poids des marqueurs pour augmenter la robustesse du système.

La première étape est l'initialisation. Il est nécessaire de positionner les marqueurs dans une position connue pour ainsi pouvoir savoir quel marqueur correspond à la main ou bien à la tête par exemple. En effet, il est impossible pour un algorithme d'identifier par exemple un marqueur comme étant celui de la main gauche si au préalable on n'a pas précisé que le marqueur 0 correspondait à la main gauche. Le premier marqueur détecté sera identifié comme le numéro 0, le second numéro 1 et ainsi de suite. Les marqueurs sont détectés de gauche à droite. Une fois cette opération effectuée, les positions des marqueurs sont calculées comme nous l'avons vu précédemment.

Après l'initialisation, à chaque appel de la fonction de mise en correspondance, les numéros des marqueurs sont remplacés correctement. Pour donner le bon numéro à chaque marqueur, le programme dans un premier temps prédit grâce à l'utilisation d'un filtre de Kalman (Kalman, 1960) où devrait se trouver le marqueur dans l'image à partir des coordonnées obtenues dans l'image précédente.

Pour rappel, le filtre de Kalman permet de prédire une information qui sera valable à l'instant  $t+1$  avec des données prélevées à l'instant  $t$ . Une fois ces coordonnées obtenues, elles sont comparées aux coordonnées des points détectés dans l'image courante. La taille des taches de lumières produites sur l'image de la caméra par chaque marqueur est également prise en compte ainsi que la vitesse de déplacement de la tache d'une image à l'autre. Tous ces paramètres permettent de créer une fonction de coût qu'il est nécessaire de minimiser pour obtenir la meilleure configuration des numéros possibles. Le coût pour un marqueur  $i$  détecté

dans l'image par rapport à un marqueur  $j$  de coordonnées prédites par le filtre de Kalman peut s'écrire :

$$C_i^j = \delta(P_i, P'_j) + \delta(V_i, V'_j) + \delta(T_i, T'_j)$$

Les couples permettant de minimiser la somme de toutes les fonctions de coût sont choisis comme étant les couples correctes. Les marqueurs sont ainsi identifiés au fil du temps (figure 34) et la triangulation peut avoir lieu.

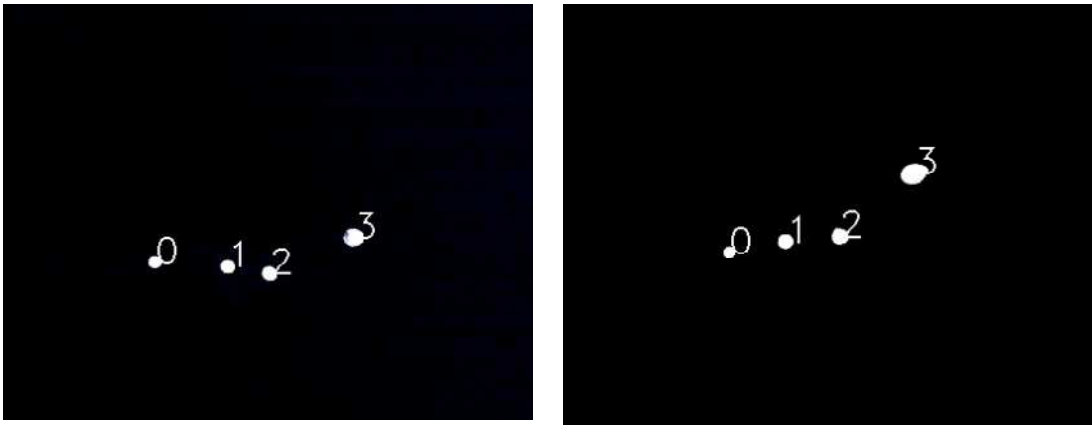


Figure 34. Étiquetage des marqueurs

#### IV.2.6 - Stabilisation et performances

Les points obtenus après triangulation sont en général peu stables. En effet, un décalage d'un pixel sur l'image peut faire varier les coordonnées 3D calculées de façon importante. Si on pose un marqueur sur un objet fixe, les coordonnées 3D calculées ne seront pas toujours exactement les mêmes. Ce mouvement est dû au fait que nous utilisons des marqueurs lumineux. La lumière n'est pas réellement constante et donc de petites variations viennent fausser les calculs faisant trembler l'objet. Pour éviter cela, deux méthodes peuvent être mises en œuvre.

- On ne prend en compte les nouvelles coordonnées de chaque marqueur que si celles-ci sont assez différentes des coordonnées précédentes. Pour cela, on utilise un seuil défini par l'utilisateur. Ce seuil doit être inférieur à la norme du vecteur allant des anciennes coordonnées aux nouvelles pour que les nouvelles coordonnées soient prises en compte.
- On utilise un filtre de Kalman qui permet de stabiliser le système.

Les deux méthodes ont été testées. Elles présentent chacune des avantages et des inconvénients. Ainsi, le seuillage simple est très rapide mais il faut bien choisir le seuil. Par contre, on observe des petits à-coups lors de l'utilisation du système. Le filtre de Kalman quant à lui est plus gourmand. Il présente par contre un lissage de bonne qualité en plus de la stabilisation. C'est cette deuxième solution que nous avons utilisée pour stabiliser les points (figure 35, 36 et 37).

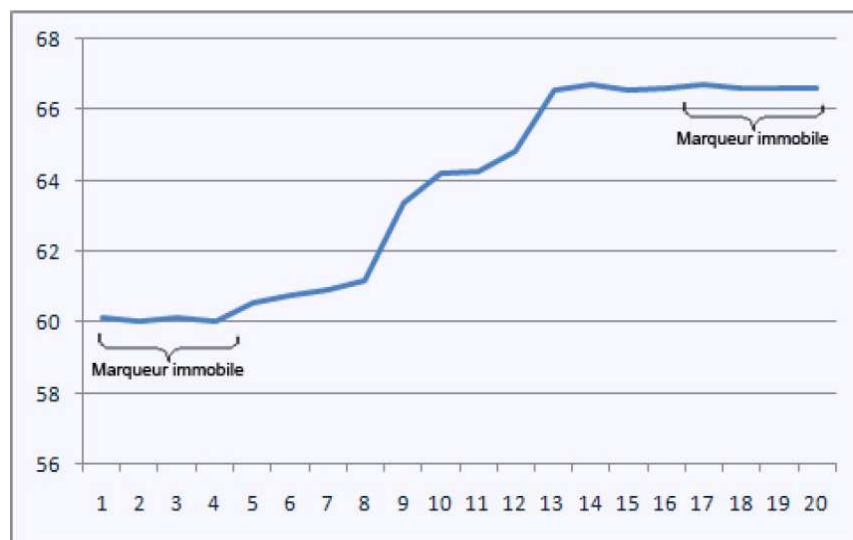


Figure 35. Position en x sans stabilisation

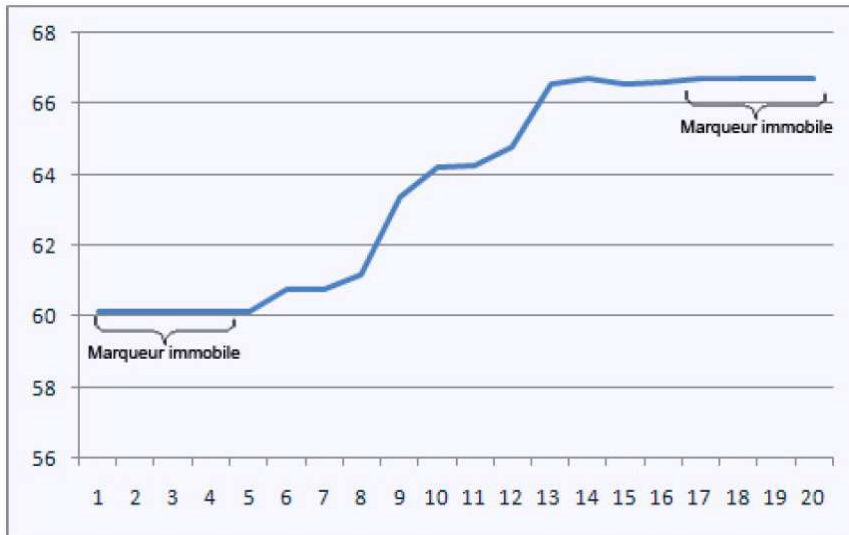


Figure 36. Position en x sans stabilisation



Figure 37. Zoom sur les courbes, à gauche sans stabilisation à droite avec. Le marqueur est immobile durant toute la période.

Nous avons effectué un ensemble de mesures pour évaluer les performances du système. Ces résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous (tableau 2) :

Tableau 2. Performances du système de tracking.

Paramètres	Performances
Précision selon les axes (mm)	X=2.07, Y=1.96, Z=3
Distance de travail	Entre 1 mètre et trois mètres (dépend de la taille des marqueurs)
taux d'images (Frame rate)	30 images par secondes (ajustable)
Nombre maxi de marqueurs traqués	7 marqueurs

#### IV.2.7 - Matériel

Pour effectuer le tracking dans le domaine infrarouge, nous avons modifié nos webcams qui possèdent un filtre à l'intérieur permettant de réduire le passage des ondes infrarouges, ceci dans le but d'améliorer la qualité des images obtenues. Ce filtre se présente sous la forme d'un morceau de verre traité et se trouve directement devant ou derrière la lentille de la caméra. Parfois la lentille est directement traitée. Une fois ce filtre supprimé, la caméra est beaucoup plus réactive aux ondes infrarouges. Il a été ensuite nécessaire de filtrer les ondes lumineuses n'étant pas dans le domaine de l'infrarouge (ondes visibles par l'œil humain) car ces ondes ne nous intéressent pas, les marqueurs émettant des ondes dans le domaine de l'infrarouge.

Pour les marqueurs, nous avons commencé à réaliser des tests avec des diodes infrarouges mais les résultats n'étaient pas précis. Nous nous sommes donc tournés vers des marqueurs sphériques réfléchissant l'infrarouge. Ces marqueurs réfléchissent la lumière dans la direction opposée d'où celle-ci est projetée quelque soit l'orientation du marqueur. Pour éclairer les marqueurs, il est nécessaire d'avoir des sources de lumière. Nous avons donc réalisé des projecteurs infrarouges (un pour chaque caméra) pour qu'ainsi la lumière réfléchi soit en



direction des caméras. Ces projecteurs se composent d'un circuit imprimé où sont soudées quarante diodes infrarouges (figure 38).



Figure 38. Matériel utilisé, filtres, Webcams modifiées, marqueurs

#### IV.2.8 - Couplage tracking 3D Wiimote

Nous avons interfacé la Wiimote avec nous application afin d'obtenir l'orientation 3D, également la Wiimote permet d'avoir la position 3D, cependant cette solution a été vite écartée car elle montre vite ses limites par rapport à notre système de tracking 3D, en effet pour déterminer sa position 3D, la Wiimote utilise un sensor bar avec dix diodes infrarouges, réparties par groupe de cinq de chaque côté, que la Wiimote repère grâce à une petite caméra infrarouge.. La Wiimote peut ainsi par triangulation calculer sa 3D par rapport à la barre. Malheureusement la Wiimote a besoin pour cela d'être toujours orientée vers le sensor bar vers l'écran

Nous avons donc opté pour l'utilisation d'un système de tracking hybride, en utilisant notre tracking 3D pour avoir la position 3D de la Wiimote (pour cela nous avons positionné un marqueur sur la Wiimote de façon à ce que la position de la Wiimote soit tracké en 3D) et la Wiimote pour déterminer la rotation 3D.

### IV.3 - Applications

Dans le cadre de cette thèse, deux applications 3D indépendantes ont été développées, une application pour la navigation et une deuxième pour la sélection/manipulation. Le langage

utilisé pour l'implémentation de ces applications est le C++. Nous avons également utilisé le logiciel 3ds Max pour la modélisation des objets et des scènes 3D.

#### IV.3.1 - Navigation

Le but de cette application est de permettre à deux utilisateurs représentés par des avatars de naviguer et d'inspecter collaborativement des objets virtuels (représentant des pierres) en utilisant plusieurs techniques de navigation (voir chapitre sur 5). Evidement, les deux utilisateurs se trouvent dans deux sites distants et sont reliés via un réseau informatique (voir section 4.5). Les deux participants peuvent communiquer en utilisant une liaison audio entre les deux sites (figure 39).



Figure 39. Application de navigation dans la plateforme Braccetto

Les périphériques d'entrées utilisés dans cette application sont le tracking 3D que nous avons présenté dans la section précédente ainsi que la Wiimotte. Le premier travail effectué était de modéliser la scène 3D en utilisant le logiciel 3Ds Max. L'étape suivante a consisté à importer les objets modélisés ainsi que la scène dans l'application. Pour cela, nous avons utilisé le moteur graphique Irrlicht. Également, nous avons utilisé un moteur audio pour la gestion des sons dans l'application. Pour la partie réseau, nous avons utilisé le moteur réseau RakNet

(figure 40). Comme périphérique d'affichage, nous utilisons le système Braccetto (voir section suivante) et deux hauts parleurs pour le son.

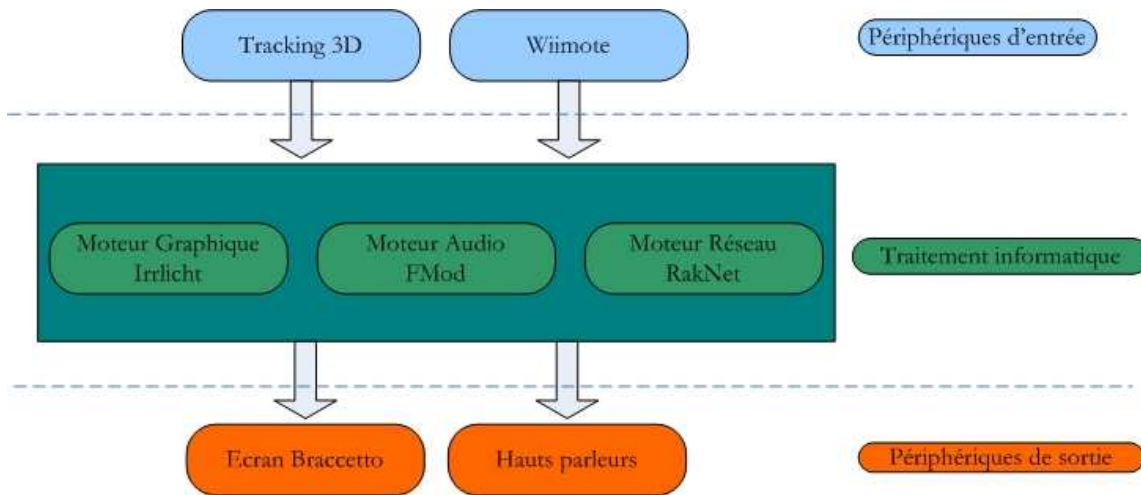


Figure 40. Architecture générale de l'application

#### IV.3.2 - Manipulation

Dans cette deuxième application, les utilisateurs (qui se retrouvent dans deux sites distants) doivent réaliser un puzzle 3D dans une scène virtuelle (figure 41), en utilisant trois types d'interaction 3D : le Ray casting, le GoGo, la Main virtuelle (voir chapitre 6).



Figure 41. Application de sélection/manipulation dans la plateforme Braccetto

Cette application a été implémentée en langage C++, les périphériques d'entrées sont les mêmes que pour l'application précédente (Tracking 3D + Wiimote). Nous avons utilisé les mêmes moteurs (graphique, audio, réseau) que l'application précédente ainsi que les mêmes périphériques de sortie (Braccetto + hauts parleurs).

#### IV.4 - Plateforme Braccetto

Le Braccetto (signification en italien « bras dans le bras ») est une plateforme de travail collaboratif développé par le CSIRO ICT-Center en collaboration avec DSTO et NICTA. Ce projet vise à développer des nouvelles technologies de partage d'informations qui peuvent aider des équipes géographiquement éloignées à collaborer plus efficacement pour des activités créatrices telles que la conception, la planification, l'analyse et la prise de décision par exemple.

Le Braccetto est composé d'une unité centrale de traitement de type Intel Xeon 3.0GHz et de deux grands écrans d'affichage à cristaux liquides (50 pouces) d'une résolution de 1920x1080 montés sur un support métallique. Ce support tient compte des périphériques d'interaction comme le clavier, la souris, les caméras, les microphones et les haut-parleurs. En outre, l'armature est conçue pour rendre la plateforme portable. Un autre point important dans cette plateforme est que les écrans d'affichage sont physiquement réglables permettant ainsi diverses configurations selon la nature de l'application. Dans une configuration par défaut (figure 42), les utilisateurs pourraient mettre deux écrans, un dans une position horizontale et l'autre en verticale.



Figure 42. Configurations du Braccetto, à gauche configuration par défaut du Braccetto (configuration de type Workbench), à droite une autre configuration du Braccetto avec quatre écrans

## IV.5 - Collaboration distante entre deux Braccettos

### IV.5.1 - Architecture réseau

Généralement, il existe trois topologies de base possibles pour un réseau informatique. Ces topologies sont :

- Point à point - Dans cette configuration, chaque participant est relié à l'autre ; le participant communique directement avec les autres participants en leur envoyant directement les informations. Cela signifie que si on a  $n$  participants, il faut envoyer  $n-1$  fois le message (figure 43). Ce qui implique un coût extrêmement élevé et un débit réseau très important.

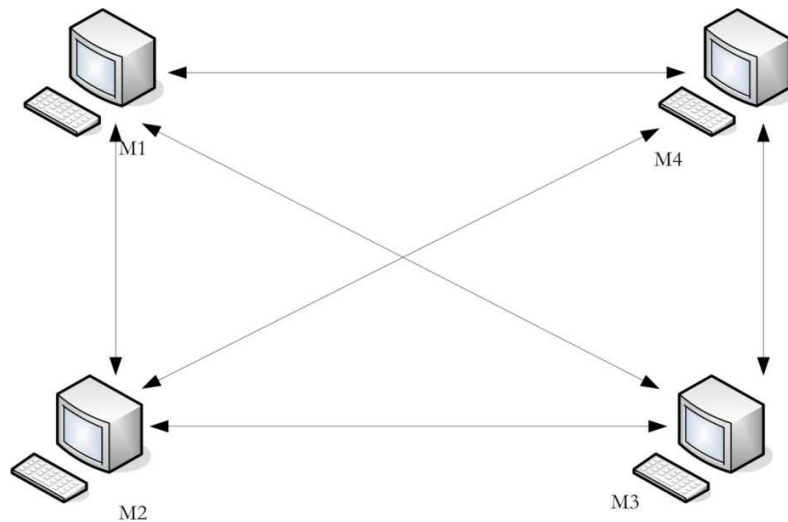


Figure 43. Architecture réseau point à point

- Multipoint - Dans cette topologie, les messages ne sont envoyés qu'une fois, vers une adresse multipoint, réduisant alors le trafic d'informations (figure 44).

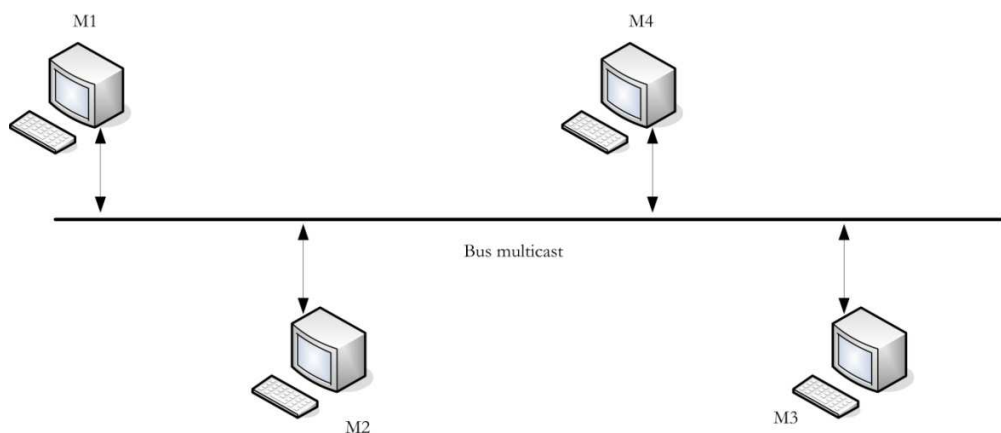


Figure 44. Architecture réseau multipoint

- Pont de diffusion - Tous les participants sont reliés à un point central, qui joue le rôle de passerelle et se charge d'envoyer le message d'un participant aux autres. Ce type de réseau est très utilisé, car efficace et peu coûteux (figure 45).

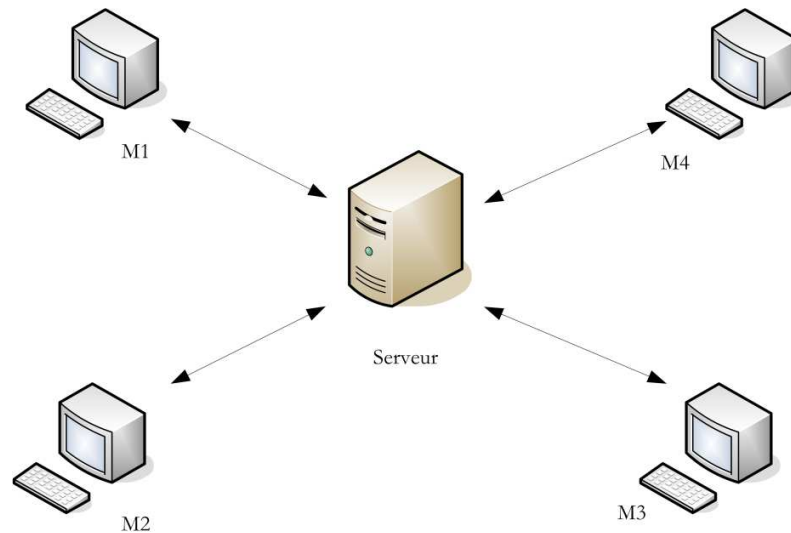


Figure 45. Architecture réseau pont de diffusion

La mise en réseau de plusieurs Braccettos pouvait suivre trois architectures réseau distinctes : l'architecture Point à Point, l'architecture Multipoint et l'architecture Pont de diffusion. Nous avons écarté l'architecture Multipoint car elle n'est exploitable que sur un réseau interne. L'architecture Point à Point présente l'avantage d'être facile à mettre en place mais cette solution est très gourmande en bande passante. C'est pourquoi, l'architecture Pont de diffusion a été choisie. Cette architecture permet d'utiliser un serveur afin de gérer le réseau. Ce système permet de connecter très facilement un nombre quelconque de Braccetto sans surcharge excessive du réseau, contrairement à l'architecture point à point.

#### IV.5.2 - Distribution des données

Selon Shaun (Shaun , 1996), il existe quatre configurations de base de données BDD possibles, représentant la distribution des données de l'EV. Ces configurations sont :

- Une base de données centralisée - Dans cette BDD, les données qui décrivent l'EV sont stockées dans un serveur central qui gère l'échange des informations avec les clients.
- Une base de données dupliquée à cohérence faible - Les participants disposent d'une

version complète ou partielle de la BDD. L'échange des informations se fait par des messages envoyés à des intervalles de temps réguliers.

- Une base de données dupliquée à cohérence forte - La base de données est répartie de la même façon qu'une base de données à cohérence faible. Chaque participant dispose d'une copie de la BDD décrivant l'EV. Cependant, la cohérence est assurée en temps réel par un échange d'information permanent.
- Une base de données distribuée - Dans ce type de BDD, les données sont partitionnées sur plusieurs serveurs.

Nous avons choisi d'utiliser une base de données dupliquée à cohérence forte. En effet, l'utilisation d'une base de données centralisée a été exclue car ce type de BDD demande l'utilisation de clients sophistiqués qui doivent assurer en temps réel le rendu 3D de l'EV pour assurer l'interactivité du système. L'utilisation d'une base de données distribuée est intéressante dans le cadre d'un EVC à grande échelle. Le choix logique qui reste est d'utiliser une base de données dupliquée à cohérence forte, afin d'assurer une interactivité en temps réel. Chaque utilisateur (client) dispose d'une copie complète de l'EV ; l'échange d'information avec les autres participants se fait par l'intermédiaire d'un serveur.

### IV.5.3 - Protocole de communication

Il existe plusieurs types de protocole de communication réseau. Chaque protocole a des avantages et des inconvénients. Afin de trouver le protocole le plus adapté à notre plateforme collaborative, nous avons évalué deux protocoles : le protocole TCP/IP et le protocole l'UDP/IP. Même si ces deux protocoles utilisent des numéros de ports en plus des adresses IP, il existe une différence majeure entre eux.

#### IV.5.3.1 - Protocole TCP/IP

Le TCP/IP (Protocole de contrôle de transmission/protocole Internet) est un protocole orienté connexion. Il permet d'acheminer un message d'une application à une autre, d'une façon fiable, grâce aux accusés de réception. Lors de l'envoi d'un message, un numéro de



séquence (afin d'assurer l'ordre de réception des données) est associé à ce message. A la réception de ce message, le récepteur retourne un accusé de réception permettant ainsi d'assurer la réception des données entre l'émetteur et le récepteur.

Si le message dépasse une certaine durée de temps, il est considéré comme perdu et le même message est de nouveau envoyé.

#### IV.5.3.2 - Protocole UDP/IP

Le protocole UDP/IP (Protocole de datagramme utilisateur/ protocole Internet) est un protocole de communication non orienté connexion qui utilise une en-tête réduite. L'en-tête est composée de quatre champs de 16 bits qui contiennent les ports source et destination du message et la longueur du message UDP. Avec ce protocole, les messages sont envoyés sous forme de datagrammes ou blocs. En effet, il s'agit d'un mode de communication dans lequel l'émetteur envoie des données sans prévenir le récepteur. De la même façon, le récepteur, à son tour, reçoit les données sans envoyer d'accusé de réception à l'émetteur.

L'avantage majeur du protocole TCP par rapport à l'UDP est que le TCP permet d'avoir une communication fiable entre l'émetteur et le récepteur. L'inconvénient est qu'il nécessite l'utilisation des accusés de réception ; ce qui prend du temps. Etant donné que le protocole UDP utilise une entête réduite par rapport aux segments d'entête TCP, cela permet de réduire l'occupation de la bande passante est donc augmenter la rapidité de communication. Finalement par souci de fluidité et dans le but d'avoir une application interactive en temps réel, nous avons choisi d'utiliser le protocole UDP/IP.

#### IV.5.4 - Principe de fonctionnement

Le serveur est lancé dans un premier temps. Il joue un double rôle. Tout d'abord, il doit assurer l'acheminement des données d'un client émetteur vers tous les autres clients. Ensuite, il doit assurer des sauvegardes de l'état de l'EV à des intervalles de temps régulier (figure 46).

Lorsqu'un client se connecte au serveur, ce dernier lui transmet le nombre des clients connectés à l'application ainsi que l'état de l'EV. Lorsqu'un deuxième client se connecte au serveur, le serveur lui envoie la liste des clients déjà connectés ainsi que l'état de l'EV. Le deuxième client synchronise alors l'état de sa scène avec le premier client.

Lorsque les deux clients sont connectés et l'état de la scène 3D est synchronisé entre les clients, le travail commence. Chaque action est effectuée en local et envoyée simultanément au serveur qui doit redistribuer cet événement à tous les autres clients. Quand un client se déconnecte, celui-ci informe le serveur qui à son tour doit signaler aux autres clients cette information. Quand le serveur est arrêté, il envoie un message à tous les clients pour les informer de se déconnecter.

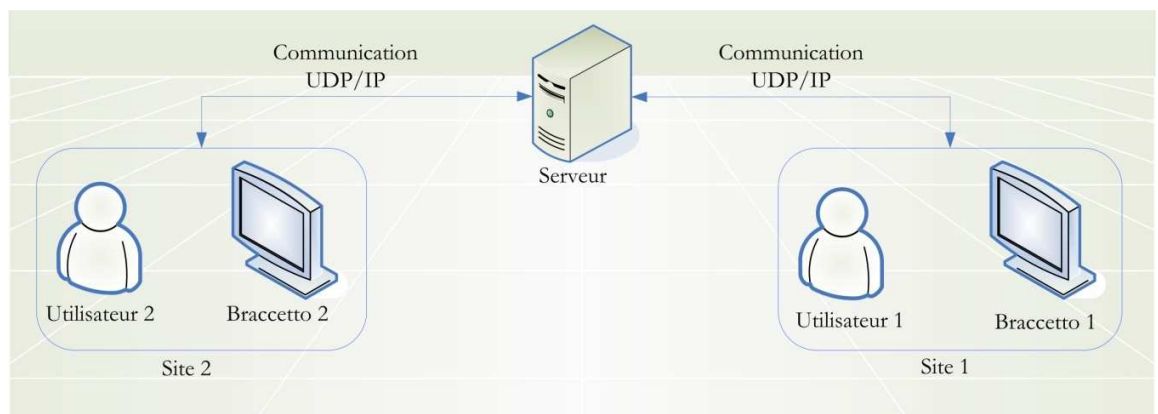


Figure 46. Schéma général de la plateforme

## IV.6 - Conclusion

Le développement réalisé au cours de cette thèse effectué a été important. Deux applications collaboratives en RV ont été mises en place allant du système de tracking jusqu'au rendu visuel final, ce développement est répartie sur trois aspects :

Périphériques d'entrées : un système de tracking 3D optique léger et à bas coût a été mis en place, afin de donner aux utilisateurs une plus grande liberté de mouvement et faciliter le processus d'interaction avec l'EV. Ce système fournit la position en 3D (3 ddl), il est également utilisé avec un Wiimote qui donne l'orientation en 3D (3dd). L'ensemble permet d'avoir une interface à 6ddl à bas coût et de bonne précision.

L'environnement 3D : deux applications collaboratives ont été développées. Ces deux applications ont été implémentées en langage C++ et en utilisant un ensemble de bibliothèques open source dédiées à la conception des environnements 3D (Irrlicht, FMod).

L'architecture réseau : afin d'assurer la liaison réseau entre les deux plateformes Bracceto, nous avons utilisé une architecture avec une base de données dupliquée à cohérence forte et avec un protocole réseau de type UDP/IP car il permet une bonne fluidité des données.

## Chapitre V - Expérimentations

### V.1 - Expérimentation sur la navigation 3D en EVC

#### V.1.1 - La navigation 3D

##### V.1.1.1 - Navigation en environnement virtuel

La navigation est un élément très important dans le processus d'interaction dans un EV. Selon Bowman, la navigation dans un EV est constituée de deux composantes (Bowman et al., 2004) : une composante motrice et une composante cognitive.

La composante motrice concerne le mouvement ou le déplacement de l'utilisateur dans l'espace. Plusieurs techniques de déplacements existent qui peuvent être classées selon les métaphores de navigation utilisées. Généralement, il existe deux catégories de métaphores : les métaphores réelles comme la marche ou la conduite et les métaphores magiques qui donnent aux utilisateurs des pouvoirs magiques en éliminant les contraintes physiques du monde réel. On peut citer par exemple la métaphore de la carte qui permet aux utilisateurs de se déplacer en spécifiant les coordonnées de la cible à atteindre ou la métaphore de "World in Miniature" (Mine, 1996)

La composante cognitive (wayfinding en anglais) est un processus cognitif qui permet de définir un chemin dans un environnement virtuel en construisant une « carte cognitive » de l'espace (Bowman et al., 2004). La formation d'une carte cognitive de l'espace virtuel nécessite trois types de connaissances spatiales : les points de repère (Landmark knowledge), l'itinéraire (Route knowledge) et la configuration (Survey knowledge). Selon Passini (Passini, 1992), pendant l'exploration d'un nouvel environnement, la personne commence dans un premier temps par « balayer ou scanner » l'environnement pour repérer les points importants dans cet espace (lieux et objets importants). C'est le processus des connaissances des points de repère. Ensuite, elle structure ces connaissances pour créer des relations entre les différents repères

composant cet environnement afin de composer son itinéraire lui permettant d'atteindre sa destination. Durant le déplacement, des informations supplémentaires spatiales viendront s'ajouter aux connaissances précédentes pour mettre à jour la configuration interne de l'espace de l'utilisateur.

#### V.1.1.2 - Classification des métaphores de navigation

Il existe différentes métaphores de navigation qui ont été déjà proposées. Ces métaphores peuvent être classées en deux catégories (De Boeck, Raymaekers, & Coninx, 2005):

- **Métaphores de contrôle direct de la caméra.** Dans ce type de métaphores, l'utilisateur contrôle d'une façon directe la position et l'orientation de son point de vue en utilisant un périphérique d'entrée adapté :
  - Contrôle de la caméra centré sur l'utilisateur. Parmi cette catégorie de métaphores, on peut citer la métaphore de « Eyeball in hand » proposée par Ware (Ware & Jessome, 1988), également la métaphore de « World in miniature » proposée par Mine (Mine, 1996).
  - Contrôle de la caméra centré sur les objets. On trouve la métaphore de la « Scene in hand » proposée par Ware (Ware & Osborne, 1990).
- **Métaphores de contrôle indirect de la caméra.** Cette catégorie donne à l'utilisateur un contrôle indirect de la position et l'orientation de son point de vue. On peut citer par exemple la métaphore de « Teleportation » (Bowman et al., 1998), ainsi que la métaphore de « Small scene manipulation » proposée par De Boeck (De Boeck, Cuppens, De Weyer, Raymaekers, & Coninx, 2004) .

#### V.1.1.3 - Travaux relatifs à la cognition spatiale

Dans la littérature, on trouve beaucoup de travaux relatifs à la navigation dans les EV, notamment dans la cognition spatiale. Dans leurs études, Ruddle et al montrent que l'acquisition des connaissances spatiales est possible dans un EV (Ruddle, Payne, & Jones, 1997). Ruddle et al montrent également que le mode d'exploration, qu'il soit « actif » c'est-à-

dire lorsque les sujets peuvent se déplacer librement dans le monde virtuel, ou « passif » dans lequel les sujets doivent suivre un itinéraire prédéfini, n'a pas d'influence significative sur l'acquisition des connaissances spatiales dans un EV non immersif (Ruddle et al., 1997). L'étude de Gaunet confirme ces résultats. Il ne souligne aucune influence des conditions d'exploration dans l'espace virtuel pour les tâches de pointage de direction et d'identification des points de repère (Gaunet, Vidal, Kemeny, & and Berthoz, 2001).

Dans une autre étude, Ruddle (Ruddle, Payne, & Jones, 1999a) souligne que le type de visualisation immersif ou non immersif, n'a pas d'influence sur l'acquisition des connaissances spatiales dans un EV, même si la notion de la distance est mieux maîtrisée dans les EV immersifs.

Scribante montre qu'en mode d'exploration actif, les techniques de déplacement influencent l'acquisition des connaissances spatiales dans un EV non immersif (Scribante, 2000). Dans son expérience, Scribante montre que les sujets qui utilisent la technique de « marche » ont des connaissances sur l'itinéraire plus importantes que les sujets qui utilisent la technique de « vol ».

Carassa a étudié l'influence des conditions d'exploration sur l'acquisition des connaissances spatiales (Carassa, Geminiani, Morganti, & Varotto. D., 2002). Ces résultats convergent avec les résultats de (Wilson, Foreman, Gillett, & Stanton, 1997) et (Gaunet et al., 2001), même si Carassa souligne qu'il y a d'autres facteurs qu'il faut prendre en compte comme la nature de l'activité, le type d'environnement et le mode d'apprentissage.

#### V.1.1.4 - Études empiriques

Des études empiriques des différentes techniques de navigation ont été réalisées. Parmi ces travaux, on peut citer les travaux de Bowman et al (Bowman et al., 1999a) qui ont utilisé un testbad afin d'évaluer sept métaphores de navigation.

Dodds et al (Dodds & Ruddle, 2008a) (Dodds & Ruddle, 2008b) ont développé des nouvelles « Mobile Group Dynamics » MGDs, permettant d'aider des personnes à travailler

ensemble dans un EVC. Ces MGDs sont (teleoperating, awareness et multiple views). Ces techniques ont été évaluées dans le contexte d'une application urbaine de planification, en donnant à un groupe de sujets la possibilité d'utiliser ces MGDs, et à un autre groupe de sujets un EVC conventionnel (sans ces nouveaux MGD). Les résultats de cette évaluation montrent que les sujets communiquent plus en utilisant les MGD par rapport aux EVCs dits conventionnels. Les auteurs justifient cela par le fait que l'utilisation de ces MGD augmente le niveau d'informations sensorielles (comme l'awareness des autres participants, ainsi que les vues multiples qui fournissent des informations visuelles supplémentaires). L'utilisation des MGDs favorise plus de comportements réels chez les participants, comme rester ensemble sur une période prolongée et se regrouper après des périodes de séparation.

L'étude de Ruddle (Ruddle et al., 1999a) (Ruddle, Payne, & Jones, 1999b) montre que l'utilisation d'une combinaison de différents types de cartes montrées simultanément dans l'environnement virtuel augmente la capacité chez les participants de rechercher d'objets dans un EV à grande échelle. Egalement, l'ajout d'une boussole et des coordonnées numériques n'ont pas affecté l'efficacité de la recherche. L'étude de Darken a montré que l'utilisation de cartes et de grilles a permis d'améliorer l'exécution de la navigation chez les participants (Darken & Sibert, 1996).

### V.1.2 - L'étude expérimentale

Dans cette étude expérimentale, nous avons changé systématiquement trois conditions de navigation (métaphore de la CARTE, métaphore de l'AVATAR, métaphore de la LAMPE) afin d'investiguer leur impact sur plusieurs aspects liés à l'expérience de l'utilisateur (l'effort collaboratif, implication /awareness, coprésence, présence sociale, utilisabilité, satisfaction, préférence, performance de la tâche). Dans la section suivante, la conception de l'expérience est décrite plus en détail.

### V.1.2.1 - Description de la tâche

Nous avons demandé à deux participants (un groupe de deux participants par session qui se trouvent dans deux sites géographiquement distants) de se déplacer dans un EV en utilisant une métaphore de navigation pour inspecter trois objets représentant des pierres virtuelles positionnées dans des endroits différents dans la scène et évaluer l'intensité de la couleur jaune que contiennent ces pierres (figure 47). Pour chaque condition (métaphore) les pierres changent, c'est-à-dire que pour la première métaphore les participants doivent inspecter trois pierres, ensuite pour la deuxième métaphore ils doivent inspecter trois autres pierres différentes des trois précédentes et ainsi de suite.

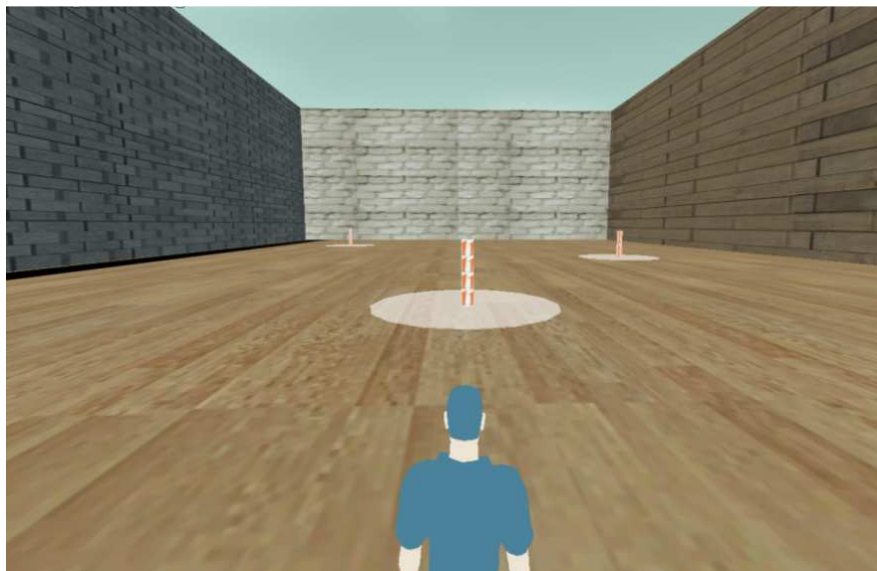


Figure 47. L'EV utilisé dans l'expérience de navigation

Dans cette expérience, il est important que les utilisateurs inspectent les objets d'une façon collaborative ; c'est-à-dire que les utilisateurs doivent inspecter la même pierre au même moment. Pour cela, nous avons introduit une condition supplémentaire qui consiste à n'afficher l'objet que si les deux utilisateurs sont proches de cet objet (figure 48).



Les deux participants doivent se mettre d'accord et désigner un seul objet parmi les trois présents dans la scène. L'accomplissement de cette tâche nécessite la navigation en utilisant une métaphore de navigation et l'inspection collaborative. Les participants doivent prendre en compte le volume et la forme de chaque objet ainsi que la répartition des taches jaunes et des autres taches sur ces objets (figure 49). C'est pour ces raisons que nous avons décidé d'utiliser cette tâche pour l'expérience.



Figure 48. Situation des deux avatars devant un objet virtuel



Figure 49. Exemple de trois objets différents

### V.1.2.2 - Conditions d'expérience

Dans le cadre de cette tâche d'inspection collaborative, l'utilisateur doit connaître la position et le point de vue de son partenaire dans la scène. Les critères sur lesquels nous nous sommes basés pour choisir les trois métaphores de navigation sont les suivants :

- Le point de vue du partenaire. Il s'agit de représenter le point de vue du partenaire. Nous avons défini deux choix possibles :
  - Le point de vue du partenaire est directement intégré dans la scène.
  - Le point de vue du partenaire est représenté dans une fenêtre à l'extérieur de la scène.
- Le contrôle de la position spatiale dans la scène. Cela concerne la manière dont l'utilisateur contrôle sa propre position et orientation dans la scène. Deux types de contrôle sont possibles :
  - Contrôle direct : l'utilisateur contrôle sa position spatiale d'une façon directe.
  - Contrôle indirect : l'utilisateur passe par un intermédiaire pour contrôler sa position spatiale.

En fonction de ces critères, trois métaphores de navigation ont été choisies :

- Métaphore de la CARTE = contrôle indirect + point de vue du partenaire dans une fenêtre additionnelle.
- Métaphore de l'AVATAR = contrôle direct + point de vue du partenaire dans une fenêtre additionnelle.
- Métaphore de la LAMPE = contrôle direct + point de vue du partenaire intégré dans la scène.

#### V.1.2.2.1 - Métaphore de la CARTE

Cette métaphore de navigation est basée sur la poursuite d'une cible a priori connue. L'utilisateur est représenté comme une icône sur une petite carte 2D de l'EV. Les déplacements de l'utilisateur sont commandés par le changement de la position de cette icône. Cette métaphore permet à l'utilisateur d'avoir le point de vue de son partenaire dans une petite

fenêtre. La position et l'orientation de l'utilisateur et de son partenaire sont représentées dans la carte 2D. L'utilisateur commande indirectement sa position dans l'environnement (le participant commande la position de son avatar par l'intermédiaire d'une icône sur une carte). Cette métaphore permet d'avoir également un feedback visuel indirect du point de vue du partenaire (figure 50).



Figure 50. Métaphore de la carte

#### *V.1.2.2.2 - Métaphore de l'AVATAR*

Dans cette métaphore, l'utilisateur navigue directement dans l'EVC en changeant la position et l'orientation de son avatar via la Wiimote. On retrouve aussi de la même façon le point de vue du partenaire présenté par une petite fenêtre. Dans cette métaphore, le contrôle de la position est direct et le feedback du point de vue du partenaire est indirect (figure 51).



Figure 51. Métaphore de l'AVATAR

#### *V.1.2.2.3 - Métaphore de la LAMPE*

C'est une métaphore similaire à la métaphore de l'AVATAR ; la différence entre ces deux métaphores consiste dans le point de vue de l'utilisateur. La scène s'éclaire en fonction du point de vue du partenaire et permet à l'utilisateur d'avoir un feedback direct du point de vue de son partenaire (figure 52).



Figure 52. Métaphore de la LAMPE

#### V.1.2.3 - Matériel

Nous utilisons comme périphérique d'entrée, notre système de tracking optique. Nous utilisons également la Wiimote de chez Nintendo, une boule réfléchissante est positionnée sur la Wiimote afin d'avoir la position en 3D (le système Wiimote fournissant l'information sur l'orientation spatiale). Notre plateforme collaborative est constituée de deux systèmes Braccetto ; chaque Braccetto se compose d'une unité centrale de traitement de type Intel Xeon 3.0 GHz, équipée de deux écrans d'affichage à cristaux liquides d'une résolution de 1920x1080. Ces deux systèmes de Braccetto (figure 53) sont reliés entre eux par une architecture réseau de type UDP/IP.

#### V.1.2.4 - Participants

Nous avons recruté la majorité de nos participants dans le campus de l'université de Macquarie à Sydney en Australie. Le nombre total de participants est de 40 participants (13 femmes soit 32,5% et 27 hommes soit 67.5 %). L'âge de ces participants est de 18 à 55 ans avec une moyenne d'âge de 26.06 ans et un écart type de 8.11. Les conditions nécessaires afin d'accepter la participation d'un sujet pour l'expérience étaient d'avoir au minimum 18 ans, une maîtrise parfaite de l'anglais et une vision normale ou corrigée.



Figure 53. La plateforme expérimentale

#### V.1.2.5 - Procédure

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons recruté pour cette expérience un nombre total de 40 participants pour 20 sessions (deux participants pour chaque session). Nous plaçons les participants dans deux chambres éloignées d'environ une trentaine de mètres.

Avant de commencer l'expérience, nous demandons à chaque participant de lire les instructions générales de l'expérience. Ensuite, nous leur demandons de remplir et de signer un « consent form ». Après cela, nous entraînons les participants afin qu'ils puissent maîtriser le système et comprendre l'utilisation de chaque métaphore. Cela dure environ 10 à 15 minutes. Après cette étape d'entraînement, nous demandons aux participants de répondre à un questionnaire d'entrée démographique en ligne.

Pendant l'expérience, nous demandons aux deux participants de réaliser la tâche d'une façon collaborative en utilisant une métaphore de navigation et de répondre après chaque condition à un questionnaire en ligne. Au total, il y a trois conditions, soit trois métaphores de navigation. Pour la dernière condition, les participants répondent à un questionnaire de sortie pour exprimer leurs préférences.

Durant l'expérience, les participants ne peuvent pas voir leurs partenaires directement. Ils peuvent se voir dans l'environnement virtuel via leur représentation virtuelle c'est à dire leur avatar et ils communiquent via audio.

A la fin de l'expérience, les participants sont conduits dans la même salle pour qu'ils puissent faire connaissance et également pour faire un debriefing afin de recueillir leurs impressions.

#### V.1.2.6 - Mesures

Les variables mesurées dans cette expérience sont les suivantes :

- **Coprésence** : la coprésence est mesurée grâce au questionnaire de Schroeder (Schroeder et al., 2001). Nous utilisons deux questions pour mesurer cette notion sur Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants d'immersion virtuelle

une échelle de 1 à 7 points questions (voir questionnaire de navigation questions 1-2 annexe A).

- **Implication ‘Involvement’** : pour mesurer l’implication des participants, nous utilisons quatre questions du questionnaire de Gerhard (Gerhard et al., 2001a) évaluées sur une échelle de 1 à 7 points (voir questionnaire de navigation questions 3-4 annexe A).
- **Awareness ‘Conscience’**: l’awareness est mesuré deux questions du questionnaire de Gerhard sur une échelle de 1 à 7 points (voir questionnaire de navigation questions 5-6 annexe A).
- **Effort collaboratif** : à partir du questionnaire de Biocca (Biocca et al., 2001), quatre questions sont adressées dans le but de mesurer la perception de l’effort collaboratif des participants sur une échelle de 1 à 7 points (voir questionnaire de navigation questions 7-11 annexe A).
- **Satisfaction** : la satisfaction est mesurée par trois questions du questionnaire de (Anneli et al., 1994), avec une échelle de 1 à 7 points (voir questionnaire de navigation questions 12-15 annexe A).
- **Utilisabilité** : le questionnaire d’Anneli a été modifié à notre contexte de recherche afin d’évaluer l’utilisabilité (Anneli et al., 1994) . Nous utilisons quatre questions sur une échelle de 1 à 7 points (voir questionnaire de navigation questions 16-19 annexe A).
- **Présence sociale** : nous utilisons la méthode de Short et Christie (Short et al., 1978) pour mesurer le sens de la présence sociale avec neuf paire bipolaire de questions (voir questionnaire de navigation question 20 annexe A).
- **Préférences** : nous proposons quatre questions pour évaluer les préférences des utilisateurs par rapport aux métaphores proposées (voir questionnaire de navigation questions 21-24 annexe A).

Au total, les participants doivent répondre à un questionnaire de 25 questions en ligne.

Par ailleurs, nous utilisons une mesure objective afin d'évaluer les performances de chaque participant dans les trois conditions en mesurant le temps d'accomplissement de la tâche (l'ensemble des questions est donné en annexe A.)

#### V.1.2.7 - Résultats

Les résultats présentés dans cette section ont été analysés en utilisant la version 16 du logiciel d'analyse statistique de données SPSS. Nous utilisons la méthode de l'ANOVA à un facteur pour l'analyse de la variance en utilisant des niveaux de confiance de 5% et de 1%. Nous utilisons également le post-hoc de Scheffe qui précise les groupes qui se distinguent significativement entre eux.

##### *V.1.2.7.1 - Performance de la tâche*

Les résultats statistiques montrent que les participants ont dû mettre en moyenne 131.23 secondes en utilisant la métaphore de la CARTE pour accomplir la tâche, alors qu'avec la métaphore de l'AVATAR, le temps moyen d'accomplissement de la tâche est de 137.48 secondes, pour la métaphore de la LAMPE le temps de réalisation de la tâche est de 142.21 secondes. L'analyse de la variance ne montre pas de différence significative entre les trois conditions ( $F(2,117) = 0.029$   $p=0,971$ ). Le résultat obtenu au niveau de la performance de la tâche montre bien que toutes les métaphores permettent d'accomplir la tâche correctement dans des temps proches. Cette vérification est un préalable avant d'approfondir la question des critères de conception d'un EVC dont font partie les critères liés à l'expérience de l'utilisateur et qui sont détaillés par la suite.

##### *V.1.2.7.2 - Présence sociale*

La moyenne de la présence sociale chez les participants en utilisant la métaphore de la LAMPE est de 4.89, comparativement à 4.90 pour la métaphore de l'AVATAR et 4.68 pour la métaphore de la CARTE (figure 54). La différence entre les trois groupes est non significative ( $F(2,117) = 0.59$ ,  $p=0.591$ ). On peut donc conclure que le type de métaphore d'interaction n'influence pas la présence sociale.



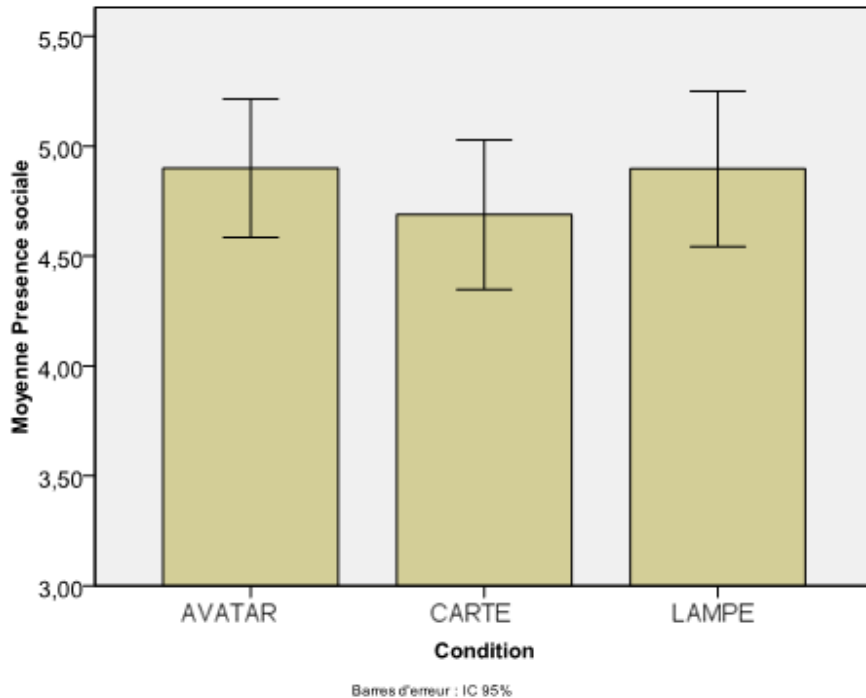


Figure 54. La moyenne de la présence sociale dans les trois conditions « navigation »

#### V.1.2.7.3 - Coprésence

La moyenne de la coprésence chez les participants en utilisant la métaphore de la LAMPE est de 5.67, comparativement à 4.95 pour la métaphore de l'AVATAR et 4.62 pour la métaphore de la CARTE (figure 55). La différence entre les trois groupes est significative ( $F(2,117) = 5.2, p = 0.007$ ). On peut donc conclure que le type de métaphore d'interaction influence la coprésence (tableau 3).

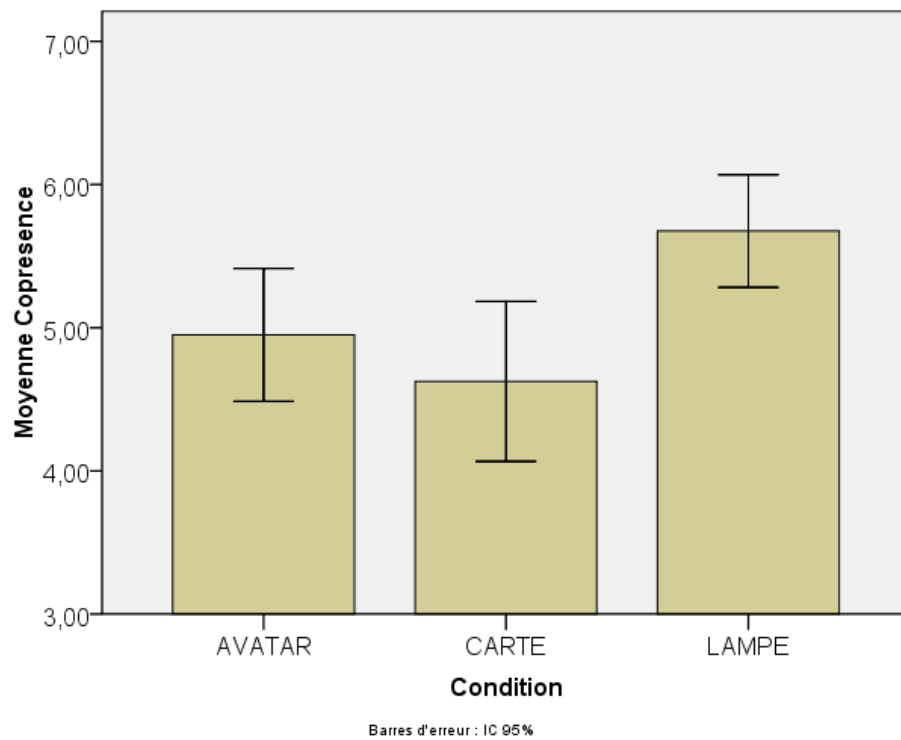


Figure 55. La moyenne de la coprésence dans les trois conditions « navigation »

Tableau 3. Comparaison post-hoc pour la coprésence « navigation »

Condition	Signification
AVATAR -CARTE	p=0.623
CARTE-LAMPE	p=0.006**
AVATAR-LAMPE	p=0.098

#### V.1.2.7.4 - Effort collaboratif

La moyenne de l'effort collaboratif obtenue en utilisant la métaphore de la LAMPE est de 4.58, alors qu'elle est de 4.28 pour la métaphore de l'AVATAR et de 4.03 pour la métaphore de la CARTE (figure 56). En analysant la variance des trois conditions, on trouve une différence

significative entre les groupes ( $F(2,117) = 4.98$ ,  $p = 0.008$ ). Les métaphores de navigation influencent l'effort collaboratif (tableau 4).

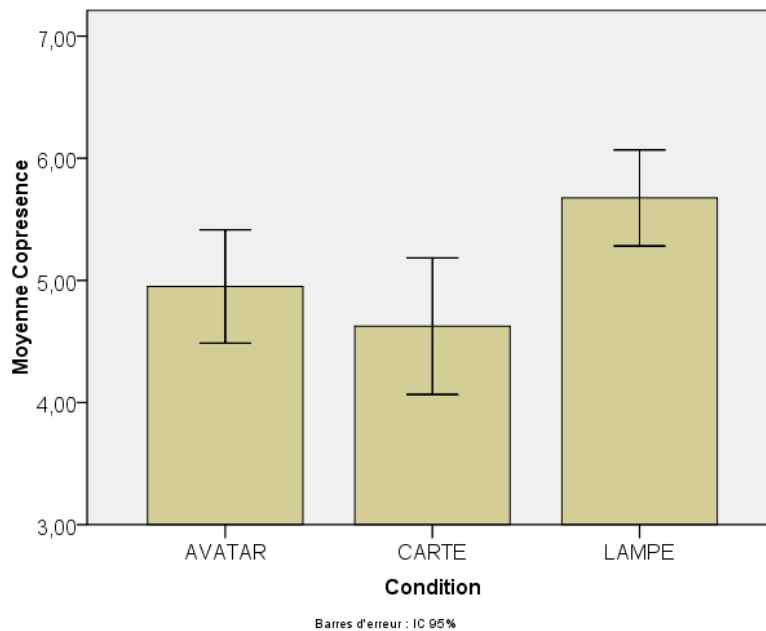


Figure 56. La moyenne de l'effort collaboratif dans les trois conditions « navigation »

Tableau 4. Comparaison post-hoc pour l'effort collaboratif « navigation »

Condition	Signification
AVATAR -CARTE	$p=0.361$
CARTE-LAMPE	$p=0.008^{**}$
AVATAR-LAMPE	$p=0.232$

#### V.1.2.7.5 - Implication

En utilisant la métaphore de la CARTE, la moyenne de l'implication est de 5.03, alors que pour la métaphore de la LAMPE elle est de 4.75, et de 4.35 pour la métaphore de l'AVATAR (figure 57). L'analyse de la variance entre les trois conditions montre une différence

significative ( $F(2,117) = 5.1$ ,  $p = 0.007$ ). Le type de métaphores de navigation influence l'implication des participants (tableau 5).

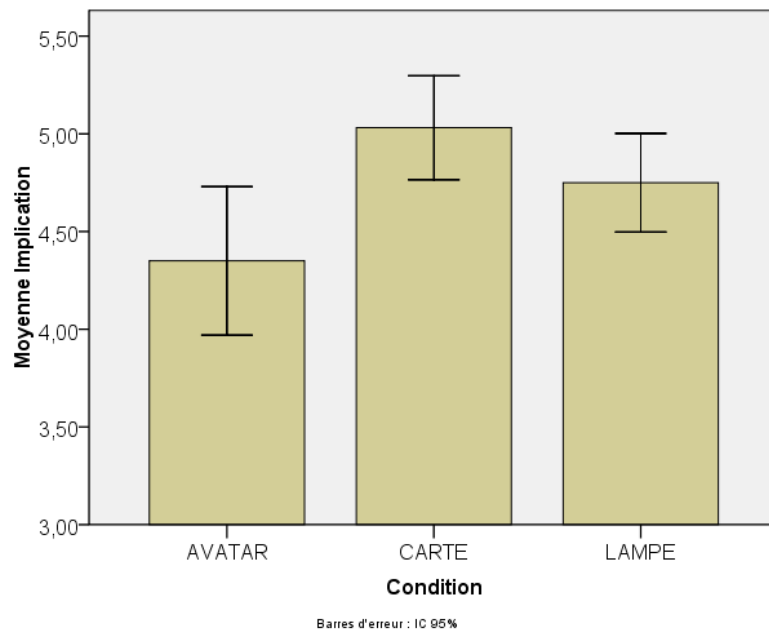


Figure 57. La moyenne de l'implication dans les trois conditions « navigation »

Tableau 5 Comparaison post-hoc pour l'implication « navigation »

Condition	Signification
AVATAR -CARTE	$p = 0.007^{**}$
CARTE-LAMPE	$p = 0.421$
AVATAR-LAMPE	$p = 0.176$

#### V.1.2.7.6 - Conscience 'Awareness'

Chez les participants qui ont utilisé la métaphore de l'AVATAR, la moyenne de l'awareness est de 6.00, elle est de 5.78 pour la métaphore de la LAMPE et de 5.17 pour la métaphore de

la CARTE (figure 58). L'analyse de la variance montre une différence significative entre les conditions ( $F(2,117) = 5.15, p = 0.007$ ) (tableau 6).

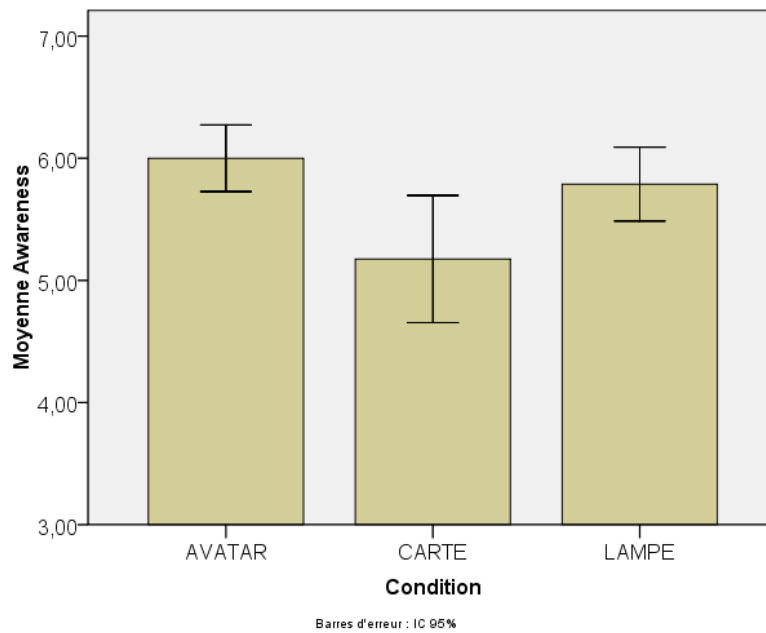


Figure 58. La moyenne de l'awareness dans les trois conditions « navigation »

Tableau 6. Comparaison post-hoc pour l'awareness « navigation »

Condition	Signification
AVATAR -CARTE	$p = 0.01^{**}$
CARTE-LAMPE	$p = 0.076$
AVATAR-LAMPE	$p = 0.729$

#### V.1.2.7.7 - Utilisabilité

La moyenne de l'utilisabilité chez les participants en utilisant la métaphore de la LAMPE est de 5.75, comparativement à 5.23 pour la métaphore de l'AVATAR et 4.28 pour la

métaphore de la CARTE (figure 59). La différence entre les trois groupes est significative ( $F(2,117) = 11.44$   $p=0.001$ ) (tableau 7).

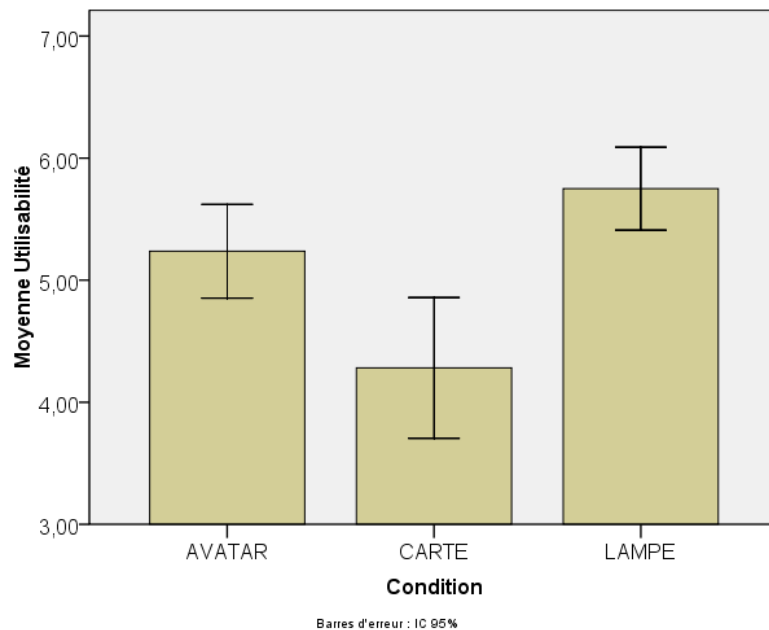


Figure 59. La moyenne de l'utilisabilité dans les trois conditions « navigation »

Tableau 7. Comparaison post-hoc pour l'utilisabilité « navigation »

Condition	Signification
AVATAR -CARTE	$p=0.011^{**}$
CARTE-LAMPE	$p=0.001^{**}$
AVATAR-LAMPE	$p=0.263$

#### V.1.2.7.8 - Satisfaction

La moyenne de la satisfaction chez les participants en utilisant la métaphore de la LAMPE est 5.08, comparativement à 4.60 pour la métaphore de l'AVATAR et 4.17 pour la métaphore de la CARTE (figure 60). La différence entre les trois groupes est significative ( $F(2,117) = 3.15$ ,  $p=0.046$ ) (tableau 8).

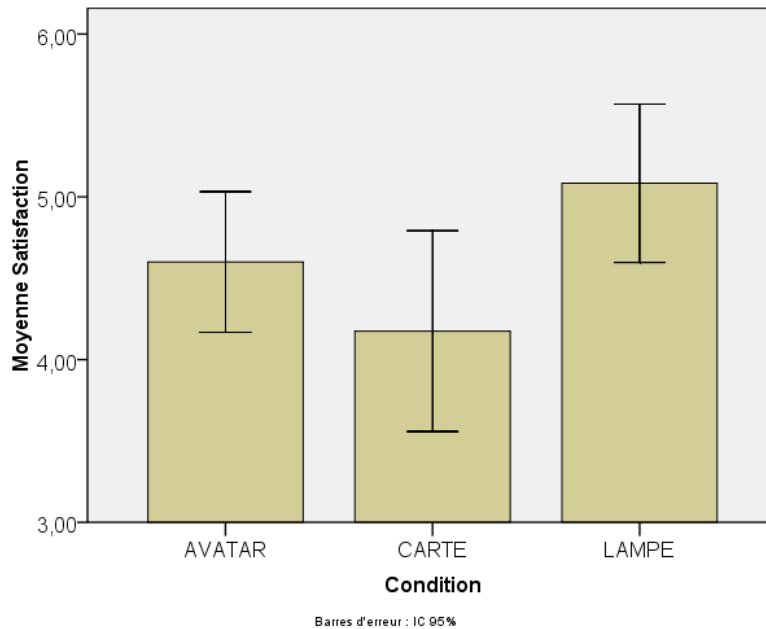


Figure 60. La moyenne de la satisfaction dans les trois conditions « navigation »

Tableau 8. Comparaison post-hoc pour la satisfaction « navigation »

Condition	Signification
AVATAR - CARTE	p=0.504
CARTE-LAMPE	p=0.047*
AVATAR-LAMPE	p=0.413

#### V.1.2.7.9 - Préférences

L'analyse du questionnaire au sujet de la préférence montre que 40 % des utilisateurs préfèrent la LAMPE alors que 31 % des participants préfèrent l'AVATAR, et 29 % de participants préfèrent la CARTE.

#### V.1.2.7.10 - Corrélation

---

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants d'immersion virtuelle

L'analyse des données de la présente recherche montre qu'il existe une relation de corrélation statistiquement significative entre les variables suivantes :

- Awareness et coprésence ( $r = 0.355, p = 0.001$ )
- Effort collaboratif et coprésence ( $r = 0.395, p = 0.001$ )
- Effort collaboratif et awareness ( $r = 0.308, p = 0.001$ )
- Satisfaction et effort collaboratif ( $r = 0.313, p = 0.001$ )
- Utilisabilité et coprésence ( $r = 0.314, p = 0.001$ )
- Utilisabilité et awareness ( $r = 0.325, p = 0.001$ )
- Utilisabilité et effort collaboratif ( $r = 0.382, p = 0.001$ )
- Utilisabilité et satisfaction ( $r = 0.606, p = 0.001$ )
- Présence sociale et coprésence ( $r = 0.415, p = 0.001$ )
- Présence sociale et satisfaction ( $r = 0.475, p = 0.001$ )
- Présence sociale and Utilisabilité ( $r = 0.349, p = 0.001$ )

#### V.1.2.8 - Discussion

Les résultats de cette étude révèlent un certain nombre de différences significatives au niveau de plusieurs variables.

L'analyse des données expérimentales n'a pas montré de différence significative au niveau de la performance de la tâche. Cependant, en se basant sur l'analyse de données vidéo enregistrées pendant l'expérience, nous remarquons que les sujets ont déployé un effort important en inspectant les objets. La tâche n'est pas seulement limitée à l'observation de la couleur. Les sujets ont dû évaluer visuellement l'existence de la couleur jaune relativement au volume de chaque objet. La différence significative trouvée au niveau de l'effort collaboratif à partir de l'analyse des données expérimentales confirme que les utilisateurs ont dû échanger des informations afin de prendre la décision appropriée. Le résultat obtenu est attendu. En effet, dans des cas où les métaphores de navigation donnent les mêmes performances de la tâche, il



est intéressant de s'orienter vers des aspects liés à l'expérience de l'utilisateur d'où l'apport de notre question de recherche précédemment présentée.

En analysant les résultats de cette expérience, nous constatons que le sens de la coprésence est plus élevé en utilisant la métaphore de la LAMPE par rapport aux deux autres métaphores (LAMPE>AVATAR>CARTE). Nous justifions cela par le fait que la métaphore de la LAMPE donne à l'utilisateur un contrôle direct sur son avatar. Beaucoup de travaux ont montré que le niveau d'interactivité conditionne le sens de la présence d'une façon générale. Le contrôle direct de la position spatiale va générer chez les participants un sentiment de coprésence plus élevé avec la métaphore de la LAMPE. De plus, cette métaphore (la LAMPE) permet à l'utilisateur d'avoir un retour visuel direct du point de vue du partenaire dans la scène. Ceci va aussi influencer d'une façon positive la coprésence. Le fait d'avoir directement dans la scène une information visuelle sur le partenaire dans la scène aidera le participant à mieux percevoir la présence d'une autre personne dans la scène et donc avoir un sentiment de coprésence plus élevé par rapport aux autres métaphores de navigation. Nous constatons également que la métaphore de la CARTE donne un bas niveau de coprésence par rapport aux autres métaphores. En utilisant la métaphore de la CARTE, l'utilisateur est confronté à trois vues différentes au même instant : une pour l'EV, une autre pour le point de vue du partenaire et une troisième pour la petite carte représentant l'EV en 2D. Cela va diviser la notion de l'espace chez les participants et perturbera le sentiment de la coprésence dans l'EV et donc baissera le niveau de coprésence.

Au niveau de l'engagement de l'utilisateur, nous constatons que la CARTE augmente cette notion chez les participants (CARTE>LAMPE>AVATAR). Ce résultat est justifié par le fait que la métaphore de la CARTE permet aux utilisateurs d'avoir une référence spatiale de leur position dans la scène, grâce à la petite carte. Cette référence est très importante pour donner à l'utilisateur un sentiment d'implication par rapport à l'EV. Une personne qui connaît bien sa position dans l'environnement se sentira mieux intégré dans cet espace ; cela encourage son sentiment d'appartenir à cet environnement, et donc favorise le sentiment d'implication.

Pour l'awareness, les résultats montrent que les métaphores qui donnent à l'utilisateur un contrôle direct de leur position dans l'environnement, avec un retour visuel direct du point de vue de leur partenaire (AVATAR et LAMPE > CARTE), favorise le sentiment d'awareness ou de « conscience » chez les participants.

Au niveau de l'effort collaboratif, nous remarquons que la métaphore de la LAMPE augmente chez les participants le sentiment de collaboration. Les résultats statistiques montrent que (LAMPE > AVATAR > CARTE). Comme nous l'avons déjà mentionné, la métaphore de la LAMPE donne un retour direct dans la scène pour le point de vue du partenaire. Avoir cette information directement dans la scène va permettre aux participants d'avoir moins d'informations à traiter et donc une charge cognitive plus faible, permettant aux sujets de se concentrer plus sur la réalisation de la tâche.

Nous avons noté lors du débriefing que la majorité des participants ont annoncé qu'il est très difficile d'utiliser la métaphore de la CARTE pour de petits déplacements en raison d'un manque de précision du système. Ils ont constaté que la métaphore de la LAMPE est intuitive et plaisante à l'utilisation car elle permet d'avoir un retour visuel direct du point de vue du partenaire. Ceci justifie que la métaphore de la LAMPE donne plus de satisfaction.

Les résultats de cette étude prouvent que les métaphores de navigation n'ont pas affecté la présence sociale et n'ont pas amélioré l'information sociale.

Nous notons qu'il y a une corrélation statistiquement significative entre la coprésence et l'awareness. Selon (Ruth, 2005), la coprésence se rapporte à une prise de conscience mutuelle entre les participants. Par ailleurs, avoir une conscience des actions du partenaire pendant la réalisation de la tâche est fortement liée au sentiment de coprésence car les deux notions sont fortement liées : avoir une conscience des actions du partenaire et avoir le sentiment d'être avec une autre personne dans le même EV. Ceci explique la relation de corrélation entre la coprésence et la conscience.

Il y a une corrélation significative entre l'utilisabilité et la satisfaction. En effet, une métaphore de navigation facile à utiliser, contribue à la satisfaction de l'utilisateur. Nous avons également trouvé une corrélation positive entre la coprésence et l'utilisabilité. Selon (Gerhard et al., 2001a), la présence est l'indicateur principal de l'utilisabilité de l'EVC ; ce qui peut expliquer ce résultat.

Nous avons trouvé que l'effort de collaboration et la satisfaction sont fortement corrélés. Nous supposons que quand une métaphore présente l'avantage d'être facile à employer et que l'utilisateur est satisfait de son utilisation, ceci motive les participants et favorise le processus de la collaboration.

## V.2 - Expérience sur la manipulation 3D en EVC

### V.2.1 - La manipulation 3D

#### V.2.1.1 - Introduction

En RV, la manipulation des objets joue un rôle très important dans l'interaction 3D. La qualité de l'EV dépend du niveau d'interaction entre l'utilisateur et cet environnement. C'est une tâche en commun entre le monde réel et l'EV. Dans notre vie courante, nous utilisons nos mains afin d'interagir avec des objets ; la main peut donc être considérée comme un parfait périphérique d'interaction. Elle permet la manipulation de différent type d'objet d'une façon précise efficace et rapide. Si l'on veut par exemple porter un livre d'un point A vers un point B, nous effectuons les étapes suivantes :

On prend le livre → on le déplace → on retourne le livre selon l'orientation voulue → on dispose le livre.

Dans nos travaux, nous utilisons une décomposition semblable à celle évoquée précédemment c'est-à-dire que pour nous la tâche de manipulation est constituée de :

- Sélection: la sélection consiste à distinguer un objet parmi d'autres (prendre le livre). Cette tâche est considérée selon Mine (M. R. Mine, 1996) comme l'action de pointer un objet puis le valider. La sélection peut être alors présentée de la façon suivante :

Sélection = pointage + validation

- Translation : la tâche de changement de la position 3d d'un objet souvent préalablement sélectionné (déplacer le livre)
- Rotation : la rotation est la tâche de changement d'orientation d'un objet (retourner le livre)

#### V.2.1.2 - Classification des techniques de manipulation 3D

Il existe plusieurs techniques de manipulation 3D. Beaucoup de ces techniques ont des points en commun. Ces techniques de manipulation peuvent être structurées par une classification permettant de mieux comprendre ces techniques et également de les évaluer.

Il existe des classifications qui ont été proposées afin de structurer les techniques de manipulation. On peut citer par exemple :

- la classification par métaphore

**Métaphores égocentrique** : une métaphore égocentrique est une métaphore dans laquelle l'utilisateur agit directement depuis l'intérieur de l'environnement virtuel, comme s'il en faisait partie. Ce type de métaphore est généralement moins approprié à la manipulation à grande échelle. Ces métaphores sont généralement utilisées pour la manipulation d'objet avec précision. Les métaphores égocentriques sont divisées en deux familles :

- Les métaphores de main virtuelle
- Les métaphores de pointeur virtuel

**Métaphores exocentriques** : elles placent l'utilisateur à un niveau extérieur. Celui-ci interagit depuis l'extérieur de l'environnement virtuel. Par conséquent, ces métaphores d'interaction sont particulièrement utilisables dans les situations où la tâche est répartie sur des distances relativement grandes dans la scène. Cependant, la manipulation d'objet qui exige une interaction très précise, telle que la déformation d'objet, sera plus difficile avec ce genre de métaphores.

#### V.2.1.3 - Études empiriques

Quelques études empiriques ont été entreprises afin d'évaluer l'impact des métaphores d'interaction sur les performances de la tâche dans le cadre des EVs mono utilisateur. Dans cette section, nous allons présenter deux études empiriques de référence sur les techniques d'interaction 3D.

Bowmann (Bowman et al., 1999a) a utilisé un banc d'essai (Testbad) pour évaluer des métaphores de l'interaction 3D comme le Ray casting, le GoGo et l'Image plane. Dans son expérience, les sujets doivent effectuer des tâches simples et génériques d'interaction 3D. La première tâche est une tâche de sélection : l'utilisateur doit sélectionner un objet parmi un groupe d'objets. Les variables intra-sujet pour cette tâche sont la distance entre l'utilisateur et l'objet (3 distances différentes ont été évaluées) et la taille de l'objet à choisir (2 tailles ont été choisies). La deuxième tâche est une tâche de manipulation : l'utilisateur doit déplacer et orienter l'objet selon l'information contenue dans une cible. Les variables intra-sujets pour cette tâche sont la taille relative de l'objet par rapport à la position finale (2 tailles différentes ont été testées) et le nombre de degrés de liberté de l'interaction (2ddl, 6ddl). Les résultats de cette expérience prouvent que la métaphore de Ray casting donne de meilleures performances que le GoGo pour la sélection d'objet. Cependant pour la manipulation, les performances du Ray casting diminuent au profit du GoGo. Également, cette étude montre des résultats secondaires comme le fait que l'habileté spatiale et l'expérience antérieure en EV ne peuvent pas être utilisées pour prédire la performance. La sélection par occultation peut provoquer la fatigue du bras chez les sujets. La manipulation par changement d'échelle peut provoquer des vertiges après l'expérience en RV. De même, les sujets de sexe masculin ont eu des meilleures performances.

Poupyrev (Poupyrev et al., 1997) a également effectué une évaluation des techniques de l'interaction 3D (GoGo Ray casting et main virtuelle). Dans cette expérience, l'utilisateur doit effectuer deux tâches. Les variables intra-sujets pour la sélection sont la distance de l'utilisateur par rapport à l'objet (5 niveaux) et la taille de l'objet à choisir (3 niveaux). La variable intra-sujet pour la manipulation est la taille relative de l'objet par rapport à la position finale (3 niveaux). Les résultats de cette expérience montrent que d'une façon générale les métaphores de Ray casting sont mieux adaptées pour la sélection des objets avec retour visuel même si la translation d'objet est moins bonne avec cette métaphore par rapport aux autres (GoGo et Main virtuelle).

### V.2.2 - L'étude expérimentale

Cette expérience a pour but d'étudier l'impact des métaphores de manipulation sur l'expérience de l'utilisateur et la performance de la tâche dans un EVC. Les métaphores de manipulation utilisées dans cette expérience sont les suivantes :

- Ray casting
- GoGo
- Main virtuelle

Les variables mesurées dans cette expérience sont les mêmes que dans l'expérience précédente, sauf pour la présence sociale. En effet, vu les résultats obtenus dans l'expérience précédente nous avons jugé inutile de reprendre cette mesure.

#### V.2.2.1 - Description de la tâche

Pour chaque session, les participants sont regroupés par deux pour réaliser une tâche ensemble à distance. Nous avons choisi comme tâche l'assemblage d'un puzzle 3D. Les participants doivent reconstituer une image par un assemblage de cubes. L'image à reconstituer correspond à un dégradé de couleurs et est présentée en bas à droite de l'écran. Cette tâche exige des participants de travailler ensemble dans le but de résoudre d'une façon collaborative le problème. Les sujets utilisent une métaphore par session parmi les trois métaphores de manipulation. Ils doivent établir un puzzle 3D de neuf cubes, placés d'une façon aléatoire sur une table, le puzzle change d'une métaphore à l'autre. Pour reconstruire le puzzle, les participants peuvent sélectionner les cubes et les placer sur un squelette (représentant la structure du puzzle) (figure 61).

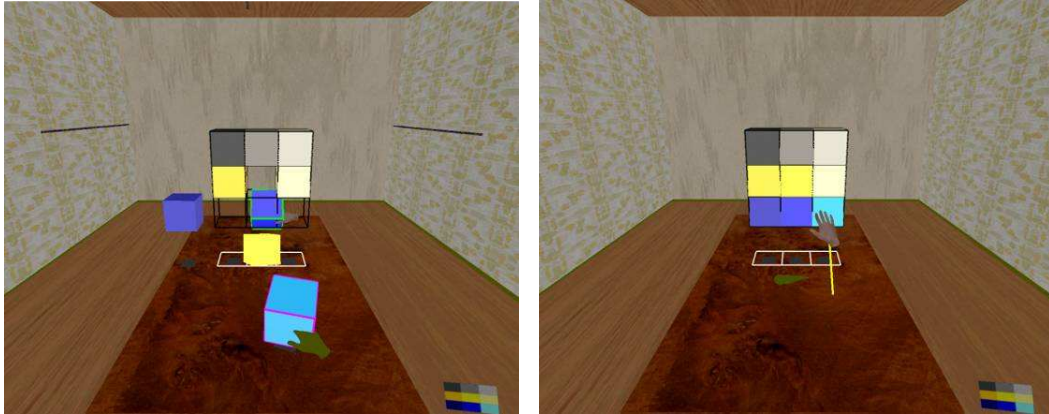


Figure 61. La scène virtuelle utilisée dans l'expérience

Le choix de cette tâche est justifié par le fait qu'elle demande une collaboration entre les sujets afin de trouver la bonne configuration des cubes. Cela nécessite la communication et la participation entre les sujets. La tâche de puzzle demande l'utilisation des métaphores de manipulation pour manipuler les cubes. Également, cette tâche est utilisée dans beaucoup de travaux précédents et est considérée comme une tâche de référence dans les études du travail collaboratif (Schroeder et al., 2001).

#### V.2.2.2 - Conditions d'expérience

Nous nous sommes basés sur la classification proposée dans la section VI.1.2 pour le choix des métaphores utilisées pour effectuer la tâche de puzzle 3D. Ces métaphores sont détaillées ci-dessous.

##### *V.2.2.2.1 - Métaphore de la main virtuelle*

La métaphore de la main virtuelle est l'une des métaphores les plus naturelles et simples à utiliser. Cette métaphore fait référence à une utilisation directe de la main de l'utilisateur. La main virtuelle évolue d'une façon similaire à la main réelle de l'utilisateur. Les objets présents dans la scène peuvent être sélectionnés par intersection entre la main et l'objet. Une fois l'objet sélectionné, il est attaché à la main virtuelle ; la manipulation se fait donc par un mapping direct de la main à l'objet (figure 62).



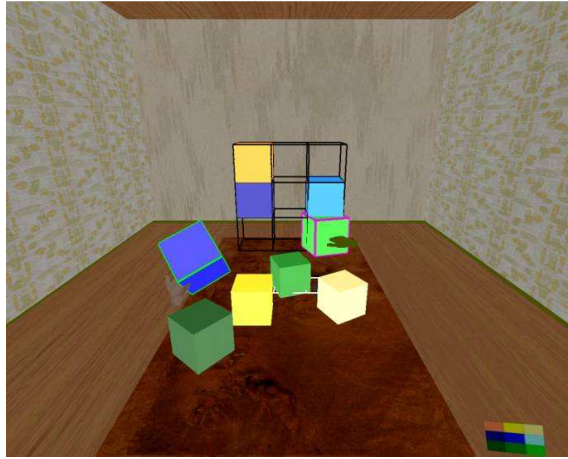


Figure 62. Métaphore de la Main virtuelle

#### *V.2.2.2.2 - Métaphore de Ray casting*

La métaphore de ray-casting est l'une des métaphores les plus utilisées. Un rayon est attaché à la main virtuelle de l'utilisateur. La main virtuelle et le rayon évoluent de la même façon que la main réelle de l'utilisateur. Cette métaphore permet de sélectionner des objets en les désignant avec le rayon virtuel. Une fois sélectionnés, les objets peuvent être manipulés comme s'ils étaient attachés au rayon virtuel (figure 63).

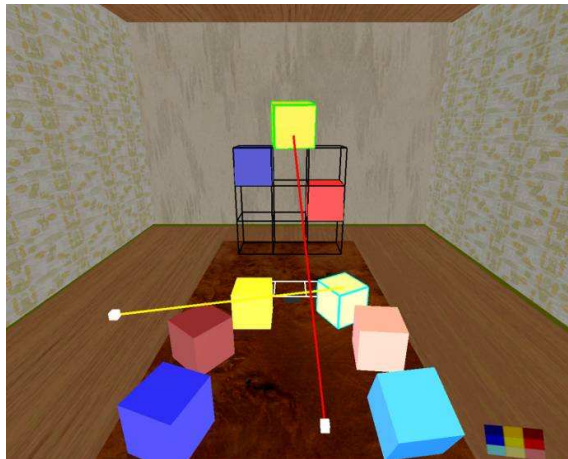


Figure 63. Métaphore du Ray casting

*V.2.2.2.3 - Métaphore de GoGo*

Cette métaphore donne à l'utilisateur un bras virtuel « élastique » pour atteindre les objets virtuels éloignés. L'espace autour de l'utilisateur est divisé en deux zones. Une première zone est centrée sur lui. Dans cette zone, la main virtuelle évolue de la même façon que la main virtuelle classique. Quand l'utilisateur prolonge sa main au delà de cette zone, ses mouvements sont amplifiés et le coefficient d'amplification croît au fur et à mesure de l'extension de son bras (figure 64).

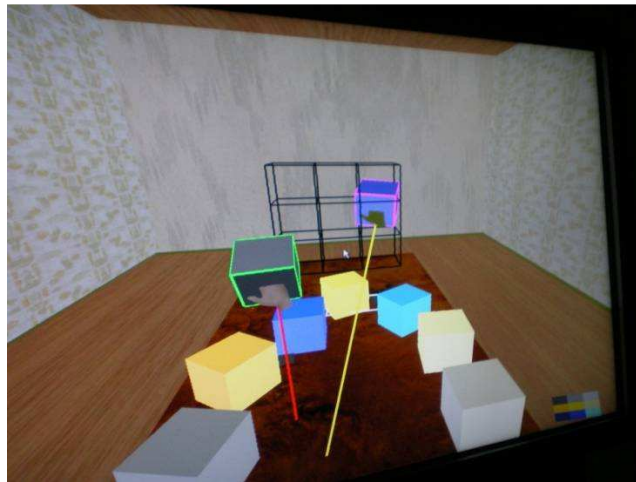


Figure 64. Métaphore de GoGo

*V.2.2.3 - Matériel*

Le matériel utilisé dans cette expérience est le même que celui utilisé dans l'expérience précédente (voir chapitre 5) à savoir un système de tracking optique ainsi que la Wiimote comme périphériques d'entrées. Nous utilisons deux systèmes Braccettos qui sont reliés par une architecture réseau UDP/IP. La scène virtuelle est composée d'une chambre avec une table et des cubes de différentes couleurs déposés sur cette table. Les utilisateurs sont représentés par les métaphores de manipulation.

#### V.2.2.4 - Participants

32 participants âgés de 18 à 57 ans (moyenne=28.68, Écart Type=10.73) ont pris part à cette expérience. 34.37 % des participants sont des femmes. La plupart des participants ont été recrutés sur le campus de l'université de Macquarie à Sydney en Australie. Tous les participants ont plus de 18 ans, maîtrise parfaitement l'anglais et ont une vision normale ou corrigée.

#### V.2.2.5 - Procédure

La procédure de cette expérience est la même que l'expérience précédente. L'expérience dure environ 40 minutes. A la fin de l'expérience, les participants sont conduits dans la même salle afin qu'ils puissent se connaître et également pour faire un bilan permettant de recueillir leurs impressions.

#### V.2.2.6 - Mesures

Les variables mesurées dans cette expérience sont les mêmes que dans l'expérience précédente. Les questions posées aux sujets sont sur une échelle de 1 à 7 points. Ces mesures sont relatives aux notions suivantes.

- **Coprésence** - (voir questionnaire de manipulation questions 1-2 annexe A).
- **Implication** (voir questionnaire de manipulation questions 3-6 annexe A).
- **Awareness** (voir questionnaire de manipulation questions 7-9 annexe A).
- **Effort collaboratif** (voir questionnaire de manipulation questions 10-13 annexe A).
- **Satisfaction** (voir questionnaire de manipulation questions 14-16 annexe A).
- **Utilisabilité** (voir questionnaire de manipulation questions 17-20 annexe A).
- **Préférences** (voir questionnaire de manipulation questions 21-24 annexe A).

Pour mesurer la performance de la tâche, nous utilisons une mesure quantitative en mesurant le temps d'accomplissement de la tâche.

### V.2.2.7 - Résultats

#### *V.2.2.7.1 - Performance de la tâche*

Les résultats statistiques montrent que les participants ont dû mettre en moyenne 263,56 secondes en utilisant la métaphore de la Main virtuelle pour reconstruire le puzzle, alors qu'avec la métaphore de Ray casting, le temps moyen d'accomplissement de la tâche est de 249,52 secondes, pour la métaphore de GoGo le temps de réalisation de la tâche est de 201,63 secondes. L'analyse de la variance ne montre pas de différence significative entre les trois conditions ( $F(2,93) = 1,29$   $p=0,279$ ).

#### *V.2.2.7.2 - Coprésence*

La moyenne de la coprésence trouvée avec la métaphore de Ray casting est de 4.90, elle est de 3.81 avec la métaphore de GoGo et de 3.75 avec la métaphore de la Main virtuelle (figure 65). La différence entre les trois groupes est statistiquement significative ( $F(2,93) = 3.96$ ,  $p=0.022$ ). Le test de Post-hoc relève une différence significative entre le Ray casting et la Main virtuelle (tableau 9).

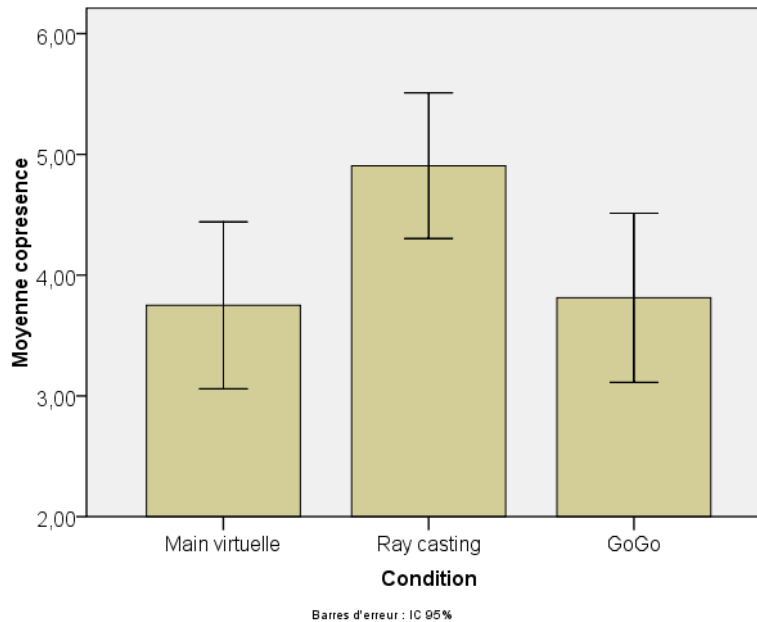


Figure 65. La moyenne de la coprésence dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 9. Comparaison post-hoc pour la copresence « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Co-presence	3.96	2	0.022	Ray casting> Main virtuelle

#### V.2.2.7.3 - Awareness

En utilisant la métaphore du Ray casting, la moyenne de la mesure de la Conscience est de 5.73, alors que pour la métaphore du GoGo elle est de 5.29, et de 4.90 pour la métaphore de la Main virtuelle (figure 66). L'analyse de la variance entre les trois conditions montre une différence significative  $F(2,93) = 4.50$ ,  $p = 0.014$ . Le test de Post-hoc relève une différence significative entre le Ray casting et la Main virtuelle  $p = 0.014$  (tableau 10).

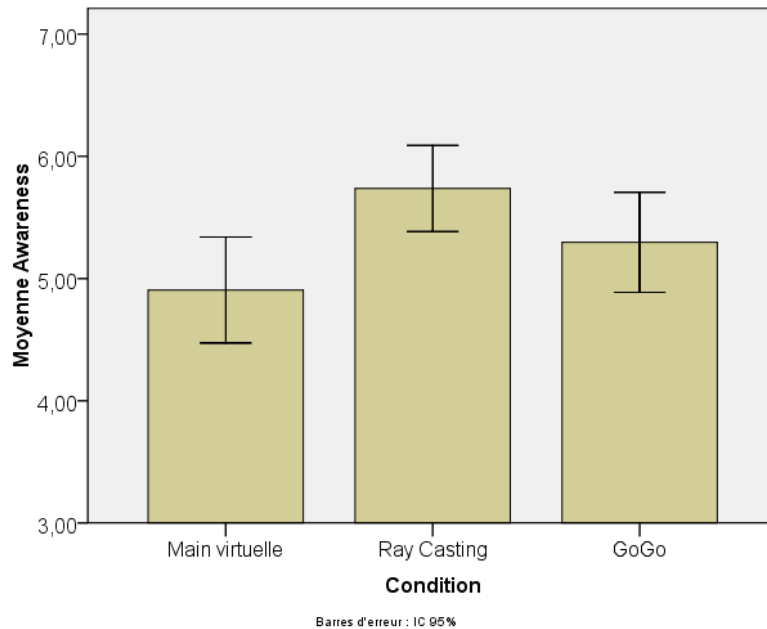


Figure 66. La moyenne de l'awareness dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 10. Comparaison post-hoc pour l'awareness « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Awareness	4.50	2	0.014	Ray casting> Virtual hand

#### V.2.2.7.4 - Effort collaboratif

L'effort collaboratif chez les participants en utilisant la métaphore du GoGo est de 4.56, comparativement à 4.19 pour la métaphore de la Main virtuelle et 4.02 pour la métaphore du Ray casting (figure 67). La différence entre les trois groupes est significative ( $F(2,93) = 3.31$ ,  $p=0.041$ ). Avec le test de post-hoc on trouve une différence significative entre le Ray casting et le GoGo ( $p=0.046$ ) (tableau 11).

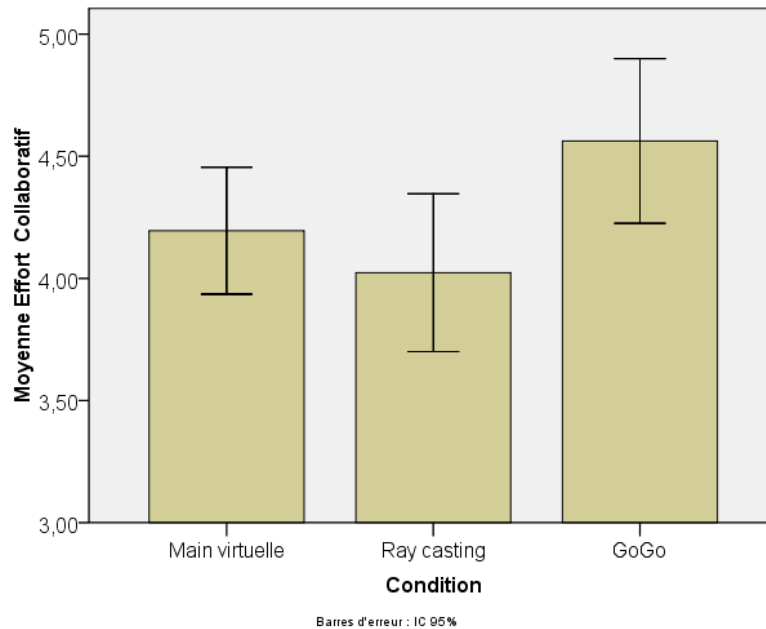


Figure 67. La moyenne de l'effort collaboratif dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 11. Comparaison post-hoc pour l'effort collaboratif « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Collaborative effort	3.31	2	0.041	GoGo > Ray casting

#### V.2.2.7.5 - Implication

Chez les participants qui ont utilisé la métaphore du Ray casting, la moyenne de l'implication est de 4.96. Elle est de 4.40 pour la métaphore de GoGo et de 4.15 pour la métaphore de la Main virtuelle (figure 68). L'analyse de la variance montre une différence significative entre les conditions  $F(2,93) = 4.79$ ,  $p = 0.01$ . Le test de Post-hoc montre une différence significative entre la Main virtuelle et le Ray casting ( $p = 0.013$ ) (tableau 12).

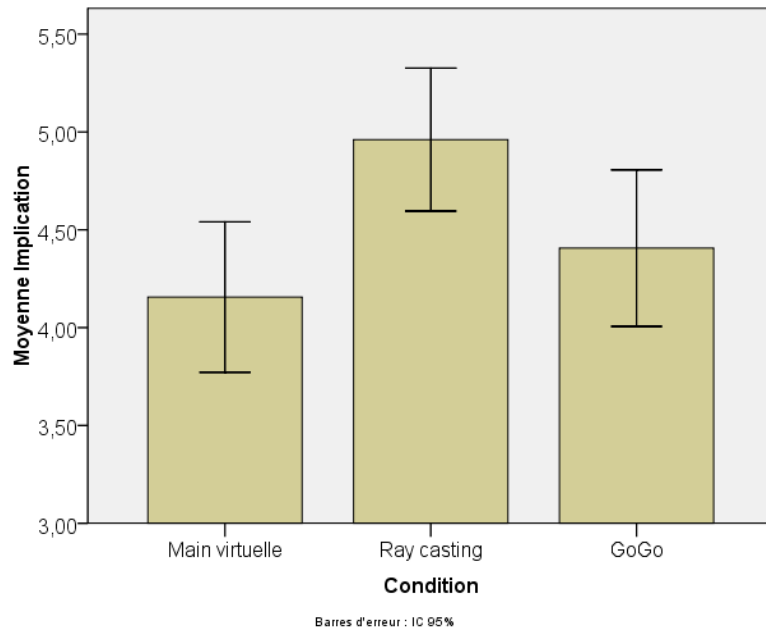


Figure 68. La moyenne de l'implication dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 12. Comparaison post-hoc pour l'implication « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Implication	4.79	2	0.01	Ray casting> Virtual hand

#### V.2.2.7.6 - Utilisabilité

La moyenne de l'utilisabilité chez les participants en utilisant la métaphore de GoGo est de 4.36, comparativement à 3.87 pour la métaphore de la Main virtuelle et 3.34 pour la métaphore du Ray casting (figure 69). La différence entre les trois groupes est significative  $F(2,93) = 3.18$ ,  $p = 0.046$ . Une différence significative entre le Ray casting et le GoGo a été relevée avec le test de Post-Hoc ( $p = 0.046$ ) (tableau 13).



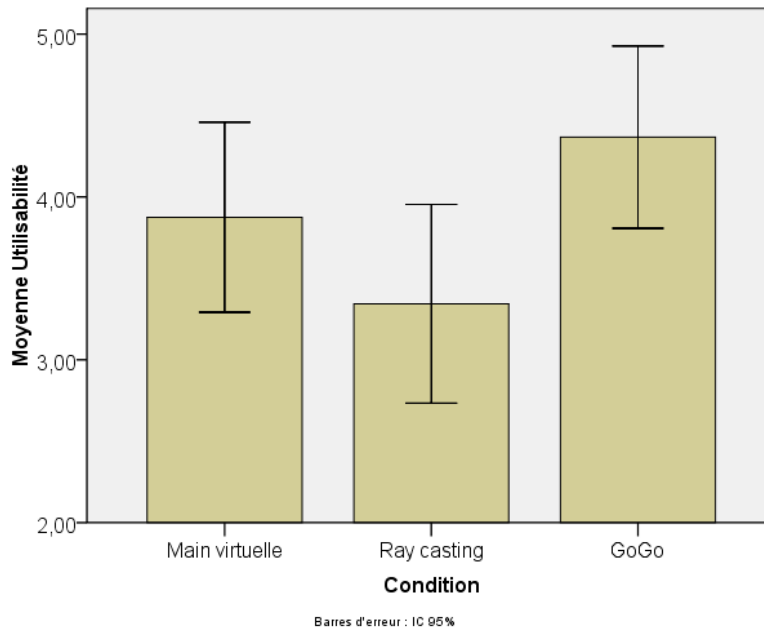


Figure 69. La moyenne de l'utilisabilité dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 13. Comparaison post-hoc pour l'utilisabilité « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Utilisabilité	3.18	2	0.046	GoGo > Ray casting

#### V.2.2.7.7 - Satisfaction

Les résultats montrent que la moyenne de la satisfaction est de 4.76 avec la condition de GoGo, 3.77 avec la condition de la main virtuelle et 3.53 avec le Ray casting (figure 70). La différence entre les trois groupes est significative  $F(2,93) = 3.74$ ,  $p = 0.027$ . Le test de post-hoc relève une différence significative entre le Ray casting et le GoGo ( $p = 0.04$ ) (tableau 14).

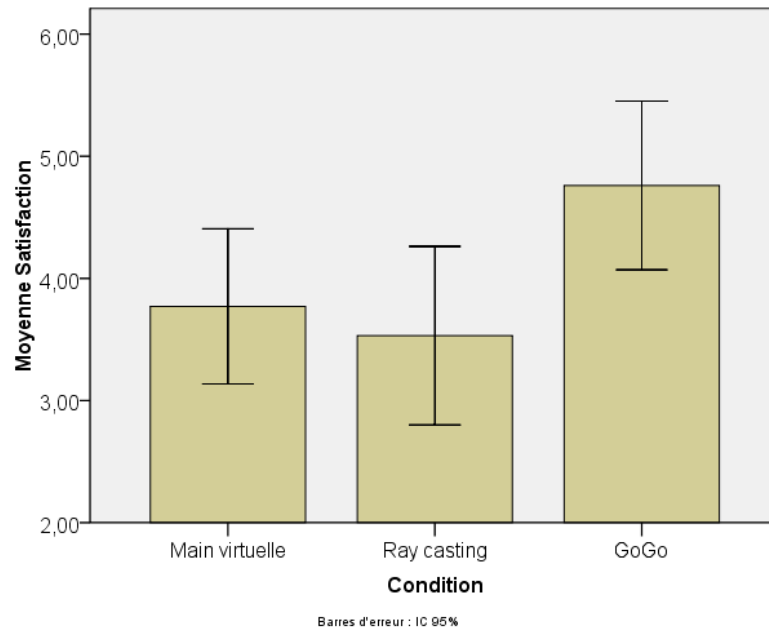


Figure 70. La moyenne de satisfaction dans les trois conditions « manipulation »

Tableau 14. Comparaison post-hoc pour la satisfaction « manipulation »

Factor	F	df	p	Post-hoc comparaisons
Satisfaction	3.74	2	0.027	GoGo > Ray casting

#### V.2.2.7.8 - Préférences

L'analyse de résultats du questionnaire relative à la préférence montre que 56.25 % des participants préfèrent la métaphore de GoGo, 31.25 % des participants préfèrent la main virtuelle et 12,5 % le Ray casting.

#### V.2.2.7.9 - Corrélation

Une corrélation de type Person a été utilisée afin de déterminer les relations de corrélations entre les variables mesurées. Les résultats obtenus sont les suivants (tableau 16) :

- Corrélation entre coprésence et implication:  $r = 0.512$ ,  $p = 0.001$

- Corrélation entre coprésence et awareness:  $r = 0.479$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre implication et awareness:  $r = 0.599$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre implication et satisfaction:  $r = 0.406$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre implication et utilisabilité:  $r = 0.309$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre utilisabilité et satisfaction:  $r = 0.309$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre satisfaction et collaborative effort:  $r = 0.343$ ,  $p = 0.001$
- Corrélation entre utilisabilité et collaborative effort:  $r = 0.264$ ,  $p = 0.001$

#### V.2.2.8 - Discussion

Le résultat obtenu pour la performance de la tâche de manipulation montre que les trois métaphores de manipulation proposées n'influent pas de façon significative sur la performance de la tâche. Cette dernière n'est donc pas un critère significatif pour le choix de la métaphore de manipulation. Explorer des aspects liés à l'expérience de l'utilisateur est par conséquent bénéfique pour la définition des critères liés au choix de la métaphore de manipulation.

Les résultats statistiques de cette expérience montrent que le niveau de coprésence est plus élevé en utilisant la métaphore de Ray casting par rapport aux métaphores de GoGo et de Main virtuelle. En analysant le comportement des sujets et lors de la séance de bilan avec les participants, nous avons constaté un sentiment de déception en utilisant la métaphore du Virtual hand chez les sujets car ils attendent de cette métaphore un comportement plus réaliste comme par exemple concernant l'animation des doigts, la fermeture ou l'ouverture de la main. L'étude de (Nowak & Biocca, 2003) montre qu'un bas niveau d'anthropomorphisme donne un niveau de coprésence et de présence sociale plus important qu'avec un anthropomorphisme plus élevé ou un anthropomorphisme nul. En effet, un niveau d'anthropomorphisme élevé crée chez les participants des espérances plus élevées en terme de réalisme du comportement. Aussi, lorsque ces espérances ne sont pas atteintes, le niveau de présence et de coprésence est réduit.

Les résultats statistiques montrent également que le niveau d'awareness est plus élevé en utilisant la métaphore de Ray casting (Ray casting>GoGo>Main virtuelle). Le test de Post-hoc montre une différence significative entre le Ray casting et la main virtuelle. La différence majeure entre ces deux métaphores est que la première est une métaphore de pointeur virtuel alors que la deuxième est une métaphore de main virtuelle. Pendant la réalisation de la tâche, la métaphore de Ray casting permet de mieux comprendre les actions du partenaire. Cette compréhension facilite les actions de l'autre participant et facilite le processus de conscience. Cela justifie le fait que le niveau de conscience est plus élevé en utilisant le Ray casting par rapport à la Main virtuelle.

Le résultat de corrélation trouvé entre la coprésence et la conscience confirme le résultat déjà obtenu dans l'expérience précédente. La coprésence et la conscience sont deux notions qui sont liées.

La métaphore de Ray casting donne un niveau d'implication plus élevé que les autres métaphores (Ray casting>GoGo>Main virtuelle). L'analyse des résultats de Post-hoc relève une différence significative entre la métaphore de Ray casting et la Main virtuelle. Également, les résultats montrent une relation de corrélation positive entre l'implication et la coprésence mais aussi entre l'implication et la conscience.

Lors de la séance de debriefing, la majorité des participants ont signalé que la métaphore de GoGo est une métaphore intuitive et agréable à utiliser comparée aux autres métaphores. En effet, la métaphore de la Main virtuelle présente l'avantage d'être simple et naturelle à utiliser. Mais, l'inconvénient majeur de cette métaphore est qu'elle ne permet pas de sélectionner les objets qui sont loin de l'utilisateur. La métaphore du Ray casting est bien adaptée pour la sélection des objets éloignés mais la rotation est difficile avec cette métaphore alors que la métaphore de GoGo est une métaphore qui permet de sélectionner et de manipuler des objets qui sont loin de l'utilisateur d'une façon simple et intuitive. Cela explique le niveau de satisfaction et d'utilisabilité plus élevé en utilisant la métaphore de GoGo (GoGo>Main virtuelle> Ray casting).

La perception de l'effort collaboratif est plus élevée avec la métaphore de GoGo (GoGo >Main virtuelle>Ray casting). Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette métaphore présente l'avantage d'être intuitive et agréable à utiliser créant chez les participants un sentiment de motivation pour accomplir la tâche. Cette motivation se traduit par l'effort de collaboration qui augmente en utilisant la métaphore de GoGo.

Nous trouvons également que l'effort collaboratif et la satisfaction, l'effort collaboratif et l'utilisabilité sont positivement corrélés. Quand une métaphore d'interaction présente l'avantage d'être facile à utiliser et que l'utilisateur est satisfait par l'utilisation de la métaphore, cela motive les participants et favorise le processus de collaboration.

### V.3 - Conclusion

Les résultats statistiques montrent que les métaphores d'interaction 3D influencent d'une façon significative plusieurs facteurs liés à l'expérience de l'utilisateur comme par exemple la coprésence, l'effort collaboratif, l'implication, l'awareness...etc.

Les résultats des deux expériences sont très intéressants sur deux aspects. Le premier aspect est lié à la conception des EVCs. Avec les résultats obtenus, nous pouvons dresser un ensemble de critères et de règles de conception qui seront proposés dans le chapitre conclusion. Le deuxième aspect concerne la compréhension de l'expérience de l'utilisateur dans un contexte de collaboration en EVC (voir le chapitre de conclusion). Grâce à la première étude, nous avons montré l'importance du choix de la métaphore de navigation. Nous avons également montré qu'il y a plusieurs facteurs entrant en compte dans le processus de collaboration et qui n'apparaissent pas dans le cas des EV mono utilisateur. Il est donc important d'utiliser une méthodologie d'évaluation spécifiquement conçue pour les EVCs.

Dans la seconde expérience, nous avons évalué l'effet des métaphores de manipulation sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC. La tâche choisie a été un puzzle 3D et les métaphores de navigation que nous avons utilisées sont le Ray casting, la Main virtuelle et le GoGo.

---

Les résultats obtenus dans cette expérience confirment les résultats antérieurs de la navigation et montrent clairement que les métaphores d'interaction influencent le travail collaboratif.



## Chapitre VI - Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous adressons une conclusion générale par rapport aux travaux de recherche menés durant cette thèse, ses caractéristiques et ses limitations, ainsi que les perspectives proposées pour la suite du projet.

### VI.1 - Introduction

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'interaction 3D du point de vue de l'expérience de l'utilisateur dans un EVC. Il est vrai que la performance de l'utilisateur est un critère important dans le choix d'une métaphore d'interaction. Cependant, la performance de l'utilisateur n'est pas un critère toujours utile pour le choix d'une métaphore d'interaction 3D, par exemple dans le cas où ces métaphores donnent les mêmes performances. Cela incite donc le concepteur à compléter ces critères par des critères liés à l'expérience de l'utilisateur car ils sont très importants pour le travail de collaboration avec l'autre. A travers ce travail de recherche, nous avons tenté de mieux comprendre des notions qui entrent dans le processus du travail collaboratif, comme par exemple la présence sociale, la coprésence, l'awareness, l'implication, l'utilisabilité et la satisfaction.

La principale question de recherche posée dans cette thèse était la suivante : « Quel est l'effet des métaphores d'interaction sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC ? ». Cette question de recherche a été adressée par deux expérimentations qui visent à évaluer les métaphores d'interaction dans un EVC, afin de trouver un ensemble de règles et de critères de conception nécessaires pour améliorer le travail collaboratif à distance.

### VI.2 - Contributions

L'objectif essentiel de cette thèse est d'étudier l'impact des métaphores d'interaction sur l'expérience de l'utilisateur dans un EVC. Pour mener à bien l'étude de cette problématique de recherche, nous avons décomposé les travaux de cette thèse en plusieurs parties.



### VI.2.1 - État de l'art

Vu le caractère pluridisciplinaire de cette thèse, l'état de l'art présenté dans ce mémoire offre une vision globale sur plusieurs aspects. Nous revisitons l'interaction 3D dans un EV en présentant les principales classifications de l'interaction 3D ainsi que les périphériques d'entrée et d'affichage utilisés dans l'interaction 3D. Nous présentons également un état de l'art sur la communication dans l'optique de mieux comprendre la communication interpersonnelle, en présentant quelques modèles de communication existants et en y ajoutant un modèle de communication collaborative. Également, un état de l'art sur les EVC a été dressé en abordant plusieurs points liés aux EVC.

### VI.2.2 - Système de tracking optique

Le système de tracking optique 3D développé dans le cadre de cette thèse est caractérisé par son bas coût ainsi que sa robustesse. Le développement de ce système de tracking nous a permis de travailler sur des problématiques liées au traitement des images et à la vision par ordinateur, comme par exemple la calibration des caméras, la géométrie stéréoscopique, l'étiquetage automatique...etc. Ce système de tracking 3D a été utilisé dans l'ensemble des applications développées dans le cadre de cette thèse.

### VI.2.3 - Applications

Deux applications collaboratives ont été développées dans cette étude en utilisant le langage de programmation C++ et des bibliothèques open source. La première application permet à deux utilisateurs dans deux sites distants d'inspecter collaborativement des objets 3D, en utilisant un ensemble de métaphores de navigation. La deuxième permet de réaliser un puzzle 3D en collaboration entre deux utilisateurs dans deux sites géographiquement éloignés, par l'utilisation de métaphores de manipulation.

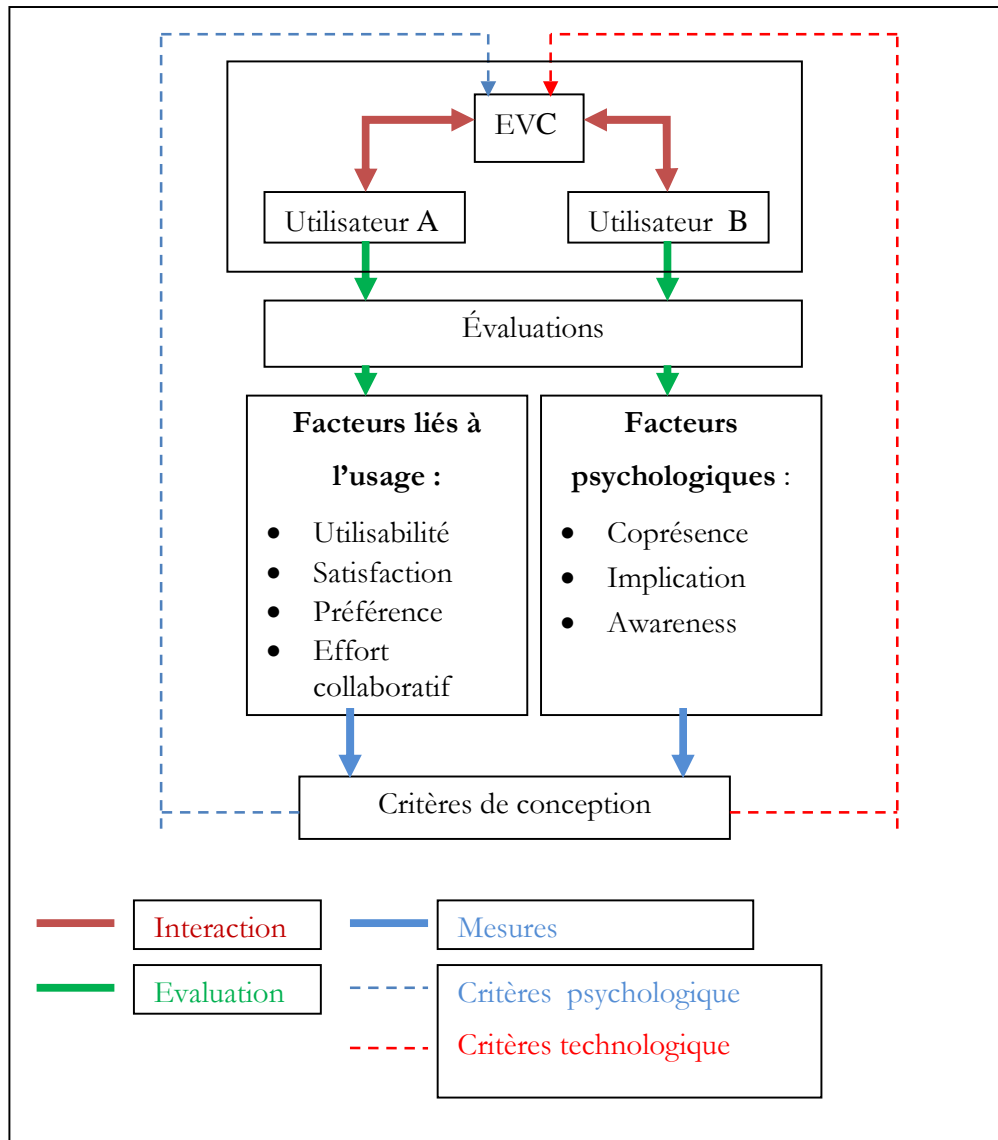
#### VI.2.4 - Evaluations

L'un des points forts de ce travail de recherche est la mise en place de deux séries d'expérimentation en partenariat avec l'équipe HFIT (Human Factors In Telepresence) du Networking Technologies Laboratory du CSIRO à Sydney qui est spécialisée dans l'étude des facteurs humains afin d'optimiser la collaboration dans les EVCs.

Il est évident que la performance de la tâche est un facteur très important dans l'évaluation d'un EVC. Cependant il est important de considérer d'autres facteurs qui influent sur l'expérience de l'utilisateur :

- Facteurs liés à l'usage de l'EVC
  - L'utilisabilité
  - La satisfaction
  - La préférence
  - L'effort collaboratif
- Facteurs psychologiques dans un EVC
  - La coprésence
  - L'implication
  - L'awareness

L'évaluation de ces facteurs dans un EVC se révèle importante et nécessaire pour comprendre les mécanismes qui influencent le travail collaboratif. C'est la raison qui nous a amené à proposer une méthodologie d'évaluation schématisée ci-dessous :



La première expérience est dédiée à l'effet des métaphores de navigation sur l'expérience de l'utilisateur et sur la performance de la tâche. Trois métaphores de navigation (CARTE, AVATAR et LAMPE) ont été comparées en utilisant une évaluation de type sommative avec des mesures subjectives (questionnaires) et objectives (mesures numériques).

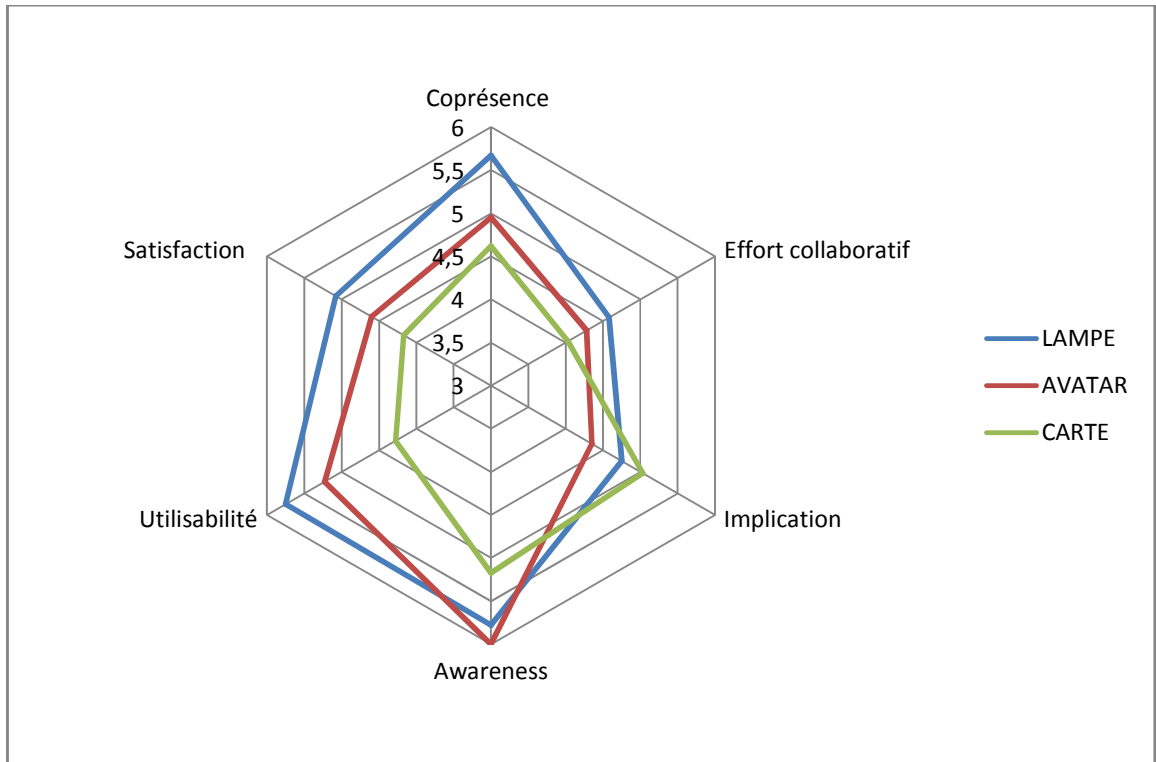


Figure 71. Récapitulatif des résultats pour l'expérience de la navigation

Pour cette expérience, nous avons recruté un ensemble de 40 participants. D'une façon générale, les résultats obtenus de cette expérience suggèrent l'utilisation d'un retour visuel du point de vue du partenaire direct dans la scène avec des métaphores qui donnent aux utilisateurs un contrôle direct de leurs actions, afin de favoriser des notions comme la coprésence et l'awareness.

La deuxième expérience est focalisée sur l'étude de l'effet des métaphores de manipulation sur l'expérience des utilisateurs en EVC. Dans cette expérience, nous avons proposé aux participants d'utiliser trois métaphores de manipulation (Ray casting, GoGo et Main virtuelle) pour faire une tâche de puzzle dans un EVC.

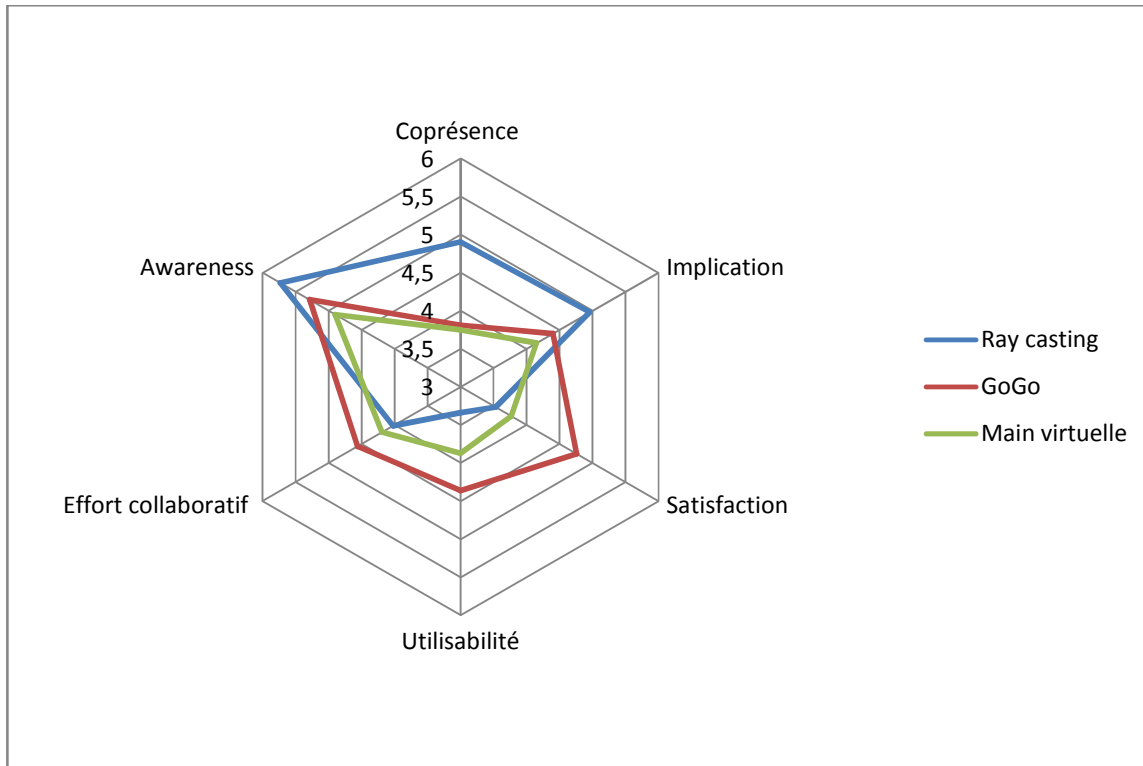


Figure 72. Récapitulatif des résultats pour l'expérience de la manipulation

32 participants ont pris part à cette expérience. Les résultats de cette expérience donnent l'avantage aux métaphores de manipulation de type pointeur virtuel. De même, les résultats suggèrent la nécessité d'avoir un équilibre entre le réalisme visuel et comportementale des métaphores de manipulation.

### VI.2.5 - Critères de conception

Les travaux réalisés dans cette thèse nous ont permis de montrer l'importance du choix de la métaphore d'interaction. Grâce aux résultats de nos deux expériences, nous avons pu établir une liste de recommandation pour favoriser l'interaction 3D dans un EVC où les facteurs humains sont des éléments essentiels :

- Utilisation d'un retour visuel du point de vue du partenaire directement dans la scène. Les résultats de l'expérience de navigation montrent que les métaphores avec retour visuel direct dans la scène permettent d'augmenter le sentiment de coprésence, implication et awareness. Ces notions sont nécessaires pour percevoir la présence et les actions du partenaire présent dans le même EVC.
- Un contrôle direct des actions de l'utilisateur. En effet, avoir une métaphore d'interaction avec un contrôle direct rend la métaphore plus interactive et favorise la collaboration dans l'EVC.
- Eviter d'utiliser plusieurs fenêtres d'affichage dans la même scène virtuelle. Nous constatons que l'utilisation de plusieurs fenêtres d'affichage (le cas de la métaphore de navigation CARTE) distrait l'intention de l'utilisateur et que l'espace virtuel (donc perçu par l'utilisateur) dans lequel l'utilisateur sent une présence et une coprésence est divisé à cause de cette multiplication d'affichage.
- La référence spatiale est très importante pour l'implication. Avoir ce type d'information dans un EV est important pour que l'utilisateur se repère par rapport à l'environnement ; cela favorise le sentiment de l'implication de l'utilisateur.
- N'avoir recours aux métaphores d'interaction avec un effort cognitif élevé qu'en cas de besoin. Une métaphore d'interaction avec une charge cognitive élevée demande à l'utilisateur de dépenser un effort mental considérable, cet effort diminue l'effort collaboratif entre les participants pour l'accomplissement de la tâche.
- Avoir un équilibre entre le réalisme visuel et comportemental. Nous constatons que si le réalisme comportemental n'est pas en adéquation avec le réalisme visuel, utilisé dans la métaphore d'interaction, cela crée chez les participants un sentiment de déception, qui influence d'une façon négative la coprésence, l'implication, l'awareness.
- L'importance de prendre en compte les facteurs ergonomiques de la métaphore d'interaction. Ces facteurs influencent l'utilisabilité, la satisfaction et l'effort collaboratif. Il est donc nécessaire d'utiliser au maximum des métaphores intuitives et agréables à utiliser.

## VI.3 - Limitations

### VI.3.1 - Limitations technologiques

Le système de tracking 3D utilisé dans cette étude a été conçu pour servir dans nos expérimentations. Ce système est basé sur de simples webcams. Il serait intéressant de remplacer ces webcams par des cameras professionnelles afin d'augmenter la précision du système.

Dans cette étude, nous avons choisi des tâches génériques et simples pour la navigation et la manipulation afin de pouvoir généraliser les résultats de ces études sur d'autres situations de travail collaboratif.

Dans nos expériences, nous avons utilisé un système de visualisation de type workbench. Il serait très intéressant de s'orienter vers des systèmes de visualisation complètement immersifs comme par exemple les casques immersifs de type HMD (Head Mounted Display) ou les CAVEs.

L'architecture réseau utilisée dans nos applications est une architecture de type UDP/IP, qui n'est pas l'architecture la plus fiable mais qui permet d'avoir une rapidité de débit nécessaire dans le contexte de nos expérimentations. Cependant, l'amélioration ou l'utilisation d'un autre protocole serait intéressante dans le cas où la fiabilité de transfert des données est primordiale.

### VI.3.2 - Limitations liées à l'évaluation

Plusieurs précautions ont été prises afin de s'assurer que les mesures effectuées d'une session à l'autre sont les mêmes. Dans ce cadre, nous avons mis en place et suivi durant les expérimentations un protocole d'expérience strict réalisé selon les meilleures directives de pratique en psychologie expérimentale afin d'atteindre une fiabilité élevée entre les sessions de chaque expérience. Par exemple, pour s'assurer que les instructions données aux participants soient identiques pour tous les participants, les expérimentateurs ont suivi un manuscrit

Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants  
d'immersion virtuelle

prédéfini pour s'assurer que les mêmes consignes ont été données à tous les participants. Cependant, un problème lié à la compréhension des questionnaires est apparu chez certains participants. Toutefois, ce problème reste négligeable comparé au nombre de participants qui ont pris part à nos expérimentations.

L'une des erreurs les plus fréquentes susceptible d'apparaître lors de la phase d'analyse des données statistiques est la retranscription des résultats des questionnaires. Pour éviter ces problèmes, nous avons utilisé un système de questionnaire en ligne. Malheureusement, ce système n'est pas entièrement automatisé, même s'il reste mieux que les questionnaires traditionnels sur papier.

## VI.4 - Perspectives

Les travaux de recherche présentés s'inscrivent dans les études sur les métaphores d'interaction 3D en EVCs. Ces travaux se sont attachés à proposer une méthodologie d'étude de l'influence de techniques d'interaction sur différents facteurs humains entrant en compte lors du travail collaboratif en EVC. Les résultats obtenus montrent l'importance de la prise en compte des facteurs humains autres que la performance de la tâche dans la phase de conception des EVCs. Les pistes de recherche sont nombreuses. Quelques unes d'entre elles sont proposées ci-après.

### VI.4.1 - Retour d'effort à l'échelle 1

Dans l'expérimentation concernant la manipulation, nous n'avons utilisé aucun périphérique à retour d'effort. Il serait intéressant de s'intéresser à l'interaction collaborative en utilisant des périphériques à retour d'effort dans un EVC à l'échelle 1, de type Spidar (Bouguila, Ishii, & Sato, 2000)

### VI.4.2 - Travail collaboratif asymétrique

Beaucoup d'études ont été effectuées dans des EVCs symétriques (même configuration pour tous les participants). Il serait intéressant de s'intéresser aux EVC de type asymétrique



(par exemple les utilisateurs n'utilisent pas forcément les mêmes périphériques d'affichage, les mêmes périphériques d'entrée...). En effet, on retrouve souvent ce genre de configurations dans les situations de travail collaboratif réelles.

#### VI.4.3 - Plateforme multiutilisateurs

Le nombre d'utilisateurs dans nos expériences a été limité à deux utilisateurs alors que des situations de travail collaboratif demandent l'intervention de plus de deux participants. Il serait intéressant d'avoir des plateformes collaboratives avec plus de deux utilisateurs afin d'étudier des problématiques liées à la gestion de la prise de main et à la gestion des conflits et des intentions des participants.

#### VI.4.4 - Analyse linguistique et charge cognitive

L'utilisation d'autres mesures de types objectives, comme par exemple l'analyse linguistique, et la mesure de la charge cognitive permettent d'obtenir des résultats métriques sur des notions comme l'implication, l'effort collaboratif ou encore l'effort cognitive.

#### VI.4.5 - Vers un modèle comportemental du travail collaboratif

Il serait intéressant de s'orienter plus vers les aspects mentaux et cognitifs nécessaires au processus du travail collaboratif. Les travaux menés dans cette thèse ouvrent la voie vers la mise en place d'un modèle comportemental humain du travail collaboratif à distance. Il reste encore beaucoup de travail à poursuivre dans cette optique qui nécessite la collaboration avec des spécialistes du domaine de la psychologie cognitive et de l'ergonomie.

## Bibliographie

Anneli, A., Olof, H., Kristian, S., Marten, S., & Olov, S. (1994). *DIVE - the distributed interactive virtual environment* Swedish Institute of Computer Science, Box 1263, 164 28 Kista.

Arnaldi, B., Fuchs, P., & Tisseau, J. (Eds.). (2003). *Chapitre 1 du volume 1 du traité de la réalité virtuelle* Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Arnaldi, B., Berthoz, A., Burkhardt, J. M., Fuchs, P., Guitton, P., Moreau, G., et al (Eds.). (2006). *Le traité de la réalité virtuelle : Les application de la réalité virtuelle* Mines de paris.

Avango.(1999). *Avango*.<http://www.avango.org/>

Avradinis, N., Vosinakis, S., & Panayiotopoulos, T. (2000). *Using virtual reality techniques for the simulation of physics experiments*

Bar-Shalom, Y., & Li, R. (1995). Multitarget-multisensor tracking.

Bell, J. T., & Fogler, H. S. (2004). Virtual reality in chemical engineering education. Paper presented at the *Purdue University, West*, 16-18.

Benford , S., & Fahl'en , L. (1993). A spatial model of interaction in large virtual environments. Paper presented at the *ECSCW'93: Proceedings of the Third Conference on European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, Milan, Italy. 109-124.

- Benford, S., Bowers, J., Fahl'en, L. E., & Mariani, J. (1994). Supporting cooperative work in virtual environments. *The Computer Journal*, 37(4), 653-668.
- Benford, S., Greenhalgh, C., Rodden, T., & Pycock, J. (2001). Collaborative virtual environments, commun run. *ACM*, 44(7), 79-85.
- Benford, S., & Greenhalgh, C. (1997). Introducing third party objects into the spatial model of interaction. Paper presented at the *ECSCW'97: Proceedings of the Fifth Conference on European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, Lancaster, UK. 189-204.
- Beth, R. M., & Carroll, J. M. (2002). Usability engineering scenario-based development of human-computer interaction. In Morgan Kaufmann (Ed.), *Interactive technologies*. (Academic Press ed., ). San Fancisco, USA:
- Biocca, F., Harms, C., & Gregg, J. (2001). The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity. *Presence*, , 9-11.
- Bouguila, L., Ishii, M., & Sato, M. (2000). Multi-modal haptic device for large-scale virtual environments. *ACM Multimedia 2000*, , 277-283.
- Bowers, J., Pycock, J., & O'Brien, J. (1996). Talk and embodiment in collaborative virtual environments. Paper presented at the *CHI '96: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver, British Columbia, Canada. 58-65. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/238386.238404>

- Bowman, D. A., Hodges, L. F., Allison, D., & Wineman, J. (1999). The educational value of an information-rich virtual environment. Paper presented at the *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 317-331.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., Laviola, J. J., & Poupyrev, I. (Eds.). (2004). *3D user interfaces: Theory and practice* Addison-Wesley Educational Publishers Inc.
- Bowman, D. A., Ohnson, D. B., & Hodges, L. F. (1999a). Testbed evaluation of virtual environment interaction techniques. Paper presented at the *VRST '99: Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, London, United Kingdom. 26-33. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/323663.323667>
- Bowman, D. A., Koller, D., & Hodges, L. F. (1998). A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. *Journal of the Virtual Reality Society*, 3, 120-131.
- Buxton, W. (1983). Lexical and pragmatic considerations of input structures. In *Computer Graphics*, 17(1), 31-37.
- Carassa, A., Geminiani, G., Morganti, F., & Varotto, D. (2002). Route and survey descriptions of paths: The effect of experience of a large-scale environment. *Bulletin of People-Environment Studies*,

- Card, S., Mackinlay, J., & Robertson, G. (1991). A morphological analysis of the design space of input devices. *ACM Transactions on Information Systems*, 9(2), 99-122.
- Casanueva, J. S., & Blake, E. H. (2001). *The effects of avatars on co-presence in a collaborative virtual environment* Annual Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists (SAICSIT2001). Pretoria, South.
- Casanueva, J. S., & Blake, E. H. (2000). Small group experiments in collaborative virtual environments. Paper presented at the Stellenbosch, South Africa.
- Chevaldonne, M., Saimpont, A., Merienne, F., & Pozzo, T. (2006). Postural empathy tests for the measure of immersion and presence in virtual environment. Cuncun, Mexique.
- Churchill, E. F., Snowdon, D. N., & Munrr, A. J. (Eds.). (2001). *Collaborative virtual environments* Springer.
- Comaniciu, D., & Meer, P. (1999). Mean shift analysis and application.
- Coquillart, S., Arnaldi, B., Berthoz, A., Burkhardt, J. M., Fuchs, P., Guitton, P., et al (Eds.). (2006). *Le traité de la réalité virtuelle : Interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel* Mines de paris.
- Darken, R. P., & Sibert, J. L. (1996). Navigating large virtual spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8, 49-71.

- De Boeck, J., Cuppens, E., De Weyer, T., Raymaekers, C., & Coninx, K. (2004). Multisensory interaction metaphors with haptics and proprioception in virtual environments. Paper presented at the *NordiCHI '04: Proceedings of the Third Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, Tampere, Finland. 189-197. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/1028014.1028043>
- De Boeck, J., Raymaekers, C., & Coninx, K. (2005). Are existing metaphors in virtual environments suitable for haptic interaction. Paper presented at the *Proceedings of 7th International Conference on Virtual Reality (VRIC) 2005*, 261-268.
- De Luca, L., Véron, P., & Florenzano, M. (2006). Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach . *Computers & Graphics*, 30(2), 160-176.
- Degrande, S. *Spin 3D*.<http://rallyx.inria.fr/2002/Raweb/alcove/uid43.html>
- Deutsch, J. E., Latonio, J., Burdea, G. C., & Boian, R. (2001). Post-stroke rehabilitation with the rutgers ankle system: A case study. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 10(4), 416-430. Retrieved from 10.1162/1054746011470262; <http://dx.doi.org/10.1162/1054746011470262>
- Divipro.(2000). *Divipro*.<http://aig.cs.man.ac.uk/divipro/index.php>

- Dodds, T. J., & Ruddle, R. A. (2008a). Using teleporting, awareness and multiple views to improve teamwork in collaborative virtual environments. *Proceedings of the 14th Eurographics Symposium on Virtual Environments*, , 81-88.
- Dodds, T. J., & Ruddle, R. A. (2008b). Mobile group dynamics in large-scale collaborative virtual environments. *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, , 59-66.
- Ellis, S. R. (1994). What are virtual environments. *IEEE Computer Graphics & Applications*, , 17-22.
- Férey, N., Gros, P. E., Hérisson, J., & Gherbi, R. (2004). Exploration by visualization of numerical and textual genomic data. *Journal of Biological Physics and Chemistry*, 4, 102-110.
- Fuchs, F. (1996). Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris (Ed.), *Les interfaces de la réalité virtuelle*
- Fussell, S. R., Kraut, R. E., & Siegel, J. (2000). Coordination of communication: Effects of shared visual context on collaborative work. Paper presented at the *CSCW '00: Proceedings of the 2000 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 21-30. Retrieved from 10.1145/358916.358947; <http://dx.doi.org/10.1145/358916.358947>
- Gaunet, F., Vidal, V., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Active, passive and snapshot exploration in a virtual environment: Influence on scene memory, reorientation and path memory. *Cognitive Brain Research*, 11, 409-420.

- Gaver, W. (1992). The affordances of media spaces for collaboration, *ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, , 17-24.
- Garbaya, S., & Zaldivar-Colado, U. (2007). The affect of contact force sensations on user performance in virtual assembly tasks. *Virtual Reality*, 11(4), 287-299.
- Gerhard, M., Moore, D. J., & Hobbs, D. J. (2001a). Continuous presence in collaborative virtual environments: Towards a hybrid avatar-agent model for user representation. *The Third International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, , 137-155.
- Gerhard, M., Moore, D., & Hobbs, D. (2001b). Continuous presence in collaborative virtual environments: Towards the evaluation of a hybrid avatar-agent model for user representation. Madrid, Spain.
- Gibson, W. (1989). *Neuromancer*. New York: Grafton.
- Greenberg, S., Gutwin, C., & Cockburn, A. (1996). Awareness through fisheye views in relaxed-WYSIWIS groupware. *Graphics Interface*, , 28-38.
- Greenhalgh, C., & Benford, S. (1995). MASSIVE: A collaborative virtual environment for teleconferencing. *ACM Trans.Comput.-Hum.Interact.*, 2(3), 239-261. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/210079.210088>
- Gutwin, C. (1997). Workspace awareness in real-time distributed groupware. (PhD thesis, University of Calgary.).



- Haritaoglu, I., Harwood, D., & Davis, L. S. (1998). A real time system for detecting and tracking people in 2,5D.
- Harms , C., & Biocca, F. A. (2004). Internal consistency and reliability of the networked minds social presence measure. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- Hedley , N. R., Billinghamurst, M., Postner, L., May, R., & Kato , H. (2002). Explorations in the use of augmented reality for geographic visualization. *Presence*, 11, 119-133.
- Held, R. M., & Durlach, N. I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 109-112.
- Herder, J., Worzberger, R., Twelker, U., & Albertz, S. (2002). Use of virtual environments in the promotion and evaluation of architectural designs. *Journal of the 3D-Forum Society*, 16(4), 117-122.
- Hofmann, J., & Bubb, H. (1999). *16 presence in industrial virtual environment applications — susceptibility and measurement reliability*
- Horaud , R., & Monga , O. (1995). In Hermes Sciences Publicat (Ed.), *Vision par ordinateur : Outils fondamentaux*. France:
- IJsselsteijn, W., & Riva, G. (2003). Being there: The experience of presence in mediated environments. In W. I. G. Riva, F. Davide (Ed.), *Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments*, (pp. 4-14)

- Ishii, H., Kobayashi, M., & Arita, K. (1994). Iterative design of seamless collaboration media. *ACM*, 37(8), 83-97.
- Jacob, R. J. K., & Sibert, L. E. (1992). The perceptual structure of multidimensional input device selection. 211-218.
- Johnson, W. L. (2000). *Virtual environments for training*. <http://www.isi.edu/isd/VET/vet.html>
- Johnson, W. L. (1995). Pedagogical agents in virtual learning environments. *Proceedings of the International Conference on Computers and Education*,
- Juan De , L., & Manuel , A. (2000). *Using simulation and virtual reality for distance education*. *SIIE'2000*
- Kahkonen , K., & Whyte , J. (2003). *Industrial applications of virtual reality in architecture and construction*
- Kalman, R. E. (1960, A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* , 35-45.
- Lanier, J. (1988). *A vintage virtual reality interview*., 1988, from <http://www.well.com/user/jaron/vrint.html>
- Mantovani, F., Agliati, A., Mortillaro, M., Vescovo, A., & Zurloni, V. (2006). Communication - presence roundtrip: Travelling along theoretical, methodological and applicative

connections. In G. Riva , M. T. Anguera & F. Mantovani (Eds.), *From communication to presence: Cognition, emotions and culture towards the ultimate Communicative Experience* (IOS Press ed., pp. 3-22). Amsterdam: IOS Press.

Mine, ,Mark R. (1995). *ISAAC: A virtual environment tool for the interactive construction of virtual worlds*. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill.

Mine, M. R. (1996). *Working in a virtual world: Interaction techniques used in the chapel hill immersive modeling program*. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill.

Naef, M., Staadt, O., & Gross, M. (2005). Multimedia integration into the blue-c API.

*Computers & Graphics*, 29(1), 3. Retrieved from DOI: 10.1016/j.cag.2004.11.003;

<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TYG-4F490FG->

[1/2/f8202fedcc419d14f58291ea558507f4](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TYG-4F490FG-1/2/f8202fedcc419d14f58291ea558507f4)

Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T., & Ishida, T. (1998). *FreeWalk: A three-dimensional meeting place for communities* Retrieved from [citeseer.ist.psu.edu/nakanishi98freewalk.html](http://citeseer.ist.psu.edu/nakanishi98freewalk.html)

Normand, V. B., C., Benford, S., Bullock, A., Carion, S., Chrysanthou, Y., Farcet, N., et al. (1999). The COVEN project: Exploring applicative, technical, and usage dimensions of collaborative virtual environments. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 8(2), 218-236.

Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1162/105474699566189>

- Nowak, F., & Biocca, K. L. (2003). The effect of the agency and thropomorphism of users sense of telepresence, copresece, and social presence in virtual environments. *Presence: Teleopers and Virtual Environments*, 12(5), 481-494.
- Osgood, C. E., Suci, G. J., & Tannenbaum, P. H. (1957). *The measurementof meaning*. Urbana, USA:
- Paillot, D., Merienne, F., & Thivent, S. (2003). CAD/CAE visualization in virtual environment for automotive industry. Zurich, Switzerland. 315-316.
- Parise, S., Kiesler, S., Sproull, L., & Waters, K. (1996). My partner is a real dog: Cooperation with social agents. Paper presented at the *CSCW '96: Proceedings of the 1996 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, Boston, Massachusetts, United States. 399-408.  
Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/240080.240351>
- Passini, R. (1992). *Wayfinding in architecture* (Van Nostrand Reinhold ed.). NY:
- Poupyrev, I., Weghorst, S., Billinghamurst, M., & Ichikawa, T. (1997). A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive VR. Paper presented at the *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 21-28.
- Querrec, R., Buche, C., Maffre, E., & hevaillier, P. (2003). SecuReVi : Virtual environments for fire fighting training. Laval, France.

- Reid, D. B. (1979). An algorithm for tracking multiple targets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *AC-24*(6), 843-854.
- Riva, G. (1999). Virtual reality as communication tool: A sociocognitive analysis. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, *8*(4), 462-468. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1162/105474699566341>
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1999a). Broad-scale navigating virtual environments: What differences occur between helmet-mounted and desk-signal displays? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *8*, 157-168.
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. (1997). Navigating buildings in "desk-top" Virtual Environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *3*(2)
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1999b). The effects of maps on navigation and search strategies in very-large-scale virtual environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *5*, 54-75.
- Ruth, R. (2005). Social presence as presentation of self.
- Sallnas, E. L. (2005). Effects of communication mode on social presence, virtual presence, and performance in collaborative virtual environments. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, *14*(4), 434-449. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1162/105474605774785253>

- Satava , R. M. (1999). Emerging technologies for surgery in the 21st century. *Archives of Surgery*, 134, 1197-1202.
- Schroeder, R. (1996). *Possible worlds: The social dynamic of virtual reality technology*. Boulder, CO, USA: Westview Press, Inc.
- Schroeder, R., Steed, A., Axelsson, A., Heldal, I., Abelin, Å., Wideström, J., et al. (2001). Collaborating in networked immersive spaces: As good as being there together? *Computers & Graphics*, 25(5), 781. Retrieved from DOI: 10.1016/S0097-8493(01)00120-0; <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TYG-43XNJ4Y-6/2/588c967cc29d0153bca9f35d8c116769>
- Schuemie, M. (2003). Human-computer interaction and presence in virtual reality exposure therapy. Delft University of Technology).
- Scribante, V. (2000). Impact de deux facteurs d'influence sur l'acquisition des connaissances spatiales. Université de Genève).
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). In The University of Illinois Press: Urbana. (Ed.), *The mathematical theory of communication* (The University of Illinois Press: Urbana. ed.)
- Shaun , B. (1996). Modelling parallel and distributed virtual reality systems for performance analysis and comparison. Department of Computer Science, Rhodes University).

- Short, J., Williams, E., & Christie, B. (1978). The social psychology of telecommunications. *Contemporary Sociology*, 7, 32-33.
- Simmross-Wattenberg, F., Carranza-Herrezuelo, N., Palacios-Camarero, C., Higuera, J. P., Martin-Fernandez, M. A., Aja-Fernandez, S., et al. (2005). Group-slicer: A collaborative extension of the 3D-slicer. *Journal of Biomedical Informatics*, 38(6), Volume 38, Issue 6, December 2005, Pages 431-442.
- Slater, M., & Usoh, M. (1994). Body centered interaction in immersive virtual environments. *Artificial Life and Virtual Reality*, , 125-148.
- Slater, M., Sadagic, A., Usoh, M., & Shroeder, R. (2000). *Small-group behaviour in a virtual and real environment: A comparative study* Retrieved from [citeseer.ist.psu.edu/slater00small.html](http://citeseer.ist.psu.edu/slater00small.html)
- Son, J., Gruts, Y., Kwack, K., Cha, K., & Kim, S. (2007). Stereoscopic image distortion in radial camera and projector configurations. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 24(3), 643-650.
- Sutherland, I. E. (1965). The ultimate display. Paper presented at the *Proceedings of IFIP*, 506-508.
- Torguet, P., Balet, O., Gobbetti, E., Jessel, J. P., Duchon, J., & Bouvier, E. (1999). Cavalcade: A system for collaborative prototyping. Laval, France. 161-170.

- Van Wyk, E., & de Villiers, R. (2008). Usability context analysis for virtual reality training in south african mines. Paper presented at the *SAICSIT '08: Proceedings of the 2008 Annual Research Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists on IT Research in Developing Countries*, Wilderness, South Africa. 276-285. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/1456659.1456691>
- VIPER. (1998). *VIPER library*. Retrieved 2009 [http://vr.c-s.fr/cavalcade/technology\\_viper.html](http://vr.c-s.fr/cavalcade/technology_viper.html)
- Ware, C., & Jessome, D. R. (1988). Using the bat: A six dimensional mouse for object placement. Paper presented at the *Proceedings on Graphics Interface '88*, Edmonton, Alberta, Canada. 119-124.
- Ware, C., & Osborne, S. (1990). Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(2), 175-183. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/91394.91442>
- Welch , G., Yang, R., Cairns , B., Towles , H., Ilie, A. S. A., Russo , D., et al. (2004). 3d telepresence for off-line surgical training and on-line remote consultation. Paper presented at the *The University of Tokyo*, 113-152.
- Wilson, P. N., Foreman, N., Gillett, R., & Stanton, D. (1997). The effect of landmarks on route-learning in a computer-simulated environment. *Journal of Environmental*, 14, 305-313.



Zheng, X. S., McConkie, G. W., & Schaeffe, B. (2003). Navigational control effect on representing virtual environments.

## Liste des tableaux

Tableau 1. Liste des variables mesurées par des questionnaires.....	61
Tableau 2. Performances du système de tracking.....	79
Tableau 3. Comparaison post-hoc pour la coprésence « navigation ».....	105
Tableau 4. Comparaison post-hoc pour l'effort collaboratif « navigation ».....	106
Tableau 5 Comparaison post-hoc pour l'implication « navigation ».....	107
Tableau 6. Comparaison post-hoc pour l'awareness « navigation ».....	108
Tableau 7. Comparaison post-hoc pour l'utilisabilité « navigation ».....	109
Tableau 8. Comparaison post-hoc pour la satisfaction « navigation ».....	110
Tableau 9. Comparaison post-hoc pour la copresence « manipulation ».....	124
Tableau 10. Comparaison post-hoc pour l'awareness « manipulation ».....	125
Tableau 11. Comparaison post-hoc pour l'effort collaboratif « manipulation ».....	126
Tableau 12. Comparaison post-hoc pour l'implication « manipulation ».....	127
Tableau 13. Comparaison post-hoc pour l'utilisabilité « manipulation ».....	128
Tableau 14. Comparaison post-hoc pour la satisfaction « manipulation ».....	129

## Liste des figures

Figure 1. La taxonomie des dispositifs d'entrée proposée par Buxton (Buxton, 1983) .....	21
Figure 2. La taxonomie des dispositifs d'entrée proposée par Card, Mackinlay et Robertson (Card et al., 1991).....	22
Figure 3. Image d'un joystick (Logitech Extreme 3D Pro) .....	23
Figure 4. La spacemouse 3D Logitech 3D .....	23
Figure 5. La manette Wiimote de Nintendo .....	24
Figure 6. Classification des systèmes de tracking existants.....	25
Figure 7. Système d'affichage de type BOOM utilisant le tracking mécanique.....	26
Figure 8. Le système de tracking inertielle IS-900 MiniTrax d'Intersense.....	27
Figure 9. Un système optique de motion capture.....	27
Figure 10. Dispositif d'Eye tracking de type EL-MAR.....	28
Figure 11. Exemple d'un workbench. Ici, une simulation d'un déplacement de fluide dans le sous-sol pour l'extraction de produits polluants. © J. Wallace/INRIA .....	30
Figure 12. Exemple d'une salle d'immersion virtuelle MoVE <sup>TM</sup> (Modular Virtual Environment) à 4 faces.....	31
Figure 13. Modèle d'un visiocasque stéréoscopique.....	31
Figure 14. Modèle de transmission de communication de Shannon et Weaver (Shannon & Weaver, 1949).....	33
Figure 15. Modèle de Shannon et Weaver {{127 Shannon, C. E. 1949}} modifié pour la CI..	34
Figure 16. Types de communication selon la distance temporelle et la distance spatiale .....	35
Figure 17. Modèle de collaboration. ....	36
Figure 18. Exemple de collaboration d'avatars utilisés dans une plateforme collaborative DIVE .....	39
Figure 19. Exemple d'avatars de type humanoïde utilisés dans Spin3D .....	40
Figure 20. La plateforme collaborative MASSIVE.....	42
Figure 21. Exemple de la plateforme de travail collaboratif COVEN .....	43
Figure 22. Interaction sur des objets virtuels dans Immersive telepresence.....	43

Figure 23. Principe du fonctionnement de la plate forme BLUE-C. ....	44
Figure 24. Logiciel de prototypage virtuel CAVALCADE.....	45
Figure 25. Assemblage d'une pièce CAO en mode collaboratif dans DIVIPRO .....	46
Figure 26. Exemple d'un prototype CAO collaboratif avec le logiciel CATIA.....	47
Figure 27. Approche scientifique proposée.....	56
Figure 28. Classification des techniques d'évaluation .....	58
Figure 29. Architecture d'une plateforme collaborative .....	69
Figure 30. Principe du fonctionnement du système de tracking 3D .....	71
Figure 31. Mire utilisée dans le calibrage .....	72
Figure 32. Résultat de points reconstruits après la calibration en rouge et des points théoriques en bleu.....	73
Figure 33. Principe de l'algorithme de détection des marqueurs .....	74
Figure 34. Étiquetage des marqueurs .....	76
Figure 35. Position en x sans stabilisation .....	77
Figure 36. Position en x sans stabilisation .....	78
Figure 37. Zoom sur les courbes, à gauche sans stabilisation à droite avec. Le marqueur est immobile durant toute la période.....	78
Figure 38. Matériel utilisé, filtres, Webcams modifiées, marqueurs.....	80
Figure 39. Application de navigation dans la plateforme Braccetto .....	81
Figure 40. Architecture générale de l'application .....	82
Figure 41. Application de sélection/manipulation dans.....	82
Figure 42. Configurations du Braccetto, à gauche configuration par défaut du Braccetto (configuration de type Workbench), à droite une autre configuration du Braccetto avec quatre écrans .....	84
Figure 43. Architecture réseau point à point.....	85
Figure 44. Architecture réseau multipoint .....	85
Figure 45. Architecture réseau pont de diffusion .....	86
Figure 46. Schéma général de la plateforme.....	89

Figure 47. L'EV utilisé dans l'expérience de navigation .....	95
Figure 48. Situation des deux avatars devant un objet virtuel.....	96
Figure 49. Exemple de trois objets différents.....	96
Figure 50. Métaphore de la carte .....	98
Figure 51. Métaphore de l'AVATAR.....	99
Figure 52. Métaphore de la LAMPE.....	99
Figure 53. La plateforme expérimentale.....	100
Figure 54. La moyenne de la présence sociale dans les trois conditions « navigation » .....	104
Figure 55. La moyenne de la coprésence dans les trois conditions « navigation ».....	105
Figure 56. La moyenne de l'effort collaboratif dans les trois conditions « navigation » .....	106
Figure 57. La moyenne de l'implication dans les trois conditions « navigation ».....	107
Figure 58. La moyenne de l'awareness dans les trois conditions « navigation ».....	108
Figure 59. La moyenne de l'utilisabilité dans les trois conditions « navigation ».....	109
Figure 60. La moyenne de la satisfaction dans les trois conditions « navigation ».....	110
Figure 61. La scène virtuelle utilisée dans l'expérience .....	119
Figure 62. Métaphore de la Main virtuelle .....	120
Figure 63. Métaphore du Ray casting .....	120
Figure 64. Métaphore de GoGo.....	121
Figure 65. La moyenne de la coprésence dans les trois conditions « manipulation ».....	124
Figure 66. La moyenne de l'awareness dans les trois conditions « manipulation ».....	125
Figure 67. La moyenne de l'effort collaboratif dans les trois conditions « manipulation ».....	126
Figure 68. La moyenne de l'implication dans les trois conditions « manipulation ».....	127
Figure 69. La moyenne de l'utilisabilité dans les trois conditions « manipulation ».....	128
Figure 70. La moyenne de satisfaction dans les trois conditions « manipulation ».....	129
Figure 71. Récapitulatif des résultats pour l'expérience de la navigation .....	139
Figure 72. Récapitulatif des résultats pour l'expérience de la manipulation .....	140
Figure 73. Fonctionnement du filtre de Kalman.....	198



## Annexe A : Questionnaires

### Questionnaire d'entrée

Please provide an answer to each question below:	
Trial number : _____	your ID: _____
Date : _____	hour : _____
Sex (circle one):      Male                  Female	
Your Age: _____	
Highest level of education completed (circle one)	
High School                  College If currently in college, what year: _____	
Occupation: _____	
Is English your native language?      Yes      No	
If English is NOT your native language, how would you rate your proficiency in	

<p>English (circle one):</p> <p style="text-align: center;">Basic                      Good                      Fluent</p>
<p>Have you ever played a Puzzle Game before? Yes      No</p>
<p>Video Game experience (select one):</p> <p> <input type="checkbox"/> Everyday                      <input type="checkbox"/> one time per week  <input type="checkbox"/> One time per month                      <input type="checkbox"/> Never </p>
<p>Which frequency you use the computer (select one)?</p> <p> <input type="checkbox"/> Everyday                      <input type="checkbox"/> one time per week  <input type="checkbox"/> One time per month                      <input type="checkbox"/> Never </p>
<p>You are accustomed to working as a group (in school, in work, sport)</p> <p> <input type="checkbox"/> Everyday                      <input type="checkbox"/> One time per week  <input type="checkbox"/> One time per month                      <input type="checkbox"/> Never </p>
<p>Do you know your partner of experiment? Yes      No</p>



### Questionnaire de navigation

Indicate your preferred answer by (marking an "X" in the appropriate box of the seven-point scale. Please consider the entire scale when making your responses.

**PLEASE READ THE STATEMENTS BELOW AND INDICATE YOUR DEGREE OF AGREEMENT WITH EACH STATEMENT**

1. To what extent did you have a sense of being in the same room as your partner?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Very small extent</span> <span>Very high extent</span> </div>
2. When you continue to think back on the task, to what extent do you have a sense that you are together with your partner in the same room?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Very small extent</span> <span>Very high extent</span> </div>
3. Were you involved in communication and the experimental task to the extent that you lost track of time?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>
4. To what extent did events occurring outside the 3D scene distract from your experience in the virtual environment?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>
5. I was an active participant in the task.	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>

6. I enjoyed the virtual environment experience.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
7. How aware were you of the existence of your virtual representation?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
8. I was immediately aware of the existence of other participants.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
9. With this navigation metaphor my partner did not help me very much.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
10. With this navigation metaphor I did not help my partner very much?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
11. I worked with my partner to complete the task?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
12. With this navigation metaphor my partner worked with me to complete the task?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
13. How satisfied are you using this navigation metaphor?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree
14. I would recommend this navigation metaphor to a friend?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Strongly disagree	Strongly agree



Colourless	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Colourful
Closed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Open
Passive	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Active
Unsociable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sociable

21. If I have the choice when solving tasks like these I would chose (select one) :
<div>MAP metaphor</div> <div>Avatar metaphor</div> <div>Light metaphor</div>
22. It was easiest for me to coordinate my actions with my partner when I used
<div>MAP metaphor</div> <div>Avatar metaphor</div> <div>Light metaphor</div>
23. It was easiest for me to predict my partner action when hi\her used
<div>MAP metaphor</div> <div>Avatar metaphor</div> <div>Light metaphor</div>
24. It was easiest for me to navigate objects when I used
<div>MAP metaphor</div> <div>Avatar metaphor</div> <div>Light metaphor</div>

### Questionnaire de manipulation

Indicate your preferred answer by (marking an "X" in the appropriate box of the seven-point scale. Please consider the entire scale when making your responses.

**PLEASE READ THE STATEMENTS BELOW AND INDICATE YOUR DEGREE OF AGREEMENT WITH EACH STATEMENT**

1. To what extent did you have a sense of being in the same room as your partner?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Very small extent</span> <span>Very high extent</span> </div>
2. When you continue to think back on the task, to what extent do you have a sense that you are together with your partner in the same room?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Very small extent</span> <span>Very high extent</span> </div>
3. Were you involved in communication and the experimental task to the extent that you lost track of time?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>
4. To what extent did events occurring outside the 3D scene distract from your experience in the virtual environment?	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>
5. I was an active participant in the task.	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>
6. I enjoyed the virtual environment experience.	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; padding: 0 10px;"> <span>Strongly disagree</span> <span>Strongly agree</span> </div>

7. How aware were you of the existence of your virtual representation?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
8. I was immediately aware of the existence of other participants.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
9. With this manipulation metaphor my partner did not help me very much.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
10. With this manipulation metaphor I did not help my partner very much?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
11. I worked with my partner to complete the task?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
12. With this manipulation metaphor my partner worked with me to complete the task?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
13. How satisfied are you using this manipulation metaphor?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
14. I would recommend this manipulation metaphor to a friend?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree
15. This manipulation metaphor is fun to use?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree Strongly agree

16. It is easy to use this metaphor for manipulation? 17.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree <span style="float: right;">Strongly agree</span>
18. This manipulation metaphor is flexible for manipulation?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree <span style="float: right;">Strongly agree</span>
19. I can recover from mistakes quickly and easily?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree <span style="float: right;">Strongly agree</span>
20. I used the manipulation metaphor successfully every time?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Strongly disagree <span style="float: right;">Strongly agree</span>

20. If I have the choice when solving tasks like these I would chose (select one) :  <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>Virtual Hand metaphor</span> <span>Ray casting metaphor</span> <span>GO GO metaphor</span> </div>
21. It was easiest for me to coordinate my actions with my partner when I used  <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>Virtual Hand metaphor</span> <span>Ray casting metaphor</span> <span>GO GO metaphor</span> </div>
22. It was easiest for me to predict my partner action when hi\her used  <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>Virtual Hand metaphor</span> <span>Ray casting metaphor</span> <span>GO GO metaphor</span> </div>
23. It was easiest for me to manipulate objects when I used  <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>Virtual Hand metaphor</span> <span>Ray casting metaphor</span> <span>GO GO metaphor</span> </div>





## Annexe B : Protocole d'expérience

//

//

// Module : Experriment Protocol

// Author : Hamid HRIMECH, Frederic MERIENNE, Leila ALEM

// Creation date: 2008-06-02

// Modified by : \$Author: HRIMECH \$

// Last update : \$Date: 2008-06-02 03:00 pm \$

// Revision : \$Revision: 0 \$

//

// @author Hamid HRIMECH

//

//

### List all other personnel involved in the project

	PHONE #	EMERGENCY #	Email
Leila Alem			Hrimech@cluny.ensam.fr
Frederic Merienne			merienne@cluny.ensam.fr
Hamid HRIMECH			Leail.alem@csiro.au
Alexis Berard			Alexis.berard@gmail.fr
Jian			

### Beforehand:

1. Subjects are recruited and given an appointment. They receive an email “kit” with appointment details (date, time, and location), bus and parking information and compensation information
2. Subjects receive a phone reminder the day before of their appointment and reminded of the importance of showing up on time. If unable, use backup list of participants and then recruit internally.

Experimenter fills up the observation sheet with the randomised condition list and participant ID

### **Identifying participants:**

Participants are identified alphanumerically by the experimental session.

- The letter designates experimental type : navigation A, manipulation B
- The letter designate metaphor type : R: ray casting, V: virtual hand, G: hand go, M : MAP, A: avatar, L: light
- The letter designates trial number: trial1 is A, trial2 is B, trial3 is C
- The digit number designates each participants 1, 2. The 1 will be the designated participant in the small room (Braccetto 1) and 2 the designated participant in the big room (Braccetto).
- Example : A\_R\_a\_1 : navigation experiment\_metaphor ray casting\_trial 1\_participant 1 in Braccetto 1

### **Documents**

Every participant gets an ID documents:

Each side experimenter gets a clipboard with the following (all documents with ID number):

- Explanation sheet = general instructions with screenshots
- Observation sheet for both rooms

Online questionnaire to be filled during the experiment

- Preliminary questionnaire
- 3 questionnaire, 1 for each experiment
- Final questionnaire

### **Things to add still:**

1. Assessing the accuracy and completion time for three tasks.
2. Notify front desk of experiments

**Concerning the use of Skype in this protocol:**

For Braccetto 1:

Login: room\_a for

Password: csiro

For Braccetto 2:

Login: room\_b

Password: csiro

The following tables outline responsibilities of the team members. These are open to changes and may vary across trials so please be clear with the 2<sup>nd</sup> experimenter in the room who is doing what!! Basically, hamid and Jian are in the Braccetto 2. Leila/Frederic and Alexis are in the Braccetto 1:

**Responsibilities *before* each trial:**

Person	hamid	Jian	Alexis	Leila/Frederic
	Switch on the two softwares of questionnaire Turn on PC	Check Braccetto 1: Turn on PC Switch on the application Check application	Check Braccetto 2: Turn on PC Switch on the application Check application	
	Have (back up) paper copies of participants ID.	Connect skype	Check connections: Braccetto 1, Braccetto 2.	
	Greet 2 <sup>nd</sup> subject at front entrance and escort to the		Confirm connection with Hamid	Greet 1 <sup>st</sup> subject

	Braccetto 2.			
		Confirm condition/task order with hamid	Confirm condition/task order with hamid	Speak to front desk

**Responsibilities**

**during the trials:**

Person	Hamid	Jian	Alexis	Leila/Frederic
	Filming of the participant Braccetto 2	Give general instructions to each side	Filming of the participant Braccetto 2	
	Taking notes	Give training to participant 1 Save load_data.txt	Give training to participant 2 Save load_data.txt	Taking notes
	Moving and removing of keyboard, mouse and wiimote?	Moving and removing of keyboard, mouse and wiimote?		Give general instructions to each side

**Responsibilities after each trial:**

Person	Hamid	Jian	Alexis	Leila/Frederic
	Turn off application	Turn off application	Debrief and escort out	Take notes during debriefing
	Check data- import questionnaire data	Save load_data.txt and performance.txt	Save load_data.txt and performance.txt	Pay (in envelopes)?
	Get ready for next trial	Get ready for next trial	Check data-import questionnaire data	
	Clean rooms		Get ready for next trial	

### Procedure

	Room 2 hamid/Jian	Room 1 Leila/Frederic/Alexis
<b>Before arrival (checklist)</b>	Tea Room disconnected Camera calibrated Internet Connexion Skype Application VCR	Tea Room disconnected Camera calibrated Internet Connexion Skype Application VCR
<b>Arrival (20 min)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Experimenter (hamid/Jian) greets participant upon their arrival.</li> <li>2. Ask participant to turn off mobile phones. collect consent form</li> <li>3. give ID paper to participant</li> <li>4. gives <i>General explanation</i> and demonstrate</li> <li>5. Give training to participant 2</li> <li>6. measure participant 2 cognitive load</li> <li>7. load Preliminary questionnaire</li> <li>8. save data</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Experimenter (Leila/Frederic/Alexis) greets participant upon their arrival.</li> <li>2. Ask participant to turn off mobile phones. collect consent,</li> <li>3. give ID paper to participant 1</li> <li>4. gives <i>General explanation and demonstrate</i></li> <li>5. give training to participant 1</li> <li>6. measure participant 1 cognitive load</li> <li>7. load Preliminary questionnaire save data</li> </ol>
<b>Before task 1 (1 min) (application 1 manipulation)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Send message “<b>start recording</b>” to room 1</li> <li>2. Send message “load application #1 for man/women ” to room 1</li> <li>3. Send message “ok for application”</li> <li>4. Ask participant “are you ready?”</li> <li>5. Send message “ready” to room 1</li> <li>6. Send message “start application 1” to room 1</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. send message “ok for recording”</li> <li>2. send message “ok for application”</li> <li>3. send message “load application 1 for man/women” to room 2</li> <li>4. Ask participant “ are you ready?”</li> <li>5. Send message “ Yes, ready” to room 2</li> <li>6. Send message “ ok “ to room 2</li> </ol>
<b>Task 1 (15 min)(application 1)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Commence task 1.</li> <li>2. Check video recording.</li> <li>3. Task complete.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Commence task</li> <li>5. Check video recording</li> <li>6. Task complete</li> </ol>

After task (10 min) (application 1)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. send message “stop application 1” to room 1</li> <li>2. send message “stop recording” to room 1</li> <li>3. check and save data “cognitive load &amp; task performance”</li> <li>4. prepare laptop 2 for :questionnaire task 1</li> <li>5. participant questionnaire task 1</li> <li>6. check and save data “questionnaire task 1”</li> <li>7. Send message “questionnaire finish”</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. send message “ok, for stop application” to room 2</li> <li>9. send message “ ok, for stop recording” to room 2</li> <li>10. check and save data “ cognitive load &amp; task performance”</li> <li>11. prepare laptop 1 for :questionnaire task 1</li> <li>12. participant complet questionnaire task 1</li> <li>13. check and save data “questionnaire task 1”</li> <li>14. Send message “questionnaire finish”</li> </ol>
Before task 2 (1 min) (application 2 )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Send “<b>ready for task 2</b>” message to room 1</li> <li>2. Send message “<b>start recording</b>” to room 1</li> <li>3. Send message “load application #2 for man/women ” to room 1</li> <li>4. Send message “ok for application”</li> <li>5. Ask participant “are you ready?”</li> <li>6. Send message “ready” to room 1</li> <li>7. Send message “start application 2” to room 1</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Acknowledge “<i>ready for task 2</i>” message.</li> <li>2. send message “ok for recording”</li> <li>3. send message “ok for application”</li> <li>4. send message “load application #2 for man/women” to room 2</li> <li>5. Ask participant “ are you ready?”</li> <li>6. Send message “ Yes, ready” to room 2</li> <li>7. Send message “ ok “ to room 2</li> </ol>
Task 2 (15 min)(application 2 manipulation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Commence task 2.</li> <li>2. Check video recording.</li> <li>3. Task complete</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Commence task 2.</li> <li>2. Check video recording.</li> <li>3. Task complete</li> </ol>
After task (10 min) (application 2)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. send message “stop application 1” to room 1</li> <li>2. send message “stop recording” to room 1</li> <li>3. check and save data “cognitive load &amp; task performance”</li> <li>4. prepare laptop 2 for :questionnaire task 2</li> <li>5. participant complet questionnaire task 2</li> <li>6. check and save data “questionnaire task 2 ”</li> <li>7. Send message “questionnaire finish”</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. send message “ok, for stop application” to room 2</li> <li>9. send message “ ok, for stop recording” to room 2</li> <li>10. check and save data “ cognitive load &amp; task performance”</li> <li>11. prepare laptop 1 for :questionnaire task 2</li> <li>12. participant complet questionnaire task 2 n</li> <li>13. check and save data “questionnaire task 2”</li> <li>14. Send message “questionnaire finish”</li> </ol>
Before task 3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Send “<b>ready for task 3</b>” message to room 1</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Acknowledge “<i>ready for task 3</i>” message.</li> </ol>

(1 min) (application 3 )	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Send message “<b>start recording</b>” to room 1</li> <li>3. Send message “load application #3 for man/women ” to room 1</li> <li>4. Send message “ok for application”</li> <li>5. Ask participant “are you ready?”</li> <li>6. Send message “ready” to room 1</li> <li>7. Send message “start application 2” to room 1</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. send message “ok for recording”</li> <li>3. send message “ok for application”</li> <li>4. send message “load application #3 for man/women” to room 2</li> <li>5. Ask participant “ are you ready?”</li> <li>6. Send message “ Yes, ready” to room 2</li> <li>7. Send message “ ok “ to room 2</li> </ol>
<b>Task 3</b> (15 min)(application 3)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Commence task 3.</li> <li>2. Check video recording.</li> <li>3. Task complete</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Commence task 3.</li> <li>2. Check video recording.</li> <li>3. Task complete</li> </ol>
<b>After task</b> (10 min) (application 3)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. send message “stop application ” to room 1</li> <li>2. send message “stop recording” to room 1</li> <li>3. check and save data “cognitive load &amp; task performance”</li> <li>4. prepare laptop 2 for :questionnaire task 3 manipulation</li> <li>5. participant complet questionnaire task 3</li> <li>6. check and save data “questionnaire task 3”</li> <li>7. Send message “questionnaire finish”</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. send message “ok, for stop application” to room 2</li> <li>9. send message “ ok, for stop recording” to room 2</li> <li>10. check and save data “ cognitive load &amp; task performance”</li> <li>11. prepare laptop 1 for :questionnaire task 3 manipulation</li> <li>12. participant complet questionnaire task 3</li> <li>13. check and save data “questionnaire task 3”</li> <li>14. Send message “questionnaire finish</li> </ol>
<b>Final questionnaire</b> (5 min	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. prepare laptop 2 for Final questionnaire</li> <li>2. participant complet Final questionnaire</li> <li>1. check and save all data</li> <li>2. Store files in hamid’s PC</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. prepare laptop 2 for Final questionnaire</li> <li>4. participant complet Final questionnaire</li> <li>5. check and save all data</li> <li>6. Store files in hamid’s PC</li> </ol>
<b>Final</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bring the two participants to Leila’s office</li> <li>2. Debrief (Leila will speak and alexis will take notes)</li> <li>3. Give cash in envelope. Ask for next experiment?</li> </ol>	

	hamid will Escort to reception.
--	---------------------------------

## **General explanation**

Hello and welcome to our study.
---------------------------------

Thank you in advance for your participation to this experiment. I am going to explain to you what you will be asked to do and what to expect.
---

In another room there is a person sitting at a setup just like this. The two rooms are linked with a network connection and audio connection so you can hear each other. You and your partner are going to build a puzzle / inspect several Virtual objects and together.
---

You are going to build collaboratively a 3D puzzle.
---

You are going to inspect several virtual objects and choosing the one which represents specific characteristics
---

VI.4.6 -
----------

Together, the two of you will build a puzzle in different conditions:
---

With one condition you use a virtual hand. The virtual hand moves in the virtual environment based on the movement of the user's physical hand. A virtual object can be selected by 'touching' or by intersection between the virtual hand and the object. The virtual object is then attached to the virtual hand and can then be manipulated. Manipulation of the object is done by direct transcription of the movements of the hand to the object,
--

With second condition you can use the Ray casting: with this Ray casting you can select objects by pointing to them with a virtual ray. Once selected the virtual objects can be manipulated as if they were attached to the ray.
---

and with the third condition you can use a combination of the one condition and the second condition
--

Together, the two of you will inspect several virtual objects and choosing the one which represents specific characteristics in different conditions:
---

The map : the user is represented as an icon on a 2D map, the user can changed him position by changing the position if the icon 2D
---



<p>This condition involves users manipulating a virtual representation of themselves in order to plan their route</p> <p>This metaphor it's like the avatar metaphor, but here the point of view of the user is represented by a light</p> <p>Do you have any questions?</p>
First, you'll both have to fill in an entry questionnaire.
You will fill in a questionnaire after each condition.
When you complete the three conditions you will fill in an exit questionnaire
Then you and your partner will get together and will be debriefed.
Do you have any questions?

### **Debriefing:**

## **Recording instruction**

### **Tasks before trial**

- Check if recorders are working.

### **Tasks during trial**

- Start recording;
- Check if recorders are ok during experiment; and
- Stop recording at the end of experiment.

### **Protocol after trial**

- Save recorded file;
- Nominate each file with code used in labels;
- Store files in hamid's PC; and
- Store recorded tapes in a safe place hamid's external hard.

**Observation and experimenter protocol**

Experimenter: \_\_\_\_\_ Date, time \_\_\_\_\_

Participant ID: \_\_\_\_\_ Experiment code: \_\_\_\_\_

Room: ☐ 1 ☐ 2

**Questions or comments made by subject:**

Question / comment by subject	Occasion	Answer / Reaction by experimenter

**Other incidents (e.g. technical problems):**


---



---



---



---

## Annexe C : La Stéréovision

### • Stéréovision

Le modèle simplifié généralement utilisé pour représenter une caméra est le modèle sténopé (pinhole) (Horaud & Monga , 1995). C'est un modèle de caméra dont l'hypothèse principale est que la relation entre les coordonnées du monde et les coordonnées des pixels est linéaire. Le modèle sténopé permet non seulement de modéliser fidèlement la plupart des capteurs passifs mais en plus il permet de simplifier les formulations mathématiques mises en jeu pour l'estimation des paramètres du modèle.

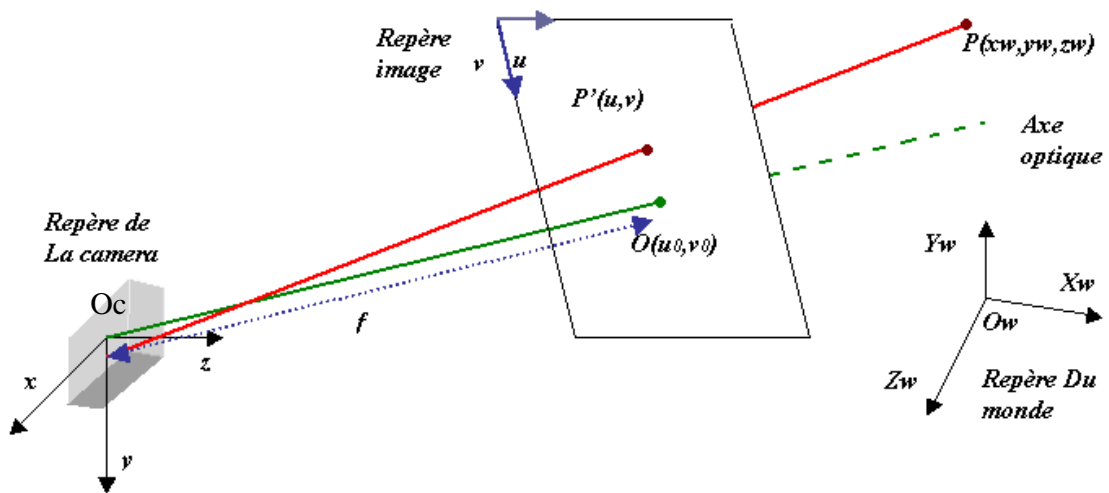
Deux ensembles de paramètres sont nécessaires pour cette modélisation : les paramètres intrinsèques et les paramètres extrinsèques (Horaud & Monga , 1995). Les paramètres intrinsèques sont spécifiques au système de saisie (c'est à dire la caméra et l'objectif). Ces paramètres sont la longueur focale de l'objectif  $f$ , les coordonnées dans le repère image de l'intersection de l'axe optique avec le plan image  $u_0$  et  $v_0$  et les dimensions des pixels sur le capteur CCD  $K_u$  et  $K_v$ . Des paramètres de distorsion (radiale et tangentielle) peuvent également être considérés en tant que paramètres intrinsèques. Les paramètres extrinsèques caractérisent la transformation rigide entre le système de référence absolu (repère monde) et le système de référence de la caméra (repère caméra). Ces paramètres sont constitués par un vecteur de translation  $3 \times 1$  nommé  $T$  et une matrice de rotation  $3 \times 3$  nommée  $R$ .

En résumé, 11 paramètres sont utilisés pour modéliser un capteur caméra de façon assez simple :

- ✓ Six paramètres extrinsèques : les trois composantes du vecteur  $T$  et les trois angles de rotation  $R$ .
- ✓ Cinq paramètres intrinsèques :  $f$ ,  $K_u$ ,  $K_v$ ,  $u_0$  et  $v_0$ .

■ Les paramètres extrinsèques

Les points de la scène sont référencés dans le repère du monde, ayant comme origine  $O_w$  et comme axes  $(X_w, Y_w, Z_w)$ . Soient un point  $P$ , dont les coordonnées sont exprimées dans le repère du monde  $(P_{xw}, P_{yw}, P_{zw})$  et un second repère, ayant pour origine  $O_c$  et comme axes  $(X, Y, Z)$ , placé sur le centre optique de la caméra comme le montre la figure ci-dessous.



Le modèle sténopé

La relation géométrique qui existe entre ces deux repères permet de définir les paramètres extrinsèques du modèle, de sorte que ces paramètres déterminent la position et l'orientation du repère de la caméra par rapport au repère du monde. La position du point focal  $O_c$  par rapport à  $O_w$  est donnée par le vecteur translation  $T$  de la forme :

$$T = \begin{bmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{bmatrix}$$

L'orientation des axes de la caméra par rapport au repère du monde est donnée par la matrice de rotation  $R$ . Cette matrice de rotation peut être obtenue par le produit matriciel de trois matrices de rotation simple. Une rotation  $\alpha$  autour d'un axe  $\Delta$  sera exprimée par

$\text{Rot}(\Delta, \alpha)$ . Comme le montrent les équations suivantes, trois matrices de rotation simple peuvent être exprimées.

$$\text{Rot}(X, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}, \text{Rot}(Y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}, \text{Rot}(Z, \delta) = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) & 0 \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Avec :

$$R = \text{Rot}(X, \alpha) \cdot \text{Rot}(Y, \beta) \cdot \text{Rot}(Z, \delta).$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r1 \\ r2 \\ r3 \end{bmatrix}$$

$r1$ ,  $r2$  et  $r3$  sont des vecteurs unitaires orthogonaux représentant l'orientation du repère de la caméra par rapport au repère du monde. Donc, les deux repères sont en relation par l'équation suivante.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T$$

De ce fait, pour un point P, de coordonnées  $(P_{xw}, P_{yw}, P_{zw})^t$  dans le repère du monde, nous pouvons calculer ses coordonnées  $(P_{xc}, P_{yc}, P_{zc})^t$  dans le repère lié à la caméra.

$$\begin{bmatrix} P_{xc} \\ P_{yc} \\ P_{zc} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} P_{xw} \\ P_{yw} \\ P_{zw} \end{bmatrix} + T.$$

Cette relation est habituellement exprimée par une seule matrice avec des coordonnées homogènes, comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} P_c \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} P_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice représente une transformation rigide : trois rotations et trois translations. Elle représente les paramètres extrinsèques. En résumé, six paramètres extrinsèques sont nécessaires pour modéliser la position et l'orientation de la caméra par rapport au repère du monde. Les six paramètres sont : les trois composantes du vecteur translation  $T = (t_x, t_y, t_z)$  et les trois angles  $(\alpha, \beta, \delta)$  qui permettent de définir la matrice de rotation  $R$ .

- Les paramètres intrinsèques

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la modélisation des paramètres intrinsèques du capteur caméra. De ce fait, nous allons nous focaliser sur la détermination des paramètres qui modélisent la géométrie interne et les caractéristiques optiques du capteur. Le modèle intrinsèque de la caméra permettra d'effectuer la relation entre un point 3D et son projeté 2D observable dans le plan image. Les coordonnées du point 3D doivent être exprimées dans le repère du capteur et les coordonnées 2D du point projeté seront exprimées dans le repère image, en pixel.

- Projection perspective

La projection perspective transforme un point de l'espace 3D en un point image 2D. Soit un point  $O$  dans le plan image, appelé point principal, et l'axe optique qui est la droite perpendiculaire à ce plan et qui passe par  $O$ . Le point  $O_c$  est le centre de projection et  $f$  est la distance focale. Comme nous l'avons exprimé précédemment, nous plaçons le centre de projection derrière le plan image. Un point  $P$  se projette sur le plan image le long d'une droite passant par  $P$  et  $O_c$ . Comme nous l'avons déjà précisé, les coordonnées du point  $P$  sont

exprimées dans le repère attaché à la caméra : le plan x-y de ce repère est parallèle au plan image et l'axe z est confondu avec l'axe optique. L'origine de ce repère se trouve en Oc. Les coordonnées du point P dans ce repère sont  $(P_{Xc}, P_{Yc}, P_{Zc})^t$ . Dans ce même repère, les coordonnées du point projeté sont :

$$x' = f \frac{P_{Xc}}{P_{Zc}}$$

$$y' = f \frac{P_{Yc}}{P_{Zc}}$$

$$z' = f$$

En utilisant les coordonnées homogènes de P :  $(P_{Xc}, P_{Yc}, P_{Zc}, 1)^t$ , et en écrivant cette transformation sous forme matricielle, on obtient la relation :

$$\begin{bmatrix} sx' \\ sy' \\ sz' \\ s \end{bmatrix} = [P1] \begin{bmatrix} P_{Xc} \\ P_{Yc} \\ P_{Zc} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[P1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$$

■ Transformations de la caméra à l'image

Les points image sont représentés en pixels dans un repère bi-dimensionnel (u,v) associé à l'image. Les paramètres suivants sont nécessaires pour qu'on puisse écrire la matrice de transformation du repère caméra au repère image :

- ✓  $u_0$  et  $v_0$  sont les coordonnées de  $O_c$  dans le repère image
- ✓ les facteurs d'échelle horizontaux et verticaux  $K_u, K_v$ .

La transformation du repère caméra au repère image s'écrit :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u & 0 & 0 \\ 0 & K_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix}$$

C'est une transformation affine représentant un changement d'échelle et une translation. La composante  $w$  étant toujours nulle, on peut ignorer la troisième ligne et écrire cette transformation sous la forme suivante.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u & 0 & u_0 \\ 0 & K_v & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Ou bien encore :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Avec } K = \begin{bmatrix} K_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & K_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette transformation représente une application linéaire de l'espace projectif vers le plan projectif.



Le produit  $[K][P1]$  est :

$$\begin{bmatrix} K_u & 0 & \frac{u_0}{f} & 0 \\ 0 & K_v & \frac{v_0}{f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix}$$

En multipliant tous les coefficients de la matrice par  $f$  (ce qui ne modifie rien puisque les coordonnées homogènes sont définies à un facteur multiplicatif près) on obtient :

$$I_c = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{avec : } \begin{cases} \alpha_u = fK_u \\ \alpha_v = fK_v \end{cases}$$

$I_c$  est une application linéaire de l'espace projectif vers le plan projectif exprimant la transformation perspective :

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = [I_c] \begin{bmatrix} P_{xc} \\ P_{yc} \\ P_{zc} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ce modèle comporte quatre paramètres. Ce sont ces paramètres qui vont être estimés lors de la phase de calibrage à l'exception de la distance focale  $f$  qui ne pourra pas être calculée explicitement.

#### ■ Modèle complet

La relation entre la métrique des points 3D référencés dans le repère du monde et leurs points 2D est :

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{xw} \\ P_{yw} \\ P_{zw} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = I_c \cdot A \cdot \begin{bmatrix} P_{xw} \\ P_{yw} \\ P_{zw} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La première matrice exprime l'intégralité des paramètres intrinsèques du capteur caméra et la seconde exprime l'intégralité des paramètres extrinsèques. La transformation du monde à l'image est donc exprimée comme suit :

$$[M] = [I_c][A]$$

[M] est la matrice de projection perspective et elle peut, en général, s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{xw} \\ P_{yw} \\ P_{zw} \\ 1 \end{bmatrix}$$

En identifiant [M] avec  $[I_c][A]$ , on obtient un ensemble d'équations qui permet de calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques en fonction des coefficients de [M]. Afin de trouver les paramètres intrinsèques, on doit estimer les coefficients de la matrice de projection [M] et extraire les paramètres de la caméra à partir de ces coefficients grâce aux formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_3 = m_3 \\ u_0 = m_1 m_3^t \\ v_0 = m_2 m_3^t \\ \alpha_u = \sqrt{m_1 m_1^t - u_0^2} \\ \alpha_v = \sqrt{m_2 m_2^t - v_0^2} \\ r_1 = \frac{m_1 - v_0 m_3}{\alpha_u} \\ r_2 = \frac{m_2 - u_0 m_3}{\alpha_v} \\ t_z = m_{34} \\ t_x = \frac{m_{14} - v_0 m_{34}}{\alpha_u} \\ t_y = \frac{m_{24} - u_0 m_{34}}{\alpha_v} \end{array} \right.$$

## • Calibrage

### ■ Calibrage d'une caméra

En utilisant la matrice de projection  $M$ , on peut écrire les coordonnées image d'un point de la scène de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{m_{11}P_{xw} + m_{12}P_{yw} + m_{13}P_{zw} + m_{14}}{m_{31}P_{xw} + m_{32}P_{yw} + m_{33}P_{zw} + m_{34}} \\ v = \frac{m_{21}P_{xw} + m_{22}P_{yw} + m_{23}P_{zw} + m_{24}}{m_{31}P_{xw} + m_{32}P_{yw} + m_{33}P_{zw} + m_{34}} \end{array} \right.$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i m_{34} = m_{11}P_{xwi} + m_{12}P_{ywi} + m_{13}P_{zwi} + m_{14} - u_i(m_{31}P_{xwi} + m_{32}P_{ywi} + m_{33}P_{zwi}) \\ v_i m_{34} = m_{21}P_{xwi} + m_{22}P_{ywi} + m_{23}P_{zwi} + m_{24} - v_i(m_{31}P_{xwi} + m_{32}P_{ywi} + m_{33}P_{zwi}) \end{array} \right.$$

On obtient donc  $2n$  équations pour  $n$  points. Il faut donc, en théorie, 6 points non coplanaires pour déterminer les 12 inconnues de la matrice de transformation perspective  $M$  et on peut réécrire les équations précédentes sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ P_i^t & 1 & 0_{1 \times 3} & 0 & -u_i P_i^t & \\ 0_{1 \times 3} & 0 & P_i^t & 1 & -v_i P_i^t & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1^t \\ m_{14} \\ m_2^t \\ m_{24} \\ m_3^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ u_i m_{34} \\ v_i m_{34} \\ & & & & \end{bmatrix}$$

Pour trouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques, nous pouvons utiliser la caractéristique des vecteurs d'orientation puisqu'ils sont unitaires. Cela induit la contrainte suivante :

$$\|m_3\| = 1$$

On peut alors écrire l'équation de la manière suivante :

$$BX_9 + CX_3 = 0$$

$$B = \begin{bmatrix} & & & \ddots & & & & & \\ P_{wxi} & P_{wyi} & P_{wzi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{wxi} & P_{wyi} & P_{wzi} & 1 & -v_i \\ & & & \ddots & & & & & \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} & & \ddots & & & & & & \\ -u_i P_{wxi} & -u_i P_{wyi} & -u_i P_{wzi} & & & & & & \\ -v_i P_{wxi} & -v_i P_{wyi} & -v_i P_{wzi} & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & & \end{bmatrix}$$

$$X_3 = m_3^t = [m_{31} \ m_{32} \ m_{33}]^t$$

$$X_9 = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{34}]^t$$

La résolution de ce système linéaire ne requiert que 6 points non coplanaires. Afin d'augmenter la précision des résultats, il est nécessaire d'augmenter le nombre de points de mesure.

Soit  $Q(X_3, X_9) = \|B.X_9 + CX_3\|^2$  le critère quadratique à minimiser avec la contrainte  $\|X_3\| = 1$  ce critère devient selon la méthode de Lagrange :

$$Q(X_3, X_9) = \|B.X_9 + CX_3\|^2 + \lambda(1 - \|X_3\|)^2$$

Où :  $\lambda$  est un multiplicateur de Lagrange

L'annulation des dérivées partielles de  $Q(X_3, X_9)$  par rapport à  $X_3$  et  $X_9$  conduit à :

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(X_3, X_9)}{\partial X_3} = B_3^t \cdot B_3 + B_3^t \cdot B_9 \cdot X_9 - \lambda X_3 = 0 \\ \frac{\partial Q(X_3, X_9)}{\partial X_9} = B_9^t \cdot B_3 \cdot X_3 + B_9^t \cdot B_9 \cdot X_9 = 0 \end{cases}$$

Le système suivant permet d'extraire les vecteurs  $X_3$  et  $X_9$ .

$$\begin{cases} X_9 = -(B_3^t \cdot B_9)^{-1} \cdot B_3^t \cdot B_9 \cdot X_3 \\ EX_3 = \lambda X_3 E = B_3^t \cdot B_3 - B_3^t \cdot B_9 \cdot (B_9^t \cdot B_9)^{-1} \cdot B_9^t \cdot B_3 \end{cases}$$

Le critère  $Q(X_3, X_9)$  a pour valeur propre  $\lambda$  si  $X_3$  est un vecteur propre unitaire de  $E$  ( $E$  est une matrice symétrique définie positive).  $X_3$  est donc le vecteur propre unitaire associé à la plus petite valeur propre  $\lambda$  de  $E$ .

#### ■ Introduction des distorsions

En pratique, il arrive que le modèle sans distorsion présenté précédemment ne soit pas assez précis. On doit alors considérer des paramètres de distorsion optique. Généralement seule la distorsion radiale est utilisée (Son, Gruts, Kwack, Cha, & Kim, 2007).

Sous l'effet de la distorsion radiale, un point subit une translation de sa position idéale vers sa position après distorsion sur une droite passant par le point principal. Cette composante de la distorsion peut s'exprimer par :

$$\Delta u = Kr^2(u - u_0)$$

$$\Delta v = Kr^2(v - v_0)$$

$$\text{Où } r^2 = (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2$$

- **Filtre de Kalman**

Le filtre de Kalman est un outil permettant d'intégrer des données mesurées à l'intérieur d'un système par différents capteurs en admettant qu'une mesure est bruitée, que toute mesure ne devrait pas avoir le même degré de confiance et que certaines mesures devraient être ignorées ou avoir un poids plus faible dans l'établissement de l'état du système. Le filtre permet de lisser les données et d'atténuer l'effet du bruit en essayant de choisir les informations les plus fiables. Il est nécessaire d'informer le filtre du niveau de bruit du système car celui-ci utilise ces informations pour donner l'état du système.

Grâce au filtre de Kalman (figure 34) il est également possible de prédire une mesure qui n'a pas pu être réalisée. Pour ce faire, le filtre de Kalman prend les dernières mesures et les utilise pour estimer la nouvelle valeur. Il utilise une boucle de rétroaction pour réintroduire dans le contrôle la valeur déterminée après filtrage.

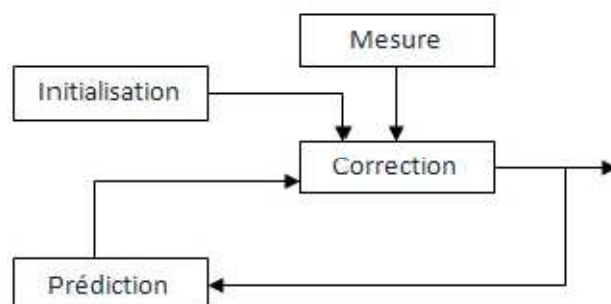


Figure 73. Fonctionnement du filtre de Kalman

Le réglage des paramètres du filtre est très important. Il faut préciser l'indice de confiance que l'on a dans le système et le niveau de bruit. Le réglage de ces paramètres va conditionner la qualité de la prédiction, la réactivité du système ainsi que la force de lissage.

- **Triangulation 3D**

Connaissant les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'un système, il est possible de calculer la position d'un point dans une scène à partir de deux vues.

Sous le modèle sténopé, la projection d'un point P(X, Y, Z) de la scène dans le plan image d'une caméra est obtenue par :

$$u = \frac{m1_{11}.X + m1_{12}Y + m1_{13}Z + m1_{14}}{m1_{31}.X + m1_{32}Y + m1_{33}Z + m1_{34}}, \quad u' = \frac{m2_{11}.X + m2_{12}Y + m2_{13}Z + m2_{14}}{m2_{31}.X + m2_{32}Y + m2_{33}Z + m2_{34}},$$

$$v = \frac{m1_{21}.X + m1_{22}Y + m1_{23}Z + m1_{24}}{m1_{31}.X + m1_{32}Y + m1_{33}Z + m1_{34}}, \quad v' = \frac{m2_{21}.X + m2_{22}Y + m2_{23}Z + m2_{24}}{m2_{31}.X + m2_{32}Y + m2_{33}Z + m2_{34}}.$$

Avec :

$$M1 = \begin{bmatrix} m1_{11} & m1_{12} & m1_{13} & m1_{14} \\ m1_{21} & m1_{22} & m1_{23} & m1_{24} \\ m1_{31} & m1_{32} & m1_{33} & m1_{34} \end{bmatrix} \quad M2 = \begin{bmatrix} m2_{11} & m2_{12} & m2_{13} & m2_{14} \\ m2_{21} & m2_{22} & m2_{23} & m2_{24} \\ m2_{31} & m2_{32} & m2_{33} & m2_{34} \end{bmatrix}$$

M1 est la matrice de projection perspective de la caméra gauche.

M2 est la matrice de projection perspective de la caméra droite.

(u,v) coordonnées 2D de la projection d'un point 3D sur un plan d'image

Ces équations peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$A \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = B$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} m1_{11} - u.m1_{31} & m1_{12} - u.m1_{32} & m1_{13} - u.m1_{33} \\ m1_{21} - v.m1_{31} & m1_{22} - v.m1_{32} & m1_{23} - v.m1_{33} \\ m2_{11} - u'.m2_{31} & m2_{12} - u'.m2_{32} & m2_{13} - u'.m2_{33} \\ m2_{21} - v'.m2_{31} & m2_{22} - v'.m2_{32} & m2_{23} - v'.m2_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} m1_{34}.u - m1_{14} \\ m1_{34}.v - m1_{24} \\ m2_{34}.u' - m2_{14} \\ m2_{34}.v' - m2_{24} \end{bmatrix}$$



Le calcul du point  $P(X,Y,Z)$ , s'obtient en résolvant au sens des moindres carrés linéaires le système linéaire de 4 équations à 3 inconnues  $(X,Y,Z)$ .