UNIVERSITE D'EVRY VAL D'ESSONNE



Mémoire pour l'obtention du titre de Docteur de l' Université d'Evry Val d'Essonne
Spécialité: Robotique

Interaction 3D Collaborative en Réalité Virtuelle

Christophe Domingues

Soutenance le : 13 Octobre 2010

JURY

F. Merienne:	Professeur, ENSAM Institut de Chalon-sur-Saône, Rapporteur
I. Thouvenin:	Maître de Conférences - HDR, UTC Compiègne, Rapporteur
P. Fuchs:	Professeur, Mines ParisTech, Examinateur
F. Davesne:	Docteur, IGR, Université d'Evry Val d'Essonne, Co-Encadrant
S. Otmane:	Maître de Conférences, Université d'Evry Val d'Essonne, Co-Encadrant
M. Mallem:	Professeur, Université d'Evry Val d'Essonne, Directeur

"Internet sera à l'économie du 21è siècle ce que l'essence fut au 20è siècle. La puissance des ordinateurs c'est l'essence d'internet."

Craig Barrett

Remerciements

Il est de coutume de remercier au début d'un tel travail tous ceux qui, plus ou moins directement, ont contribué à le rendre possible. C'est avec mon enthousiasme le plus sincère que je voudrais rendre mérite à tous ceux qui à leur manière m'ont aidé à mener à bien ce projet. Je désire alors exprimer ma profonde gratitude :

- Monsieur Malik Mallem, Directeur de thèse, pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe RATC et pour avoir assuré la direction de mon travail;
- Monsieur Samir Otmane, Co-encadrant, pour sa disponibilité, son soutien et sa motivation et surtout pour la confiance qu'il m'a accordée;
- Monsieur Frédéric Davesne, Co-encadrant, pour sa disponibilité, son soutien et sa motivation ; et pour m'avoir guidé et inspiré tout au long de cette thèse;
- Madame Indira Thouvenin et Monsieur Frédéric Merienne pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail en qualité de rapporteur;
- Monsieur Philippe Fuchs pour avoir accepté de faire partie du jury en qualité d'examinateur;
- Mes amis de thèse: Nader Cheaib, Mouna Essabbah, Imane Zendjebil, Mahmoud Haydar, Christophe Montagne, Jean-Yves Didier et Pierre Boudoin pour leur soutien et la bonne ambiance qu'ils ont su instaurer;
- Mes remerciements les plus profonds vont aussi à mes parents, qui m'ont soutenu durant mes nombreuses années d'études;
- Je ne pourrai jamais oublier le soutien et l'aide des personnes chères de ma merveilleuse famille et belle famille, ainsi que mes amis et surtout ma petite femme, qui m'ont tous supporté durant cette thèse.

Table des matières

Liste des Figures **vii**

Introduction Générale **1**

I Etat de l'art **6**

1 La gestion de l'interaction du groupe dans les Environnements Virtuels Collaboratifs **7**

1.1 Introduction 7
1.2 Quelques définitions 9
1.2.1 La Réalité Virtuelle 9
1.2.2 La Réalité Augmentée 10
1.2.3 Environnement Virtuel mono et multi utilisateurs 11
1.3 Les composantes de la Réalité Virtuelle 12
1.3.1 Interaction 13
1.3.2 Immersion 14
1.3.3 Le Travail/Télétravail Collaboratif 15
1.3.4 Le trèfle fonctionnel des collecticiels 15
1.3.5 Le Workflow 16
1.3.6 L'Awareness 16
1.3.7 Autonomie 18
1.3.8 Conclusion intermédiaire 19
1.4 Environnements Virtuels et Augmentés Collaboratifs (EVC/EAC) 19
1.4.1 Conclusion intermédiaire et défis 23
1.5 Modèles de gestion de l'interaction 3D du groupe 24
1.5.1 Le modèle spatial de l'interaction 24
1.5.2 Le modèle spatial de la présence 26
1.5.3 Le modèle de gestion dynamique des intérêts 28
1.5.4 Le framework 3-Ontology 30
1.5.5 Awareness dans les environnements collaboratifs hétérogènes . . . 31
1.5.6 Modèle réalisé en interne dans notre équipe de recherche 31
1.5.7 Conclusion intermédiaire 33
1.6 Conclusion 33

2 L'Interaction 3D dans les Environnements Virtuels Collaboratifs **35**

2.1 Introduction . . . 35
2.2 Quelques définitions . . . 36
2.2.1 Interface homme-machine . . . 36
2.2.2 Métaphore, Paradigme et Technique d'interaction . . . 36
2.3 Les principales tâches de l'interaction 3D . . . 37
2.3.1 La navigation . . . 38
2.3.2 La sélection . . . 38
2.3.3 La manipulation . . . 39
2.3.4 Le contrôle d'application . . . 39
2.4 Les techniques d'interaction mono-utilisateur . . . 41
2.4.1 Les techniques de navigation . . . 41
2.4.2 Les techniques de sélection et de manipulation . . . 42
2.4.3 Conclusion intermédiaire . . . 46
2.5 Les techniques d'interaction multi-utilisateurs . . . 46
2.5.1 Sélection/manipulation asynchrone . . . 47
2.5.2 Les techniques de sélection/manipulation synchrones . . . 49
2.5.3 Conclusion intermédiaire . . . 52
2.6 Conclusion . . . 53

3 Évaluations des Interactions et Interfaces Homme Machine 3D 56
3.1 Introduction . . . 56
3.2 Évaluation des Interfaces Homme Machine 3D . . . 57
3.2.1 L'ergonomie . . . 57
3.2.2 Les critères ergonomiques . . . 58
3.3 Les approches analytiques . . . 59
3.3.1 L'approche heuristique . . . 59
3.3.2 L 'approche "Cognitive Walkthrought" . . . 61
3.3.3 Les approches prédictives . . . 62
3.3.4 Conclusion intermédiaire . . . 63
3.4 L'évaluation empirique . . . 63
3.4.1 Les indicateurs de performance . . . 64
3.4.2 Les facteurs extérieurs . . . 67
3.4.3 Création des scénarios et choix des utilisateurs . . . 68
3.4.4 Analyse des données . . . 68
3.5 Les approches empiriques . . . 70
3.5.1 L'approche formative ou itérative . . . 70
3.5.2 L'approche sommative ou comparative . . . 72
3.5.3 L'approche hybride . . . 73
3.5.4 Conclusion intermédiaire . . . 74
3.6 Conclusion . . . 74

II Contributions 77

4 Un workflow pour la gestion des interactions 3D dans les EVC 78
4.1 Introduction . . . 78
4.2 Spécification et Modélisation . . . 79

4.2.1 Le workflow . . . 82
4.2.2 La composante Partagée . . . 83
4.2.3 La composante Motrice . . . 85
4.3 Conception et Implémentation . . . 95
4.3.1 Choix d'un formalisme pour les sources particulières . . . 95
4.3.2 Navigation . . . 96
4.3.3 Sélection . . . 100
4.3.4 Manipulation à plusieurs . . . 101
4.4 Conclusion . . . 106

5 Vers une plateforme d'assistance à l'évaluation des systèmes d'interaction 3D 107
5.1 Introduction . . . 107
5.2 Spécification et Modélisation . . . 109
5.2.1 Introduction . . . 109
5.2.2 Qu'évaluer? . . . 109
5.2.3 Comment assister l'évaluateur? . . . 111
5.3 La création du protocole expérimental . . . 113
5.3.1 Conception de l'outil . . . 113
5.3.2 Implémentation de l'outil . . . 115
5.4 Pilotage et mesure de l'évaluation . . . 118
5.4.1 Conception de l'outil . . . 118
5.4.2 Implémentation de l'outil . . . 120
5.5 Conclusion . . . 125

6 Expérimentations et Évaluations 127
6.1 Introduction . . . 127
6.2 Expérimentations du modèle de gestion de l'interaction du groupe . . . 128
6.2.1 Expérimentation et évaluation préliminaire . . . 129
6.2.2 Expérience de manipulation à deux utilisateurs . . . 136
6.2.3 Conclusion intermédiaire . . . 149
6.3 Application au projet ARITI . . . 150
6.3.1 La téléopération . . . 151
6.3.2 Le projet ARITI . . . 152
6.3.3 Architecture du système . . . 154
6.3.4 Proposition d'une expérimentation . . . 158
6.4 Conclusion . . . 160

Conclusion et Perspectives 162

III Bibliographie **167**

IV Annexes **181**

A Les questionnaires **182**
A.1 Questionnaire toutes évaluations: Informations des participants 182
A.2 Questionnaire Expérience 1: Utilisabilité 183
A.3 Questionnaire Expérience 1: Préférences et Satisfaction 185
A.4 Questionnaire Expérience 2: Effort Collaboratif 186
A.5 Questionnaire Expérience 2: Implication et Conscience (Awareness) du groupe 190
A.6 Questionnaire Expérience 2: Utilisabilité 191
A.7 Questionnaire Expérience 2: Préférences et Satisfaction 192

B La plateforme EVR@ et la bibliothèque de modules **195**
B.1 La plateforme technologique EVR@ 195
B.2 La plateforme logicielle 199
B.2.1 Serveur VOIP 200
B.2.2 Serveur multi-utilisateurs Virtools 200
B.2.3 Modules 201

C Système d'évaluation **205**
C.1 Programmation sous Virtools 205
C.1.1 Les sondes 205
C.1.2 Les contrôleurs 207
C.1.3 Gestion de la mission 207
C.2 Mise en place du CMS 209
C.2.1 Plugins utilisés 209

D Travail accompli sur le projet ARITI **211**
D.1 Modélisation géométrique du robot 211
D.2 Contrôle du robot sur la plateforme EVR@ 212
D.3 Réalité Augmentée 212
D.3.1 Streaming Vidéo 212
D.3.2 Mise en place sous VLC 213
D.3.3 Calibration des Caméras 214
D.4 Programmation sous Virtools 215
D.5 Communication avec les robots 216

Liste des figures

1.1 Les trois I (Adapté de [Burdea and Coiffet, 1993]) 9
1.2 Les médiations du réel (Adapté de [Tisseau, 2001]) 10
1.3 Le continuum réel-virtuel (Adapté de [Milgram and Kishino, 1994]) 11
1.4 Présence et autonomie en réalité virtuelle (Adapté de [Tisseau, 2001]) . . 13
1.5 Le trèfle fonctionnel de l'interaction 3D. (Adapté de [Otmane et al., 2007]) 14
1.6 Manipulation à deux utilisateurs (Extrait de [García et al., 2008]) 18
1.7 Illustration de l'EVC MASSIVE (Extrait de [Greenhalgh and Benford, 1995]) 20
1.8 Le projet IN:SHOP (Extrait de [Lang et al., 2003]) 21
1.9 Le système DIVIPRO (Extrait de [Glencross et al., 2002]) 21
1.10 Illustration de l'interface du projet Group-Slicer (Extrait de [Simmross-Wattenberg et al., 2005
1.11 La présence position dans un ensemble d'objets (Adapté de [Rodden, 1996]) 26
1.12 Le focus et le nimbus dans un ensemble d'objets 27
1.13 Le réseau d'intérêt (Adapté de [Ding and Zhu, 2003]) 28
1.14 Les relations entre objets hostpot et activistes (Adapté de [Ding and Zhu, 2003]) 29
1.15 Influence des interactions sur les intérêts (Adapté de [Ding and Zhu, 2003]) 29
1.16 Le framework 3-Ontology (Extrait de [Leiva-Lobos and Covarrubias, 2002]) 30
1.17 Illustration des focus et nimbus des utilisateurs (Adapté de [Otmane et al., 2007]) 32

2.1 Classification des méthodes de contrôle de l'application (Extrait de [Bowman et al., 2004]) 41
2.2 Illustration de la technique Scaled-World Grab lors de la sélection d'un objet 45
2.3 Illustration de la technique HOMER. HOMER est composé de différentes phases, une phase de sélection par un Ray Casting puis une phase de manipulation avec l'utilisation de la main virtuelle simple 46
2.4 Un EVC pour la visualisation de molécules (Extrait de [Arthur et al., 1998]) 48
2.5 La course se réalise avec deux participants. L'écran est partagé, les utilisateurs peuvent communiquer en direct mais agissent uniquement sur leur véhicule. Ils ne peuvent agir sur le véhicule adverse. (Extrait du jeu Gran Turismo 5) 48
2.6 Illustration de la méthode proposée par [Noma and Miyasato, 1997] . . . 50
2.7 Deux utilisateurs manipulent un objet en utilisant la technique SkeweR (Extrait de [Duval et al., 2006]) 51
2.8 Illustration de la technique Bent Pick Ray (Extrait de [Riege et al., 2006]) 52

3.1 Schéma technocentrique de référence en réalité virtuelle (Adapté de [Fuchs et al., 2006a]) 71
3.2 Méthodologie du banc d'évaluation des techniques d'interaction 3D (extrait de [Bowman et al., 2001a]) 72
3.3 Récapitulatif des méthodes d'évaluations 74

4.1 Les deux trèfles fonctionnels provenant des deux domaines 80
4.2 Notre proposition de fusion des deux trèfles fonctionnels 81
4.3 La boucle de perception/cognition/action passant par le monde virtuel (Extrait de [Fuchs et al., 2006b]) 81
4.4 L'ajout de la composante workflow dans la boucle perception/cognition/action 82
4.5 Les composantes du workflow 83
4.6 Illustration de la composante partagée 83
4.7 Illustration des sources qu'un utilisateur observe dans l'EVC. Le cylindre représente le champ de vision simplifié de l'utilisateur. 84
4.8 Les utilisateurs sont caractérisés par des vecteurs d'états. La matrice d'état formée des vecteurs, permet d'alimenter le moteur de workflow. Le moteur agit alors sur l'aura, le focus, etc. pour modifier la perception dans l'EVC. 87
4.9 L'intersection de deux focus sur la source permet aux utilisateurs d'interagir sur celle-ci 88
4.10 Illustration de l'Aura 89
4.11 Illustration de l'assistant durant une phase de sélection 89
4.12 Principe de l'application de la fonction de navigation 90
4.13 Illustration de la fonction de sélection 91
4.14 Principe de notre proposition pour permettre la manipulation à plusieurs 93
4.15 La modélisation de notre problème sous forme cinématique. Ici les liaisons entre les deux utilisateurs et l'objet sont modélisées par des liaisons rotules. Cette liaison rotule dispose de trois degrés de liberté sur ses trois composantes en rotation. Les efforts transmissibles seront sur les composantes de translation. 94
4.16 Processus pour déterminer le mouvement de l'objet. En résolvant, la relation de la dynamique, nous pouvons déterminer les accélérations en translation et en rotation de l'objet, à partir de la force communiquée par l'utilisateur sur la liaison rotule représentée par son torseur. 94
4.17 Illustration de l'application de la fonction de manipulation 95
4.18 Illustration de la fonction de transfert lors de la tâche de navigation agissant sur l'Aura des sources 97
4.19 Illustration de la fonction de transfert pour donner l'intention des autres utilisateurs à se diriger vers une source 98
4.20 Illustration de la fonction de sélection 100
4.21 Influence du type de liaison sur les relations objet/avatars 102
4.22 L'activation des fonctions d'assistance dans le but d'améliorer la coordination 103
4.23 Illustration du principe de restriction de certaines sources 106

5.1 Illustration de la problématique d'une évaluation. De nombreux paramètres sont à prendre en compte 108
5.2 Positionnement de notre outil d'assistance à l'évaluation. Extrait de [Fuchs et al., 2006b] 110
5.3 Le cycle en V simplifié 112

5.4 Illustration du concept pour notre outil d'évaluation. Celui-ci distingue deux outils, l'un destiné à la conception de protocoles, le second permettant la récupération des données. Le lien entre les deux outils, signifie qu'il est nécessaire de concevoir au préalable le protocole avant de procéder à l'enregistrement des données. 113
5.5 La méthodologie retenue pour la création du protocole afin de vérifier/réfuter l'hypothèse 113
5.6 Illustration du lien entre les différents éléments pour la construction du protocole 115
5.7 L'architecture technique de la plateforme 116
5.8 Création d'un questionnaire pour une évaluation 117
5.9 L'interface pour la réponse aux questions du questionnaire 118
5.10 Le déroulement d'une évaluation. Le facteur A possède deux valeurs, ce qui signifie que l'utilisateur devra réaliser un essai pour chaque valeur du facteur A. 120
5.11 La méthodologie retenue pour le pilotage de l'évaluation afin de vérifier/réfuter l'hypothèse 120
5.12 Illustration de l'intégration de différents modules fonctionnels 121
5.13 Architecture conceptuelle du module d'évaluation 122
5.14 Illustration du gestionnaire de mission en cours de fonctionnement pour l'évaluation 1 du chapitre 4. 123
5.15 Illustration du résultat de deux contrôleurs ayant la capacité de modifier la taille et la couleur des objets de l'environnement 124
5.16 Illustration de la mise en évidence de l'intervention de la sonde temps durant l'évaluation 125

6.1 L'utilisateur sur la plateforme réalisant la première expérience utilisant un flystick pour interagir dans l'environnement. 130
6.2 L'environnement virtuel utilisé pour réaliser la première expérience. . . . 131
6.3 Gestion des tâches par le flystick 131
6.4 Les points d'attache à atteindre avec la main virtuelle simple pour valider la sélection 132
6.5 Moyenne du temps de sélection pour chaque essai 135
6.6 Influence de l'assistance en sélection sur le nombre d'erreurs 135
6.7 Le dispositif expérimental de l'expérience où deux utilisateurs manipulent une planche virtuelle via leur flystick. 137
6.8 L'environnement virtuel utilisé pour réaliser la seconde expérience 138
6.9 Liaisons entre les deux avatars et la planche 138
6.10 Utilisation des données de la matrice d'état par nos fonctions d'assistance 140
6.11 Les trois secteurs pour déterminer le nombre de chute durant la manipulation à deux utilisateurs 142
6.12 Taux d'erreurs de manipulation en fonction des trois conditions d'assistance (CA, CB et CC) 143
6.13 Nombre total de chutes dans les différents secteurs tous essais confondus . 144
6.14 Les temps moyens de passage dans les différents secteurs tous essais confondus 145
6.15 Le temps moyen total pour les trois conditions 146

6.16 Durée moyenne de manipulation dans chaque secteur pour les trois conditions. 146
6.17 Durée moyenne totale d'un essai selon les trois conditions, dans les cas où l'essai est réussi. 147
6.18 Récapitulatif des résultats quantitatifs pour les différentes conditions d'assistance. 150
6.19 Illustration de la première interface pour l'assistance à la téléopération en réalité augmentée 152
6.20 Illustration présentant la seconde interface pour l'assistance à la téléopération collaborative. Des fonctions de travail collaboratif sont présentes et permettent à des utilisateurs de communiquer et de se coordonner en vue de réaliser des missions 153
6.21 L'application ARITI sur la plateforme EVR@ 154
6.22 Assemblage des différents modules pour la mise en place du système de téléopération multi-utilisateurs 155
6.23 L'interface d'ARITI multi-utilisateurs sous Virtools 155
6.24 Un robot Fanuc LR Mate 200i 156
6.25 Les serveurs du site esclave 157
6.26 L'architecture réseau du projet ARITI multi-utilisateurs 157
6.27 L'environnement virtuel pour la réalisation de la tâche 158
6.28 Le dispositif expérimental de l'expérience 159

B.1 Les plateformes de Réalité Virtuelle du laboratoire 196
B.2 Le projecteur DLP de la plateforme fixe 197
B.3 Le flystick 198
B.4 Un gant de données 5DT disposant de quatorze capteurs 198
B.5 Le SPIDAR 199
B.6 Configuration du serveur multi-utilisateurs 201
B.7 Le code source permettant la connexion au serveur multi-utilisateurs . . . 201
B.8 Illustration de l'intégration de différents modules fonctionnels 202
B.9 Vue globale de l'implémentation de EVRA Core. On distingue une partie comportant toutes les fonctions et une seconde comportant toutes les variables globales nécessaires aux fonctionnements des différents modules . 202
B.10 Configuration du serveur collaboratif pour la prise en charge des téléchargements de modules 203
B.11 Enregistrement des événements durant l'utilisation de l'EVC dans une base de données 203
B.12 Le module multi-utilisateurs chargé dans Virtools 204

C.1 Illustration de deux sondes mesurant les variations d'échelle et l'accélération instantanée du cube. 206
C.2 L'anatomie d'une sonde, ici la sonde vitesse. Toutes les sondes se présentent sous la même forme. 206
C.3 L'évaluateur via un avatar va construire une mission permettant de faire suivre une trajectoire aux participants. Le repère permet de positionner un point à atteindre. 208
C.4 Un utilisateur réalise une mission de déplacement. Il doit pour cela atteindre les points de passage représentés par le repère 3D. 208

C.5 Anatomie du programme Virtools permettant de contrôler le déroulement de la mission d'évaluation. La sonde Chrono permet de mesurer le temps pour réaliser la sous tâche. 209

D.1 Schéma représentant le placement des repères sur le robot Fanuc 212
D.2 Illustration du fichier de configuration VLC. 214
D.3 Vue du programme ARITI sous Virtools 215
D.4 Illustration du projet ARITI depuis une page WEB 216

A Avo...

Introduction Générale

Contexte

Cette thèse propose une approche combinant la Réalité Virtuelle (RV) et le Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur (TCAO) afin de permettre à plusieurs utilisateurs de pouvoir interagir ensemble dans l'environnement virtuel de manière efficace. La recherche de l'efficacité de cette interaction 3D nécessite des outils adaptés facilitant l'interaction collaborative mais aussi d'outils permettant de valider les performances de cette dernière.

La réalité virtuelle (RV) est une technologie jeune qui se situe à la croisée de plusieurs domaines comme l'infographie, la conception assistée par ordinateur (CAO), la simulation, la téléopération de systèmes complexes, etc. Cette technologie regroupe un ensemble de techniques et d'outils qui permettent aux utilisateurs, d'interagir avec un Environnement Virtuel (EV). Elle utilise de nombreux périphériques matériels et des techniques logicielles pour chaque domaine applicatif. Les actions dans l'EV s'opèrent via l'utilisation de techniques d'interaction 3D qui sont basées sur les facultés humaines d'action et de perception des utilisateurs. L'interaction 3D est donc la composante motrice de la RV. De nombreuses techniques d'interaction 3D existent et sont dédiées à la réalisation d'une des quatre tâches (navigation, sélection, manipulation et contrôle d'application). Cependant, elles ne sont pas forcément rattachées à une application particulière. En général, elles cherchent à accomplir une tâche d'interaction sans prendre en compte les exigences des environnements complexes tels que les environnements virtuels collaboratifs (EVCs).

Problématique

Les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVCs) sont des environnements virtuels peuplés où les utilisateurs interagissent entre eux pour réaliser des actions communes

(déplacement en groupe, sélection et manipulation d'objets en commun, communication, etc.). Dans les EVCs, la complexité se situe au niveau de l'interaction d'un groupe d'utilisateurs avec les objets. En effet, il y a plusieurs contraintes à respecter notamment celles liées à la coordination des actions des différents utilisateurs et la conscience de présence d'un utilisateur par rapport aux objets de l'environnement et par rapport aux autres utilisateurs.
Notre travail de recherche s'inscrit dans le cadre de l'interaction 3D et de la collaboration en Réalité Virtuelle. Il développe la notion d'assistance à l'interaction 3D collaborative et à son évaluation. Pour l'assistance à l'interaction 3D collaborative, une approche basée sur un Workflow [1] intégrant l'anticipation et la gestion des interactions du groupe est proposée. Pour l'assistance à l'évaluation des techniques d'interaction 3D, une approche basée sur les méthodes empiriques d'évaluation intégrant les outils statistiques de recherche d'informations est proposée. L'objectif de cette thèse est de modéliser, concevoir, implémenter et évaluer un système d'assistance à l'interaction 3D collaborative. Notre problématique s'articule autour de plusieurs questions:

- Quel modèle pour organiser et gérer l'interaction 3D du groupe dans un EVC?
- Comment améliorer la perception des utilisateurs lors des processus d'interactions collaboratives?
- Comment faciliter la conception des protocoles expérimentaux pour évaluer des systèmes d'interaction 3D afin de réaliser des expérimentations plus souvent?

Les deux premières questions concernent la proposition d'un modèle permettant d'organiser et de gérer les actions des différents utilisateurs afin de permettre la réalisation de tâches communes. Cela implique une assistance en temps réel aux participants permettant ainsi une collaboration plus intuitive et simple. Pour cela, il est nécessaire de modifier la perception des utilisateurs via des outils d'assistance permettant de déterminer l'anticipation. La dernière question implique la proposition d'un système permettant de faciliter l'évaluation des systèmes d'I3D. Pour cela, il est nécessaire de proposer une assistance à la construction d'une expérimentation, via des outils permettant de faciliter le choix des nombreux paramètres composant un protocole. Le but n'est pas de remplacer les experts mais de guider, dans le but d'évaluer plus souvent et plus rapidement afin de déceler les problèmes avant la réalisation d'une évaluation par des experts.

[1] Modélisation et gestion de l'ensemble des tâches à accomplir et des différents acteurs impliqués dans la réalisation d'un processus commun.

Organisation du mémoire

Les questions qui articulent notre problématique ont guidé l'organisation de ce manuscrit autour de deux parties: Tout d'abord, une première partie **Etat de l'art**, puis une partie **Contributions**. La première partie a pour objectif la recherche de concepts, méthodes et outils nécessaires pour répondre à notre problématique. A cet égard, nous nous sommes intéressés dans un premier temps aux Environnements Virtuels Collaboratifs, aux modèles de gestion du groupe, aux outils de perception des actions, à l'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs et finalement aux méthodologies d'évaluations. La seconde partie est consacrée à la présentation de nos contributions personnelles qui se déclinent en trois chapitres.

Chapitre 1

Le premier chapitre (**La gestion de l'interaction du groupe dans les Environnements Virtuels Collaboratifs**) présente des exemples de modèles de gestion de l'interaction du groupe dans les environnements virtuels collaboratifs. Ce chapitre a pour objectif d'identifier les modèles et les concepts associés à la conscience et à la présence des utilisateurs dans un environnement virtuel collaboratif. Pour cela, nous avons parcouru les différents systèmes et projets qui traitent des Environnements Virtuels Collaboratifs. Nous passons en revue les outils favorisant la perception des utilisateurs dans les EVC. Nous présentons ensuite les modèles associés à l'interaction 3D et à la présence d'un groupe d'utilisateurs dans ce type d'environnement.

Chapitre 2

Le second chapitre (**L'Interaction 3D dans les Environnements Virtuels Collaboratifs**) présente l'interaction 3D mono et multi-utilisateurs en RV, les différentes techniques, les métaphores et paradigmes sur lesquels elles reposent. En effet, après l'analyse des modèles permettant la gestion de l'interaction 3D du groupe dans les EVC, il est nécessaire d'étudier les outils dont disposent les utilisateurs pour interagir dans cet EVC. Dans un EVC, un utilisateur peut soit interagir seul, soit à plusieurs, nous avons donc passé en revue les différentes méthodes d'interactions mono-utilisateur. Nous présentons ensuite les limitations de ces méthodes pour l'interaction à plusieurs et nous terminons par l'étude des méthodes d'interaction multi-utilisateurs.

Chapitre 3

Le troisième chapitre (**Evaluations des Interactions et Interfaces Homme Machine 3D**) expose les approches pour l'évaluation de l'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs. Nous avons passé en revue les différentes approches existantes: Analytiques et Empiriques. Nous avons passé tout d'abord en revue les méthodes analytiques. Ensuite, nous nous sommes intéressé à l'approche empirique, son principe général, les paramètres de ce type d'approche et des méthodes existantes. Cela nous a amené à la conclusion qu'il est difficile d'exploiter l'approche analytique dans le cadre de l'évaluation des systèmes I3D et que l'approche empirique est difficile à mettre en place à cause des nombreux paramètres existants.

Chapitre 4

Le quatrième chapitre (**Un workflow pour la gestion des interactions 3D dans les EVC**) aborde la modélisation du système de gestion du workflow du groupe. Dans un premier temps, nous proposons un concept de gestion du workflow pour l'interaction 3D multi-utilisateurs qui permet la coordination des utilisateurs dans un EVC afin qu'ils réalisent des tâches de l'interaction 3D en commun et cela via l'utilisation de techniques mono utilisateur. En effet, le système a la capacité de connaître les intentions des utilisateurs (anticipation) lors de la réalisation des tâches de l'interaction 3D, il pourra donc fournir les outils d'assistance nécessaires à la coordination. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur la boucle de perception-action que nous avons modifié afin d'intégrer une composante de workflow. Cette composante va perturber le cycle afin de modifier la perception des participants afin qu'ils puissent interagir de manière synchrone sur un même objet, plus précisément de permettre la coordination des actions. Une spécification fonctionnelle regroupant les deux trèfles fonctionnels des deux domaines (RV et TCAO) permet de structurer l'interaction collaborative en ensembles fonctionnels qui sont l'ensemble navigation, l'ensemble sélection, l'ensemble production/-manipulation et l'ensemble de communication. Cette spécification exploite les concepts de Focus, de Nimbus, d'Aura, d'Assistants et de vecteur d'états qui représentent le formalisme de gestion de l'interaction du groupe. Ces travaux sont actuellement en cours de publications [Otmane et al., 2010].

Chapitre 5

Le cinquième chapitre (**Vers une plateforme d'assistance à l'évaluation des systèmes interaction 3D**) est dédié à un l'outil permettant la création de protocoles pour

l'évaluation des systèmes d'interaction 3D. L'outil proposé repose sur le concept d'assistance à l'évaluation et permet, d'une part, de construire de manière assistée un protocole expérimental, d'autre part, de piloter et de mesurer le déroulement de l'évaluation afin d'établir des analyses. De ce fait, le concepteur peut évaluer plus rapidement et fréquemment. L'outil se décompose en deux éléments: d'une part une partie "pilotage et mesures des variables" qui permet de piloter les différents cas de l'évaluation que l'expérimentateur aura spécifié durant la création du protocole expérimental, et d'autre part, une partie "expérimentale" composée d'une base de connaissances. Outre la base de connaissance, la partie expérimentale assiste l'évaluateur, pour qu'il puisse faire le bon choix des indicateurs permettant d'obtenir des mesures, mais aussi les facteurs qui modifient ces mesures. Cela est rendu possible par l'utilisation d'algorithmes statistiques de décision permettant de présélectionner des paramètres. Plusieurs étapes ont mené à cet outil et plusieurs publications ont découlé: tout d'abord le concept initial a été publié dans [Domingues et al., 2007] ainsi que les premières implémentations de l'outil à ces débuts [Domingues et al., 2008c] et [Domingues et al., 2008a]. Nous avons publié une revue [Domingues et al., 2010] qui présente le concept de manière plus avancé.

Chapitre 6

Enfin dans le dernier chapitre (**Expérimentations et Evaluations**) nous avons appliqué notre modèle de gestion de l'interaction du groupe dans des cas basiques de navigation, sélection et manipulation synchrone à deux utilisateurs. Nous avons étudié l'influence du modèle sur les performances, en terme d'exécution et de comportement des utilisateurs de ces tâches. Ensuite, nous avons appliqué notre modèle dans le cadre du projet de téléopération, ARITI. Nous présentons les modifications que nous avons apporté au projet ARITI afin de permettre la collaboration entre plusieurs utilisateurs. Ces modifications touchent aux aspects technologiques et logicielles. Les modifications apportées au projet ARITI ont été tout d'abord publiées dans [Boudoin et al., 2008] et [Domingues et al., 2008b] qui présentent les premières avancées techniques puis dans [Domingues et al., 2009b] et [Domingues et al., 2009a] qui présentent les évolutions successives et des cas d'application.

Enfin, nous avons terminé le mémoire par une conclusion comportant un bilan des différents aspects traités ainsi que des perspectives.

Partie I

Etat de l'art

Chapitre 1

La gestion de l'interaction du groupe dans les Environnements Virtuels Collaboratifs

1.1 Introduction

Apparue dans les années 80, la Réalité Virtuelle (RV) révolutionne la manière dont nous percevons et analysons le monde physique nous entourant. La RV a la capacité de plonger un médecin dans le corps de son patient afin qu'il puisse toucher, bouger ou bien déformer des éléments. Elle peut aussi nous immerger dans un univers aquatique afin de plonger et d'observer le monde sous marin. Plus globalement, cette technologie permet de réaliser ce que nous ne pouvons pas habituellement réaliser.
Le terme de Réalité Virtuelle est lui même contradictoire. En effet dans RV, il y a le terme de Réalité qui signifie quelque chose qui existe et le terme de Virtuelle qui signifie quant à lui quelque chose qui n'existe pas, qui n'est pas réel. Une première définition de RV a été apportée dès 1968 [Sutherland, 1968]. Ensuite dans les années 90, plusieurs définitions ont suivi [Rheingold, 1991] [Lanier, 1992], dans lesquelles on trouve le terme de Réalité Augmentée. Ces auteurs décrivent la réalité virtuelle comme une technologie exploitant la puissance informatique pour simuler une réalité synthétique que plusieurs personnes peuvent partager. Ce monde synthétique est appréhendé via nos sens et ces derniers sont utilisés pour interagir dans ce monde par l'intermédiaire d'artefacts informatisés.
Parallèlement à l'émergence de la Réalité Virtuelle, les premiers travaux sur le thème du travail collaboratif sont apparus dans les années 80. Mais c'est en 1991, que Ellis et associés [Ellis et al., 1991] ont introduit la notion de CSCW, Computer Supported

Cooperative Work (TCAO: Travail Coopératif Assisté par Ordinateur en français) ainsi que le terme de groupware (logiciel coopératif ou collecticiel). Le travail collaboratif regroupe toutes les activités humaines en faisant intervenir plusieurs personnes en même temps ou non.

Un Environnement Virtuel Collaboratif (EVC) est une nouvelle technologie qui résulte de la convergence du TCAO (CSCW en Anglais) et de la RV. Ils représentent des environnements virtuels multi-utilisateurs qui permettent aux participants de se partager un même espace virtuel et de réaliser un objectif commun. Pour la communauté de la Réalité Virtuelle, les EVC sont des extensions de la RV mono-utilisateur. Pour le domaine du travail collaboratif, les EVC représentent une technologie qui peut supporter certains aspects de l'interaction sociale. Pour [Damer, 1997], la technologie des EVC permet de transformer les réseaux informatiques en des espaces peuplés d'interactions homme machine et qui supportent le travail collaboratif.

Cette définition technologique des EVC nous oriente vers plusieurs axes d'études. Le premier axe concerne les études liées aux architectures réseaux et logicielles de ces environnements. Cependant, nous ne traiterons pas cet aspect dans cette thèse, pour cela nous vous recommandons la lecture de la thèse de Khézami [Khezami, 2005]. C'est le second aspect qui nous intéresse plus particulièrement, à savoir l'interaction homme machine des utilisateurs. En effet, toutes les actions réalisées par les utilisateurs ont la capacité de modifier l'EVC. Pour cela, les utilisateurs doivent avoir une connaissance de certaines informations pour pouvoir agir: Qui partage l'environnement? Qui travaille avec qui? Qui fait quoi? Quand? Comment? Où? Avec quoi? Par conséquence, une coordination importante entre les participants est nécessaire. En prenant l'exemple d'un EVC permettant à deux chirurgiens distants de télé-opérer un même patient virtuel, il est indispensable qu'ils se coordonnent.

Dans ce chapitre, nous vous présenterons tout d'abord quelques définitions sur lesquelles nous allons baser nos travaux. Nous vous présenterons ensuite des projets qui ont abouti à des Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC). Ces projets seront pour nous l'occasion d'analyser comment est réalisée la gestion de l'interaction des utilisateurs. Ensuite, nous présenterons des modèles de gestion de l'interaction du groupe. Ces modèles serviront de base, pour mettre en place notre modèle de gestion de l'interaction collaborative dans les EVC (voir chapitre 4).

1.2 Quelques définitions

1.2.1 La Réalité Virtuelle

La RV est une technologie qui se situe à la croisée de plusieurs domaines comme l'informatique, la simulation, la CAO ou encore la télérobotique. Elle repose sur l'utilisation de différents dispositifs matériels hétérogènes ainsi que des techniques logicielles. La RV dispose de nombreuses définitions dues à l'ambiguïté du terme virtuel.
En 1992, [Aukstakalnis and Blatner, 1992] ont proposé une définition très générique de Réalité Virtuelle. Ils considérent la RV comme un moyen, pour des utilisateurs de visualiser et d'interagir avec des ordinateurs et des données variées et complexes. Dans la communauté française de la RV, nous pouvons citer la définition proposée par Burdea et associés en 1993 ([Burdea and Coiffet, 1993]). Ils ont introduit trois composantes à prendre en compte pour permettre à un utilisateur d'interagir en temps réel dans l'environnement virtuel (voir figure 1.1). Ces composantes sont l'Immersion, l'Interaction et l'Imagination.

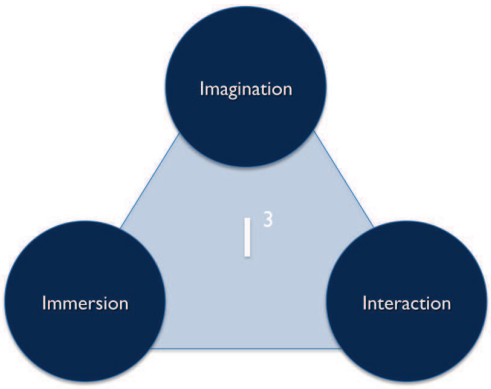


FIGURE 1.1: Les trois I (Adapté de [Burdea and Coiffet, 1993])

Tisseau [Tisseau, 2001] définit la Réalité Virtuelle comme un univers de modèles qui propose la triple médiation des sens, de l'action et de l'esprit (voir figure 1.2). Cette médiation des sens permet la perception du réel, la médiation des actions permet de mener des expérimentations alors que la médiation de l'esprit permet une représentation mentale de la réalité.

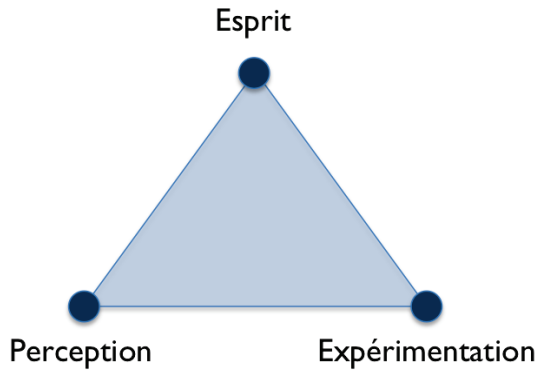


FIGURE 1.2: Les médiations du réel (Adapté de [Tisseau, 2001])

Plus récemment, Fuchs et associés [Fuchs et al., 2006b] ont proposé deux définitions de la RV, une définition technique et une fonctionnelle :

- Définition technique de la RV: la RV 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 ;
- Définition fonctionnelle de la RV: la réalité virtuelle va permettre de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et/ou de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.

Pour terminer, Fuchs et associés [Fuchs et al., 2006b] ont proposé une définition qui englobe toutes les définitions. Pour cela, ils se basent sur la finalité de la RV:

> *"La finalité de la RV est de permettre à une personne ou 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."*

Cette dernière définition sera utilisée dans la suite du document lors de l'utilisation du terme Réalité Virtuelle.

1.2.2 La Réalité Augmentée

Selon Azuma [Azuma, 1997], la Réalité Augmentée (RA) est une variante de la Réalité Virtuelle (RV). Alors que la réalité virtuelle plonge un individu dans un environnement

virtuel où il ne peut voir le monde réel, la RA permet à l'utilisateur de voir le monde réel où des objets virtuels y sont superposés. Un système de réalité augmentée doit combiner les objets réels avec les objets virtuels le tout en temps réel.
La RA permet à un utilisateur d'obtenir davantage d'informations que le monde réel par l'intermédiaire des objets virtuels. Pour effectuer, cette "fusion" du réel avec le virtuel, il faut utiliser des dispositifs d'affichage tels que les casques vidéo transparents qui permettent de visualiser une scène virtuelle tout en observant le monde réel ou encore des lunettes transparentes , dans ce cas là le monde virtuel n'est pas projeté au niveau des yeux mais sur un écran. Là aussi l'utilisateur peut voir le monde réel. En théorie la réalité augmentée devrait permettre des interactions simples avec les objets virtuels mais il existe de nombreux styles d'interaction ainsi que des problèmes technologiques au niveau dispositifs ce qui implique des problèmes. Pour résumer, il existe deux façons d'utiliser la RA :

- En vision directe : augmenter directement ce qui est vu par l'utilisateur en superposant des informations virtuelles sur la vue réelle de l'utilisateur. Ce type d'augmentation peut se faire en exploitant des dispositifs d'affichage transparents;
- Vision indirecte : augmenter ce qui est vu par un ou plusieurs capteurs en superposant des informations virtuelles sur des retours d'informations obtenus par ces capteurs. Par exemple, dans le cas du contrôle d'un robot, un retour vidéo d'un robot distant est augmenté par un modèle virtuel du robot que contrôle l'utilisateur en temps réel.

Pour résumer les différentes définitions de RV et de RA, en 1994, Milgram et Khisino [Milgram and Kishino, 1994] ont proposé une unification des concepts en proposant un continuum reliant la RV et la RA figure 1.3.

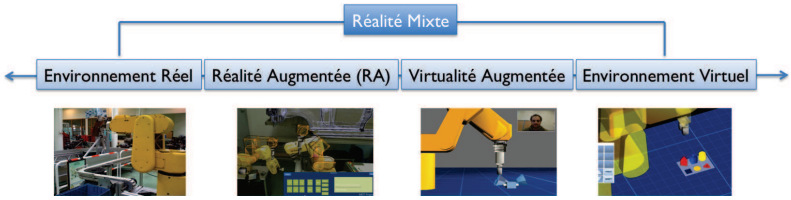


FIGURE 1.3: Le continuum réel-virtuel (Adapté de [Milgram and Kishino, 1994])

1.2.3 Environnement Virtuel mono et multi utilisateurs

Le terme d'Environnement Virtuel (EV) a été introduit en 1995 [Heim, 1995]. L'environnement virtuel est le lieu qui accueille un ou plusieurs utilisateurs afin de leur permettre de réaliser des tâches, en leur donnant la sensation d'être dans un nouveau lieu. L'environnement

virtuel est représenté par un modèle 3D de données réelles ou imaginaires qu'on peut visualiser et avec lesquelles on peut interagir en temps réel [Bowman and Hodges, 1999]. On distingue différents types d'environnement virtuels en fonction du degré d'immersion que l'on souhaite donner [Kalawsky, 1993] :

- Environnement non immersif;
- Environnement semi immersif;
- Environnement immersif.

Un Environnement Virtuel Collaboratif (EVC) est un environnement virtuel qui permet d'accueillir plusieurs utilisateurs et d'interagir avec des objets ou bien entre utilisateurs. Ils sont le résultat de la convergence de deux communautés : la Réalité Virtuelle et le Travail Collaboratif. Une première définition a été proposée par [Gibson, 1989]:

> *"Un EVC est un système distribué qui permet à des individus de se partager des informations par l'interaction individuelle et collaborative dans un monde virtuel".*

Churchill et associés [Churchill and Snowdon, 1998] ont proposé une autre définition moins restrictive:

> *"Un EVC est un espace virtuel créé par ordinateur et distribué où des utilisateurs peuvent se réunir et interagir sur des objets virtuels".*

1.3 Les composantes de la Réalité Virtuelle

A l'origine, les premiers travaux/recherche en RV se sont focalisés sur la conception et la réalisation d'interfaces favorisant l'immersion de l'utilisateur et ses possibilités d'interaction dans l'EV. Ces interfaces permettent la caractérisation de la présence de l'utilisateur et lui procurer une certaine autonomie. Zeltzer [Zeltzer, 1992], a défini trois composantes de base pour la réalité virtuelle, l'autonomie, l'immersion et l'interaction pour définir une application de réalité virtuelle. Tisseau [Tisseau, 2001] caractérise quant à lui, une application de RV en se basant sur les notions de présence et d'autonomie. Cependant la présence intègre les notions d'interaction et d'immersion. Par conséquent, on distingue trois composantes principales qui définissent une application de RV. Tisseau représente graphiquement une application de RV par un point dans un espace à trois dimensions. Les axes de ce graphique correspondent aux différentes composantes avec

une échelle allant de l'absence de la composante à la présence de la composante figure 1.4. Le graphique est illustré par des exemples d'applications comme un virus informatique. Ce dernier se caractérise par une autonomie forte mais une immersion et une interaction nulle.

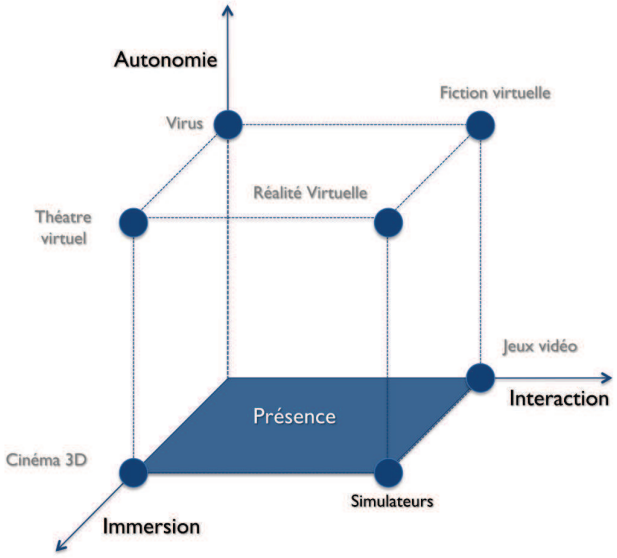


FIGURE 1.4: Présence et autonomie en réalité virtuelle (Adapté de [Tisseau, 2001])

Dans ce qui suit, nous présenterons les trois composantes de la Réalité Virtuelle.

1.3.1 Interaction

L'interaction est la composante qui permet aux utilisateurs d'interagir dans l'environnement virtuel (EV) donc c'est une composante dite motrice. Une technique d'interaction définit la méthode qui permet de réaliser une tâche dans l'environnement. C'est une sorte de protocole de communication avec le système qui représente les actions/réactions. On parle de métaphore d'interaction pour designer un ensemble de techniques qui utilisent un même outil virtuel ou concept similaire. Dans le chapitre suivant, nous détaillerons les techniques utilisées pour interagir dans les environnements virtuels.

Le trèfle fonctionnel de l'interaction 3D Le modèle du trèfle fonctionnel de l'interaction 3D a été proposé par [Otmane et al., 2007]. Ce modèle s'inspire du modèle du trèfle fonctionnel des collecticiels [Ellis et al., 1991]. Le trèfle est composé de trois feuilles (voir figure 1.5) représentant les trois tâches de base de l'interaction 3D (navigation, sélection et manipulation). La tâche de contrôle d'application est une tâche qui a un lien direct avec le système et qui intervient implicitement durant l'utilisation des trois autres tâches. Cela forme un cadre fonctionnel pour l'interaction 3D qui permet

de représenter la fonction qu'un utilisateur est en train de réaliser à un moment donné dans l'environnement virtuel. Cette dernière peut-être simple telle que la navigation, la sélection et la manipulation ou la combinaison de deux tâches simples, par exemple, un utilisateur qui navigue et déplace un objet au même temps.

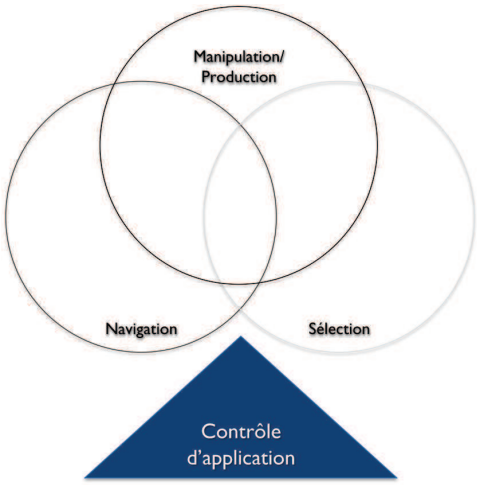


FIGURE 1.5: Le trèfle fonctionnel de l'interaction 3D. (Adapté de [Otmane et al., 2007])

1.3.2 Immersion

En RV, le terme "immersion" est souvent associé à des formules du type "immersion dans un EV ou EVC" ou encore "l'utilisateur est immergé". Par définition, l'immersion est la relation entre le sujet et l'environnement virtuel. Bowman a défini ce terme en 1999, comme la sensation d'être présent. Pour lui, un utilisateur est dit immergé lorsqu'il sent que le monde virtuel qui l'entoure a remplacé le monde physique. La présence donne à l'utilisateur l'impression d'être dans l'univers virtuel. Plusieurs définitions ont été proposées dans la littérature pour le terme de présence. Pour [Zeltzer, 1992], la présence, est la mesure du nombre de canaux sensoriels disponibles. Le terme de présence peut se découper en deux composantes, la présence sociale ou co-présence et la présence virtuelle. La co-présence ou présence sociale est le sentiment de présence avec d'autres participants partageant un même environnement virtuel. Pour [Biocca et al., 2001] la co-présence est le degré auquel un observateur présent dans environnement croit qu'il n'est pas seul ou isolé. Elle est liée au niveau de perception de la présence de l'autre personne présente dans le même environnement. Ce type de présence passe par l'utilisation d'un avatar représentant les utilisateurs dans l'environnement.

1.3.3 Le Travail/Télétravail Collaboratif

Le télétravail peut se définir comme une forme d'organisation ou de réalisation en exploitant les technologies de l'information et de la communication depuis un autre lieu que les locaux de l'entreprise comme son propre domicile. Le développement d'Internet et de l'ordinateur personnel ont permis de rompre avec la contrainte du temps et du lieu (l'employé n'est plus sur le lieu de travail). Plus précisément, "Un télétravailleur"" est quelqu'un qui travaille en utilisant à distance les ressources de son entreprise. Le télétravail implique à terme des formes de rémunération davantage liées aux résultats qu'au temps passé. D'où la nécessité de critères d'évaluation les plus précis et les plus objectifs possibles.
Le travail collaboratif ou "Computer Supported Cooperative Work (CSCW)" est un nouveau modèle de travail dans lequel, se joignent plusieurs personnes (télétravailleurs), au moyen de nouveaux outils de communication (par exemple Internet) en vue de réaliser un objectif en commun. Les recherches dans ce domaine proposent des outils de communication, de travail et d'échange ou de partage de données permettant de réunir les différents participants et ainsi de créer une intelligence et une mémoire collective dans les organisations [Schal and Schael, 1996], [Greenberg, 1990].
Le CSCW est un domaine de recherche pluri-disciplinaire qui intéresse les sociologues, les psychologues, les ergonomes et les informaticiens. Bien que le CSCW comporte le terme "Computer", les outils mis en jeu dans cette discipline dépassent de loin l'ordinateur en incluant la téléphonie, les messageries, la vidéo et les systèmes d'imagerie. En tant que domaine scientifique, le "Travail Collaboratif" est encore immature et les problèmes théoriques sont nombreux [Ellis et al., 1991].

1.3.4 Le trèfle fonctionnel des collecticiels

Les collecticiels (logiciels collaboratifs) proposent de compléter les fonctionnalités classiques des logiciels par des fonctions qui permettent à plusieurs utilisateurs de travailler ensemble sur des données partagées (par exemple : rapports, données multimédia, etc). Pour structurer l'analyse des collecticiels, et proposer un moyen de classification, certains auteurs répartissent les fonctionnalités des outils collaboratifs en se basant sur le trèfle fonctionnel [Ellis et al., 1991]. Le trèfle se compose de trois espaces: Communication, Production et Coordination.

L'espace de communication L'espace de communication fait référence à l'échange de données informatiques dites systèmes et de données de conversations dites sémantiques

qui sont étrangères au système et qui prennent la forme de communication textuelle, vidéo ou encore audio. Les méthodes les plus courantes de communication sont :

- Par mail, Messages SMS, Chat ou Messagerie Instantanée qui regroupent les formes de communications textuelles
- Téléphonie Voix par IP qui est une technique qui permet de communiquer par la voix via l'Internet ou tout autre réseau acceptant le protocole TCP/IP.
- Vidéo conférence qui permet de voir son correspond à distance via l'utilisation d'une caméra ou d'un système de conférence.

L'espace de production L'espace de production contient toutes les fonctionnalités de construction et d'accès aux données partagées. Une application collaborative de type "tableau blanc virtuel" où les utilisateurs peuvent écrire ou dessiner sur ce tableau virtuel est l'espace de production.

L'espace de coordination L'espace de coordination fait référence au lieu où les utilisateurs vont s'organiser afin de réaliser la tâche principale. Les utilisateurs vont se répartir les sous tâches en utilisant des moyens de communication.

1.3.5 Le Workflow

Par définition, le workflow est un flux d'informations au sein d'une organisation [Wikimedia et al., 2010]. En informatique c'est la modélisation et la gestion de l'ensemble des tâches à accomplir et des différents acteurs impliqués dans la réalisation d'un processus commun. Cela décrit le circuit de validation, les tâches à accomplir entre les différents acteurs d'un processus, les délais, les modes de validation, et fournit à chacun des acteurs les informations nécessaires pour la réalisation de sa tâche. On parle de moteur de workflow pour décrire le dispositif logiciel permettant d'exécuter une ou plusieurs définitions de workflow. On peut donc en déduire que l'ensemble des interactions 3D d'un groupe d'utilisateurs dans un EVC s'apparente à cette définition.

1.3.6 L'Awareness

La conscience (Awareness en Anglais) est par définition la connaissance intuitive et immédiate que l'être humain possède de son existence, de ses facultés. Pour Zammar [Zammar, 2005], la conscience est l'aspect le plus fondamental de l'interaction dans les

environnements virtuels. Sans aucune connaissance de l'état des autres utilisateurs, il est difficile d'établir et de proposer une interaction dans l'environnement. Pour Dourish [Dourish and Bly, 1992] la conscience est la compréhension de l'activité des autres qui engendre un contexte pour notre propre activité.
Gutwin et Greenberg [Gutwin and Greenberg, 2002] relèvent quatre caractéristiques inhérentes au concept de conscience :

- La conscience est la connaissance de l'état d'un environnement connu et limité dans l'espace et le temps;
- La conscience est constituée de connaissances d'un environnement qui doivent être mises à jour en fonction des transformations de l'environnement;
- La conscience est entretenue par l'interaction des personnes avec l'environnement;
- La conscience est liée à une activité. La conscience n'est pas un but mais participe à la réalisation d'une tâche.

Cependant dans un EVC, la conscience est plus difficile à maintenir que dans la réalité [Greenberg et al., 1996] :

- Les environnements réels sont très riches et ne peuvent être simulés virtuellement à la perfection;
- Les interactions en environnement virtuel génèrent moins d'informations que dans l'environnement réel. Les auteurs illustrent leurs propos par l'exemple suivant: "Dans le réel un utilisateur prend un document, le déchire et le jette dans la poubelle. En virtuel, un utilisateur sélectionne le fichier et appuie sur la touche supprimer". Dans le cas réel, l'utilisateur génère beaucoup plus d'informations.

Pour que les utilisateurs puissent percevoir les événements ainsi que les autres participants. Il est donc nécessaire qu'ils aient conscience des uns et des autres pour pouvoir agir. Pour cela, on exploite les sens humains mais plus particulièrement la vision, l'haptique et l'ouïe.
Pour la vision, l'avatar virtuel (c'est un objet qui représente l'utilisateur dans l'environnement) est très souvent utilisé. Il permet d'une part, de visualiser la présence des autres utilisateurs, mais aussi la sienne dans l'EVC [Mer et al., 2001]. L'avatar permet aussi d'indiquer son intention ou son point de vue pour indiquer par exemple l'objet virtuel avec lequel on souhaite interagir. Nous retrouvons cela dans les travaux de [Hindmarsh et al., 2000], [Hindmarsh et al., 1998] et [Fraser et al., 1999]. L'avatar peut prendre plusieurs formes: soit très simple (forme géométrique basique) soit une forme de plus en plus complexe

pour atteindre une ressemblance réelle avec l'utilisateur. D'autres artefacts sont utilisés comme dans [García et al., 2008]. Deux utilisateurs représentés dans l'EVC par deux avatars doivent déplacer un objet (voir figure 1.6). Des flèches 3D apparaissent alors et indiquent le sens de déplacement aux utilisateurs.

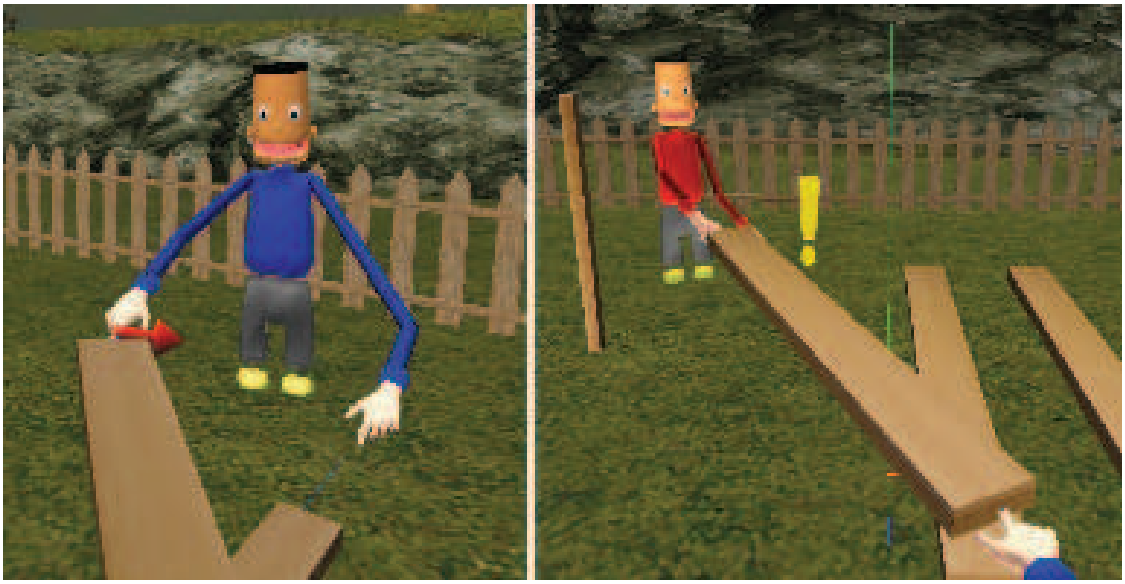


FIGURE 1.6: Manipulation à deux utilisateurs (Extrait de [García et al., 2008])

Pour l'haptique, nous pouvons citer l'exemple de plusieurs utilisateurs qui manipuleraient un objet simultanément, le déplacement d'un utilisateur va provoquer un retour de force chez les autres. Cela permet de faire sentir aux autres utilisateurs sa présence. L'inconvénient du retour d'effort est qu'il peut être difficile de faire la différence, entre le retour de force dû à des collisions et celui dû à l'action opposée d'un autre utilisateur [Aguerreche et al., 2009a]. Pour l'audio, nous pouvons utiliser une spatialisation du son, permettant ainsi de créer un son 3D, provenant de la communication des autres participants. La spatialisation du son consistent à créer l'illusion que des sons proviennent de diverses directions de l'espace. Cette direction donne l'illusion de la présence des autres utilisateurs. Cependant, audio comme haptique peuvent entraîner des discontinuités de perception pour les utilisateurs en cas de délai dû au réseau.

1.3.7 Autonomie

Dans un environnement virtuel, l'utilisateur est exposé dans un environnement autonome qui lui donne la liberté pour évoluer, modifier et interagir avant et pendant. Cela n'est pas le cas d'une application de calcul scientifique car les paramètres sont initialement fixés. L'autonomie réside dans la capacité dont l'utilisateur dispose pour coordonner ses perceptions et ses actions au cours du processus d'interaction. L'autonomie par nécessité

concerne la prise en compte instantanée des changements dans l'environnement, par les organismes comme par les mécanismes [Tisseau, 2001].

1.3.8 Conclusion intermédiaire

L'objectif de cette section a été de définir les différents termes que nous avons utilisé pour réaliser nos travaux. Dans la section suivante, nous présentons des exemples d'environnements virtuels collaboratifs.

1.4 Environnements Virtuels et Augmentés Collaboratifs (EVC/EAC)

Dans cette section, nous présentons quelques exemples d'environnements virtuels collaboratifs. Elle est pour nous l'occasion d'étudier comment se réalise la gestion du groupe pour gérer l'interaction des participants. Ces environnements intègrent pour certains d'entre eux des modèles de gestion de l'interaction 3D du groupe qui sont traités dans la suite de ce chapitre.

MASSIVE MASSIVE (Model, Architecture and System for Spatial Interaction in Virtual Environments) [Greenhalgh and Benford, 1995] est un système de téléconférence qui permet à plusieurs utilisateurs de communiquer via différents canaux (audio, texte ou graphique). Ce processus de communication est assuré par le modèle spatial de l'interaction [Benford and Fahlen, 1993], via l'utilisation de l'aura, du nimbus et du focus. Pour entrer en contact avec un participant, il faut que les zones de nimbus et de focus se recouvrent. La figure 1.7 illustre l'environnement MASSIVE avec quelques participants représentés par leurs avatars. MASSIVE a connu deux extensions, MASSIVE-2 et MASSIVE-3. MASSIVE-2 [Greenhalgh and Benford, 1999] intègre le concept de "Third party object" [Greenhalgh and Benford, 1997] qui sont des objets qui permettent de modifier la perception qu'ont deux objets l'un de l'autre (par exemple, la perception qu'on deux utilisateurs l'un de l'autre est altérée par un autre utilisateur). Un résultat très intéressant, apporté par Greenhalgh est l'importance de la communication et du champ de vision pour la collaboration. MASSIVE-3 [Greenhalgh et al., 2000] intègre quant à lui une autre gestion des actions du groupe [John et al., 1996].

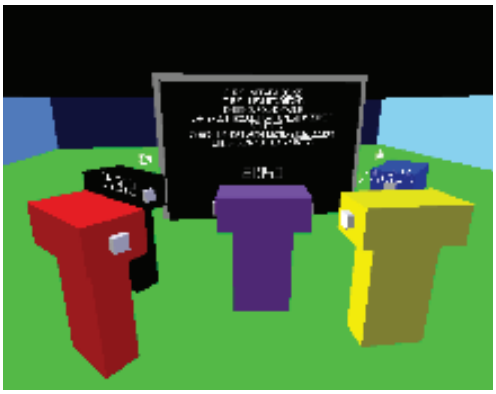


FIGURE 1.7: Illustration de l'EVC MASSIVE (Extrait de [Greenhalgh and Benford, 1995])

SPIN-3D Le projet SPIN3D [Dumas et al., 1998] a mené au développement d'une plate-forme de travail coopératif synchrone pour de petits groupes. Ce projet a été réalisé par Orange en collaboration avec une équipe multidisciplinaire composée d'informaticiens et de psychologues. SPIN-3D propose une visualisation et une interaction 3D basées sur la métaphore de réunion sur table.

Projet COVEN COVEN [Normand et al., 1999] pour Collaboratives Virtual ENvironments avait pour objectif la conception et l'étude des technologies dans les environnements virtuels collaboratifs. Ce projet Européen, a abouti à plusieurs résultats sur différents niveaux : système, interaction et applications. Ce projet a permis plusieurs applications comme un outil pour l'architecture intérieure et un second pour l'entraînement à la vente en ligne. COVEN permet de gérer l'interaction des utilisateurs et intègre la notion de "third party object" [Greenhalgh and Benford, 1999] que l'on retrouve dans l'environnement MASSIVE-2.

Projet Blue-C Blue-c est un projet allemand. Ce dernier permet l'immersion des participants via l'utilisation d'un CAVE, de plus les participants sont modélisés en 3D via une acquisition de leur visage [Gross et al., 2003]. L'acquisition 3D permet de construire un avatar à l'image de l'utilisateur sous la forme d'une représentation en nuage de points. Ce projet a abouti aux développements de plusieurs EVC comme le projet IN:SHOP. IN:SHOP (voir la figure 1.8), qui permet à un client immergé d'être assisté durant ses courses par un responsable [Lang et al., 2003]. Le client peut visualiser les informations, écouter des sons ou configurer certains objets 3D dans un but commercial (vente de voitures). Il n'y a donc pas d'interaction sur des objets communs en même temps. Le responsable peut guidé le client.



FIGURE 1.8: Le projet IN:SHOP (Extrait de [Lang et al., 2003])

Projet DIVIPRO DIVIPRO est une application de prototypage CAO qui permet à plusieurs utilisateurs de manipuler et d'interagir ensemble sur des maquettes virtuelles [Glencross et al., 2002]. L'objectif est de réaliser des opérations d'assemblage pour vérifier les processus de maintenance (voir figure 1.9). DIVIPRO peut exploiter le dispositif haptique PHANToM.

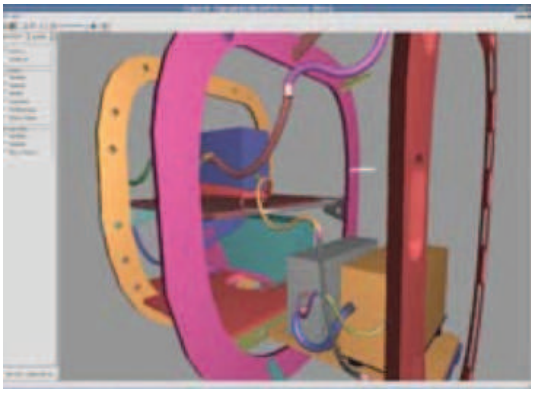


FIGURE 1.9: Le système DIVIPRO (Extrait de [Glencross et al., 2002])

RNTL Part@ge Part@ge est une plateforme RNTL [Partage, 2007] financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) portant sur le thème de l'interaction 3D multi-utilisateurs. Ce projet vient poursuivre les activités du projet RNTL PERF-RV [PERV-RV, 2004] mené par Bruno Arnaldi. Les objectifs visent à proposer un ensemble d'outils permettant l'interaction 3D à plusieurs dans les EVC. Ces objectifs sont organisés autour de trois thèmes :

- Modèle et objets : l'objectif est de proposer de nouveaux formats de données 3D compatibles avec tous les outils utilisés dans le projet (Virtools, Spin3D,...) ainsi que la définition de nouvelles techniques d'interaction qui gère le retour d'effort;

- La fusion des outils de communication et collaboration afin de développer des plateformes de communication et de collaboration;
- La collaboration avancée : l'objectif est de proposer des solutions aux problèmes telles que le contrôle haptique à distance en réseau dégradé.

Ce projet a abouti à plusieurs résultats comme des techniques d'interactions 3D multi-utilisateurs. Pour cela, nous pouvons citer les travaux de [Bouguet et al., 2007] qui proposent un outil permettant le partage synchrone de documents via un un système de visioconférence.

Autres projets: Domaine médical Dans le domaine médical qui fournissent des services aux médecins pour travailler ensemble sur des patients. Nous pouvons citer le projet Argonaute 3D [Mer et al., 2004] qui utilise comme base, le système SPIN-3D. Argonaute 3D permet aux médecins d'accéder aux dossiers médicaux des différents patients, ainsi qu'à des données d'IRM ou de scanners reconstruits en 3D. Un salon virtuel est disponible et qui permet aux médecins, représentés par des avatars de communiquer. Ils peuvent communiquer vocalement ou bien d'effectuer des gestes via leurs avatars. Le projet Group-Slicer [Simmross-Wattenberg et al., 2005] permet aux médecins de se partager des données pour analyser des cas cliniques. L'interaction avec les données se fait de manière asynchrone alors que la communication est synchrone (voir figure 1.10).

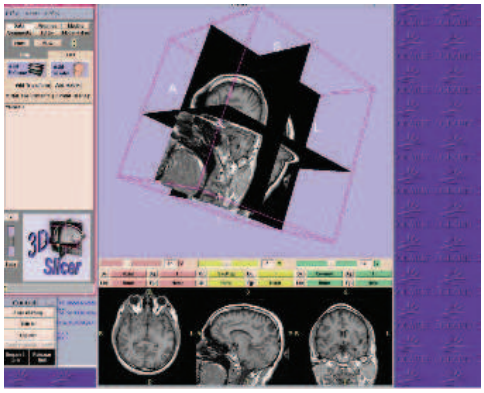


FIGURE 1.10: Illustration de l'interface du projet Group-Slicer (Extrait de [Simmross-Wattenberg et al., 2005])

Autres projets: Domaine formation Un premier projet concernant le domaine de la formation est le projet VET. VET signifie Virtual Environment for Training [Johnson and Rickel, 1997]. Ce projet est dédié à la formation des utilisateurs sur des machines complexes. Les utilisateurs sont en immersion totale dans l'environnement virtuel. Ils interagissent via des gants de données, des capteurs de position et un visiocasque. La composante collaboration intervient lorsqu'un formateur peut intervenir

dans l'EV avec les utilisateurs par le biais d'un agent dans le but d'enseigner. Pour terminer, nous pouvons présenter, NPSNET [Macedonia et al., 1994] qui est un système, conçu pour supporter et simuler des formations et exercices militaires. Chaque machine d'un utilisateur est configurée pour simuler un véhicule ou une personne militaire (entité virtuelle). Des milliers de ces entités virtuelles peuvent agir l'une sur l'autre.

1.4.1 Conclusion intermédiaire et défis

Dans cette section, nous avons présenté des exemples de systèmes et de projets portant sur le travail collaboratif assisté par la réalité virtuelle et/ou augmentée. Le domaine des EVC est le résultat de la convergence de deux communautés de chercheurs: RV et TCAO (Travail Collaboratif Assisté par Ordinateur). Les EVC sont habités par plusieurs utilisateurs afin qu'ils puissent interagir/travailler ensemble. Ce travail est uniquement possible si un espace virtuel commun de travail est partagé. Ce partage d'espace engendre de nombreux problèmes issus des deux communautés. Nous pouvons citer d'une part les problèmes liés au domaine du TCAO :

- La représentation des groupes dans l'environnement;
- La gestion des droits d'accès aux différents objets virtuels et informations partagées pour l'ensemble des utilisateurs.

Et d'autre part, les problèmes liés au domaine de la RV. En effet, les EVC sont des environnements virtuels très complexes dus à :

- La gestion dynamique des interactions de plusieurs personnes sur le même objet virtuel;
- L'évaluation des techniques d'Interaction 3D;
- La conscience de présence des autres utilisateurs travaillant dans le même espace virtuel;
- La gestion des points de vues des différents utilisateurs (synchronisation des espaces virtuels).

Les problèmes des environnements collaboratifs concernent principalement le partage des objets par plusieurs utilisateurs en même temps. Le domaine du travail collaboratif assisté par la RV et la RA manque de modèles et de formalismes qui permettent de contrôler et de gérer l'interaction collaborative. Au vue des différents défis touchant les EVC et afin de répondre à notre problématique, nous allons dans la suite de ce chapitre

étudier les différents modèles permettant de gérer l'interaction du groupe. Ensuite, nous avons étudié dans les chapitres suivants l'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs ainsi que les méthodes pour évaluer. Ces trois chapitres constituent une base pour nos contributions.

1.5 Modèles de gestion de l'interaction 3D du groupe

1.5.1 Le modèle spatial de l'interaction

Le modèle spatial de l'interaction est un modèle très connu [Benford and Fahlen, 1993]. Il a été développé dans les années 90, comme une méthode de contrôle de transmission de données dans les EVCs. Le modèle spatial utilise les propriétés de l'espace comme base pour négocier les interactions et les communications entre des objets dits communicants. A partir des paramètres de position et d'orientation, les objets ont la capacité de modifier leur interaction et communication. Dans ce qui suit, nous allons vous présenter les concepts de ce modèle.

Espace et Objet Le concept fondamental de ce modèle repose sur un découpage de l'espace virtuel. Une métrique spatiale est définie et permet de mesurer les positions et les directions des différents objets. Ces objets représentent des personnes et des informations réelles ou virtuelles. Les objets interagissent entre eux via une combinaison de supports de transmission comme l'audio, le texte ou le visuel ou via des interfaces spécifiques.

Aura Le modèle défini l'aura comme la zone dans laquelle l'objet peut interagir avec d'autres objets. Les objets sont entourés de leurs auras dans l'espace. L'aura représente une zone au sein de laquelle l'objet peut interagir avec un autre objet. Les objets portent leurs auras et se déplacent dans le monde virtuel. Dès que deux auras se touchent, on parle alors de collision d'auras, l'interaction devient alors possible. Le système va alors mettre en relation les deux objets en permettant l'échange d'informations. Ainsi, l'aura peut être considérée comme un outil technologique fondamental de l'interaction. L'aura peut prendre n'importe quelle forme ou taille. En règle générale, les objets vont porter des auras différentes (taille, couleur).

Awareness, Focus et Nimbus L'Awareness mesure la qualité d'une interaction entre deux objets après que ces derniers aient été mis en relation par leurs auras respectives. La mesure d'awareness entre deux objets n'est pas symétrique (l'awareness de A par

rapport à B n'est pas égal à celle de B par rapport à A). Cette mesure est réalisée en utilisant le focus et le nimbus.
Le Focus peut être vu comme un outil pour diriger l'attention et par conséquent, filtrer l'information en fonction des frontières délimitées par l'aura. C'est en quelque sorte le point de vue de l'utilisateur.
Le Nimbus représente lui un sous-espace dans lequel un objet rend un certain nombre de ses aspects disponible aux autres objets. Ceux-ci peuvent être sa présence, son identité, son activité ou une combinaison de ces derniers. Nimbus permet à des objets d'attirer l'attention des autres objets sur eux. Les objets négocient des niveaux de l'Awareness en employant leurs Foci et Nimbi afin d'essayer de se mettre en interaction entre eux. Les niveaux de l'awareness sont calculés à partir d'une combinaison des nimbus et des Focus des objets en question.

Adaptateurs Une fois que l'Aura, le Focus et le Nimbus et par conséquent l'Awareness sont définis, ils seront manipulés par les objets pour gérer et contrôler les interactions. Trois moyens de manipulation ont été envisagés :

- Manipulés par des actions spatiales fondamentales telles que les mouvements et les orientations;
- Manipulés par quelques paramètres principaux;
- Manipulés par divers objets adaptateurs. Un Adaptateur est un objet qui peut modifier l'Aura, le Focus ou le Nimbus d'un objet ou ajustant leur taille ou couleur.

Un nouveau moyen de manipulation a été proposé via une extension du modèle. Nous vous la présenterons dans la suite.

Extensions du modèle Ce modèle a subi de nombreuses extensions au cours des années. Nous pouvons citer les travaux de Sandor avec le système AETHER [Sandor et al., 1997] ou encore Greenhalgh ([Greenhalgh, 1997] et [Greenhalgh and Benford, 1999]).
Tout d'abord, dans [Bowers, 1993], l'auteur a ajouté le concept de "Borne" (Boudaries en Anglais). Les bornes divisent l'espace en différentes zones et régions et fournissent des mécanismes pour contrôler les mouvements et influencer les interactions de l'espace afin d'agir sur l'aura, le focus et le nimbus. Quatre types d'effets sont possibles: obstructif, non-obstructif, conditionnellement obstructif et transformation.
Dans AETHER, les auteurs utilisent les concepts de focus, nimbus et Awareness sur des réseaux sémantiques d'objets et de relations. Cela permet de construire un historique des objets et des relations entre objets qui ont été mis à jour ou supprimés.

Greenhalgh quant à lui intègre la notion de "third party object" (en Français: "un objet tiers") qui prend en charge des facteurs contextuels dans les calculs de l'awareness afin de permettre une évolutivité de de dernier. En effet, ces objets tiers peuvent avoir deux effets sur l'awareness: atténuer ou amplifier les relations existantes ou encore introduire de nouvelles relations d'awareness.

1.5.2 Le modèle spatial de la présence

Le modèle de présence pour les applications coopératives [Rodden, 1996] représente un modèle de conscience de l'interaction pour les applications multi-utilisateurs. L'objectif principal du modèle spatial de présence est de permettre le partage d'un espace de travail d'une application coopérative en se basant sur les notions d'Awareness et de présence. Ce modèle est basé principalement sur le modèle spatial
d'interaction [Benford and Fahlen, 1993].

La présence de la position, Focus et Nimbus La présence de la position d'un utilisateur (voir figure 1.11) dans un EVC est représentée par son emplacement et l'ensemble des objets lui étant adjacents. Le focus et le nimbus sont à la base de cette présence de la position. Le nimbus associe l'ensemble des utilisateurs. Elle donne pour chaque utilisateur leur position de présence dans l'EVC. Le focus associe quant à lui, un utilisateur à un point de position de l'espace.

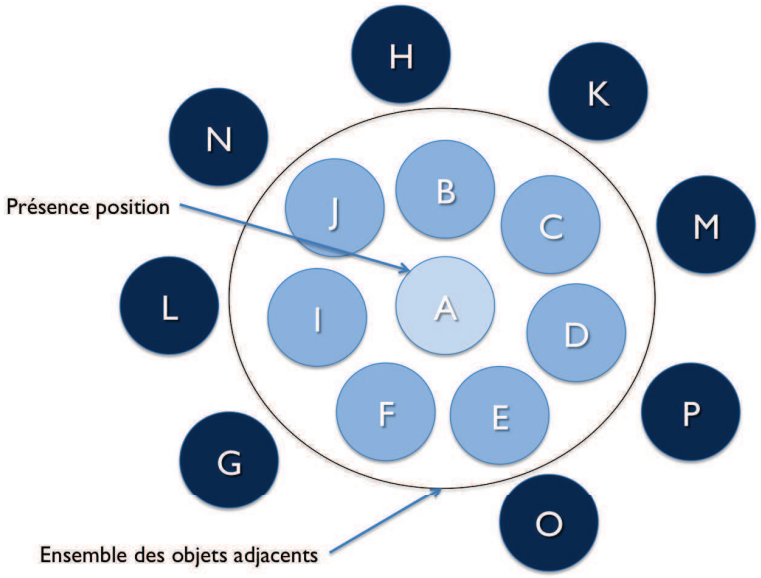


FIGURE 1.11: La présence position dans un ensemble d'objets (Adapté de [Rodden, 1996])

Emplacement, Focus et Nimbus globaux Les focus et nimbus (voir figure 1.12) globaux donnent des états globaux d'un utilisateur dans l'EVC caractérisé par les ensembles de positions. Trois fonctions sont utilisées pour déterminer l'emplacement, le focus global et le nimbus global d'un utilisateur :

- Location/Emplacement: donne l'ensemble des positions des objets d'un utilisateur;
- Agg Focus: donne l'ensemble de tous les objets appartenant au focus de l'utilisateur;
- Agg Nimbus: donne l'ensemble de tous les objets appartenant au nimbus de l'utilisateur.

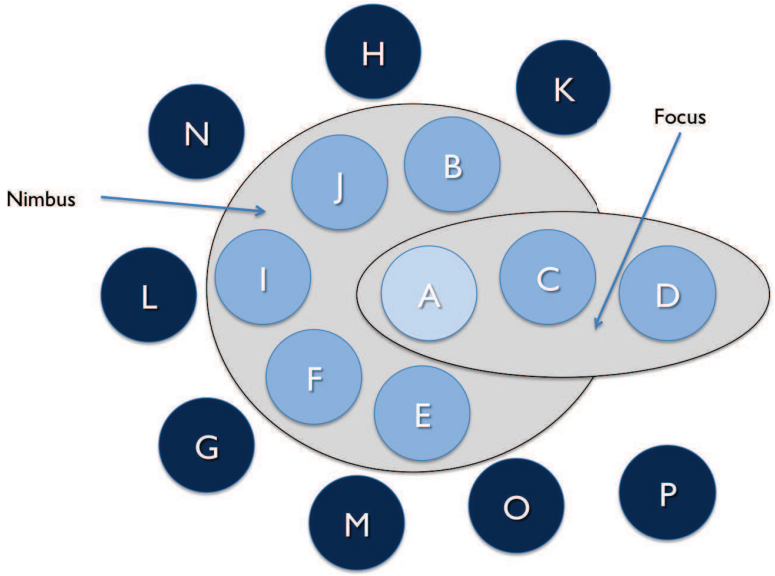


FIGURE 1.12: Le focus et le nimbus dans un ensemble d'objets

Awareness Ce modèle permet une représentation quantitative et continue de la conscience des utilisateurs afin de connaître si ceux-ci sont avertis les uns des autres. Les auteurs ont proposé deux formes pour cette représentation :

- Forme continue : c'est une fonction qui donne des indications sur comment les utilisateurs peuvent se rendre compte l'un de l'autre. Des règles peuvent être définies pour cette fonction qui peuvent exploiter des objets de l'espace. Cette fonction exploite le chevauchement entre le focus et le nimbus des utilisateurs;
- Forme discrète: elle permet le calcul d'un certain nombre de modes considérés comme les placements des utilisateurs dans d'autres focus, nimbus et intersection des deux. Ce modèle définit dix modes de placement des utilisateurs dans d'autres focus et nimbus et six modes de recouvrement. Chaque mode peut-être représenté par les différents recouvrements du focus et du nimbus de deux corps.

1.5.3 Le modèle de gestion dynamique des intérêts

Le modèle de gestion dynamique des intérêts [Ding and Zhu, 2003] traite le problème de gestion de la présence dans les environnements virtuels collaboratifs entre les différents utilisateurs. Ce modèle s'intéresse à l'interaction dynamique des environnements. Le modèle décrit les comportements des utilisateurs et plus spécifiquement les changements de leur centre d'intérêt dans le temps. Dans la plupart des applications sur les EVCs, l'utilisateur interagit avec un ensemble d'objets à un instant donné. Ces objets par lesquels l'utilisateur est intéressé forment son focus d'intérêt.
Dans ce cas, la question à se poser est la suivante : comment le système arrive à définir les intérêts d'un utilisateur? Pour cela, un modèle d'interaction basé sur le calcul des configurations d'intérêts des participants est utilisé pour analyser les comportements des utilisateurs en temps réel.

Les réseaux d'intérêts Le modèle se base sur la notion d'intérêt qui représente l'intéressement d'un objet vis à vis d'un autre objet. Le degré d'intérêt n'est pas symétrique. Un objet A peut avoir un degré différent vis à vis B que le degré de B vis à vis de A. Au cours du processus, le calcul des degrés change en fonction des interactions entre objets. Dans l'EVC, les objets sont reliés entre eux pour former un réseau (voir figure 1.13). Chaque noeud du réseau représente un objet et l'arc reliant deux noeuds possède un poids correspond au calcul du degré entre les deux noeuds.

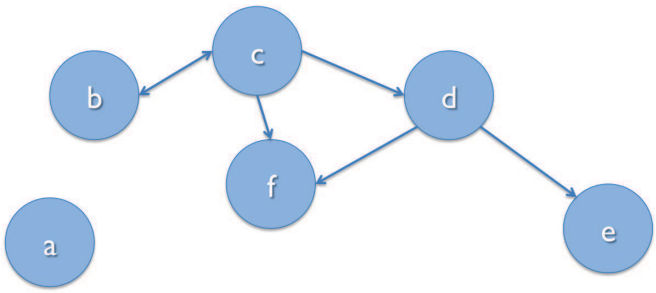


FIGURE 1.13: Le réseau d'intérêt (Adapté de [Ding and Zhu, 2003])

Les objets hostpot et activistes Les auteurs définissent deux classes d'objets: hostpot et activistes. Un hostpot est un objet qui intéresse plusieurs autres objets. Un objet activiste est un objet qui s'occupe de plusieurs objets (voir figure 1.14). Un degré hostpot et un degré activiste sont définis.

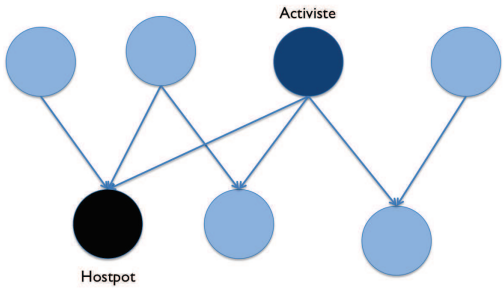


FIGURE 1.14: Les relations entre objets hostpot et activistes (Adapté de [Ding and Zhu, 2003])

Influence de l'interaction sur les degrés d'intérêt Dans l'EVC, les degrés d'intérêt vont être constamment modifiés. Trois règles ont été établies pour modifier les degrés en fonction des interactions dans l'EVC :

- Propagation d'intérêt: si un objet m est intéressé par n et n est intéressé par o alors m peut être intéressé par o;
- Rétroaction d'intérêt: L'intérêt de m vers n influence l'intérêt de n vers m en fonction du degré de hostpot de m;
- Conformité d'intérêt: L'intérêt de m pour n augmente si le degré de hostpot de n augmente.

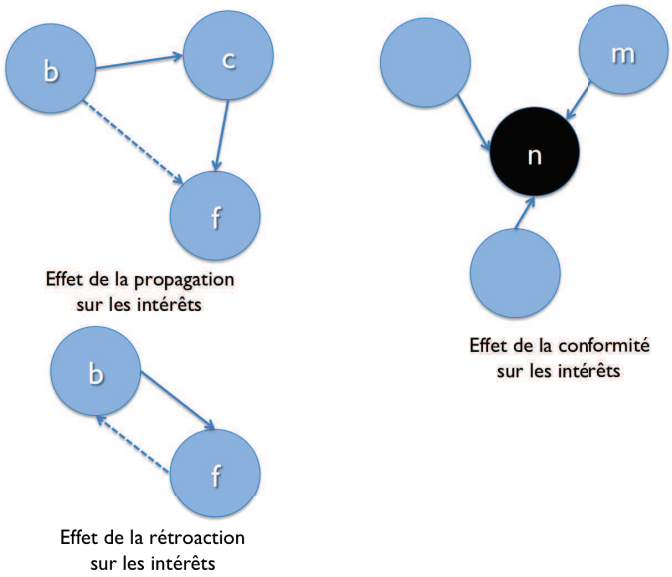


FIGURE 1.15: Influence des interactions sur les intérêts (Adapté de [Ding and Zhu, 2003])

1.5.4 Le framework 3-Ontology

Ce modèle [Leiva-Lobos and Covarrubias, 2002] permet la description des concepts et des relations entre des entités en se basant sur trois concepts: évènements, lieux et groupes comme point de départ pour modéliser la perception collective là où les autres modèles se basent uniquement sur un découpage de l'espace (modèle spatial).
Le contexte englobe chaque entité, ressource, action ou communication que les utilisateurs utilisent dans l'EVC. Ces éléments représentent les termes de groupes, évènements et lieux. Ces éléments peuvent se regrouper sous trois formes: une forme spatiale représentant tous les éléments peuplant l'environnement; une forme temporelle
représentant les actions archivées des utilisateurs; et la forme culturelle constituée par les vues partagées des utilisateurs. Les lieux contiennent des objets et sont représentés par des cartes. Les événements apparaissent dans un lieu à un instant donné et sont conservés dans un historique. Les groupes habitent les lieux et sont les protagonistes des évènements de l'EVC. Les portraits représentent des groupes et les utilisateurs les composants (voir figure 1.16).



FIGURE 1.16: Le framework 3-Ontology (Extrait de [Leiva-Lobos and Covarrubias, 2002])

Ce modèle utilise deux modalités d'awareness: visibilité et transparence. La visibilité est une modalité d'awareness qui apparaît lorsqu'une rupture dans les évènements apparaît. La transparence apparaît lorsqu'un utilisateur ne s'occupe plus que des tâches qu'il réalise et oublie le reste. Par exemple lorsqu'un utilisateur est concentré sur un objet, les autres objets n'étant pas dans le champ de vision deviennent transparents. Ce modèle théorique a été appliqué dans des applications collaboratives de messagerie.

1.5.5 Awareness dans les environnements collaboratifs hétérogènes

Ce modèle a été proposé par [Bharadwaj et al., 2005]. Ce modèle permet d'assurer l'awareness dans les environnements hétérogènes, plus particulièrement dans les environnements disposant d'interfaces différentes. Ce modèle se base sur le modèle spatial de l'interaction, nous retrouvons donc certaines composantes :

- Focus: correspond à une vue de tous les éléments (sources et médias) correspondant à des événements déclenchés par de l'interaction. Le nombre d'éléments peut varier en fonction du temps;
- Source et Media: représentent des informations sur des éléments qui vont générer des informations;
- Medium: représente un canal de communication.

Ce modèle permet à un utilisateur d'avoir plusieurs focus pour permettre de facilité des choix. Des règles d'accès sont utilisées pour autoriser ou interdire certaines sources.

1.5.6 Modèle réalisé en interne dans notre équipe de recherche

Ce modèle proposé par [Otmane et al., 2007] a fixé un cadre conceptuel basé sur l'aspect fonctionnel de l'interaction 3D appelé "le trèfle fonctionnel de l'interaction 3D" (voir 1.3.1). Ce cadre permet d'une part de donner la capacité aux utilisateurs d'avoir des connaissances sur l'état du système et d'autre part de fournir au système les informations nécessaires pour assister les utilisateurs à interagir ensemble.
L'ensemble de navigation est l'ensemble qui regroupe les fonctions pour la gestion de la position et de l'orientation de l'utilisateur dans l'EVC. L'ensemble de sélection regroupe les fonctions dédiées à la sélection d'un objet ou bien d'un groupe d'objets. Cela permet aux utilisateurs de se rendre compte des sélections qui s'effectuent. L'ensemble de manipulation correspond lui aux fonctions dédiées à la manipulation des objets ou bien d'un groupe. Il va donner conscience aux autres utilisateurs des manipulations en cours sur les objets (voir figure 1.17).

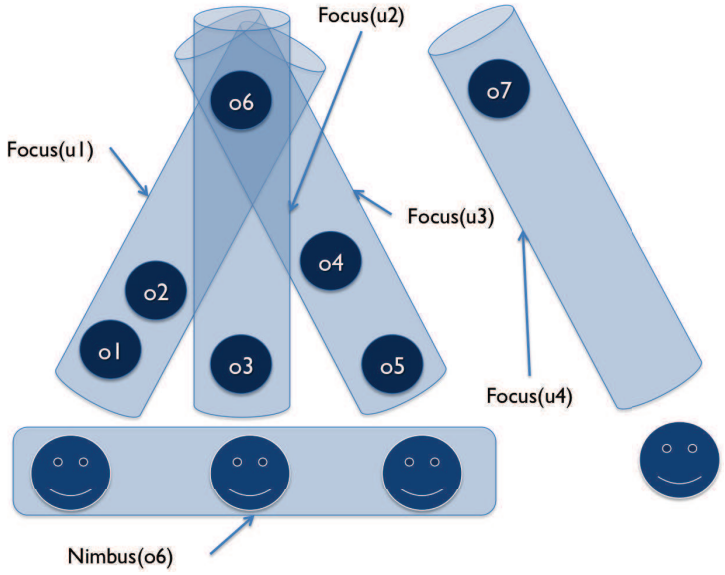


FIGURE 1.17: Illustration des focus et nimbus des utilisateurs (Adapté de [Otmane et al., 2007])

Le Focus de l'interaction Le focus correspond à l'ensemble des objets virtuels avec lesquels un utilisateur peut interagir. Les objets appartenant à la zone symbolisant le focus représentant lui même la présence de l'utilisateur dans l'EVC est décrit par une forme géométrique (un cylindre par exemple). Le Focus est attaché à l'utilisateur, il suit donc les mouvements réalisés par l'utilisateur.

Le Nimbus de l'interaction Le nimbus correspond à un sous ensemble du groupe d'utilisateurs dans lequel ces derniers se voient mutuellement par rapport à un objet de l'espace. Cela permet à ses utilisateurs de se divulguer entre eux certaines informations comme leur présence ou encore leur identité. La fonction nimbus donne pour chacun des objets l'ensemble des utilisateurs voulant peut-être interagir avec ce dernier.

Les degrés d'interaction sur un objet La fonction degré d'interaction est définie à partir des fonctions nimbus et focus et nous donne un coefficient propre à chaque espace (navigation, sélection et manipulation). Concernant l'espace de navigation ce degré nous donne la probabilité qu'un utilisateur navigue vers un objet. Pour l'espace de sélection, ce degré nous donne la probabilité qu'à un utilisateur à sélectionner l'objet. Pour finir le degré qui concerne l'espace de manipulation, nous informe de la probabilité qu'a un utilisateur de manipuler un objet. Par conséquent, plus un utilisateur est proche d'un objet, plus le degré sera élevé. Lorsque les degrés sont calculés pour chaque utilisateur par rapport à chaque objet dans chacun des espaces, on détermine les matrices

d'interaction 3D. Les degrés correspondent aux éléments de chacune des matrices. Cela permet de connaitre les actions en cours de l'utilisateur dans l'environnement virtuel.

1.5.7 Conclusion intermédiaire

Cette section présente quelques travaux qui portent sur les modèles de gestion de l'interaction du groupe dans les EVCs. Ces modèles traitent de l'interaction par rapport à une application particulière. Beaucoup de ces modèles se sont inspirés du modèle spatial de l'interaction proposé par [Benford and Fahlen, 1993]. Cependant, ce dernier reste très générique et ne peut s'appliquer directement sur les différentes types d'application de RV.

1.6 Conclusion

Un EVC est un système multi-utilisateurs qui permet à plusieurs utilisateurs d'interagir sur des objets du monde virtuel dans le but de réaliser des tâches seuls ou en commun. Dans ce chapitre, nous avons présenté des systèmes et des projets portant sur le travail collaboratif assisté par la réalité virtuelle et augmentée ainsi que des modèles de gestion de la conscience (awareness) du groupe. Ces modèles traitent de la gestion de la conscience du groupe pour une application définie. Nous pouvons citer par exemple, le modèle de présence qui ne s'intéresse pas à l'interaction mais uniquement à la présence des utilisateurs. Le modèle spatial de l'interaction est quant à lui, un modèle très générique qui ne peut être appliqué directement. Néanmoins, le modèle réalisé en interne [Ouramdane-Djerrah et al., 2007] est très intéressant car il propose une gestion de l'interaction 3D collective via une quantification sous forme de probabilité qu'a un utilisateur de réaliser une tâche de l'interaction 3D (Navigation, Sélection et Manipulation). Maintenant que nous avons les méthodes pour gérer l'interaction du groupe, il est nécessaire de se focaliser sur l'interaction 3D pour répondre à la question initialement dans notre problématique: "Comment interagir efficacement dans l'EVC?".
L'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs regroupe les tâches simples (navigation, sélection, manipulation, le contrôle d'application et l'entrée de symboles) afin de permettre aux utilisateurs d'interagir dans l'EV/EVC seul ou à plusieurs sur un objet partagé ou non. Cette interaction 3D s'effectue par le biais de dispositifs qui permettent de détecter les actions des utilisateurs (déplacement, appui sur une touche) et qui s'appliquent à des métaphores. Ces métaphores qui sont des méthodes informatiques traduisent les actions du monde réel dans le monde virtuel. Dans le chapitre 2, nous nous intéresserons aux méthodes pour interagir efficacement dans les EVC. Dans le chapitre 3, nous nous intéresserons aux méthodes d'évaluation afin de les rendre efficaces.

L'exploitation de ce chapitre et du second chapitre, nous permettra de mettre en place notre modèle de gestion de l'interaction collaborative dans les EVC. A partir de notre proposition, nous proposons une méthode d'interaction 3D à plusieurs sur un même objet de manière synchrone qui sera exposée dans le chapitre 4. Cette dernière sera évaluée via la proposition de notre système d'aide à l'évaluation présentée dans le chapitre 5.

Chapitre 2

L'Interaction 3D dans les Environnements Virtuels Collaboratifs

2.1 Introduction

Le premier chapitre a été l'occasion d'aborder les modèles permettant la gestion de l'interaction 3D du groupe dans les Environnements Virtuels Collaboratifs. Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer sur les outils dont disposent les utilisateurs pour interagir dans un EVC.

Des expériences dans le domaine de la réalité virtuelle ont montré que l'utilisation d'interfaces 2D dans les environnements virtuels n'étaient pas du tout efficace du point de vue de l'interaction ([Bowman, 1999], [Rizzo et al., 2005], [Sternberger et al., 2008]). Cela est d'autant plus vrai que, dans le domaine du travail collaboratif, les interfaces 2D destinées à la collaboration réduisent la capacité des participants à collaborer.

Qu'ils soient seuls ou plusieurs à vouloir agir sur une partie de l'EVC, les utilisateurs vont exploiter des techniques d'interactions 3D. De manière analogue au "monde réel" où nous sommes amenés à nous déplacer et à sélectionner ou manipuler des objets, les utilisateurs de l'EVC vont exécuter des tâches similaires. Ce sont les techniques d'interactions 3D qui vont nous permettre d'effectuer ces dernières. L'interaction dans un EVC n'est pas exclusivement multi-utilisateurs. En effet, il est tout à fait possible que certains utilisateurs puissent également interagir seuls dans l'EVC.

Ce chapitre va donc présenter quelques techniques d'interaction 3D mono-utilisateur et sera suivi d'une présentation des techniques multi-utilisateurs où plusieurs utilisateurs

vont agir ensemble sur un objet partagé. Pour l'aspect mono-utilisateur, nous vous recommandons les lectures des thèses de [Ouramdane, 2009] et de [Sternberger, 2006].

2.2 Quelques définitions

2.2.1 Interface homme-machine

Les interfaces homme-machine en RV/RA permettent à un ou plusieurs hommes de communiquer avec la machine de façon transparente et naturelle. Cela permet notamment de concevoir des applications de simulation extrêmement réalistes. Ces nouvelles interfaces sont le plus couramment hybrides. Une interface hybride est une interface qui permet l'envoi de signaux vers l'homme, mais l'homme peut envoyer des signaux vers la machine. Nous pouvons citer l'exemple d'un dispositif haptique qui permet, d'une part, de réaliser des actions vers le monde virtuel et, d'autre part, de ressentir des efforts provenant du monde virtuel.
Pour reprendre l'exemple du système embarqué dans les vêtements, une interface pour communiquer pourrait être des lunettes. Les informations seraient affichées directement sur les verres des lunettes. Les interfaces peuvent se confondre avec les objets classiques comme une table : on appelle cela les surfaces augmentées. Des objets virtuels sont visualisables sur la table et les utilisateurs peuvent les utiliser et communiquer avec. En réalité virtuelle, les interfaces homme-machine sont très variées car de nombreuses technologies sont employées. L'objectif de ces interfaces est de permettre à un ou plusieurs hommes de communiquer avec la machine de façon transparente et naturelle. Cela permet notamment de concevoir des applications de simulation extrêmement réalistes. Ces nouvelles interfaces sont le plus couramment hybrides, ce qui permet l'envoi et la réception de signaux entre l'homme et la machine. Pour illustrer ce propos, nous utiliserons l'exemple d'un casque immersif où l'utilisateur via le casque envoie des informations concernant la position de sa tête et reçoit des informations visuelles.

2.2.2 Métaphore, Paradigme et Technique d'interaction

Dans un environnement virtuel, les utilisateurs interagissent avec les objets de manière analogue au monde réel. En effet, nous interagissons avec différents objets pour effectuer des actions comme se nourrir ou s'amuser.
La métaphore d'interaction signifie qu'un objet ou concept réel est utilisé comme un outil virtuel pour interagir avec l'environnement virtuel [Sternberger et al., 2008]. Une métaphore d'interaction regroupe un ensemble de techniques d'interaction qui utilisent le même outil virtuel ou le même concept pour interagir avec les entités du monde

virtuel. Pour Fuchs et associés ([Fuchs et al., 2006b]), une métaphore d'interaction est une image symbolique d'une action ou d'une perception utilisée pour réaliser une tâche précise dans un EV.
La notion de paradigme est par définition, une représentation du monde, une manière de voir les choses qui repose sur une base définie. On parle alors de paradigme d'interaction pour désigner un ensemble de règles et de techniques permettant à l'utilisateur d'accomplir des tâches d'interaction au sein d'un environnement virtuel [Bowman et al., 2001b] [Poupyrev et al., 1998]. Dans les interfaces homme-machine 2D, un paradigme d'interaction couramment utilisé est WIMP (Windows Icons Menu Pointing devices).
Les techniques d'interaction homme-machine sont les méthodes qui permettent à l'utilisateur d'accomplir des tâches par l'intermédiaire de l'interface homme-machine
[Bowman et al., 2001b]. Les techniques d'interaction doivent faire le lien entre l'action humaine (par l'intermédiaire de l'interface) et l'action dans le système.

2.3 Les principales tâches de l'interaction 3D

La Réalité Virtuelle permet aux utilisateurs d'évoluer dans des environnements qui peuvent être soit imaginaires, soit des simulations du monde réel. L'interaction représente la composante motrice de la RV. Elle donne aux utilisateurs le pouvoir de réaliser différentes tâches et de changer les événements au cours du temps. Une tâche peut être définie comme la fonction que l'utilisateur exécute à un moment donné dans l'EV. Le résultat de l'exécution de cette fonction se traduira par les changements de l' état du système dans lequel l'utilisateur évolue. Nous pouvons définir l'interaction en RV comme la traduction des actions des utilisateurs dans le monde réel en des tâches spécifiques dans l'espace virtuel.
En 1999, Bowman [Bowman, 1999] propose une classification des différentes techniques d'interaction selon quatre tâches: la navigation, la sélection, la manipulation et le contrôle d'application. Sternberger et associés [Sternberger, 2006] ajoutent quant à eux, une nouvelle tâche qui est l'entrée de symboles. Cette dernière caractérise les techniques permettant d'entrer des symboles comme des chiffres et des lettres.
Une autre classification des techniques d'interaction a été proposée par Coquillart et associés
([Coquillart et al., 2003]). Les auteurs décomposent l'application de RV en des tâches élémentaires appelées primitives comportementales virtuelles (PCV). Ces PCV représentent les objectifs du niveau d'immersion et d'interaction (I2) fonctionnelles. Les tâches élémentaires vont être réalisées par l'utilisateur grâce aux techniques d'interaction. Les PCV sont regroupées en quatre catégories :

- Observer le monde virtuel;
- Se déplacer dans le monde virtuel;
- Agir sur le monde virtuel;
- Communiquer avec autrui ou avec le système.

Dans ce qui suit, nous présentons les quatre tâches d'interaction 3D qui constituent la classification moderne proposée par Bowman [Bowman, 1999]. La tâche d'entrée de symboles ne sera pas abordée car nous la considérons comme une composante de la tâche du contrôle d'application. Nous présenterons ensuite quelques techniques associées aux différentes tâches.

2.3.1 La navigation

La navigation est la tâche la plus commune dans tout environnement virtuel. Elle permet aux utilisateurs d'explorer, rechercher ou encore de manoeuvrer [Bowman et al., 2001b]. Le principal problème de la navigation consiste à spécifier un déplacement virtuel quelconque sans déplacement physique ou avec un déplacement physique restreint. Il faut cependant noter que le déplacement qui sera réalisé dans le monde virtuel est souvent plus complexe que son équivalent dans le monde réel du fait de la gestion simplifiée du modèle physique (absence de gravité, gestion des collisions et des contraintes inexistante ou insuffisante). Les dispositifs peuvent contraindre les techniques utilisées. Ainsi, une technique qui se base sur le mouvement des jambes est associée à un périphérique précis, à savoir un tapis de locomotion [Iwata, 1999].
La navigation se décompose en deux sous-tâches :

- Le déplacement: il représente la composante motrice de la navigation; il se rapporte au déplacement physique dans le monde virtuel (déplacement d'un endroit à un autre);
- La recherche d'itinéraire (Way Finding): elle représente la composante cognitive de la navigation. Cette tâche permet à un utilisateur de se repérer ou de s'orienter dans le monde virtuel. Elle implique par conséquent des efforts cognitifs (mémoire spatiale, concentration, etc.) [Fuchs et al., 2006b].

2.3.2 La sélection

L'action de sélection d'un objet est une tâche très courante que nous effectuons dans le monde réel. La préhension d'un objet se fait directement avec la main et tous les sens sont

disponibles pour assister le mouvement (en particulier la vue, le toucher et l'ouïe). Dans les environnements virtuels, la sélection désigne la prise d'un ou de plusieurs objets pour permettre son utilisation ultérieure (manipulation) [Bowman et al., 2004]. La sélection d'un objet dans l'environnement virtuel peut être considérée comme deux sous tâches :

- La Désignation: c'est le choix par l'utilisateur d'un ou plusieurs objets dans le monde virtuel;
- La Validation: elle désigne la confirmation de la sélection. Elle peut se faire de plusieurs manières: presser un bouton, réaliser un geste ou encore utiliser une commande vocale.

2.3.3 La manipulation

Comme la sélection, la manipulation d'un objet est une tâche courante que nous réalisons dans le monde réel. Nous réalisons sans réfléchir des gestes complexes, comme maintenir un objet en équilibre. Dans l'EV, la manipulation donne la capacité aux utilisateurs d'être des acteurs car elle permet la modification des propriétés d'un ou de plusieurs objets. Le plus souvent, celles-ci concernent la position et l'orientation de l'objet manipulé, mais aussi d'autres propriétés comme le changement des couleurs ou des tailles. La manipulation est étroitement liée à la sélection car il n'est pas possible de manipuler sans avoir au préalable sélectionner l'objet. C'est pourquoi des auteurs assimilent la sélection à la manipulation comme le montre le découpage de la manipulation proposé par [Bowman et al., 2004]. On retrouve la sélection comme une sous-tâche de la manipulation :

- La sélection représente la tâche d'identification d'un objet de l'environnement virtuel;
- Le positionnement permet de changer la position 3D de l'objet;
- La rotation qui permet de changer l'orientation 3D de l'objet.

2.3.4 Le contrôle d'application

A contrario des autres tâches, le contrôle d'application n'a pas d'équivalence dans le monde réel mais fait plutôt référence à une décision de l'utilisateur. Dans une interface 2D, ce contrôle d'application peut se résumer la plupart du temps à un simple clic sur une icône ou sur des menus afin de vider la corbeille ou bien d'envoyer un email. Comme les

dispositifs de contrôle d'application de RV ne se résume pas au clavier et à la souris, ceux-ci ne peuvent pas s'utiliser car l'utilisateur agit de manière naturelle avec son corps, le plus souvent debout, de nouvelles techniques de contrôle d'applications ont été conçues. Nous pouvons citer des techniques de commande gestuelle, des menus graphiques en 3D, etc. . Pour Bowman et associés [Bowman et al., 2004], le contrôle d'application est une tâche qui permet d'exécuter une commande dans le but de changer le mode d'interaction ou l'état du système. Ernst Kruijff (chapitre 8 de [Bowman et al., 2004]) a proposé une classification figure 2.1 des différentes techniques de contrôle d'application :

- Menus graphiques 3D: c'est l'équivalent 3D des menus 2D. Ils peuvent prendre soit la forme d'un menu 2D transformé qui sera positionné dans le monde virtuel (on utilisera alors une technique de sélection/manipulation 3D pour manipuler les boutons du menu), soit la forme d'un menu 3D. Dans ce cas nous pouvons citer le menu circulaire 3D proposé par [Liang and Green, 1994] pour lequel les commandes sont représentées sous forme d'un anneau circulaire;

- Commande vocale: la reconnaissance vocale permet l'association de mots ou phrases permettant ensuite le lancement de commandes comme l'initialisation ou la sélection. Bien que cela soit une méthode naturelle d'interaction avec le système, les systèmes de reconnaissance vocale n'ont pas une efficacité garantie. De plus, il existe une phase d'apprentissage des mots de l'utilisation du système par l'utilisateur;

- Reconnaissance de gestes: la reconnaissance de gestes permet via la réalisation d'un mouvement naturel de lancer une commande. Cette méthode peut être considérée comme naturelle car on utilise par exemple des gestes de la main. Cependant, certaines commandes sont particulièrement difficiles à réaliser. La reconnaissance de gestes peut utiliser des gants de données qui permettent la mesure de la flexion des doigts via des capteurs. Le gant peut être combiné avec d'autres capteurs comme des accéléromètres. Une autre technique consiste à utiliser un gant avec des capteurs passifs (boules réfléchissantes) qui seraient analysés via une caméra par traitement d'image. Cette dernière présente l'avantage d'obtenir un système final beaucoup plus léger et moins encombrant. Une application proposée par [Igarashi et al., 2007] exploitent les gestes;

- Outils de commande: les outils sont des représentations d'outils réels ou virtuels avec lesquels l'utilisateur va agir sur l'environnement (par exemple un pinceau réel dans le cas d'une application de peinture virtuelle).

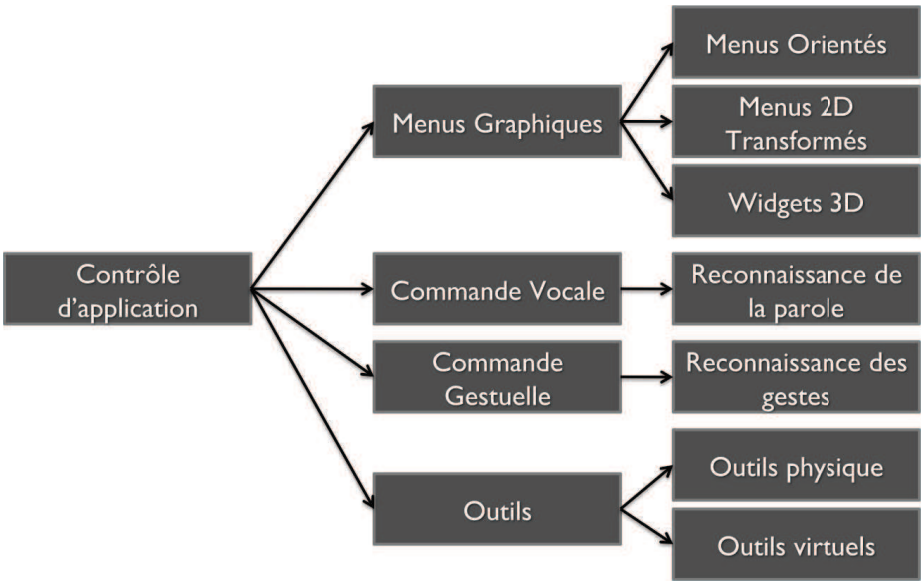


FIGURE 2.1: Classification des méthodes de contrôle de l'application (Extrait de [Bowman et al., 2004])

2.4 Les techniques d'interaction mono-utilisateur

Cette section aborde la présentation de quelques techniques d'interaction 3D. Nous nous limiterons aux trois premières tâches de l'interaction: Navigation, Sélection et Manipulation. Le contrôle d'application ne sera pas abordé car nous ne l'utiliserons pas dans nos propositions. De plus, nous assimilerons la sélection et la manipulation lors de la présentation des techniques. Pour une présentation des techniques associées au contrôle d'application, nous vous proposons la lecture des thèses de [Ouramdane, 2009] et de [Sternberger, 2006].

2.4.1 Les techniques de navigation

Selon que l'utilisateur connaisse sa destination ou non, sa navigation sera dite libre ou bien assistée. En effet, dans le cas de la navigation libre, l'utilisateur n'a pas un objectif précis. Il se déplace dans le monde virtuel pour explorer. Dans le cas de la navigation assistée, l'utilisateur se déplace pour se diriger vers un lieu identifié. Il sera alors aidé afin qu'il trouve le bon chemin. Il y a alors deux catégories de techniques dont :

- La direction du regard (Libre) [Mine, 1995] : le déplacement s'effectue comme dans le monde réel grâce à la direction du regard, donc par les rotations de la tête. Pour cela, la tête de l'utilisateur est suivie par un dispositif de tracking afin que l'image affichée dépende de la rotation de la tête;

- La direction de la main (Libre) [Mine, 1995]: on utilise la main pour indiquer dans quelle direction on souhaite aller. Dans ce cas, on procède par un tracking de la main pour en déduire la direction à prendre dans le monde virtuel;

- Le déplacement en utilisant les gestes de la main (Libre) [Mapes and Moshell, 1995]: cette technique est basée sur la métaphore de "tirer sur une corde". On réalise certaines combinaisons en pinçant ses doigts, pour que le système interprète ces combinaisons;

- Le déplacement en utilisant une carte (Assisté)[Bowman et al., 1998] : l'utilisateur est représenté par une icône dans une carte 2D. Le déplacement de l'icône par le stylet jusqu'au nouvel endroit de la carte implique le déplacement de l'utilisateur. Ce type d'interaction est repris dans les systèmes GPS pour explorer la carte géographique.

2.4.2 Les techniques de sélection et de manipulation

Le toucher, la préhension et la manipulation sont des moyens utilisés pour communiquer et agir avec le monde réel. En réalité virtuelle, la sélection représente la désignation d'un objet ou d'un ensemble d'objets afin d'accomplir un objectif donné ; la manipulation quant à elle se rapporte à la spécification et la modification des propriétés des objets (en général la position et l'orientation). Plusieurs techniques existent et ont été classifiées en deux grandes familles par Poupyrev [Poupyrev et al., 1998] en fonction de la position et de la distance utilisateurs-objets virtuelles : les techniques exocentriques pour lesquelles le monde virtuel est manipulé depuis l'extérieur et les techniques égocentriques pour lesquelles l'utilisateur agit directement depuis l'intérieur de l'environnement virtuel. Cette dernière est composée de deux sous-familles : les techniques basées sur la métaphore de la main virtuelle et les techniques basées sur la métaphore du pointeur virtuel.

Les techniques égocentriques La sous-famille contenant les techniques basées sur la métaphore de la main virtuelle utilise une représentation virtuelle de la main humaine, qu'on nomme avatar, afin de sélectionner et manipuler des objets. La sélection des objets est valable seulement quand la main "touche" les objets virtuels, ce qu'on appelle manipulation directe. On distingue différentes techniques :

- La technique la plus naturelle est celle de la Main Virtuelle Simple (MVS). Elle est utilisée pour sélectionner et déplacer les objets en transmettant (avec un gain de 1) les mouvements de la main de l'utilisateur à l'avatar du monde virtuel. Une fois

que l'objet est sélectionné, les mouvements de la main sont transcrits directement à l'objet car celui-ci se retrouve attaché à la main, ce qui permet de manipuler l'objet;

- La technique Go-Go introduite par Poupyrev [Poupyrev et al., 1996] permet la sélection et la manipulation d'objets éloignés. Pour cela, il existe une relation non linéaire entre la main virtuelle et la main réelle. À partir d'une certaine distance, le déplacement dans le monde réel se traduit par un grand déplacement dans le monde virtuel (gain égal à 1). La technique Go-Go permet la sélection et la manipulation des objets proches et lointains. L'inconvénient majeur est que lorsque la distance est importante, les mouvements de faible amplitude de la main réelle se traduisent en mouvements de forte amplitude de la main virtuelle. La manipulation de la main virtuelle à grande distance devient imprécise voir difficile. Il existe des extensions de Go-Go comme la technique Stretch Go-Go [Poupyrev et al., 1996], pour laquelle le bras virtuel peut s'agrandir ou se rétrécir selon la position de celui-ci dans le monde virtuel.

Les techniques basées sur la métaphore du pointeur virtuel utilisent également une représentation virtuelle de la main. Dans ce cas, l'utilisateur sélectionne un objet à l'aide d'un pointeur laser et non pas en le touchant. Là encore plusieurs techniques existent :

- La technique "Ray-Casting" [Bolt, 1980] permet de pointer un objet avec un rayon laser issu de la main virtuelle. Pour valider la sélection, il faut donc détecter l'intersection entre le rayon et l'objet. C'est une technique simple car seulement deux degrés de liberté sont nécessaires. Bien qu'elle soit très pratique, elle pose des problèmes pour la sélection et la manipulation des objets petits ou lointains;

- La technique "Flashlight" [Liang et al., 1994] permet de sélectionner des objets sans avoir besoin d'une grande précision: c'est une sélection "grossière". Cette technique est une extension du "Ray-Casting " pour laquelle le rayon laser est remplacé par un halo lumineux. Pour qu'un objet soit sélectionné, il faut qu'une partie de celui-ci soit traversée par un halo de lumière entièrement ou partiellement. Cependant, d'après Bowman, la sélection d'objets devient très difficile quand ceux-ci sont groupés entre eux. Néanmoins, cela permet la sélection d'objets de petite tailles ou lointains. Pour pallier les problèmes liés à des objets groupés, la technique "Aperture" [Forsberg et al., 1996] permet de modifier dynamiquement le diamètre d'un halo de lumière afin d'obtenir une meilleure précision;

- Les techniques plans-images [Pierce et al., 1997] simplifient la sélection et la manipulation des objets en permettant de sélectionner et de manipuler les objets 3D

en touchant et manipulant leurs projections sur un plan image 2D. On distingue quatre variantes qui utilisent des gants de données : dans le cas de la technique "Sticky Finger", l'utilisateur pointe avec son doigt l'objet qu'il veut choisir ; pour "Head-crusher", la sélection s'effectue en entourant l'objet virtuel grâce à un geste du pouce et de l'index de la main réelle ; pour "Framing Hands" la sélection s'effectue en encadrant par les deux mains réelles le ou les objets ; finalement pour "Lifting Palm", pour sélectionner un objet virtuel on place sa main sous celui-ci.

Les techniques exocentriques Les techniques d'interaction 3D exocentriques permettent à l'utilisateur d'interagir avec le monde virtuel de l'extérieur. Une conséquence est que l'utilisateur n'aura pas le sentiment d'être totalement immergé dans le monde virtuel. Voici quelques techniques d'interaction 3D exocentriques :

- La technique World In Miniature (WIM) [Stoakley et al., 1995] utilise une représentation miniature réelle du monde virtuel afin que l'utilisateur puisse manipuler indirectement l'objet virtuel. La sélection des objets est réalisée par la technique de la main virtuelle simple. Cette technique ne permet pas un déplacement précis et pose des problèmes si l'environnement contient de nombreux objets, car cela engendre des miniatures trop petites et par conséquent difficilement sélectionnables et manipulables;
- La technique Scaled-World grab [Mine et al., 1997] permet la sélection d'objets éloignés. Lorsque l'utilisateur sélectionne un objet, l'échelle de l'utilisateur ou du monde virtuel est alors augmentée de manière à ce que la main virtuelle touche l'objet sélectionné (voir figure 2.2).

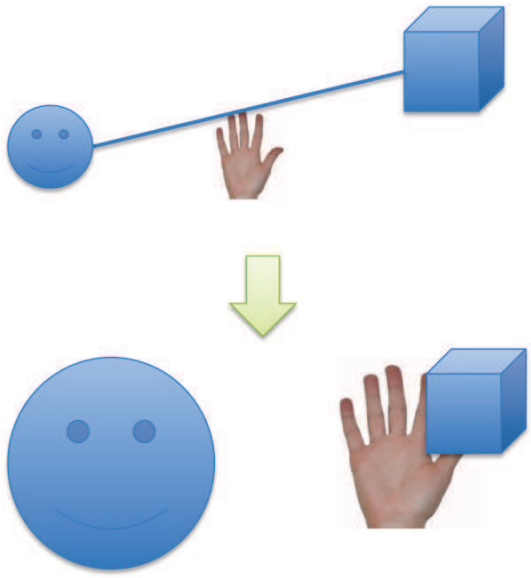


FIGURE 2.2: Illustration de la technique Scaled-World Grab lors de la sélection d'un objet

Les techniques hybrides Les techniques hybrides combinent au moins deux techniques ego et/ou exocentriques. En voici certaines :

- La technique HOMER [Bowman et al., 2001b] est une technique hybride (voir figure 2.3). Elle utilise le Ray- Casting pour la sélection d'un objet et la technique de la main virtuelle simple pour la partie manipulation. L'objet est alors attaché à la main et hérite de toutes les transformations que la main subie. Une fois que l'objet est relâché la main virtuelle reprend sa position initiale [Bowman et al., 2001b];
- La technique "Voodoo Dolls" (poupée Voodoo) [Pierce et al., 1999] est une technique qui combine la technique WIM et une des techniques plans-images. Cette technique nécessite l'utilisation de deux mains. La sélection des objets ou d'un groupe d'objets s'effectue par une technique d'occlusion comme "Framing Hands", puis le ou les objets sont alors dupliqués en miniature pour subir les manipulations qui seront transcrites à l'objet virtuel d'origine. Cette technique permet une manipulation aisée d'objets en mouvement ou animés [Bowman et al., 2001b].

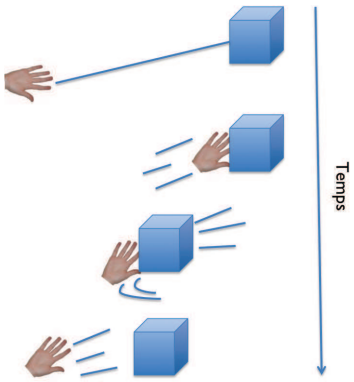


FIGURE 2.3: Illustration de la technique HOMER. HOMER est composé de différentes phases, une phase de sélection par un Ray Casting puis une phase de manipulation avec l'utilisation de la main virtuelle simple

2.4.3 Conclusion intermédiaire

Dans un EVC, un utilisateur peut interagir seul ou avec d'autres participants. Si l'utilisateur agit seul sur un objet, il utilise alors des techniques d'interaction mono-utilisateur afin de se déplacer, sélectionner et manipuler dans l'EVC. Néanmoins ses actions peuvent être observées par les autres participants. Cependant toutes les techniques ne sont pas exploitables dans les EVC. En effet, les techniques de manipulation exocentriques sont difficiles à employer car elles ne permettent pas aux autres utilisateurs de comprendre ce que l'utilisateur est en train de réaliser et ne favorisent pas l'immersion de l'utilisateur, contrairement aux techniques égocentriques. En effet, ces dernières utilisent un avatar qui représentent les actions de l'utilisateur. L'interaction multi-utilisateurs doit permettre à plusieurs utilisateurs d'un EVC d'interagir sur un même objet, c'est-à-dire sur les mêmes données. Le second point nécessaire est de permettre aux utilisateurs de visualiser les actions des autres participants. Par conséquent, nous pensons qu'il est nécessaire de proposer une sur couche aux techniques mono-utilisateur égocentriques afin que les utilisateurs puissent agir ensemble, sur les données partagées de l'objet (par exemple, la position et l'orientation). Il est également nécessaire de permettre aux utilisateurs de constater les actions des autres (awareness), en générant de l'information visuelle, sonore ou haptique. A ce propos, nous rappelons que le chapitre 1 a traité des outils permettant de traiter et de gérer l'awareness dans un but d'interaction.

2.5 Les techniques d'interaction multi-utilisateurs

Nous venons d'étudier les techniques mono-utilisateur qui sont à la base des actions des utilisateurs dans l'EVC. Cependant, beaucoup de ces techniques ne peuvent pas

s'appliquer telles quelles dans le cas multi-utilisateurs car elles ne sont pas prévues pour gérer les données partagées d'un objet. Elles peuvent néanmoins permettre la manipulation d'un objet à tour de rôle par plusieurs utilisateurs. Les travaux concernant l'interaction multi-utilisateurs sont peu nombreux et il est donc nécessaire de proposer de nouveaux développements. Dans ce qui suit, nous étudierons quelques techniques d'interaction 3D collaborative. Nous remarquerons qu'elles sont essentiellement dédiées à la manipulation d'objets (la sélection étant une phase de la manipulation). Cependant, elles ne s'intéressent qu'au résultat final et non aux aspects de coordination et communication entre les utilisateurs. Concernant la navigation à plusieurs, nous pouvons citer les travaux de Dodds ([Dodds and Ruddle, 2008a] et [Dodds and Ruddle, 2008b]). Leurs travaux permet (via une représentation métaphorique du groupe par un graphe) aux utilisateurs d'avoir une trace des autres pour se déplacer seul ou via un groupe. Deux modes de déplacement existent: "automatique" en suivant le groupe et "téléportation" pour rejoindre un groupe distant.

2.5.1 Sélection/manipulation asynchrone

La méthode asynchrone est apparue dès les débuts de la recherche dans ce domaine. Elle exploite des techniques mono-utilisateur que plusieurs utilisateurs vont appliquer à un objet à tour de rôle. Une première approche est apparue dans le projet PIT (Protein Interactive Theater) [Arthur et al., 1998]. Ce dernier est un projet qui permet à deux utilisateurs co-localisés et physiquement proches de partager et d'agir sur un environnement virtuel commun pour l'étude des molécules. Chacun des deux utilisateurs possède sa propre vue de la scène donc des données car sa tête est "trackée" par des capteurs positionnés sur les lunettes stéréoscopiques (voir figure 2.4). Cependant, les deux protagonistes se partagent un même dispositif d'interaction pour la manipulation des objets avec une main virtuelle simple. Les actions sur l'objet sont réalisées par les utilisateurs, chacun leur tour, mais ils peuvent communiquer en direct pour se coordonner pour l'attribution des tâches.



FIGURE 2.4: Un EVC pour la visualisation de molécules (Extrait de [Arthur et al., 1998])

Des travaux similaires ont été proposés par Stewart et associés [Stewart et al., 1999]. La différence est que les deux utilisateurs disposent chacun d'un dispositif d'interaction. Cependant, ils disposent du même dispositif de sortie (écran). Ce principe se retrouve très souvent dans les jeux vidéos multi-joueurs où l'écran est divisé en deux ou bien les utilisateurs peuvent voir sur un même écran non divisé les autres participants (voir figure 2.5). Les utilisateurs agissent uniquement sur leurs données mais peuvent visualiser les données des autres participants.

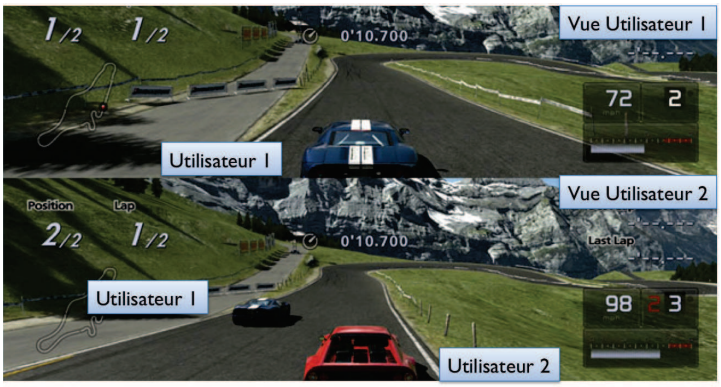


FIGURE 2.5: La course se réalise avec deux participants. L'écran est partagé, les utilisateurs peuvent communiquer en direct mais agissent uniquement sur leur véhicule. Ils ne peuvent agir sur le véhicule adverse. (Extrait du jeu Gran Turismo 5)

Dans [Wideström et al., 2000], les utilisateurs doivent reconstituer un puzzle en 3D. Les utilisateurs prennent un objet à tour de rôle. Ils manipulent les pièces 3D du puzzle via la technique mono-utilisateur Main Virtuelle Simple.

L'utilisation successive de techniques mono-utilisateur ne permet pas une manipulation simultanée d'un objet par plusieurs utilisateurs. Les techniques d'interaction mono-utilisateur ne peuvent pas être employées telles quelles dans un EVC [Aguerreche et al., 2009a]. En effet, ces techniques ne gèrent pas les accès concurrents à un objet. Cependant, certaines techniques d'interaction peuvent être modifiées pour permettre l'interaction à plusieurs.

2.5.2 Les techniques de sélection/manipulation synchrones

Les techniques synchrones permettent aux utilisateurs d'agir sur des données partagées de l'objet, ensemble et en même temps. On distingue deux catégories : une première catégorie consiste à répartir des données partagées (degrés de liberté, couleur, taille). Par exemple, un utilisateur va agir sur les translations et l'autre sur les rotations de l'objet via des techniques mono-utilisateur. Elle combine les techniques d'interaction et non pas le mouvement des utilisateurs.
La seconde catégorie concerne "l'accès concurrent aux même données". Cela permet de combiner les mouvements des différents utilisateurs pour déterminer le mouvement de l'objet. On retrouve dans cette catégorie des techniques qui exploitent des techniques mono-utilisateur (ray-casting ou main virtuelle simple) ou des extensions de techniques qui ont pour base les techniques mono-utilisateur.

2.5.2.1 Répartition des données partagées entre les utilisateurs

Cette première approche permet de réaliser une action simultanée sur un même objet en séparant les données comme les rotations et translations afin de les assigner aux différents utilisateurs. Par exemple, un utilisateur réalisera les translations un autre les rotations. Dans cette catégorie, les utilisateurs peuvent agir en même temps sur l'objet. Pinho et associés [Pinho et al., 2002] ont classé cette approche en deux sous-familles :

- Les métaphores coopératives homogènes: Les utilisateurs qui manipulent l'objet utilisent une même technique mono-utilisateur;
- Les métaphores coopératives hétérogènes: Dans ce cas, les utilisateurs manipulent l'objet en utilisant des techniques mono-utilisateur différentes.

Afin de combiner les actions des différents utilisateurs, les auteurs ont mis au point un framework qui combine les techniques d'interaction et non pas le mouvement des utilisateurs. Le framework permet aussi de générer de l'information. Cette information est

cependant très succincte en se limitant à la visualisation de l'autre utilisateur.

2.5.2.2 Accès concurrent aux données partagées

Dans cette catégorie, tous les utilisateurs ont accès à toutes les données disponibles (par exemple degrés de liberté). Dans le cas d'une manipulation d'objet, le mouvement de celui-ci sera une combinaison du mouvement des différents utilisateurs au sens physique. Une première approche consiste donc à déterminer le mouvement de l'objet manipulé par deux utilisateurs via l'addition des deux vecteurs de position et d'orientation liés aux deux utilisateurs. Une seconde approche consiste à prendre la moyenne des deux vecteurs position et orientation.
Noma et associés [Noma and Miyasato, 1997] ont présenté des travaux sur la manipulation à plusieurs utilisateurs. Ceux-ci interagissent sur l'objet partagé via des bras à retour d'efforts comme illustré sur la figure 2.6. Les utilisateurs sont représentés par une main virtuelle simple. Le mouvement final de l'objet est le résultat de l'équilibre des forces appliquées par les utilisateurs. Cependant, celles-ci engendrent des incohérences entre la position de la main virtuelle et la main réelle. En effet, lorsqu'un utilisateur va appliquer une force à l'objet pour le déplacer, les mains virtuelles simples des autres participants attachées à l'objet vont également suivre le déplacement de l'objet, ce qui peut sembler incohérent pour les autres utilisateurs, étant donné qu'ils n'ont pas actionné leur bras haptique.

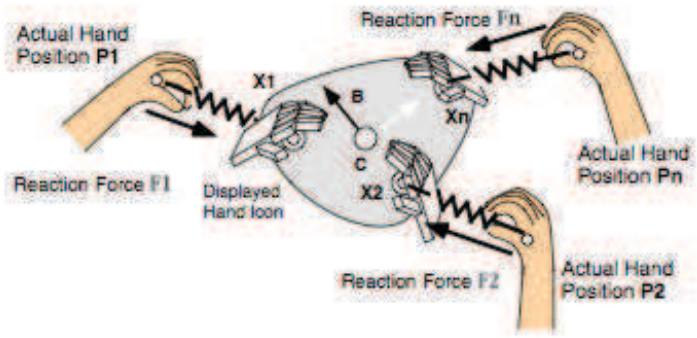


FIGURE 2.6: Illustration de la méthode proposée par [Noma and Miyasato, 1997]

Plus récemment, nous pouvons citer la technique des "3 Mains Virtuelles"
[Aguerreche et al., 2009b] qui permet de déterminer le mouvement d'un objet à partir de trois points. Le mouvement de l'objet en translation et en rotation est déterminé à partir de la position des trois points. Ces trois points correspondent aux points d'attaches permettant à la main virtuelle simple de manipuler l'objet. Seules les translations sont

prises en compte.

La technique des rayons 2D/3D de Duval et associés [Duval and Fleury, 2009] est une technique d'interaction 3D pour les EVC, dans laquelle les deux utilisateurs n'utilisent pas une plateforme de Réalité Virtuelle mais un simple PC. Son avatar est représenté par un objet 3D dans l'EVC mais se contrôle via un dispositif de pointage 2D (par exemple une souris). Cette technique permet une collaboration asymétrique entre un utilisateur immergé sur une plateforme de Réalité Virtuelle et un autre utilisateur regardant un simple écran.

Le curseur 3D ou SkeweR [Duval et al., 2006] est une technique conçue dans le but de conserver un historique des interactions ainsi que de permettre la représentation correcte des interactions simultanées. Elle permet la manipulation simultanée d'un objet par plusieurs utilisateurs. Pour cela, les utilisateurs contrôlent un curseur 3D qui se comporte comme une main virtuelle simple, sauf que la sélection s'effectue automatiquement en s'approchant de l'objet partagé. Si un utilisateur est disponible pour le contrôle de l'objet, uniquement des rotations peuvent être communiquées à l'objet. Si deux utilisateurs sont disponibles pour le contrôle de l'objet, l'objet se contrôle comme une "baguette" à partir des mouvements de translation et de rotation (voir figure 2.7).

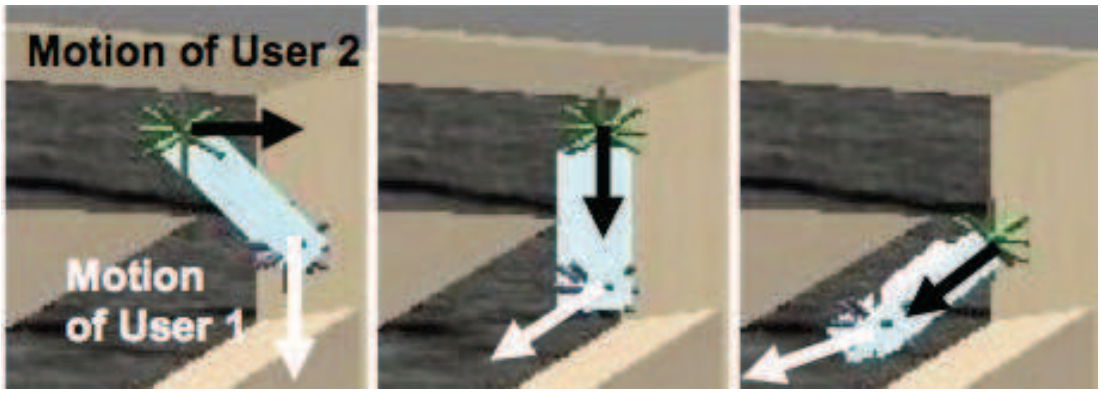


FIGURE 2.7: Deux utilisateurs manipulent un objet en utilisant la technique SkeweR (Extrait de [Duval et al., 2006])

Duval [Duval and Tenier, 2004] ont proposé une technique qui dérive de la technique RayCasting pour la manipulation d'un objet à deux utilisateurs. Cette technique se base sur le constat suivant: si un utilisateur manipule son rayon afin de déplacer un objet partagé, le rayon de l'autre utilisateur "agrippé" à ce même objet va aussi se déplacer. Cependant, l'effecteur du second utilisateur n'a pas bougé ce qui engendre une incohérence entre le déplacement réel et le déplacement virtuel. Les auteurs proposent de courber les rayons en fonction de la force qui est appliquée. Ils proposent trois formes de rayons:

- Élastique: si une contrainte apparaît lors de la manipulation de l'objet par l'utilisateur, un élastique va s'étirer entre l'objet et le rayon ;
- Coudé: le rayon va se plier vers l'objet ;
- Déformable: le rayon va se dédoubler. Une partie correspondant au rayon initial ayant permis la sélection va rester stable. La seconde partie va se plier pour rester en contact avec l'objet en fonction des mouvements de l'objet suite à la coopération.

Le Bent Pick Ray [Riege et al., 2006] est similaire aux travaux de Duval sur le rayon virtuel. Ces travaux nous proposent l'utilisation d'un rayon virtuel droit (pick ray) pour la sélection en mono-utilisateur. Lorsqu'un second rayon sera affiché correspondant au second utilisateur, ce qui correspond au cas où un second utilisateur va lui aussi sélectionner l'objet. Les deux rayons vont alors se courber (bent pick ray) comme l'illustre la figure 2.8.

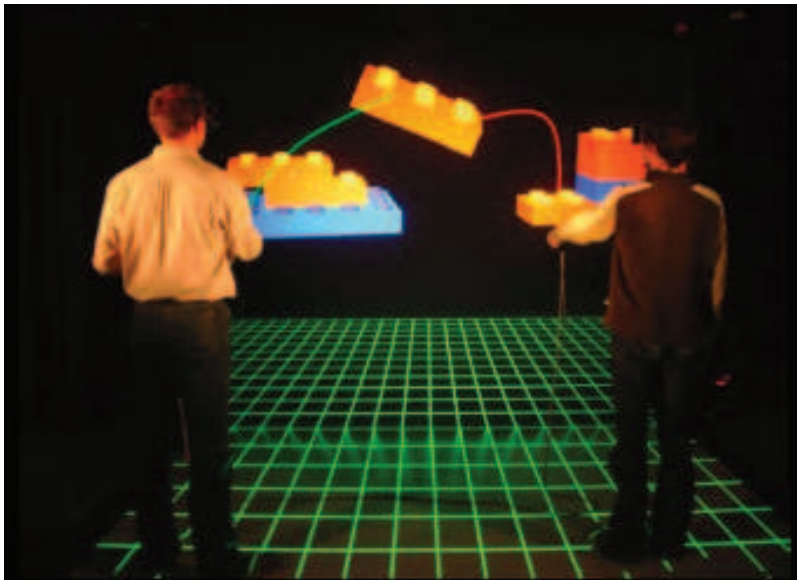


FIGURE 2.8: Illustration de la technique Bent Pick Ray (Extrait de [Riege et al., 2006])

2.5.3 Conclusion intermédiaire

L'interaction 3D collaborative permet à plusieurs utilisateurs d'agir ensemble. Elle permet de rendre les interactions plus naturelles. Cela est rendu possible grâce à des mécanismes permettant d'interagir de manière asynchrone ou synchrone. L'interaction 3D à plusieurs posent plusieurs difficultés. Une première difficulté concerne la conscience des actions d'un utilisateur par rapport aux autres utilisateurs. En effet, il est nécessaire de montrer en permanence aux utilisateurs que leurs actions sont liées les

unes aux autres d'une manière le plus compréhensible possible. En effet, il existe une différence entre l'action qu'un utilisateur souhaite faire et le résultat commun. C'est pourquoi, il est nécessaire de lui faire comprendre le différentiel entre ce qu'il a voulu réaliser et le résultat commun final. Une seconde difficulté concerne le passage d'une action mono-utilisateur via l'utilisation d'une technique comme la main virtuelle simple à une action collaborative. Une troisième difficulté est d'ordre terminologique et concerne l'emploi de termes coopératif et collaboratif dans le domaine de la RV. Ces deux termes sont très souvent considérés comme des synonymes alors qu'ils sont différents comme nous pouvons le voir dans [Aguerreche et al., 2009a]:

> *Certains auteurs distinguent "coopération" et "collaboration" en considérant que l'un désigne des actions simultanées et l'autre des actions simplement coordonnées à la résolution d'une tâche. Malheureusement, dans ces mêmes publications, les définitions d'un mot et de l'autre s'échangent au gré des auteurs. Par conséquent, nous considérerons les deux mots comme synonymes en explicitant les situations*

ou bien dans le cadre du projet RNTL Partage [Partage, 2007], les auteurs utilisent une autre définition:

> *"La coopération est la possibilité de contribuer à une tâche globale grâce à des actions complémentaires de plusieurs utilisateurs. Ces actions peuvent se faire de différentes manières en alternance ou simultanées, sur un même objet ou sur des objets différents.*

Cependant, en nous basant sur le point de vue du domaine du TCAO, les termes sont différents. En effet, dans le premier chapitre, nous avons vu que la communauté du TCAO représente la collaboration par le trèfle fonctionnel des collecticiels. Ce trèfle se compose de trois composantes: Communication, Coordination et Communication. Dans la communauté de la RV, le terme de coopération est assimilé au terme de production du trèfle. Par conséquent, les aspects de communication et de coordination ne sont pas traités alors qu'ils sont indispensables à la réalisation d'actions en commun.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les méthodes employées dans les EV et EVC pour agir avec les différents objets virtuels. Nous avons tout d'abord abordé l'interaction

mono-utilisateur, c'est-à-dire réalisée par un utilisateur unique sur un objet. Nous avons identifié les différentes techniques de navigation et de sélection/manipulation. Nous avons ensuite abordé les techniques dites multi-utilisateurs pour les tâches de manipulation permettant à plusieurs utilisateurs d'agir ensemble car les techniques mono-utilisateur ne le permettent pas, et cela pour différentes raisons.

Premièrement, les techniques exocentriques sont difficiles à employer dans un EVC car elles ne permettent pas aux utilisateurs de comprendre ce qu'un autre utilisateur est en train de réaliser à un instant précis. Or, c'est un point très important dans les actions à plusieurs, car cela permet d'avoir conscience de ce que les utilisateurs réalisent. Il reste alors les techniques égocentriques, mais ces dernières, telles quelles sont faites, ne permettent pas à plusieurs utilisateurs de réaliser des actions en simultanées via un accès aux données dites partagées comme la position et l'orientation de l'objet. Il est donc nécessaire de donner des propriétés supplémentaires aux techniques pour combiner soit le mouvement des utilisateurs ou bien les techniques d'interaction elles même, utilisées par les utilisateurs sur un même objet.

C'est dans ce sens, que les recherches sur l'interaction 3D à plusieurs se sont concentrées. On distingue alors des techniques qui permettent de séparer les données partagées (position, orientation) de l'objet virtuel, en attribuant par exemple à un utilisateur, le rôle de translater l'objet, à l'autre, le rôle d'orienter l'objet via la technique mono-utilisateur de leur choix. Ces rôles vont d'ailleurs engendrer des incohérences entre ce que l'utilisateur voit et ce qu'il a voulu réaliser. On distingue aussi des techniques qui permettent un accès simultané sur les données partagées via la même technique mono-utilisateur (le plus souvent, la main virtuelle simple) ou des techniques mono-utilisateur modifiées comme le ray-casting.

De plus, les techniques exposées traitent l'interaction 3D multi-utilisateurs uniquement du point de vue, du résultat final, c'est à dire le déplacement final d'objet. Or, la collaboration sous entend aussi la gestion de la coordination et de la communication des utilisateurs. La coordination est un élément indispensable pour préparer les phases de navigation et de sélection vers l'objet. Ces phases sont nécessaires en vue de manipuler l'objet en commun.

Notre approche consisterait à permettre un accès simultané aux données partagées de l'objet via des techniques mono-utilisateur tout en permettant un retour sur les actions via une gestion globale de l'interaction. Cela permettra de traiter l'interaction 3D mais aussi la coordination et la communication des utilisateurs. Nous exploiterons donc ce chapitre mais aussi le premier chapitre, où nous avons étudié les modèles de gestion de l'interaction 3D dans les EVC, pour proposer un modèle répondant à cela (chapitre 4).

Cependant, tout comme l'interaction 3D mono-utilisateur, l'interaction 3D multi-utilisateurs a aussi besoin d'être évaluée afin d'identifier les forces et les faiblesses. Par conséquent, l'évaluation est une étape indispensable pour la validation de l'efficacité de l'interaction

3D afin de répondre à la problématique de notre thèse, à savoir "Comment des utilisateurs peuvent collaborer efficacement dans une interface utilisateur 3D?"
Dans le chapitre suivant, nous allons donc nous intéresser aux méthodes d'évaluations. L'étude menée dans ce chapitre est essentielle pour valider le modèle que nous proposons dans le chapitre 4. Ces études ont permis d'aboutir à un outil nous permettant d'assister les concepteurs de techniques d'interaction 3D durant la phase de conception de leur technique (voir chapitre le 5).

Chapitre 3

Évaluations des Interactions et Interfaces Homme Machine 3D

3.1 Introduction

Les technologies utilisées en Réalité Virtuelle offrent aux utilisateurs de nouvelles interfaces qui leurs permettent d'interagir facilement et naturellement avec l'environnement virtuel. Actuellement, l'étude des techniques d'interaction 3D est un des problèmes majeurs dans la majorité des applications de RV. Cependant il faut noter que les techniques d'interactions 3D sont très éloignées des interactions 2D classiques. Ces dernières se réalisent le plus souvent par l'intermédiaire du couple clavier-souris associé aux interfaces graphiques usuelles. La manière d'étudier les méthodes d'interactions 2D est aujourd'hui maîtrisée et il est possible de connaître leurs performances car il existe de nombreux modèles de prédiction ainsi que des techniques d'évaluation. Malheureusement, ce n'est pas encore le cas pour l'interaction 3D en raison d'un certain nombre de spécificités liées à l'interaction 3D :

- Beaucoup de dispositifs pour interagir;
- Immaturité de la méthodologie de conception des interactions [Rizzo et al., 2005];
- Peu de spécialistes pour évaluer les techniques;
- L'évaluation par des experts en ergonomie doit être réalisée à la fin du développement. Cependant cette étape demande beaucoup de temps. De plus, le résultat arrive tardivement.

Interagir dans un environnement virtuel via des techniques d'interaction nécessite la mise en place de tests ergonomiques afin de déceler les problèmes potentiels. Nous

avons décidé de vous présenter les méthodes d'évaluation utilisées dans le domaine de l'interaction 3D.
Pour cela, ce chapitre se structure en trois sections. La première section est une introduction à l'évaluation des systèmes en général afin de présenter les deux types de méthodes existantes, à savoir les méthodes empiriques et les méthodes analytiques. La seconde section traite des méthodes analytiques utilisées en RV. Cette section permettra de conclure sur les difficultés à exploiter ces approches en RV. La troisième section traitera de la méthode empirique qui est exploitable en RV. Nous terminerons ce chapitre par une comparaison des approches empiriques utilisées en RV.

3.2 Évaluation des Interfaces Homme Machine 3D

Dans le cas idéal, lors de l'utilisation d'un système quelconque ou d'un objet, l'utilisateur ne devrait pas se poser des questions comme: "comment faire pour (...)? Est ce que j'ai bien validé mon action?". L'évaluation devient alors une étape importante pour déceler les problèmes ergonomiques des systèmes, dans l'optique de la création d'interactions intuitives et transparentes pour les utilisateurs. L'évaluation des interfaces et de l'interaction homme-machine est issue de divers domaines : ingénierie, ergonomie et psychologie entre autres. L'évaluation ne s'effectue pas seulement lorsque la conception du système est terminée, mais se retrouve au fur et à mesure de la conception de l'interface, cela implique une grande variété de techniques. Celles-ci peuvent se classer selon deux approches :

- L'approche analytique : les évaluations menées avec cette approche comparent l'interface à un modèle de référence. Cette interface de référence décrit les qualités d'une bonne interface selon des critères normatifs;
- L'approche empirique : les évaluations menées avec cette approche se basent sur la mesure des performances des utilisateurs.

Avant de présenter les différentes approches, il est nécessaire de définir le terme d'ergonomie, ainsi que les critères lui étant associés et qui délimitent des familles d'objectifs à atteindre pour concevoir une évaluation.

3.2.1 L'ergonomie

Le terme "ergonomie" est un mot d'origine grecque se composant de "ergon" (travail) et "nomos" (règles). Il désigne la science du travail. D'après l'association internationale

de l'ergonomie (IEA), " L'ergonomie (bien l'étude des facteurs humains) est la discipline scientifique qui vise la compréhension fondamentale des interactions entre les êtres humains et les autres composantes d'un système, et la mise en oeuvre dans la conception de théories, de principes, de méthodes et de données pertinentes afin d'améliorer le bien-être des hommes et l'efficacité globale des systèmes". Cette compréhension doit prendre en compte "les facteurs physiques, cognitifs, sociaux, organisationnels, environnementaux dans la conception et l'évaluation des tâches, des emplois, des produits, des organisations, des environnements en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes ". L'ergonomie est pluridisciplinaire: elle s'appuie sur la physiologie du travail, la psychologie scientifique, la biomécanique et les sciences de l'ingénieur. Cette approche devient encore plus complète avec l'émergence du travail collaboratif et du télétravail. L'ergonomie se découpe en trois parties selon l'IEA :

- L'ergonomie physique et physiologique qui porte sur les caractéristiques anatomiques, anthropométriques, physiologiques et biomécaniques dans leurs relations avec l'activité physique de l'homme (postures, répétitions de mouvement, sécurité et santé);
- L'ergonomie cognitive qui porte sur les processus mentaux comme la perception, la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices (stress, mémoire, prise de décision);
- L'ergonomie organisationnelle qui concerne l'optimisation des systèmes sociaux-techniques : travail en collaboration, télétravail, gestion des horaires.

3.2.2 Les critères ergonomiques

Utilisabilité L'utilisabilité ou plus récemment l'usabilité (d'origine anglaise) est une notion proche de l'ergonomie. Elle désigne la capacité d'un système à être compris et utilisé simplement et rapidement par l'ensemble de ses utilisateurs. D'après la norme ISO, l'utilisabilité est "le degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié". De cette définition, nous pouvons distinguer très clairement plusieurs termes importants. Nous retiendrons principalement efficacité, efficience et satisfaction :

- Par efficacité, on entend la réalisation de l'objectif de façon performante;
- Par efficience, on entend la réalisation de l'objectif le plus rapidement possible, le tout avec un minimum d'efforts;

- Par satisfaction, on entend le confort de l'interaction homme-machine et le résultat final.

Dangerosité Ce critère contient toutes les conséquences négatives qui peuvent survenir durant l'utilisation d'un système, notamment sur l'état de santé de l'utilisateur. Par exemple, une interface homme-machine "coupante" est dangereuse pour l'utilisateur. Il faut donc prendre en considération ces types de risques qui sont très variés et qui touchent tous les types d'interfaces (interface visuelle dégradant les yeux, interface haptique qui peut accidenter un utilisateur).

Utilité Ce critère désigne la capacité d'un objet ou système à aider à la réalisation d'un objectif. Ce critère est le lien entre les fonctionnalités d'un système et les attentes de l'utilisateur pour réaliser son objectif.

Accessibilité L'accessibilité désigne le degré d'utilisabilité d'un système par le plus grand nombre de personnes. Elle concerne surtout l'aménagement des systèmes pour les handicapés.

Satisfaction Ce critère représente le sentiment d'un utilisateur après l'utilisation d'un système. Ce critère permet de mettre en évidence si oui ou non le produit/système/service a plu à l'utilisateur. L'évaluation de ce critère peut s'opérer par des questionnaires.

Acceptabilité Ce critère fait référence à l'image qu'un ou plusieurs individus se font d'un système ou d'une interface. Ce sont les opinions des utilisateurs qui permettent de mettre en évidence ce critère. L'acceptabilité n'est pas liée directement à l'utilité et à l'utilisabilité.

3.3 Les approches analytiques

3.3.1 L'approche heuristique

Le terme "heuristique" qui provient du grec "heuriskein " (trouver), est l'utilisation de règles empiriques simples, pratiques et rapides. Les heuristiques sont tirées d'expériences personnelles et non pas d'analyses. L'évaluation heuristique est une méthode d'évaluation pour déceler les problèmes d'utilisabilité. Un expert inspecte l'interface pour en trouver les défauts en s'appuyant sur une liste d'heuristiques préétablie. Une fois cette étape

réalisée, les résultats sont analysés. La liste a été introduite par Nielsen [Nielsen, 1994]. Pour les interfaces homme machine 3D, de nombreux auteurs ont proposé des listes comme Hix [Hix et al., 1999] ou bien Sutcliffe et Kaur qui ont collaboré ensemble [Kaur, 1997] [Sutcliffe, 2000]. Ils ont d'ailleurs proposé une nouvelle liste de critères :

- Interaction naturelle : l'interaction doit se rapprocher de l'interaction dans le monde réel, afin qu'elle soit plus facilement compréhensible par les utilisateurs;
- Cohérence des objets et tâches réelles : les objets et les tâches à réaliser dans le monde virtuel doivent de se rapprocher du monde réel;
- Expression naturelle de l'action : l'utilisateur doit pouvoir agir librement, sans restriction.
- Coordination en temps réel : le système doit retranscrire correctement les mouvements réels de l'utilisateur, sans délai perceptible;
- Retour sensoriel réel : les différents retours sensoriels doivent être effectués en temps réel, être réalistes et respecter les lois de la physique;
- Suivi de la tête de l'utilisateur : celui-ci doit correspondre en temps réel aux mouvements de la tête de l'utilisateur;
- Navigation et orientation : l'utilisateur doit pouvoir se repérer et se déplacer facilement dans le monde virtuel;
- Entrée et sortie : le système doit indiquer clairement comment sortir du monde virtuel ou y entrer;
- Restrictions : s'il y a des restrictions (pour la navigation par exemple), elles doivent être clairement indiquées;
- Aide : des objets dans le monde doivent permettre aux utilisateurs d'être assistés;
- Dialogue clair : un dialogue simple et clair entre le système et l'utilisateur doit exister;
- Présence : l'utilisateur doit se sentir présent dans le monde virtuel comme si c'était un monde réel.

Cependant, avant d'utiliser les critères que nous venons d'énoncer, l'expérimentateur doit étudier attentivement l'environnement virtuel afin de connaître les limites de celui-ci. L'évaluateur va donc relever la présence ou l'absence d'éléments dans chacune des catégories suivantes :

- Contrôle et représentation: présence d'un avatar qui se contrôle par un périphérique d'interaction pour un contrôle naturel. Pour une tâche de navigation, un avatar n'est pas forcément nécessaire alors que pour une tâche de sélection, une main virtuelle est nécessaire; En effet, dans un EV un utilisateur peut visualiser ses déplacements soit par un avatar soit par la modification d'une caméra virtuelle, dans ce cas là aucun avatar n'est visible. Pour la sélection, il est nécessaire de permettre à l'utilisateur de visualiser ses actions;
- Manque de retour sensoriel : sans retour sensoriel, l'utilisateur sera mis en difficultés (pour une collision objet-objet par exemple). Pour cela, l'évaluateur doit noter la présence de substitutions sensorielles comme par exemple la présence d'un élément visuel (changement de couleur ou apparition d'un simple texte);
- Techniques d'interaction : il faut vérifier que les techniques d'interaction soient adaptées à la sélection des objets;
- Représentation réaliste : l'utilisation de l'audio est nécessaire dans certains cas où l'utilisation de graphismes réalistes est aussi nécessaire (pour des applications demandant un bon réalisme).

Pour les EVC, [Hrimech, 2009] a proposé une liste de recommandations obtenues à partir d'études empiriques :

- Utilisation d'un retour visuel du point de vue du partenaire directement dans la scène;
- Un contrôle direct des actions de l'utilisateur;
- La référence spatiale est très importante pour l'implication;
- Avoir un équilibre entre le réalisme visuel et comportemental.

3.3.2 L 'approche "Cognitive Walkthrought"

Cette technique est basée sur le "Modèle de l'apprentissage exploratoire ". Ce modèle se compose de quatre parties :

- Objectif : l'utilisateur se donne un objectif à réaliser;
- Exploration : l'utilisateur parcourt l'interface à la recherche de l'élément, l'outil, etc, (un menu contextuel ou un bouton permettant d'activer une fonction) qui lui permettra de réussir son objectif;

- Choix : l'utilisateur choisit la fonction;
- Action et évaluation : l'utilisateur réalise la tâche et évalue la réponse du système afin de voir si celui-ci correspond à ce qu'il souhaitait.

Afin d'évaluer une interface à partir de ce modèle, le ou les évaluateurs vont se mettre dans le rôle de l'utilisateur. Les évaluateurs pourront donc bien appréhender les difficultés potentielles qui pourraient apparaître durant l'utilisation. Les évaluateurs se poseront les questions suivantes :

- L'action à choisir est-elle évidente pour l'utilisateur ?;
- Est-ce que l'utilisateur associe correctement l'action avec ce qu'il essaie de faire ?

Les réponses à ces questions sont oui ou non. Une réponse négative indiquera, par conséquent, un problème au niveau de l'interface qu'il faudra corriger. Cette évaluation est utilisée lors des premiers essais afin de savoir si l'interface est facile d'accès par des utilisateurs novices ou pour des utilisateurs experts qui découvrent l'interface. Dans ce modèle, on va évaluer deux paramètres : les taux de succès et d'erreurs. On ne regarde pas ici la rapidité d'exécution de la tâche. Cette méthode débouche sur des recommandations données par les spécialistes.

3.3.3 Les approches prédictives

Un premier modèle prédictif a été établi par Paul Fitts en 1954 [Fitts, 1954]. Le modèle initial s'applique uniquement sur les interfaces 2D et permet de prédire le temps requis pour aller d'un point de départ à une cible d'arrivée en fonction de la distance et de la taille de la cible. Mathématiquement, la loi de Fitts est une application linéaire entre le temps et le logarithme de la taille et de la distance de la cible. Ce modèle est très utilisé pour la création et l'évaluation des interfaces 2D, mais aussi pour la comparaison de périphériques (souris, clavier etc.) sur une même interface graphique. Néanmoins, ce modèle est limité étant donné qu'il ne prend en compte que deux facteurs à savoir la distance à la cible et la taille de la cible. Il ne prend pas en compte les facteurs comme le temps de réflexion de l'utilisateur ou le temps de réponse du système. Ce modèle n'est valable que pour les actions du type "pointage" et il s'applique uniquement aux périphériques 2D. Pour une extension aux périphériques 3D des auteurs ont proposé chacun d'entre d'eux des extensions à ce modèle comme [MacKenzie and Buxton, 1992] ou plus récemment [Murata and Iwase, 2001] pour permettre de prendre en compte la troisième dimension.

3.3.4 Conclusion intermédiaire

Les méthodes analytiques ne peuvent être utilisées que pour des domaines disposant d'une longue expérience d'évaluation ergonomique et de repères solides et fiables [Bowman et al., 2001a]. Néanmoins, il faut faire l'exception de certains travaux, notamment ceux de Kaur [Kaur, 1997] et Hix [Hix et al., 1999] qui ont proposé des listes d'heuristiques pour l'évaluation des environnements virtuels.
La section suivante aborde l'évaluation empirique où les tests sont pratiqués avec des utilisateurs afin de quantifier les performances du système évalué.

3.4 L'évaluation empirique

L'évaluation empirique consiste à recueillir et analyser des données issues de l'utilisation faite par des utilisateurs. Les évaluateurs effectuent une sélection de tâches qui seront utilisées pour l'évaluation ou encore laissent l'utilisateur évoluer librement dans l'environnement virtuel. Le système se doit d'être fiable et opérationnel afin d'éviter la frustration des utilisateurs ou tout simplement, d'obtenir des résultats mettant en avant la non fiabilité du système ou la non utilisabilité des fonctionnalités. On distingue deux niveaux d'études pour la réalisation d'évaluations d'empiriques, à savoir, les études en laboratoire ou les études de terrains (Chapitre 2 de [Fuchs et al., 2006a]) :

- Les études sur le terrain permettent d'évaluer le système dans les conditions réelles de sa future possible utilisation. Elles ne peuvent être totalement contrôlées et peuvent parfois faire l'objet d'un accès difficile au terrain. Par exemple, il est clair qu'il est difficile d'évaluer un système sous l'eau. De plus le recueil de données n'est pas aussi aisé qu'en laboratoire (difficultés dues au transport du matériel de mesure);
- Les études en laboratoire sont mieux contrôlées. L'intérêt de ce type d'études est que les contraintes imposées par le milieu réel n'ont plus lieu d'être. Il est donc possible de contrôler au minimum les types de variables. Par exemple, il est possible de contrôler l'éclairage en laboratoire, ce qui n'est pas forcément évident pour une évaluation en plein air. Il est aussi possible d'effectuer toutes sortes de recueils de données qu'il ne serait pas évident de réaliser sur le terrain. Cependant les données obtenues ne seront pas forcément pertinentes dans la mesure où la situation en laboratoire n'est pas la situation réelle.

3.4.1 Les indicateurs de performance

Les indicateurs sont les "mesures" de l'interaction et de l'interface homme-machine. Les indicateurs retenus couvrent les critères ergonomiques comme l'utilité, l'utilisabilité ou l'efficacité. Ces indicateurs sont de deux types :

- Les indicateurs objectifs/quantitatifs qui sont des mesures classiques comme la durée de réalisation d'une tâche ou le nombre d'erreurs. Ces indicateurs se récupèrent par l'intermédiaire de fichiers qui enregistrent les éléments, par des enregistrements vidéo ou, plus récemment, par l'utilisation d'électroencéphalogramme afin d'obtenir des indicateurs psychophysiologiques;
- Les indicateurs subjectifs/qualitatifs qui se récupèrent au travers de questionnaires, de recueil d'attitudes d'opinions des utilisateurs. Les questionnaires doivent être utilisés et il est possible de mettre en place des réunions ("focus group").

Bowman et Hodges [Bowman et al., 2001a] ont identifié trois familles d'indicateurs :

- Les indicateurs "système" font référence aux performances intrinsèques du système (Ordinateur, périphériques);
- Les indicateurs "tâche" font référence aux tâches à accomplir dans un environnement virtuel. Ces indicateurs mettent en avant le temps d'exécution, la précision et le nombre d'erreurs pour la réalisation d'une tâche;
- Les indicateurs "utilisateur" sont pour la plupart des indicateurs subjectifs.

3.4.1.1 Données quantitatives

Les performances "mesurables" de type tâche les plus importantes et récurrentes dans les évaluations sont la vitesse d'exécution de la tâche et la précision. Cependant ces deux paramètres sont corrélés. En effet : "Si je suis rapide je serais moins précis, mais si je veux être plus précis je serai moins rapide". Il est donc important de bien savoir si on veut privilégier la vitesse ou la précision en précisant aux utilisateurs ce qu'on attend d'eux, à savoir une précision la meilleure possible ou que l'on souhaite qu'ils réalisent la tâche le plus vite possible. Pour les indicateurs "système", on peut noter le nombre d'images par seconde, le temps de latence, etc. Ces performances sont nécessaires car cela permet de savoir si par exemple le système est en temps réel ou si le débit réseau est suffisant;
Concernant les indicateurs "utilisateur", les évaluateurs peuvent mesurer le stress, la

mémorisation, les émotions ou encore la concentration à l'aide de différents outils médicaux. Il est donc possible de visualiser l'état de l'individu durant l'immersion dans le monde virtuel. Les outils utilisés sont de différentes natures :

- Électroencéphalogramme : cet appareil permet de mesurer l'activité électrique au niveau du cerveau. L'utilisation de cet appareil dans un environnent virtuel permet de vérifier la vigilance de l'utilisateur;
- Électrocardiogramme : cet appareil permet de mesurer l'activité électrique au niveau du coeur. Les variations de l'électrocardiogramme permettent de constater la présence ou non d'émotions ou d'efforts de mémorisation;
- Mesure de la pression sanguine : la mesure de la pression sanguine est une donnée qui est en relation avec les efforts mentaux et le stress de l'individu;
- Mesure de la respiration : la mesure de cette activité permet de connaître l'hyper ventilation ou l'hypo ventilation de l'individu et par conséquent, obtenir des informations sur les émotions;
- Mesure au niveau des mains : on cherche l'activité électrique au niveau de la peau des mains ainsi que la température [Sheridan, 1992];
- Mesure de la posture: des auteurs ont essayé de trouver une corrélation entre cette donnée et la présence [Freeman et al., 2000];
- Mesures ethnographiques: permet de constater du comportement des utilisateurs durant les interactions utilisateur-utilisateur dans les environnements virtuels collaboratifs. [OBrien et al., 1998]

Cependant, ces données ne sont pas mesurables facilement. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des méthodes permettant de récupérer ses données de manière qualitative.

3.4.1.2 Données qualitatives

Observations Pour les observations, les évaluateurs observent les participants qui utilisent le monde virtuel. L'évaluateur prend des notes durant la session sur le comportement de l'individu et ses réactions. Il est possible d'enregistrer la scène pour ensuite la visionner à l'aide d'une caméra. Comme pour les discussions, on distingue des observations non structurées et structurées. Pour une observation structurée, l'évaluateur dispose d'une liste de thèmes alors qu'en non-structurée, il ne dispose pas de liste, il ne prend en compte que ce qu'il considère comme important.

Réunions Les réunions (focus group) consistent à constituer un petit groupe de personnes représentatives des utilisateurs potentiels (chapitre 2 de [Fuchs et al., 2006a]) en compagnie d'un ou de plusieurs évaluateurs. Cette méthode permet de récupérer des idées, des problèmes éventuels ou encore des alternatives afin d'améliorer le système. Ces réunions doivent intervenir après que les utilisateurs aient effectué des essais sur le système. Les discussions peuvent être enregistrées puis transcrites afin d'être analysées.

Questionnaires Les questionnaires sont composés d'une liste de questions afin d'obtenir plus d'informations concernant les utilisateurs. Il est possible d'utiliser les questionnaires avant, après ou pendant l'utilisation du système. Les questionnaires sont plus pratiques que les interviews. Il existe différents types de questionnaires et donc plusieurs catégories de questions pour la récupération des données subjectives :

- Questions concernant les périphériques: elles permettent de connaître les avis, les impressions des utilisateurs sur les périphériques pour l'interaction homme-machine. Ces questions touchent les notions de prise en main et de confort;
- Questions concernant l'utilisateur propre : elles permettent de récupérer des données démographiques (âge, sexe), l'expérience de l'utilisateur sur le sujet. L'expérience est un paramètre important;
- Questions concernant l'état de l'utilisateur : Comme exemple de ce type de questionnaires, nous citons le questionnaire SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) de Kennedy [Kennedy et al., 1993] et le questionnaire Short Symptom Checklist (SSC)) [Karaseitanidis et al., 2006];
- Questions concernant la présence, la co-présence et l'implication: La mesure de la présence est très particulière car beaucoup de définitions et théories ont été proposées. Cela nécessite donc de choisir les bons questionnaires en fonction de la définition que les auteurs ont utilisé, on parle alors de mesures subjectives. Cependant, il existe des techniques pour la mesure de la présence via des mesures objectives [Schuemie et al., 2001]. Les questionnaires de [Schroeder et al., 2001] mettent l'accent sur la mesure de la co-présence;
- Questions concernant l'effort collaboratif: L'effort collaboratif est l'effort que les utilisateurs fournissent pour réaliser une tâche commune. [Biocca et al., 2001] ont proposé des questionnaires pour la récupération de cette information subjective;
- Questions concernant la perception/awareness de la personne que nous pouvons mesurer en utilisant le questionnaire de [Gerhard et al., 2001].

3.4.2 Les facteurs extérieurs

Les performances dépendent d'un nombre important de facteurs extérieurs qui empêchent la réalisation correcte de la tâche. Bowman et associés [Bowman et al., 2001a] ont identifié quatre familles de facteurs : des facteurs propres à la tâche, des facteurs propres au monde virtuel, des facteurs propres à l'utilisateur et des facteurs propres au système :

- Les facteurs propres à la tâche font référence aux tâches de navigation, de sélection et de manipulation. Ces facteurs sont différents pour ce qui est des tâches de navigation et des tâches de sélection/manipulation. Un facteur de ce type est, par exemple, la distance à parcourir pour la tâche de navigation et la distance objet-utilisateur pour les tâches sélection/manipulation. Il est possible de comparer plusieurs modalités d'interaction (utilisation de la technique Go-Go et du Ray-Casting pour la sélection). On parle alors d'évaluation sommative;
- Les facteurs propres au monde virtuel font référence à tout ce qui se trouve dans le monde virtuel (les objets, une certaine activité dans celui-ci, etc.);
- Les facteurs propres à l'utilisateur peuvent modifier les performances et en particulier la vitesse d'exécution. Si un utilisateur est un expert, il aura sans doute de meilleurs résultats en termes de rapidité car celui-ci connaît les interfaces évoluées comme le flystick. L'âge et le sexe de l'utilisateur sont aussi des facteurs qui peuvent influer sur les performances;
- Les facteurs propres au système font référence à la modification d'une modalité de visualisation ou la modification de l'avatar de l'utilisateur. Par exemple, le facteur "incrustation vidéo" (réalité augmentée) est un élément qui influe sur les performances de façon positive ou négative.

Il est possible, si l'on souhaite éviter que certaines de ses variables influent sur les performances de l'interaction homme-machine, d'appliquer une des trois stratégies suivantes :

- Maintenir une variable à la même valeur. Par exemple, on ne sélectionne que les utilisateurs du même sexe ou dans une même tranche d'âge;
- Réaliser un tirage aléatoire, pour répartir différentes tâches à différents utilisateurs;
- Combiner certaines variables. Par exemple, choisir une évaluation avec le facteur taille couplé avec le facteur couleur.

3.4.3 Création des scénarios et choix des utilisateurs

Afin de pratiquer un test avec des utilisateurs, il convient de définir quels sont les types de tâches que ceux-ci doivent réaliser. Les tâches doivent être les plus proches des tâches du produit final que l'utilisateur utilisera. La précision des tâches et, par conséquent, du scénario affecte directement les résultats [Bowman et al., 2001a]. Les tâches à réaliser doivent prendre en compte les éléments cognitifs à sa réalisation (réflexion ou mémorisation). Le scénario peut aussi se résumer à une comparaison de plusieurs périphériques d'interaction. Cependant, les tâches de tests leur étant associées sont souvent artificielles, ce qui ne rend pas compte de l'utilisabilité du dispositif dans l'environnement réel (chapitre 2 de [Fuchs et al., 2006a]). Ces scénarios peuvent être construits à partir de cas ayant posé des problèmes lors des premiers tests utilisateurs. Les sujets recrutés pour les expérimentations ne doivent pas avoir n'importe quel profil. En effet, il est préférable que les sujets soient représentatifs des utilisateurs qui utiliseront le produit final. La sélection des utilisateurs est un point important si on décide de pratiquer l'évaluation sur des personnes du même sexe ou avec que des utilisateurs droitiers.

3.4.4 Analyse des données

L'analyse des données est une étape cruciale de l'évaluation. Ces données influent directement sur le choix des traitements et de l'analyse qui en découlera. Selon Burckhardt, [Burkhardt, 2003] cette analyse se déroule en deux temps :

- Une analyse descriptive qui commence par une analyse mono-variée afin de caractériser l'ensemble des indicateurs enregistrés (âge, sexe, temps, etc.), ce qui se traduit par l'exploitation d'indices comme l'amplitude, la centralité et la dispersion (écart-type) d'une distribution;
- Une fois cette étape réalisée, il est intéressant de recourir à des analyses multivariées afin de rapporter des croisements entre indicateurs de performances et facteurs extérieurs. Par exemple, caractériser une relation entre une technique d'interaction et des objets en mouvement, ou encore l'effet de l'expérience sur l'utilisation du périphérique d'interaction. Cela peut être opéré par une Analyse de la Variance, ANOVA (ANalysis Of VAriance).

3.4.4.1 Analyse descriptive

La statistique descriptive permet de résumer des informations provenant d'une base de données. Son objectif est de nous fournir une image simplifiée de la réalité, en mettant en

exergue des caractéristiques qui ne sont pas discernables de prime abord. Elle emmène un nouvel éclairage sur les données. Elle s'appuie pour cela sur des indicateurs et des représentations graphiques qui permettant une bonne compréhension de la structure des données.

3.4.4.2 ANOVA - MANOVA

L'ANOVA n'est pas une méthode qui permet d'étudier les différences de variances entre populations. Elle permet d'étudier les différences de moyenne entre $N => 2$ populations. Ce nom vient de l'utilisation des variances pour le calcul. On peut effectuer une ANOVA à simple facteur, ce qui correspond à l'étude de groupes qui se distinguent par un seul facteur (par exemple l'étude des deux groupes étudiants et professeurs). On parle d'ANOVA à deux facteurs lorsque les groupes se distinguent par deux facteurs. Par exemple: étudiants/homme, étudiants/femme, professeurs/homme, professeurs/femme. Les facteurs peuvent être à caractère qualitatif ou quantitatif. Un facteur est associé à différentes modalités déterminées par l'expérimentateur.
Avant de débuter une ANOVA, il faut au préalable définir les hypothèses statistiques se reposant sur les groupes, notées H_0 et H_1. H_0 étant l'hypothèse nulle qui indique qu'il n'y a pas de différence de moyenne entre les groupes. H_1 est l'hypothèse alternative qui postule qu'il existe une différence significative entre les groupes.

Conditions d'application de l'ANOVA Avant de procéder à une ANOVA, il faut impérativement vérifier trois points. La variance entre les différents groupes doit être identique ou quasi identique car la méthode ANOVA y est très sensible et aboutirait des résultats erronés: c'est l'hypothèse d'homoscédasticité. En second, il est nécessaire que les échantillons soient aléatoires et indépendants les uns des autres et finalement que les groupes suivent une loi normale ou approximativement normale. Lorsque ces conditions ne sont pas respectées, il est judicieux d'utiliser un équivalent non-paramétrique de l'ANOVA, le test de Kruskal-Wallis pour un facteur et le test de Friedman à deux facteurs.

Analyse du résultat Le résultat d'une analyse ANOVA se présente sous la forme d'un tableau. Dans ce tableau on retiendra plus particulièrement trois valeurs :

- Degrés de liberté, *df* qui représente le nombre de valeurs aléatoires qui ne peuvent être déterminées ou fixées par une équation;
- Test de Fisher, F;

- Erreur, p c'est à dire la probabilité de commettre une erreur en déclarant qu'il existe une différence entre les groupes. Si cette valeur est supérieure au seuil fixé par la communauté scientifique (en général 0,05), il faut alors en déduire que l'hypothèse nulle H_0 est correcte. Dans le cas contraire l'hypothèse H_0 est rejetée, ce qui signifie qu'il existe une différence entre les groupes. Il faut alors procéder à un test post-hoc afin de déterminer quels groupes, pris deux à deux, sont différents.

Tests Post-Hoc Dans le cas d'une ANOVA pour la comparaison de trois groupes, ssci la probabilité est inférieure au seuil de $0,05$, on ne peut déduire que les 3 groupes sont différents. Cependant il est possible que seulement deux groupes le soient. Il faut alors utiliser un test post-hoc, où l'on va comparer les groupes deux à deux. Nous avons à notre disposition plusieurs test post hoc :

- Test de Tukey qui consiste à comparer chaque paire de moyennes comme si ces deux moyennes pouvaient être la plus grande et la plus petite dans l'ensemble des moyennes à comparer;
- Test de Newman-Keuls qui compare les moyennes par paires, permet le classement des ces dernières. Il utilise des tests de Tukey successifs. Bien que ce test bien soit plus puissant que le test de Tukey, il ne permet pas de contrôler le taux d'erreur de l'ensemble et provoque des erreurs du premier degré;
- Test de Scheffé qui permet de réaliser des comparaisons linéaires parmi les moyennes de l'échantillon tout en contrôlant le taux d'erreur.

3.5 Les approches empiriques

3.5.1 L'approche formative ou itérative

L'approche formative/itérative est une méthode qui est appliquée durant la conception de l'interface afin de déceler et corriger les problèmes le plus rapidement possible. Cette méthode s'applique dans plusieurs domaines comme l'éducation. Par exemple dans le domaine éducatif, elle permet de déterminer si un élève possède les pré-requis nécessaires pour aborder la tâche suivante. En effet, pour apprendre à un élève les additions, il convient au préalable de s'assurer qu'il comprenne correctement les chiffres. Une méthodologie reposant sur cette approche a été proposée par [Burkhardt, 2003]. En s'appuyant sur le schéma technocentrique de référence, Burkhardt propose des objectifs d'évaluation en fonction des trois niveaux décrits dans la figure 3.1. Le schéma technocentrique est un canevas pour la conception d'un environnement virtuel. Trois niveaux

d'immersion et d'interaction sont définis. Le premier niveau (niveau bas) correspond à l'immersion et à l'interaction physique (sensori-motrice)

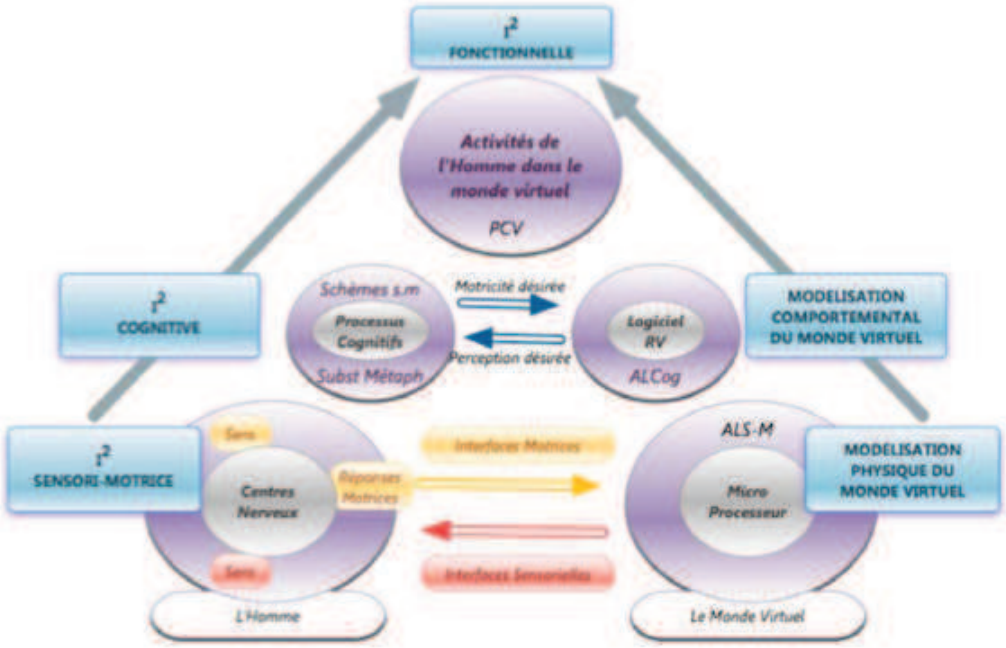


FIGURE 3.1: Schéma technocentrique de référence en réalité virtuelle (Adapté de [Fuchs et al., 2006a])

Immersion et interaction sensori-motrice Dans ce niveau, c'est l'évaluation des dispositifs d'interaction qui est concernée. Pour cela, on peut utiliser un prototype de l'interface ou une version bien évoluée de celle-ci. Par exemple, on peut effectuer des tests sur l'interface visuelle pour vérifier que celle-ci convient bien à l'utilisation du système. Différents tests comme des tests techniques, psychophysiques et ergonomiques peuvent être réalisés sur un dispositif (par exemple le poids des lunettes de stéréoscopie ou encore le poids d'un visiocasque). Les utilisateurs peuvent être choisis sans contraintes (peu importe leur âge, leur profession). L'objectif est de mettre en place des paradigmes d'interaction. L'utilisabilité est le critère mis en avant pour ce niveau.

Immersion et interaction cognitives Dans ce niveau, c'est l'évaluation des fonctionnalités qui est testée, en utilisant des utilisateurs proches des utilisateurs qui utiliseront le produit final. Ce niveau concerne le raisonnement et le comportement des utilisateurs. Un apprentissage rapide de l'interface et de l'interaction homme-machine est un critère important pour mettre en avant l'efficacité. Ici l'utilisabilité n'est plus le seul critère utilisé mais l'utilité est également prise en compte.

Immersion et interaction fonctionnelles Dans ce niveau, on s'occupe de l'évaluation de l'efficacité de l'environnement virtuel à partir de situations réelles. Ici on évalue tous les critères de l'ergonomie et il est possible d'effectuer une évaluation comparative.

3.5.2 L'approche sommative ou comparative

L'approche sommative ou comparative permet une comparaison statistique de plusieurs éléments d'une interface graphique 2D ou d'une interaction 3D. Alors qu'une évaluation formative est effectuée au terme de chaque tâche, l'évaluation sommative s'applique en général à la fin. Par comparaison avec le domaine éducatif, cette méthode correspondrait à un examen final. Comme l'évaluation formative, les résultats obtenus sont de types quantitatifs et qualitatifs. Cette évaluation permet aux évaluateurs de comparer les performances et ainsi de pourvoir choisir l'interface la plus adaptée à la situation. Pour une comparaison efficace, il faut prévoir de nombreux scénarios que les utilisateurs devront appliquer sur chacune des interfaces ou techniques d'interaction.
Une première méthodologie reposant sur l'approche comparative a été proposée par Bowman [Bowman et al., 2001a]. Le banc d'essai (voir la figure 3.2) consiste en la réalisation de plusieurs petites expériences ou d'une plus longue sur différentes techniques d'interaction ou sur une combinaison de celles-ci. L'évaluateur va concevoir des activités touchant les techniques afin de pouvoir relever différents paramètres de performance tels que la vitesse de déplacement, la précision, le confort de l'utilisateur ou encore la notion de présence dans le monde virtuel.

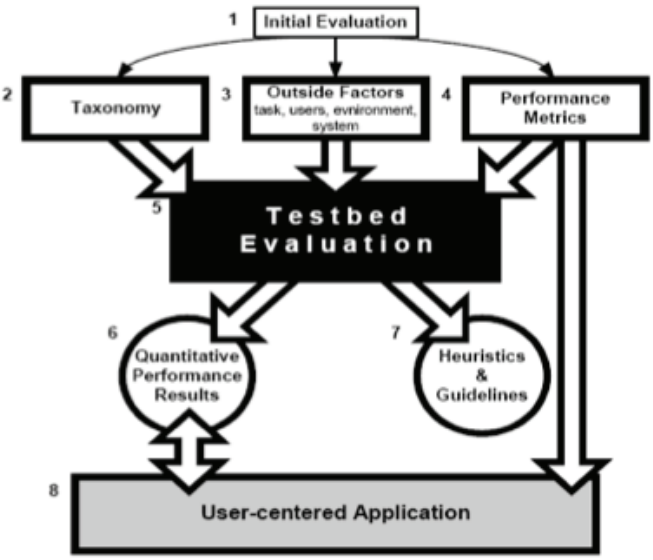


FIGURE 3.2: Méthodologie du banc d'évaluation des techniques d'interaction 3D (extrait de [Bowman et al., 2001a])

Évaluation initiale Elle permet de définir la tâche que l'évaluateur va faire pratiquer;

Taxonomie La taxonomie est la science de la classification. Bowman classifie les techniques d'interaction afin de choisir la technique ou une combinaison de techniques adéquate pour réaliser la tâche;

Facteurs extérieurs Les performances dépendent de nombreux facteurs extérieurs. Il faut les identifier avec soin;

Les Indicateurs de performances On choisit les paramètres qu'on souhaite mesurer (temps, vitesse, etc.).
Poupyrev et associés [Poupyrev et al., 1997] ont aussi proposé une approche de type banc d'essai intitulé Virtual Reality Manipulation Assessment Testbed (VRMAT) dédié uniquement à la tâche de manipulation. Cette approche comporte trois restrictions majeures : l'utilisateur doit être entièrement immergé dans le monde virtuel, la technique de manipulation considérée est celle de la main virtuelle simple et l'utilisateur ne peut pas explorer le monde virtuel, la tâche de navigation est supprimée. La manipulation est décomposée en trois sous- trois tâches: Position, Orientation et Sélection.

3.5.3 L'approche hybride

Hix et associés [Hix et al., 1999] ont proposé une méthode appelée évaluation séquentielle. L'évaluation séquentielle utilise les méthodes d'évaluation empiriques et analytiques traditionnelles dans un ordre particulier, adapté au monde des interfaces 3D :

- Analyse de tâches : une analyse précise de la tâche, des sous tâches et des méthodes pour l'utilisation du système est réalisée. Cette partie n'est pas souvent respectée lors du développement;
- Évaluation heuristique : cette étape permet la détection des problèmes dictés par les heuristiques ou des guides de conception. Cette étape nécessite plusieurs évaluateurs pour que tous les problèmes soient trouvés, comme le suggère l'évaluation heuristique proposée par Nielsen;
- Évaluation formative : après le développement de scénarios, les utilisateurs vont utiliser l'interface;
- Évaluation comparative : cette étape se déroulera dès que l'interface sera finalisée. Elle permet de faire des comparaisons entre plusieurs interfaces ou sur l'utilisation

de plusieurs périphériques sur une même interface (utilisation du Spidar et d'un Flystick pour la manipulation d'un même objet par exemple).

3.5.4 Conclusion intermédiaire

L'évaluation empirique nécessitant des utilisateurs est donc l'évaluation que nous allons utiliser. Très souvent, l'accent est mis sur l'utilisabilité des systèmes. Néanmoins ce n'est qu'un critère de l'ergonomie; utilité ou encore satisfaction sont aussi des critères importants à prendre en compte. Cependant, ce type d'évaluation est très complexe étant donné le nombre de paramètres qu'il faut prendre en compte : choix des bonnes variables de mesures, choix des paramètres qui influent sur ses variables. Mais aussi, le choix de questionnaires qui permettent de récupérer certaines données, qu'il ne serait pas possible de récupérer (ou bien difficilement) par la mesure, il est donc nécessaire d'avoir une très bonne expertise pour pouvoir réaliser une évaluation complète.

3.6 Conclusion

La figure 3.3 reprend les différentes méthodes que nous venons de présenter. On y retrouve les approches analytiques ainsi que les approches empiriques. Cependant il n'existe pas de techniques parfaites. Cela dépend du degré d'utilisabilité et d'utilité voulu pour aboutir à une interface facilement exploitable, mais aussi du degré d'expertise des utilisateurs potentiels; le degré de facilité devra être plus ou moins important.

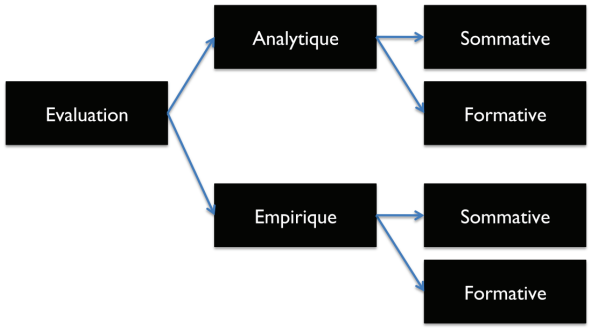


FIGURE 3.3: Récapitulatif des méthodes d'évaluations

Cependant, les IHM 3D pour les environnements virtuels sont totalement différentes des IHM 2D qui utilisent un clavier et une souris pour manipuler une interface graphique. Dans ce cas, il existent de nombreux guides de conception ou bien de modèles prédictifs comme la loi de Fitts pour construire une IHM 2D de qualité, ce qui n'est pas le cas

pour les IHM 3D. Les principales raisons sont les changements rapides dans les capacités du matériel, l'hétérogéniete des périphériques, le manque d'experts dans le domaine et un manque de maturité méthodologique (il n'existe pas de modèle prédictif) [Rizzo et al., 2005] [Bowman et al., 2001a]. Les périphériques de Réalité Virtuelle sont nombreux et fonctionnent différemment. De plus certaines IHM 3D ont été spécifiquement développées pour certains périphériques et sont donc dépendantes de ces derniers. On peut citer entre autres une technique de navigation exploitant des uniquement les "Pinch Gloves" [Bowman et al., 2001c].
Cependant, nous avons constaté que des travaux concernant des méthodologies, des lois ou bien des guides pour les environnements virtuels existent comme :

- Ce que l'on retrouve dans les travaux de Hix et associés [Hix et al., 1999] qui propose des méthodes pour rendre une application de réalité virtuelle ergonomique;
- Les principes et guides proposés par Kaur et associés [Kaur, 1997]. Ces principes sont obtenus à la suites de résultats empiriques et d'observations;
- Une extension de la loi de Fitts pour les interactions homme machine 3D ([MacKenzie and Buxton, 1992] et [Murata and Iwase, 2001]).

Il existe cependant des outils qui exploitent des guides de conception et des principes comme MAUVE [Stanney et al., 2003]. Cet outil propose une approche structurée pour améliorer l'ergonomie des environnements virtuels. Ces méthodes sont des méthodes analytiques qui permettent de comparer l'IHM 3D à un modèle de référence. Ce modèle de référence décrit les conditions pour obtenir la meilleure IHM 3D. Cependant ces méthodes analytiques ne peuvent être exploitées à cause du manque de normalisation et d'expérience ergonomique. Par conséquent, il est plus judicieux d'utiliser des méthodes empiriques d'évaluation sous forme de banc d'essai. Ces méthodes permettent de mesurer les performances de l'utilisateur [Bowman et al., 2001b]. De plus, les environnements virtuels collaboratifs apportent de nouvelles contraintes comme la prise en charge de la communication qui va engendrer des problèmes au niveau de la prise de parole ainsi que des spécificités au niveau la coordination entre utilisateurs durant les tâches.
Ce chapitre nous a permis de constater des difficultés pour mettre en place une évaluation empirique, qui fait appel à des experts et est en règle générale réalisée une seule fois. Afin de réduire ce temps de préparation, nous présentons dans le chapitre 5, un outil d'assistance qui nous permet d'évaluer plus souvent et rapidement les différentes versions de notre modèle afin d'aboutir à une technique bien plus finalisée pour qu'elle soit par la suite, évaluée par des experts. Cet outil ainsi que cet état de l'art seront utilisés pour

valider notre modèle de gestion du workflow pour les EVC (voir le chapitre 4) qui permet d'une part, de faciliter la perception des actions d'un utilisateur pour les autres, et d'autre part une manipulation simultanée sur un même objet par plusieurs utilisateurs.

Partie II

Contributions

Chapitre 4

Un workflow pour la gestion des interactions 3D dans les EVC

Mots clés Gestion et Organisation, Collaboration, Workflow, Interaction 3D multi-utilisateur, Assistance.

4.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC) sont des environnements complexes dans lesquels plusieurs utilisateurs partagent les mêmes objets pour agir ensemble. La complexité de ces environnements est liée à l'interaction du groupe d'utilisateurs avec les éléments partagés. Dans un monde partagé, plusieurs contraintes apparaissent, notamment celles qui sont liées à la coordination et à la communication des utilisateurs ainsi qu'à la gestion de l'interaction d'un utilisateur dans le monde virtuel vis à vis des objets et des autres utilisateurs.
Malheureusement, comme nous l'avons vu dans le second chapitre, les interactions 3D mono et multi utilisateur(s) en RV sont actuellement loin de procurer des solutions satisfaisantes. En effet, l'interaction 3D souffre d'un manque de modèles et de formalismes permettant de gérer et de contrôler les actions et les intentions des utilisateurs dans l'environnement virtuel. L'interaction de plusieurs utilisateurs avec l'environnements virtuel est limitée et de nombreuses recherches sont en cours. L'objectif principal des recherches menées dans le domaine de l'interaction 3D multi-utilisateurs est de donner la capacité à des utilisateurs d'évoluer dans des environnements collaboratifs et de pouvoir interagir efficacement, facilement et ensemble avec les entités de l'environnement.
Actuellement, on distingue deux catégories de techniques d'interaction 3D multi-utilisateurs synchrones. Une première catégorie sépare les degrés de liberté de

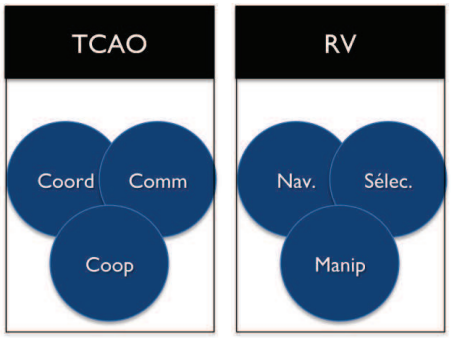
l'objet à manipuler. Dans ce cas, les utilisateurs exploitent des techniques mono-utilisateur en agissant sur les degrés de liberté qui leurs sont affectés. Un mécanisme d'adaptation est mis en place. Pour la seconde catégorie, une fonction va déterminer le mouvement final de l'objet à partir de la position et de l'orientation des utilisateurs dans l'EVC. Cela implique l'utilisation d'une nouvelle technique dans les cas multi-utilisateurs. Globalement toutes ces techniques ne prennent pas en considération les contraintes de coordination et de communication entre les utilisateurs et se concentrent exclusivement sur la manipulation avec deux utilisateurs. De fait, uniquement l'aspect production du trèfle fonctionnel des collecticiels est traité.
Pourtant, la conception d'un EVC nécessite de prendre en considération l'interaction multi-utilisateurs du point de vue du travail collaboratif, ainsi que la gestion du groupe. Un autre aspect à prendre en considération est l'hétérogénéité des plateformes de RV entre les participants ainsi que la disparité entre les utilisateurs afin de proposer des modèles et des systèmes permettant le travail collaboratif au sein d'un EVC.
Dans ce chapitre, nous présenterons un modèle de gestion des actions collectives pour permettre l'interaction 3D collaborative, afin de gérer les actions d'un groupe d'utilisateurs. Ce modèle est issu des concepts provenant des domaines du travail collaboratif et de la RV. Nous présenterons dans ce chapitre la spécification de notre modèle pour la gestion du workflow dans un EVC. Nous présenterons une proposition d'implémentation informatique et nous terminerons par l'expérimentation du modèle grâce à l'outil d'évaluation que nous vous présenterons dans le chapitre 5.
Ces travaux sont en cours de publications [Otmane et al., 2010].

4.2 Spécification et Modélisation

Le travail collaboratif assisté par ordinateur (TCAO) a pour thème de recherche les systèmes interactifs multi-utilisateurs. L'objectif du TCAO est de permettre à plusieurs utilisateurs de travailler ensemble à distance ou non, afin qu'ils produisent des résultats communs. La collaboration dans les EVCs consiste à réaliser un travail commun dans un environnement virtuel en agissant par exemple sur des objets virtuels. Pour permettre la réalisation d'actions en commun, il est nécessaire de prendre en considération les exigences liées à l'interaction 3D et au travail collaboratif. Pour cela, plusieurs facteurs sont à considérer comme l'interaction du groupe sur un même objet mais aussi la gestion de la conscience de l'interaction du groupe.

Pour cela, nous nous baserons dans un premier temps sur le modèle du trèfle (voir figure 4.1(b)) fonctionnel de l'interaction 3D [Otmane et al., 2007]. Ce modèle s'inspire du modèle du trèfle (voir figure 4.1(a)) fonctionnel des collecticiels [Ellis et al., 1991]. Ce

trèfle est composé de trois feuilles représentant les trois tâches de base de l'interaction 3D (navigation, sélection et manipulation). La tâche de contrôle d'application est une tâche qui a un lien direct avec le système et qui intervient implicitement durant l'utilisation des trois autres tâches. Cela forme un cadre fonctionnel pour l'interaction 3D qui permet de représenter la fonction qu'un utilisateur est en train de réaliser à un moment donné dans l'environnement virtuel. Cette dernière peut-être simple telle que la navigation, la sélection et la manipulation ou la combinaison de deux tâches simples. Par exemple, un utilisateur qui navigue et déplace un objet au même temps. Dans un second temps, nous exploiterons le trèfle fonctionnel des collecticiels qui permet de définir une application de travail collaboratif via trois espaces. Comme l'interaction 3D, cet espace permet de représenter la fonction qu'un utilisateur réalise dans les collecticiels (communique, produit ou se coordonne). Cette fonction peut-être aussi hybride.



(a) TCAO [Ellis et al., 1991] (b) RV [Otmane et al., 2007]

FIGURE 4.1: Les deux trèfles fonctionnels provenant des deux domaines

Nous assimilerons la communication comme une action avec l'EVC et l'espace de production comme la manipulation à plusieurs. Par conséquent, la communication sera considérée comme une tâche et la production sera intégrée dans l'espace de manipulation. Nous avons, d'une part, les concepts fonctionnels permettant de définir l'interaction 3D dans une application de RV et, d'autre part, les concepts fonctionnels permettant de définir un système de travail collaboratif. Nous avons choisi de relier les concepts provenant de deux communautés (RV et TCAO) afin de définir un système de réalité virtuelle collaboratif. Nous obtenons alors un nouveau "trèfle" comme illustré sur la figure 4.2 fusionné à partir des deux trèfles.

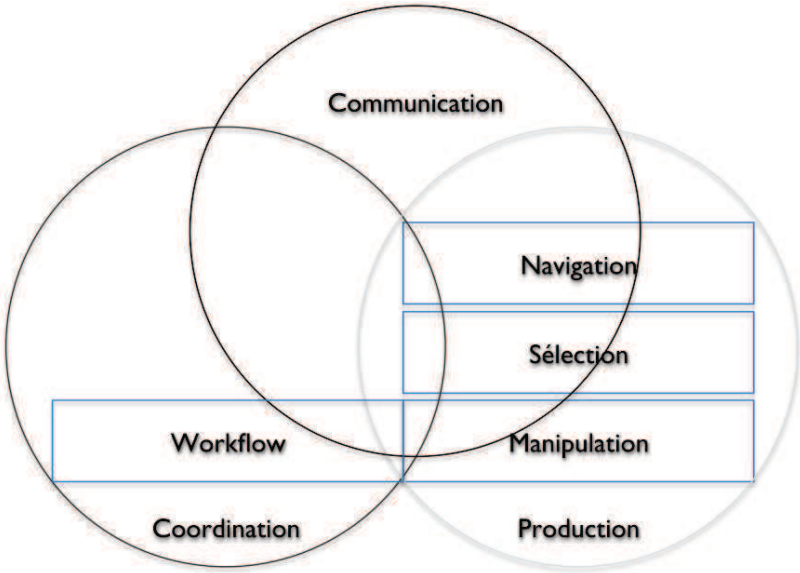


FIGURE 4.2: Notre proposition de fusion des deux trèfles fonctionnels

Ce nouveau trèfle va définir l'environnement virtuel collaboratif dans lequel, le système sera capable de gérer les différentes actions des utilisateurs afin qu'ils agissent ensemble (par exemple : navigation et communication en même temps). Dans le domaine du TCAO, on appelle le workflow, le processus qui gère les actions des différents utilisateurs. En nous basant sur un des principes fondamentaux de la RV provenant du domaine de la psychologie cognitive [Fuchs et al., 2006b], à savoir la boucle perception-cognition-action qui décrit les relations entre un utilisateur et le monde virtuel (voir figure 4.3). D'après ce principe, l'utilisateur agit sur l'EV par l'intermédiaire d'interfaces motrices qui captent ses actions (gestes, voix, etc). Ces actions sont transmises à un calculateur qui interprète ses actions comme des modifications de l'EV. Le calculateur évalue les transformations et les restitutions à apporter à l'utilisateur via les interfaces sensorielles.

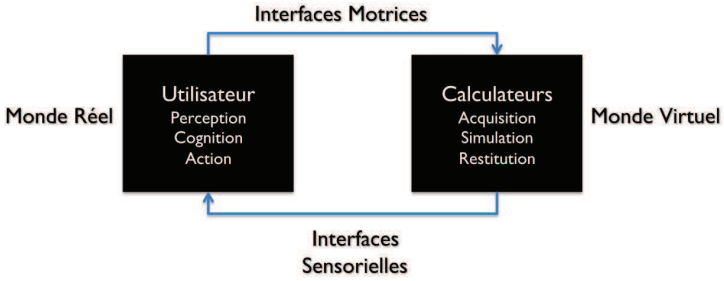


FIGURE 4.3: La boucle de perception/cognition/action passant par le monde virtuel (Extrait de [Fuchs et al., 2006b])

Par conséquent, nous allons perturber cette boucle en incorporant dans celle-ci la notion de workflow (voir figure 4.4). Le workflow est la gestion de l'ensemble des tâches à accomplir et des différents acteurs impliqués dans le processus. Le workflow dans la

boucle perturbée intervient donc pour permettre la coordination des tâches d'interaction 3D (Navigation, Sélection et Manipulation) et la communication des utilisateurs dans l'EVC. Cela signifie qu'une action d'un des utilisateurs de l'EVC sera d'abord "analysée" par le processus de workflow, pour que ce dernier modifie la perception des autres utilisateurs, afin qu'ils agissent ensemble plus facilement.

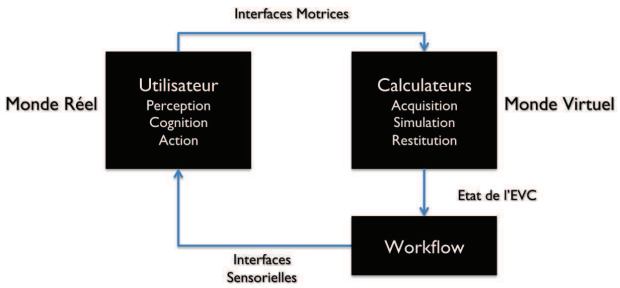


FIGURE 4.4: L'ajout de la composante workflow dans la boucle perception/cognition/action

Ce cadre fonctionnel permet d'une part, aux utilisateurs d'avoir des connaissances sur l'état du système et des autres utilisateurs (qui navigue?, qui interagit?, qui communique?, qui a des difficultés?), d'autre part, il fournit au système toutes les informations nécessaires pour assister les utilisateurs à agir (sélection facile, détection de l'intention de se diriger vers un objet), communiquer avec les autres et plus globalement à travailler ensemble.

4.2.1 Le workflow

Le workflow est une composante qui intervient sur la boucle perception/cognition/action. Elle permet d'assurer la coordination des utilisateurs afin qu'ils puissent produire ensemble (manipuler un objet à plusieurs, dialoguer, naviguer, etc...). Notre workflow est constitué de deux composantes (voir figure 4.5) : Une première composante représente l'espace des données partagées qui permet de caractériser le comportement de l'ensemble des utilisateurs pour qu'ils puissent agir en commun ainsi que les états des différents objets virtuels ou données média. C'est en quelque sorte une mémoire du groupe dans l'EVC. Cette mémoire collective va nous permettre de connaître des informations sur les actions des utilisateurs présents et donc caractériser l'EVC. La seconde composante représente l'ensemble des fonctions qui traitent les données de l'espace partagé afin de fournir les outils permettant la collaboration dans l'EVC.

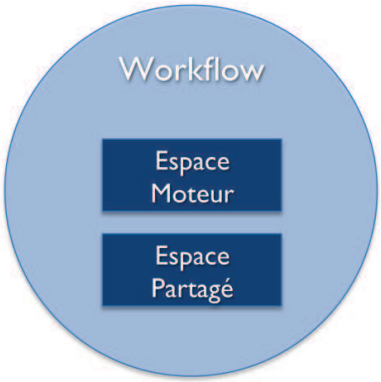


FIGURE 4.5: Les composantes du workflow

4.2.2 La composante Partagée

Cet espace est la composante partagée du workflow et est constitué de deux matrices qui représentent pour l'une, l'état de tous les utilisateurs (ME_U) et pour l'autre l'état de toutes les sources de l'EVC (ME_S). Les deux matrices définissent l'état global du système et permet de caractériser l'EVC à tout instant (voir figure 4.6). Cette connaissance de l'état du système permet de filtrer et de fournir les bons outils en fonction des situations pour que les utilisateurs puissent interagir ensemble dans l'EVC. La matrice d'état est donc définie par l'équation 4.1.

$$ME =< ME_U, ME_S > \tag{4.1}$$

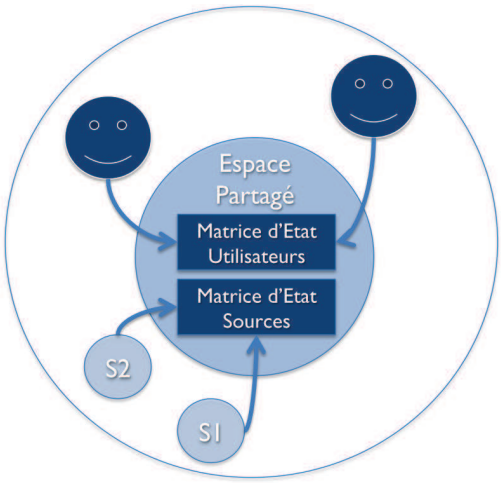


FIGURE 4.6: Illustration de la composante partagée

Les deux matrices sont construites à partir des informations des utilisateurs et des sources de l'EVC. Pour cela, nous représentons l'EVC par le triplet (U, S, W) tel que U est l'ensemble des utilisateurs, S est l'ensemble des sources et W est le workflow. Une source étant un élément générant des informations sensorielles (objet virtuel O et donnée média M) que les utilisateurs peuvent percevoir. L'appellation de source provient des travaux de [Bharadwaj et al., 2005]. Elle est pour les auteurs un élément de l'interface 2D qui génère de l'information. Quant à nous, nous définirons une source comme étant un élément de l'EVC qui génère des informations perceptibles par les utilisateurs, avec lequel il est possible d'interagir via des techniques d'interaction 3D. L'EVC est donc composé de plusieurs sources (voir figure 4.7) qui prennent différentes formes : objets 3D, flux vidéo etc.

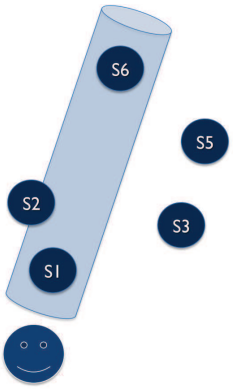


FIGURE 4.7: Illustration des sources qu'un utilisateur observe dans l'EVC. Le cylindre représente le champ de vision simplifié de l'utilisateur.

L'EVC peut être représenté donc par : $EVC = (U, S, W)$ avec $S = (O, M)$ tels que :

$$\begin{cases} U = u_1, u_2, u_i, ..., u_n & avec\ i = (1, .., n) \\ O = o_1, o_2, o_j, ..., o_l & avec\ j = (1, .., l) \\ M = m_1, m_2, m_k, ..., m_p & avec\ k = (1, .., p) \end{cases} \tag{4.2}$$

Un utilisateur u_i est représenté par le couple (A_{u_i}, VU_{u_i}). A_{u_i} étant l'avatar de l'utilisateur dans l'EVC et VU_{u_i} représente le vecteur d'état de l'utilisateur. Le vecteur d'état de l'utilisateur est représenté par plusieurs éléments tels que :

- P_{u_i} représente la position de l'avatar;
- O_{u_i} représente l'orientation de l'avatar;
- F_{u_i} représente la force que l'utilisateur exerce par l'intermédiaire de l'avatar;
- V_{u_i} représente la vitesse de l'avatar;

- m_{u_i} représente la masse virtuelle de l'avatar.

Une source S_j est représentée par le couple (R_{s_i}, VS_{s_i}). R_{s_i} étant la représentation de la source dans l'EVC et VS_{u_i} représente le vecteur d'état de la source :

- P_{s_j} représente la position de la source;
- O_{s_j} représente l'orientation de la source;
- V_{s_j} représente la vitesse de la source;
- m_{s_j} représente la masse virtuelle de la source.

En conséquence, les matrices d'états prennent la forme donnée par l'équation (4.3), représentant la matrice d'état des utilisateurs et par l'équation (4.4) pour la matrice d'état des sources:

$$ME_U = \begin{bmatrix} P_{u_0} & ... & P_{u_i} & P_{u_n} \\ O_{u_0} & ... & O_{u_i} & O_{u_n} \\ F_{u_0} & ... & F_{u_i} & F_{u_n} \\ V_{u_0} & ... & V_{u_i} & V_{u_n} \\ m_{u_0} & ... & m_{u_i} & m_{u_n} \end{bmatrix} avec\ i = (1..n) \tag{4.3}$$

$$ME_S = \begin{bmatrix} P_{s_0} & ... & P_{s_i} & P_{s_m} \\ O_{s_0} & ... & O_{s_i} & O_{s_m} \\ V_{s_0} & ... & V_{s_i} & V_{s_m} \\ m_{s_0} & ... & m_{s_i} & m_{s_m} \end{bmatrix} avec\ i = (1..m) \tag{4.4}$$

4.2.3 La composante Motrice

La seconde composante du workflow correspond aux fonctionnalités dédiées à l'assignation des tâches et des rôles durant les différents types de processus d'interaction (en solo ou à plusieurs). Il utilise les données partagées et les appliquent sur des objets particuliers de l'EVC via des fonctions de transferts. Ces objets particuliers sont quant à eux utilisés pour :

- Faire percevoir aux utilisateurs les différentes actions dans l'EVC;

- Proposer de l'assistance aux utilisateurs durant leurs propres actions.

Cette composante est elle même composée de quatre espaces correspondant aux trois tâches de l'interaction 3D (navigation, sélection et manipulation) et la tâche de communication dans l'EVC:

- L'espace de navigation : regroupe les fonctionnalités permettant la prise en charge des déplacements des utilisateurs et des sources ainsi que la visualisation, des actions des autres utilisateurs;
- L'espace de sélection: regroupe les fonctionnalités permettant la prise en charge des sélections de source par les utilisateurs;
- L'espace de manipulation : regroupe les fonctionnalités permettant la prise en charge des manipulations (déplacement, changement de couleur) apportées aux sources par les utilisateurs;
- L'espace de communication : regroupe les fonctionnalités permettant la prise en charge des communications entre utilisateurs.

Dans ce qui suit, nous présenterons deux points clés qui permettent le fonctionnement du workflow :

- Les sources particulières qui permettent un découpage de l'EVC pour déterminer les actions des utilisateurs dans un but de coordination des tâches de l'interaction 3D. Ces sources ont des fonctions associées. En tant qu'objets, elles ont la capacité d'être modifiées durant le processus par différentes fonctions appartenant aux espaces;
- Les fonctions d'espace sont des fonctions qui permettent de gérer l'interaction 3D. Elles peuvent agir sur les sources particulières de l'EVC en fournissant une assistance à la coordination.

4.2.3.1 Les sources particulières

Cette section traite des sources particulières qui sont associées à des fonctions du même nom, que le moteur de workflow peut utiliser dans le but de détecter les actions des participants ou bien de faire comprendre aux utilisateurs que certains utilisateurs réalisent des actions.
Pour cela, nous nous sommes inspirés du modèle spatial de l'interaction 3D

[Benford and Fahlen, 1993] et de [Ouramdane-Djerrah et al., 2007]. Ces modèles permettent de définir des zones pour négocier l'interaction 3D afin d'anticiper les actions des utilisateurs (par exemple, lors du passage de la tâche de navigation à la tâche de sélection). Pour cela, les auteurs exploitent les concepts **d'aura, focus, nimbus** qui permettent donc de négocier ces changements de zones (Manipulation, Sélection, etc.) en fonction des données (position et orientation) des utilisateurs (voir figure 4.8).

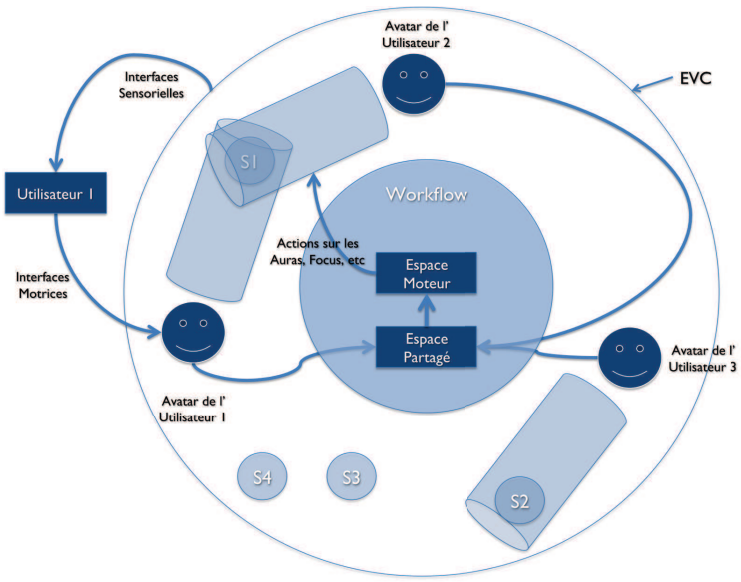


FIGURE 4.8: Les utilisateurs sont caractérisés par des vecteurs d'états. La matrice d'état formée des vecteurs, permet d'alimenter le moteur de workflow. Le moteur agit alors sur l'aura, le focus, etc. pour modifier la perception dans l'EVC.

Le Focus Le focus correspond à l'ensemble des sources avec lesquelles l'utilisateur peut interagir. Ce sont les sources qui appartiennent à une zone qui en réalité représente le champ de vision de l'utilisateur. L'intersection de deux focus permet à deux utilisateurs d'interagir sur la même source qu'ils visualisent (voir figure 4.9). Le focus est défini par l'équation (4.5). Cette dernière nous retourne les sources que l'utilisateur a dans son champ de vision. Il peut être considéré comme un outil pour diriger l'intention et va donc permettre de filtrer les sources qui ne sont pas dans le champ de vision de l'utilisateur.

$$Focus : U- > S \tag{4.5}$$

Algorithme 1 L'algorithme de la fonction focus

Entrées: $VU_{u_i}, VS_{s_j}, Focus(u_i)$

Sorties: L'ensemble S des sources

1: **pour** $j = 1$ à k **faire**
2: **si** $s_j \in Focus(u_i)$ **alors**
3: Mettre s_j dans S
4: **fin si**
5: **fin pour**
6: **retourne** S

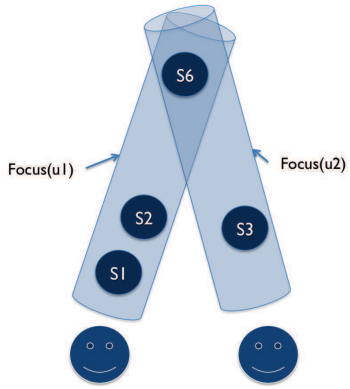


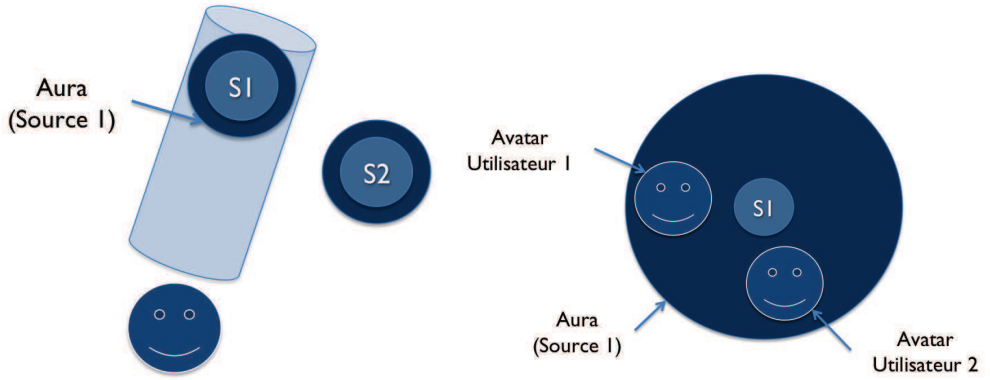
FIGURE 4.9: L'intersection de deux focus sur la source permet aux utilisateurs d'interagir sur celle-ci

Le Nimbus Le nimbus correspond à l'ensemble des utilisateurs voulant interagir sur une source. Il représente le groupe qui va peut-être sélectionner la source en vue de la manipuler par la suite. Le nimbus est défini par l'équation (4.6). Cette dernière nous retourne les utilisateurs qui visualisent une même source.

$$Nimbus : S- > U \tag{4.6}$$

L'Aura L'aura correspond à la zone qui entoure une source qui permet aux utilisateurs de sélectionner la source, seul (voir figure 4.10(a)) ou à plusieurs. La sélection est possible uniquement si le/les avatars des utilisateurs sont dans l'aura de la source (voir la figure 4.10(b)). L'aura est définie par l'équation (4.7). Cette dernière détermine les utilisateurs qui veulent potentiellement sélectionner la source.

$$Aura : S- > U \tag{4.7}$$



(a) L'Aura entourant les sources

(b) Deux utilisateurs se coordonnent en vue de sélectionner la source ensemble

FIGURE 4.10: Illustration de l'Aura

L'aura peut aussi être utilisée pour entourer l'avatar d'un utilisateur. Dans ce cas précis, cette zone peut permettre de démarrer des conversations entre utilisateurs. Cependant, nous l'utiliserons qu'avec les sources.

L'Assistant L'assistant permet à un utilisateur d'être assisté sur des actions spécifiques qu'il réalise. Par exemple dans le cas de la sélection d'une source en vue de la manipuler, un assistant peut intervenir de manière visuelle, motrice ou combinée. L'assistant prend alors la forme d'un objet assurant le rôle d'un guide virtuel comme décrit dans les articles suivants: [Otmane et al., 2000], [Ullah et al., 2008] et [Prada and Payandeh, 2009]. Dans ce cas, lorsque l'utilisateur sera informé visuellement qu'il s'approche de l'objet et lorsque ce dernier sera à l'intérieur de l'objet assistant, l'assistant l'aidera à atteindre la cible. Cela va permettre une sélection plus aisée en permettant une approche plus simple et guidée vers la cible (voir figure 4.11).

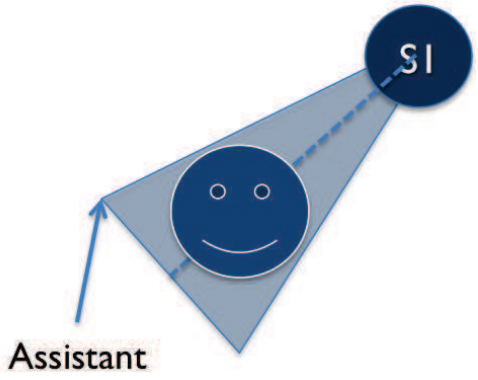


FIGURE 4.11: Illustration de l'assistant durant une phase de sélection

L'Avatar L'Avatar est une représentation dans le monde virtuel de l'utilisateur. Il peut prendre la forme d'un humanoïde ou une forme simple d'un objet 3D reconnaissable. Il va permettre de représenter les positions et les orientations de l'utilisateur aux autres utilisateurs ainsi que lui même dans l'environnement virtuel collaboratif. L'avatar est défini par l'équation (4.8).

$$Avatar : U- > VE_U \tag{4.8}$$

4.2.3.2 Les fonctions d'espaces

Les fonctions d'espaces sont des fonctions qui agissent sur les sources particulières que le moteur peut utiliser (le focus, l'aura, l'assistant, etc) en exploitant les données de l'espace partagé. Ces fonctions appartiennent aux différents espaces (navigation, sélection, manipulation et communication). En agissant sur ces objets particuliers, le système est capable de fournir une assistance aux utilisateurs afin de permettre la coordination de ces derniers dans l'EVC.

Fonction de navigation La fonction de navigation va agir sur la couleur de l'aura en utilisant des données des matrices d'états dans le but d'indiquer à l'utilisateur sa position vis à vis des sources. Cela permet d'informer l'utilisateur local qu'il se rapproche ou s'éloigne des sources. Pour les utilisateurs distants, cette fonction peut modifier, par exemple la couleur de l'avatar des autres participants.

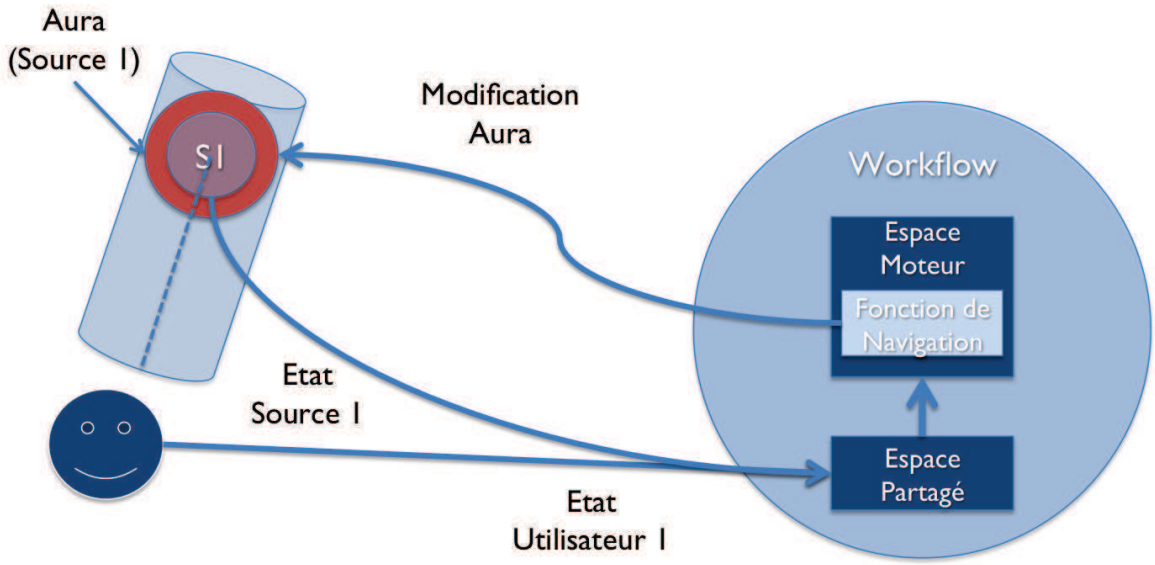


FIGURE 4.12: Principe de l'application de la fonction de navigation

Fonction de sélection La fonction de sélection est dédiée à la gestion des sélections par les utilisateurs. Elle devient active lorsque ce dernier pénètre dans l'aura de la source. Un assistant apparaît afin de l'aider à la sélection. Lorsque la sélection est validée, la manipulation devient possible (voir figure 4.13). Cette fonction agit de manière similaire pour les utilisateurs distants.

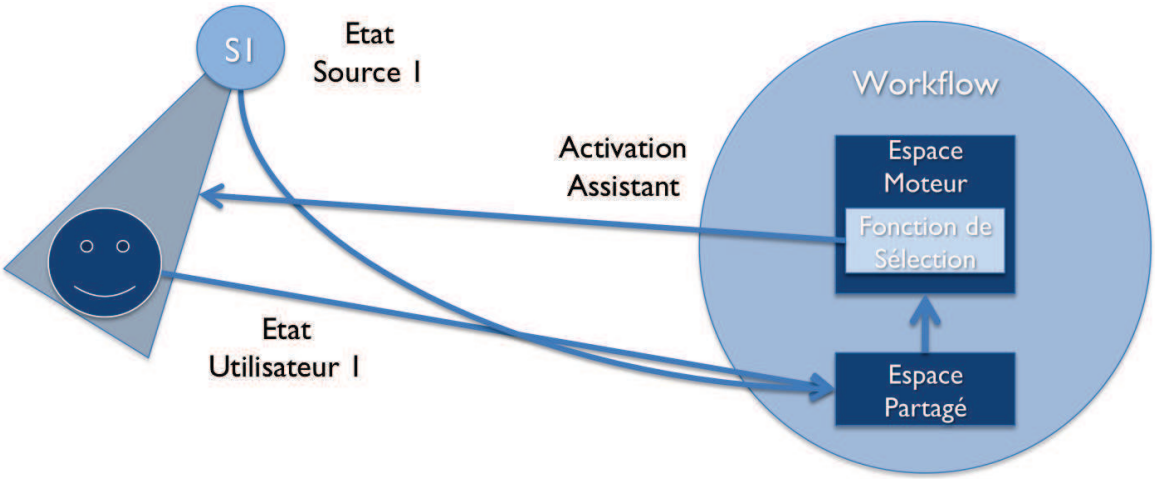


FIGURE 4.13: Illustration de la fonction de sélection

Fonction de manipulation Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, l'interaction à plusieurs dans un monde virtuel est souvent limitée à deux utilisateurs par objet. De plus, des nouvelles techniques sont proposées dans les cas multi-utilisateurs ce qui rend l'apprentissage pour les utilisateurs plus laborieux et nécessite de changer de technique durant le passage mono à multi-utilisateurs.

En partant du principe, que les utilisateurs dans un EVC peuvent s'ils le souhaitent interagir seuls, ils vont utiliser des techniques mono-utilisateur, or beaucoup de travaux s'orientent vers l'utilisation d'une nouvelle technique, ce qui signifie le changement de méthode d'interaction. En effet, si un utilisateur manipule seul un objet avec la main virtuelle simple, il n'est pas concevable que lorsqu'un second utilisateur va lui aussi sélectionner ce même objet, la métaphore initiale ne soit plus valable.

Nous souhaitons que les utilisateurs puissent manipuler des objets à plusieurs via la technique mono-utilisateur de leur choix. De cette manière, lors du passage où ils sont seuls, au passage où ils sont plusieurs, l'utilisateur continue à utiliser le système de la même manière. En effet, cela évite un apprentissage d'une nouvelle métaphore et une charge cognitive supplémentaire pour les utilisateurs.

Notre approche consiste à intégrer des concepts de mécanique classique en modélisant la manipulation multi-utilisateur via un système mécanique composé de liaisons mécaniques. Nous allons donc vous présenter les concepts que nous proposons et qui s'inscrivent dans l'espace de manipulation de notre modèle.

Notion de repère et de mouvement En physique, pour déterminer le mouvement en translation d'un objet, il est possible d'utiliser les deux premières de Newton. La première loi (voir équation 4.9) s'énonce ainsi : "Dans un référentiel galiléen, le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système est constant si et seulement si la somme des vecteurs forces qui s'exercent sur le système est un vecteur nul".

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \overrightarrow{0} \tag{4.9}$$

Cette première loi permet de déterminer la vitesse d'un objet en mouvement de translation uniforme. La seconde loi de Newton (voir équation 4.10) s'énonce quant à elle ainsi : "Soit un objet de masse m : l'accélération a subie par l'objet dans un référentiel galiléen est proportionnelle à la résultante des forces qu'il subit".

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m\overrightarrow{a} \tag{4.10}$$

Cette loi nous donne l'accélération en translation d'un objet dans un référentiel galiléen. Pour déterminer l'accélération angulaire de ce même objet, il est nécessaire d'utiliser l'extension de cette loi pour la rotation. L'accélération angulaire a_α subie par un objet, de moment d'inertie J dans un référentiel galiléen, est proportionnelle à la résultante des moments des forces qu'il subit (voir équation 4.11).

$$\sum \overrightarrow{M_{ext}} = J\overrightarrow{a_\alpha} \tag{4.11}$$

Nous pouvons résumer cela en utilisant les torseurs d'actions et dynamique (voir équation 4.12).

$$\sum T_{ext} = \{D\} \tag{4.12}$$

Nous savons que chaque liaison élémentaire de mécanique a une représentation sous forme de torseur d'action $\{T\}$. L'idée est d'exploiter les torseurs d'actions de liaisons et de les appliquer à l'équation 4.12. Pour ce faire, nous modéliserons les liaisons avatars-objet via une liaison mécanique pour former un mécanisme.

Notion de mécanisme et de liaison Par définition, un mécanisme est la combinaison de plusieurs pièces, dans notre cas, on parlera de plusieurs objets et d'avatars. Ces pièces sont liées entre elles par des contacts qu'on appelle liaisons mécaniques. La liaison mécanique est la description de la relation entre les pièces via des modèles mathématiques. Lors de la sélection d'un objet via une interaction mono-utilisateur, l'avatar de l'utilisateur devient le "parent" de l'objet. Celui-ci hérite donc des mouvements de l'avatar. Dans le cas multi-utilisateur, cela ne peut pas s'appliquer.
En s'inspirant du monde réel, où par exemple, deux utilisateurs vont déplacer ensemble une planche de bois. Le mouvement de la planche sera dépendant de l'action des utilisateurs car les utilisateurs "sont liés" à la planche par des liaisons.
En reprenant l'exemple, du déplacement d'un objet par une technique mono-utilisateur (l'objet hérite des mouvements de l'avatar). Il existe aussi une liaison entre l'avatar et l'objet, mais cette dernière ne permet pas de mouvement entre eux. Nous pouvons modéliser cela sous forme d'une liaison encastrement. L'utilisation de liaisons virtuelles entre les avatars et les objets vont agir comme un adaptateur qui va adapter les techniques mono-utilisateur au cas de la manipulation à plusieurs figure 4.14.

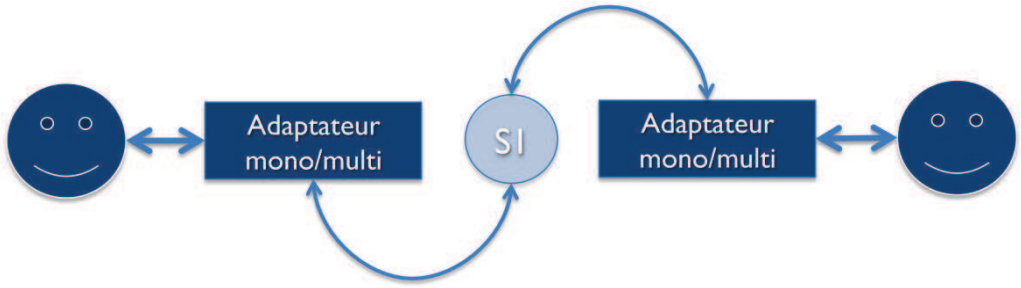


FIGURE 4.14: Principe de notre proposition pour permettre la manipulation à plusieurs

La fonction Pour déterminer la position de l'objet, il faut vérifier deux points. Le premier point est la résolution du principe fondamental de la dynamique pour obtenir la position et l'orientation de l'objet. Le second point concerne le choix des liaisons pour construire un mécanisme qui permet de déplacer l'objet (voir la figure 4.15). En effet, il faut éviter d'obtenir un mécanisme qui se bloque.

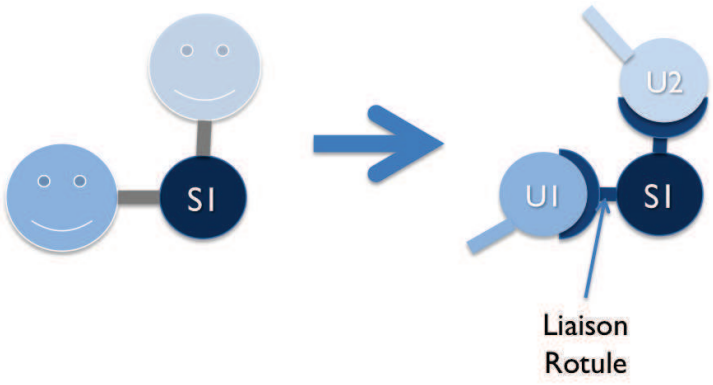


FIGURE 4.15: La modélisation de notre problème sous forme cinématique. Ici les liaisons entre les deux utilisateurs et l'objet sont modélisées par des liaisons rotules. Cette liaison rotule dispose de trois degrés de liberté sur ses trois composantes en rotation. Les efforts transmissibles seront sur les composantes de translation.

Pour déterminer le mouvement, on exploite les forces que les utilisateurs exercent sur les points d'attache de l'objet. La figure 4.16 illustre le processus pour déterminer le mouvement de la source $S1$ à partir de la force F. La liaison rotule relie l'avatar et l'objet. Elle est modélisée par son torseur des efforts transmissibles T_{Rotule}. La figure 4.17 illustre le fonctionnement du processus.

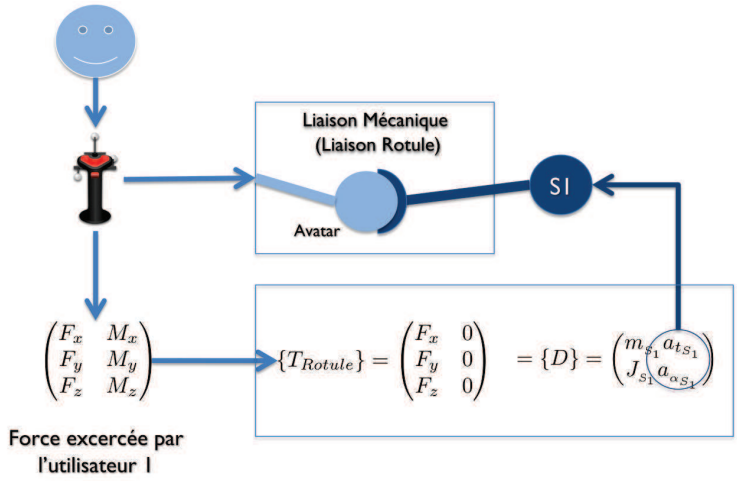


FIGURE 4.16: Processus pour déterminer le mouvement de l'objet. En résolvant, la relation de la dynamique, nous pouvons déterminer les accélérations en translation et en rotation de l'objet, à partir de la force communiquée par l'utilisateur sur la liaison rotule représentée par son torseur.

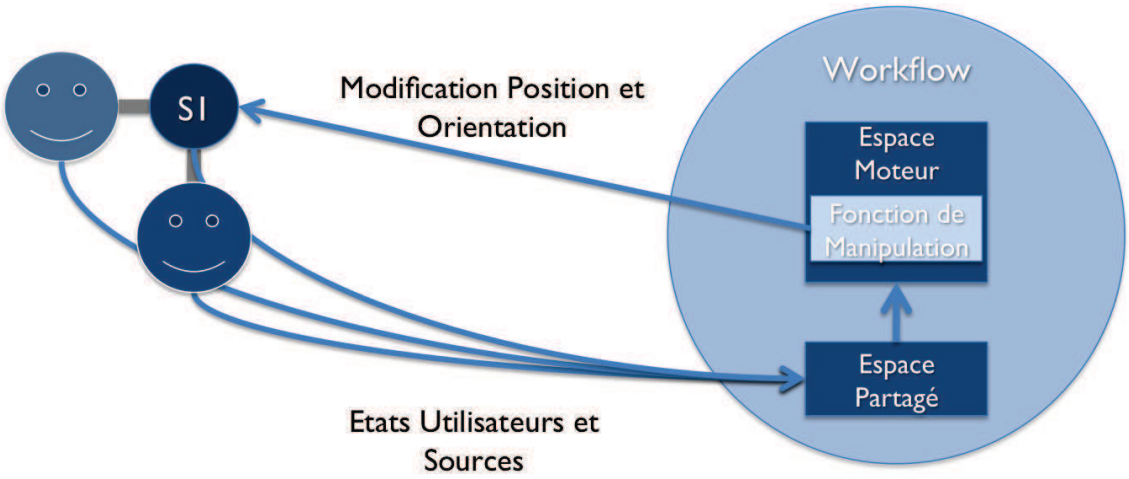


FIGURE 4.17: Illustration de l'application de la fonction de manipulation

4.3 Conception et Implémentation

4.3.1 Choix d'un formalisme pour les sources particulières

Les sources particulières vont agir comme des éléments d'assistance aux actions des utilisateurs. Or, les guides virtuels [Otmane, 2000] [Otmane et al., 2000] sont eux aussi, des moyens d'assistance. En effet, ils offrent à l'utilisateur une meilleure perception des cibles potentielles et apportent l'assistance nécessaire pour pouvoir réaliser les différentes tâches possibles [Ouramdane-Djerrah et al., 2007]. C'est dans ce contexte que nous avons décidé d'utiliser la structure [Otmane, 2000] des guides virtuels pour définir nos sources particulières (focus, nimbus, aura, avatars, assistants). Le formalisme des guides regroupe un ensemble de champs pouvant être optionnels selon la nature et le contexte des guides virtuels :

- Un attachement : le guide est attaché à un objet virtuel (source) ou à une position dans l'EVC. Il peut être attaché de manière statique ou dynamique;
- Une zone d'influence : cela jouera le rôle d'une zone d'attraction ou d'action (sélection). Cela correspond au volume du guide;
- Une condition d'activation : elle se traduit par l'appartenance d'un ensemble de paramètres extérieurs à la zone d'influence ou des conditions liées à des événements;
- Une fonction : la fonction du guide définit sa raison d'être. Elle définit le rôle du guide;
- Une condition de désactivation : elle désactive la fonction du guide, elle est donc l'inverse de la condition d'appartenance.

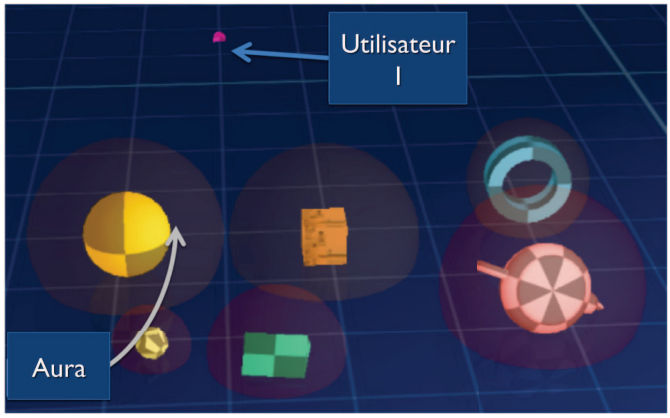
Elément	Attachement	Influence	Activation	Désactivation	Fonction
Focus	Dynamique	Cylindre invisible de rayon r et de hauteur h	Dès que l'utilisateur arrive dans l'EVC	Dès que l'utilisateur quitte l'EVC	Détermine les sources visibles par l'utilisateur
Nimbus	Dynamique	Sphère de rayon r	Lorsque plusieurs focus sont en intersection sur la même source	Lorsqu'il n'y a pas d'intersection des focus	Détermine la source visible par plusieurs utilisateurs
Aura	Dynamique	Sphère de rayon r	Lorsque l'utilisateur navigue et n'est pas physiquement présent dans l'aura	Lorsque l'utilisateur est présent dans l'aura (sélection)	Détermine les utilisateurs qui veulent potentiellement sélectionner la source
Avatar	Dynamique	Cylindre de rayon r et de hauteur h	Dès que l'utilisateur arrive dans l'EVC	Dès que l'utilisateur quitte l'EVC	Permet de déterminer le vecteur d'état de l'utilisateur
Assistant	Dynamique	Cône de hauteur h et de rayon r	Lorsque l'utilisateur est dans l'aura de la source	Lorsque l'utilisateur est hors de l'aura	Assistance visuelle et/ou à la commande

Tableau 4.1: Les différentes caractéristiques des sources particulières

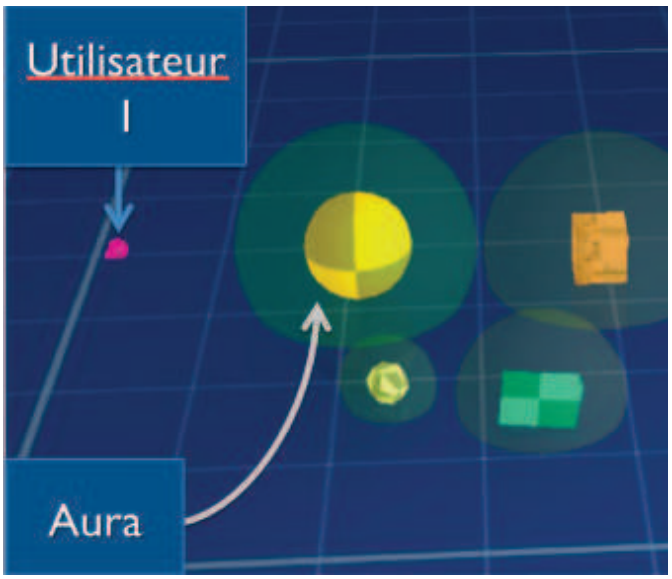
Par conséquent, en s'appuyant sur le formalisme des guides virtuels, nos éléments présentent les caractéristiques résumées dans le tableau suivant :

4.3.2 Navigation

La détection de l'intention de déplacement est déterminée à partir des matrices d'états du système. Nous avons mis en place une fonction qui permet de faire varier la couleur de l'aura de l'utilisateur. Cette variation de la couleur l'informera de sa position par rapport aux objets. Elle varie en fonction de la distance qui sépare l'avatar de l'utilisateur de la source. L'aura varie du rouge au vert, le rouge (voir figure 4.18(a)) signifiant une distance éloignée alors que le vert (voir figure 4.18(b)) signifie que l'utilisateur est proche de l'objet. L'utilisateur va donc voir l'aura des objets se modifier en fonction de ses déplacements.



(a) L'utilisateur est éloigné des sources, l'aura est rouge



(b) L'utilisateur est proche des sources, l'aura est verte

FIGURE 4.18: Illustration de la fonction de transfert lors de la tâche de navigation agissant sur l'Aura des sources

Afin d'indiquer à l'utilisateur local, l'intention de déplacement des différents utilisateurs distants vers les objets, une fonction agit sur la couleur des avatars de ses participants. Si ces derniers sont proches des sources, l'avatar devient rouge clignotant indiquant une possible intention de sélection (voir figure 4.19(b)) sinon il reste normal (voir figure 4.19(a)).



(a) Utilisateur distant proche des sources



(b) Utilisateur distant éloigné des sources

FIGURE 4.19: Illustration de la fonction de transfert pour donner l'intention des autres utilisateurs à se diriger vers une source

L'algorithme 2 nous donne la fonction de navigation pour l'utilisateur local u_0 associé à son vecteur d'état VU_{u_0}. Cette fonction permet de faire varier la couleur de l'aura des sources s_j, elles aussi associées à un vecteur d'état VS_{s_j} en fonction de la position P_{u_0} de l'utilisateur.

Algorithme 2 L'algorithme de la fonction de l'espace de navigation

Entrées: VU_{u_0}, VS_{s_j}

Sorties: Couleur de l'Aura entourant s_j

1: **si** $Avatar(u_0) \notin Aura(s_j)$ et $d = |P_{s_j} - P_{u_0}| > Seuil$ et $Focus(u_0) = s_j$ **alors**
2: $CouleurAura = VariationCouleur(d)$
3: **fin si**
4: **si** $Avatar(u_0) \notin Aura(s_j)$ et $|P_{s_j} - P_{u_0}| < Seuil$ et $Focus(u_0) = s_j$ **alors**
5: $CouleurAura = CouleurFixe$
6: **fin si**
7: **si** $Avatar(u_0) \in Aura(s_j)$ **alors**
8: $CouleurAura(s_j) = Invisible$
9: **fin si**
10: **retourne** $CouleurAura(s_j)$

L'algorithme 3 nous donne la fonction de navigation qui permet d'indiquer à l'utilisateur local u_0 associé à son vecteur d'état VU_{u_0}, que d'autres participants u_i $(i \neq 0)$ ont l'attention de se diriger vers la source s_j, elles aussi associées à un vecteur d'état VS_{s_j} en fonction de la position P_{u_0} de l'utilisateur.

Algorithme 3 L'algorithme de la fonction de l'espace de navigation

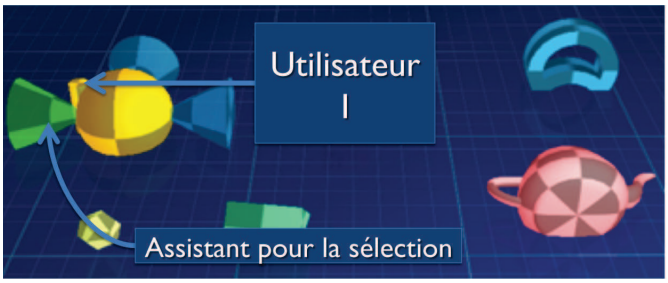
Entrées: VU_{u_i}, VS_{s_j} avec $i = 1..n$

Sorties: Couleur de l'Aura entourant s_j

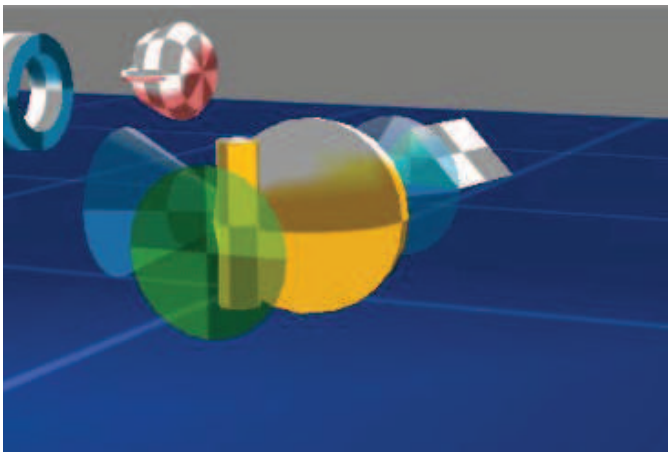
1: **si** $Avatar(u_i) \notin Aura(s_j)$ et $d = |P_{s_j} - P_{u_i}| > Seuil$ et $Focus(u_i) = s_j$ **alors**
2: $CouleurAvatar(u_i) = CouleurInitiale$
3: **retourne** $CouleurAvatar(u_i)$
4: **fin si**
5: **si** $Avatar(u_i) \notin Aura(s_j) et\ |P_{s_j} - P_{u_1}| < Seuil$ et $Focus(u_i) = s_j$ **alors**
6: $CouleurAvatar(u_i) = CouleurClignotante$
7: **retourne** $CouleurAvatar(u_i)$
8: **fin si**
9: **si** $Avatar(u_i) \in Aura(s_j)$ **alors**
10: $CouleurAura(s_j) = Invisible$
11: **retourne** $CouleurAura(s_j)$
12: **fin si**

4.3.3 Sélection

La fonction de sélection est similaire à la fonction de navigation car elle va agir sur la couleur des assistants (voir figure 4.20(a) et figure 4.20(b)). Une fois que l'utilisateur est entré dans l'Aura de l'objet, les assistants apparaissent afin de guider l'utilisateur vers l'objectif. Nous ferons varier la couleur en fonction de sa position entre l'origine de l'assistant et le point à atteindre. Cette fonction donne à l'utilisateur la capacité de connaître sa position pour valider correctement la sélection. De plus, cette fonction peut agir sur la commande du dispositif d'interaction de l'utilisateur en interdisant certains mouvements lorsque l'avatar de l'utilisateur appartient à la forme géométrique de l'assistant.



(a) Utilisateur distant proche des sources



(b) La couleur de l'assistant varie en fonction de la position de l'utilisateur par rapport au point d'attache.

FIGURE 4.20: Illustration de la fonction de sélection

L'algorithme 4 nous donne la fonction de sélection pour l'utilisateur local u_0. Cette fonction permet de faire varier la couleur de l'assistant pour assister l'utilisateur mais aussi pour permettre à l'utilisateur u_0 de visualiser qui des autres utilisateurs u_i $(i \neq 0)$ va potentiellement sélectionner la même source que lui.

Algorithme 4 L'algorithme de la fonction de l'espace de sélection sans ajustement de la commande de l'utilisateur

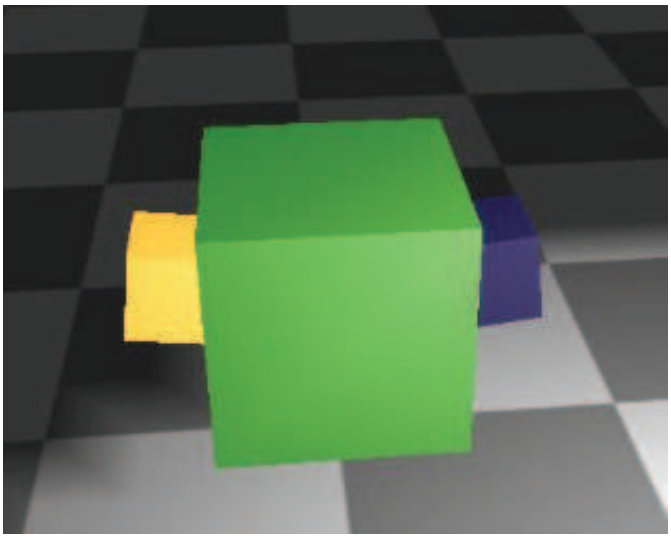
Entrées: VU_{u_i}, VS_{s_j}

Sorties: Couleur de l'assistant utilisé par l'utilisateur lors de la sélection de la source s_j

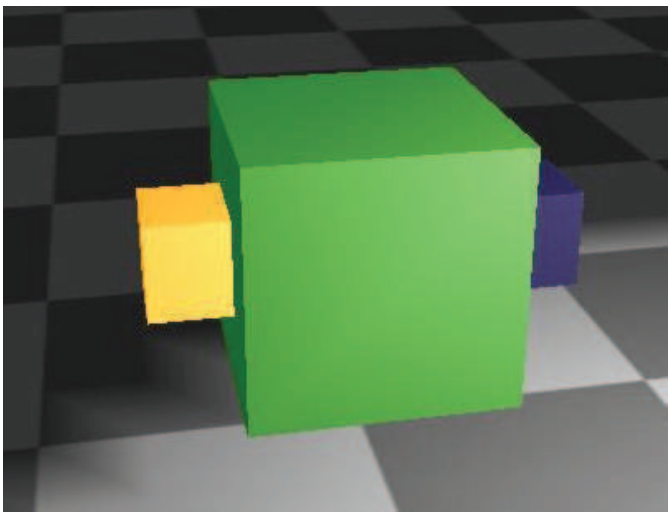
1: **si** $Avatar(u_i) \in Assistant(s_j)$ et $d = |P_{s_j} - P_{u_i}| > Seuil$ et $Avatar(u_i) \in Aura(s_j)$ **alors**
2: $CouleurAssistant = VariationCouleur(d)$
3: **fin si**
4: **si** $Avatar(u_i) \in Assistant(s_j)$ et $|P_{s_j} - P_{u_i}| < Seuil$ et $Avatar(u_i) \in Aura(s_j)$ **alors**
5: $CouleurAssistant = CouleurClignotante$
6: **fin si**
7: **si** $Avatar(u_i) \notin Assistant(s_j)$ et $Avatar(u_i) \in Aura(s_j)$ **alors**
8: $CouleurAssistant(s_j) = CouleurFixe$
9: **fin si**
10: **retourne** $CouleurAssistant(s_j)$

4.3.4 Manipulation à plusieurs

La manipulation exploite le formalisme présenté précédemment. Ce dernier modélise les liaisons (voir les figure 4.21(a) et figure 4.21(b) pour des exemples) entre les utilisateurs et la source à déplacer par des liaisons mécaniques. Elle permet de déterminer le mouvement de la source par la résolution du principe fondamental de la dynamique. Une premier fonction de l'espace de manipulation implémente cette résolution pour déterminer le mouvement de la source à partir des forces exercées par les utilisateurs.



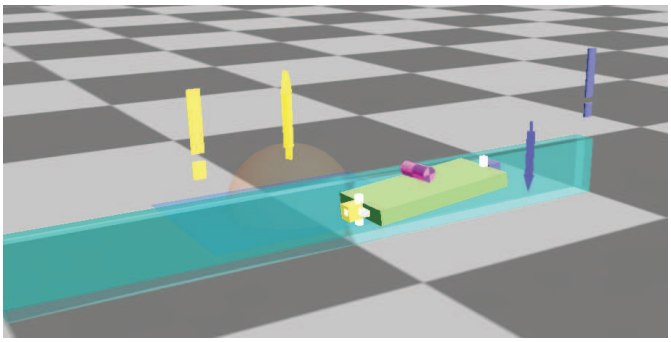
(a) Liaison Pivot (3 degrés de liberté en rotation)



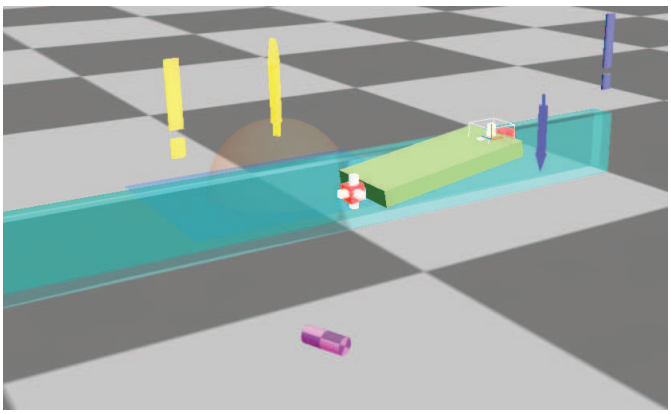
(b) Liaison Encastrement (pas de degré de liberté)

FIGURE 4.21: Influence du type de liaison sur les relations objet/avatars

Deux fonctions d'assistance à la manipulation (voir figure 4.22(a) et figure 4.22(b)) vont permettre de gérer des assistants durant la manipulation en affichant visuellement (voir 5) des indications aux utilisateurs ou/et en modifiant la granularité de la commande du dispositif (voir 6) pour accélérer ou réduire le mouvement sur un axe. Cela va perturber la boucle de perception-action dans le but de modifier le processus du workflow, et par conséquent le résultat de la manipulation.



(a) Apparition des assistants visuels durant la manipulation à plusieurs utilisateurs



(b) Activation de l'assistance à la manipulation (les avatars deviennent rouges)

FIGURE 4.22: L'activation des fonctions d'assistance dans le but d'améliorer la coordination

Algorithme 5 L'algorithme simplifiée de la fonction d'assistance visuelle dans un cas à trois utilisateurs pour afficher des informations sur l'utilisateur 1

Entrées: VU_{u_j}, VS_{s_0}

Sorties: Informations visuelles à afficher pour les différents utilisateurs

1: **pour** u_i avec $i = 1$ à 3 et $j = 1$ à 3 avec $i \neq j$ **faire**
2: Niveau1 = $Inclinometre_{s_0}(Avatar(u_i), Avatar(u_{j-1}))$
3: Niveau2 = $Inclinometre_{s_0}(Avatar(u_i), Avatar(u_j))$
4: **si** $Niveau1 > Seuil2$ et $Niveau1 < Seuil1$ **alors**
5: $GuideAlerte(u_j - 1)$ Guide indiquant à u_i un problème par rapport à u_{j-1}
6: **fin si**
7: **si** $Niveau2 > Seuil2$ et $Niveau2 < Seuil1$ **alors**
8: $GuideAlerte(u_j)$ Guide indiquant à u_i un problème par rapport à u_j
9: **fin si**
10: **si** $Niveau1 > Seuil1$ **alors**
11: $GuideCorrectifDescente(u_{j-1})$ Guide indiquant à u_i la direction pour corriger son niveau par rapport à u_j
12: $AssistanceCommande(u_i)$ Activation de la fonction d'assistance à la manipulation
13: **fin si**
14: **si** $Niveau2 > Seuil1$ **alors**
15: $GuideCorrectifDescente(u_j)$
16: $AssistanceCommande(u_i)$
17: **fin si**
18: **si** $Niveau1 < Seuil2$ **alors**
19: $GuideCorrectifMonte(u_{j-1})$
20: $AssistanceCommande(u_i)$
21: **fin si**
22: **si** $Niveau2 < Seuil2$ **alors**
23: $GuideCorrectifMonte(u_j)$
24: $AssistanceCommande(u_i)$
25: **fin si**
26: **fin pour**

Algorithme 6 L'algorithme de la fonction de commande (dans le cas de deux utilisateurs)

Entrées: $VU_{u_1}, VU_{u_2}, VS_{s_0}$

Sorties: Modification de l'interprétation de la commande

1: **si** $Sens(V_{u_1})$ et $Sens(V_{u_2})$ sont identiques **alors**
2: **si** (V_{u_1} et V_{u_2}) > Seuil **alors**
3: $V_{s_0} = Constante$
4: $CouleurAvatar(u_1) = Rouge$
5: $CouleurAvatar(u_2) = Rouge$
6: **fin si**
7: **fin si**
8: **si** $Sens(V_{u_1})$ et $Sens(V_{u_2})$ sont opposés **alors**
9: **si** ($|V_{u_1}| < Seuil2$ et $|V_{u_2}|) < Seuil2$ **alors**
10: $V_{s_0} = 0$
11: **fin si**
12: **si** ($|V_{u_1}| > Seuil2$ et $|V_{u_2}|) > Seuil2$ **alors**
13: $P_{s_0} = Deplacement_Source(VU_{u_1}, VU_{u_2})$
14: **fin si**
15: **fin si**

Néanmoins, un problème apparaît et concerne la mobilité du mécanisme. Il est nécessaire de proposer les bonnes liaisons et de limiter l'accès aux utilisateurs, si par exemple l'ajout d'un nouvel utilisateur peut potentiellement bloquer le mécanisme et donc par conséquent le mouvement. Pour cela, une fonction de restriction a été mise en place afin de limiter l'accès à une source, le principe est illustré sur la figure 4.23. Elle permet aussi de modifier les liaisons utilisateurs/sources pour permettre l'ajout d'un nouvel utilisateur (ajout d'une nouvelle pièce au mécanisme).

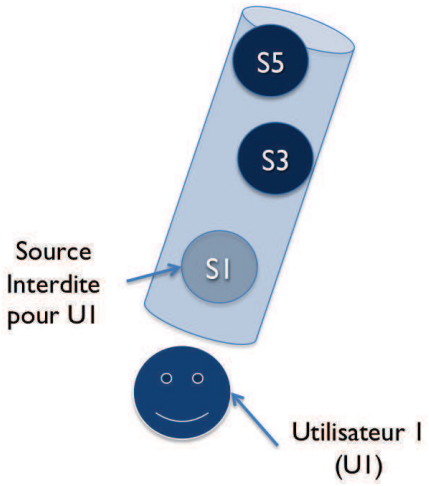


FIGURE 4.23: Illustration du principe de restriction de certaines sources

4.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un modèle de gestion du workflow pour les environnements virtuels collaboratifs (EVC) favorisant la coordination des utilisateurs pour qu'ils puissent interagir ensemble. Ce modèle repose sur la fusion des deux trèfles fonctionnels provenant respectivement du domaine du TCAO et du domaine de l'interaction 3D. Le nouveau trèfle permet de définir un EVC et par conséquent l'interaction 3D multi-utilisateurs dans ce dernier. Pour cela, nous utiliserons la boucle perception-interaction des applications de Réalité Virtuelle afin de la perturber pour ajouter une composante de workflow qui se base sur le nouveau trèfle. Le workflow va modifier le comportement des utilisateurs en fonction des actions qu'ils exécutent dans le but de réaliser des actions collectives (Navigation, Sélection, Production et Communication).
Pour cela, nous découpons la composante workflow en deux parties: une partie partagée qui représente l'état des objets et des utilisateurs et une autre assurant la coordination des utilisateurs. Pour les données partagées, nous avons caractérisé les différents utilisateurs et éléments de l'EVC par des vecteurs d'états. L'ensemble de ces vecteurs d'états forment les matrices d'états de l'EVC. Ces matrices d'états sont utilisées, d'une part, pour que les utilisateurs puissent connaître l'état des autres utilisateurs, d'autre part, elles permettent au système de fournir les bons outils afin d'assister les utilisateurs durant les actions collectives. Pour ce qui est de la partie coordination, cette dernière va exploiter les données partagées afin d'assister les utilisateurs dans les actions communes. A cela, nous utilisons une décomposition spatiale de l'EVC en différentes composantes (aura, focus, assistants, etc.) afin de déterminer les différents états et actions que les utilisateurs effectuent.

Chapitre 5

Vers une plateforme d'assistance à l'évaluation des systèmes d'interaction 3D

Mots clés Evaluation Empirique, Interaction 3D, Assistance.

5.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le troisième chapitre, l'évaluation des techniques d'interaction 3D est un processus long, complexe et difficile à mettre en oeuvre. En effet, l'interaction 3D est très éloignée de l'interaction 2D. L'interaction 2D se réalisent le plus souvent par l'intermédiaire du couple clavier-souris associé aux interfaces graphiques que nous utilisons sur nos ordinateurs. Elle est aujourd'hui maitrisée et il est possible de prévoir les performances grâce à de nombreux modèles prédictifs. Le domaine de l'interaction 3D plus généralement le domaine de la réalité virtuelle n'est pas encore mûr, à cause de nombreuses barrières : peu de spécialistes, pas de standards, peu de connaissances ou encore la diversité des IHM contrairement au couple clavier-souris. Par conséquent, il est très difficile de prédire les performances où bien de suivre des indications pour concevoir une bonne interaction 3D, comme cela existe en 2D. Il est donc nécessaire de procéder à une évaluation empirique.

Pour étayer nos propos, nous pouvons citer l'étude menée par [Dünser et al., 2008]. Dans celle-ci, les auteurs ont étudié des publications dans lesquelles étaient réalisées des évaluations avec de la Réalité Augmentée. Leurs conclusions montrent que le manque d'évaluations en Réalité Augmentée est dû à la difficulté de création des protocoles, aux choix des méthodes ou à l'analyse de résultats. Cette étude est totalement adaptable au

domaine de la réalité virtuelle. De plus les récents travaux sur l'interaction 3D multi-utilisateurs apportent des nouvelles contraintes de conception comme la coordination ou la communication des participants dans l'EVC. C'est dans ce contexte, que la seconde partie du chapitre 3 est orientée sur la présentation de l'approche empirique.
Les évaluations empiriques sont composées de nombreux indicateurs de performances subjectifs et objectifs. La problématique même de l'évaluation empirique est résumée par la figure 5.1. Celle-ci illustre, les nombreux paramètres nécessaires pour évaluer une technique d'interaction 3D. Un mauvais choix peut entraîner des résultats faux ou encore inexploitables.



FIGURE 5.1: Illustration de la problématique d'une évaluation. De nombreux paramètres sont à prendre en compte

Ces constatations nous amènent à proposer un outil permettant d'assister l'expérimentateur durant la conception des évaluations. Plus généralement, il permet d'assister les concepteurs de techniques d'interaction 3D. Dans ce qui suit, nous présenterons tout d'abord l'approche du problème que nous avons retenu. Ensuite, nous présenterons la modélisation de notre approche suivie d'une implémentation informatique de cette dernière.
Plusieurs étapes ont mené à cet outil et plusieurs publications en ont découlées: tout d'abord le concept initial a été publié dans [Domingues et al., 2007] ainsi que les premières implémentations de l'outil à ces débuts [Domingues et al., 2008c] et [Domingues et al., 2008a]. Nous avons publié une revue [Domingues et al., 2010] qui présente le concept de manière plus avancée.

5.2 Spécification et Modélisation

5.2.1 Introduction

Le domaine de l'interaction 3D a plusieurs thèmes de recherche comme l'évaluation des méthodes d'interaction ou encore la conception de nouvelles techniques. Plus généralement, l'objectif de l'évaluation est de déceler les problèmes ergonomiques des systèmes. En effet, lors de l'utilisation d'un quelconque système, l'utilisateur ne devrait pas se poser des questions comme "comment faire pour déplacer l'objet ?". Cela dans l'optique de la création d'interactions intuitives et transparentes pour l'utilisateur. L'évaluation des interfaces et de l'interaction homme-machine est issue de divers domaines : de l'ingénierie, de l'ergonomie et de la psychologie. L'évaluation ne s'effectue pas seulement lorsque le système est terminé, mais se retrouve au fur et à mesure du cycle de développement du système.
L'évaluation empirique est privilégiée pour évaluer l'interaction 3D car le manque de connaissances ne permet pas encore d'avoir des modèles prédictifs ou des guides de conception. L'évaluation empirique permet de faire une évaluation à partir d'un recueil et d'une analyse de données. Les données sont issues de l'utilisation de la technique d'interaction faite par les utilisateurs. Les évaluateurs effectuent une sélection de tâches qui seront utilisées pour l'évaluation ou encore laissent l'utilisateur évoluer librement dans l'environnement virtuel. Le système se doit d'être fiable et opérationnel afin d'éviter la frustration des utilisateurs ou, tout simplement, d'obtenir des résultats mettant en avant la non fiabilité du système ou la non utilisabilité des fonctionnalités.

5.2.2 Qu'évaluer?

La première question que nous nous sommes posés, a été la suivante: "Qu'évaluer? Est ce le dispositif? Est ce la technique?". En effet, on distingue dans une application de réalité virtuelle, différentes composantes comme les dispositifs d'interaction homme machine et la technique d'interaction 3D.
Pour répondre à ces questions, nous nous sommes appuyés sur le schéma technocentrique de la Réalité Virtuelle. Dans [Burkhardt, 2003], les auteurs ont exploité le schéma technocentrique de la Réalité Virtuelle et ont proposé des objectifs d'évaluation en fonction des trois niveaux d'Immersion et d'Interaction que le concepteur doit évalué séparément :

- Immersion et Interaction Sensori-motrices: l'évaluation de ce niveau concerne les dispositifs utilisés dans l'évaluation;

- Immersion et Interaction Cognitives: l'évaluation de ce niveau concerne l'aspect cognitif de l'utilisateur;
- Immersion et Interaction Fonctionnelles: l'évaluation de ce niveau concerne les fonctionnalités désirées du système de réalité virtuelle.

L'évaluation de l'Immersion et de l'Interaction fonctionnelles se focalise uniquement sur la fonction désirée de l'environnement virtuel. C'est sur ce point que nous allons focalisé notre outil d'évaluation (voir figure 5.2). Nous devons dans ce cas vérifier par exemple, l'efficacité d'une technique d'interaction. Un expérimentateur voulant évaluer une nouvelle technique de sélection va en général, la comparer à d'autres techniques existantes afin de constater l'apport de cette dernière dans des tâches spécifiques.

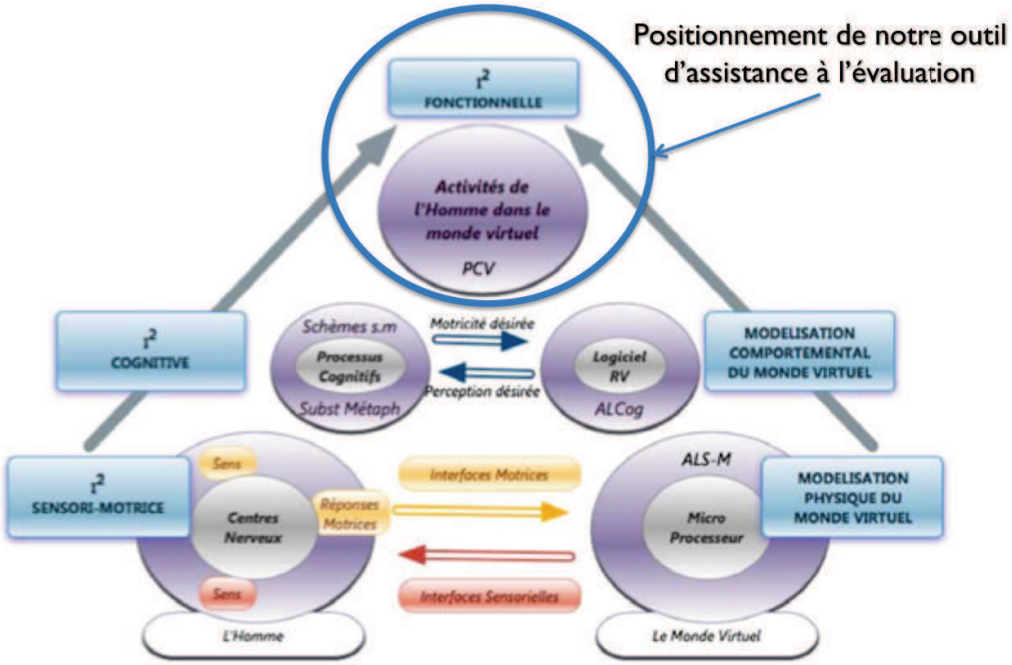


FIGURE 5.2: Positionnement de notre outil d'assistance à l'évaluation. Extrait de [Fuchs et al., 2006b]

En fonction de ce que l'évaluateur souhaite évaluer, il va devoir :

- Choisir des indicateurs permettant de mesurer certaines données quantitatives comme le temps ou la vitesse;
- Concevoir des questionnaires permettant de mesurer des données qualitatives comme la satisfaction ou les préférences;
- Choisir des facteurs pour tester les techniques dans différents cas de figure. Cela peut se traduire par une modification de la taille des objets à sélectionner;

- Concevoir un scénario d'utilisation de la technique;
- Réaliser une phase d'analyse des résultats afin de vérifier ou réfuter les hypothèses qu'il a souhaité vérifier.

Ces choix vont définir un protocole expérimental qui nous informe sur le déroulement de l'expérience : les éléments à mesurer, les éléments à faire varier ou encore l'enchaînement des essais utilisateurs afin d'obtenir des résultats analysables. De plus, nous pouvons identifier une première phase de développement où le concepteur va intervenir pour corriger certains aspects (par exemple les paramètres internes de la technique). Cette phase ne nécessite pas de faire appel à des utilisateurs. La mise en place de l'évaluation va aussi faire intervenir le concepteur. Ce dernier va devoir tester ce qu'il demande de réaliser aux utilisateurs est possible. Cette phase va permettre d'ajuster des éléments comme la position initiale des objets à sélectionner avant de lancer l'évaluation.

5.2.3 Comment assister l'évaluateur?

Nous nous orientons donc vers un outil permettant d'aider à la réalisation des évaluations empiriques. Cependant, la finalité de notre outil n'est pas de remplacer les experts en évaluation. Celui-ci ne doit pas se substituer à une évaluation finale par des experts mais il permet d'aider le concepteur à évaluer, plus rapidement, plus fréquemment et plus facilement afin d'obtenir à une technique d'interaction 3D plus aboutie :

- "Plus rapidement" nous amène à nous poser la question suivante: "Les connaissances de ce domaine ne devrait-il pas être centralisées?" ;
- "Plus fréquemment" nous amène à nous poser la question suivante: "La mise en place d'une évaluation empirique ne doit-il pas être plus simple, afin d'évaluer plus souvent?" ;
- "Plus facilement" nous amène à nous poser la question suivante: "L'aide au choix des bons éléments ou des bons paramètres ne doit-elle pas être plus simple et documentée ?"

Par conséquent, notre proposition doit intervenir dans le cycle de développement de la technique d'interaction et se focalisera uniquement sur la phase de tests du *cycle en V* (voir figure 5.3) ce qui permettra après tests de redéfinir la technique d'interaction du point de vue conception si nécessaire.

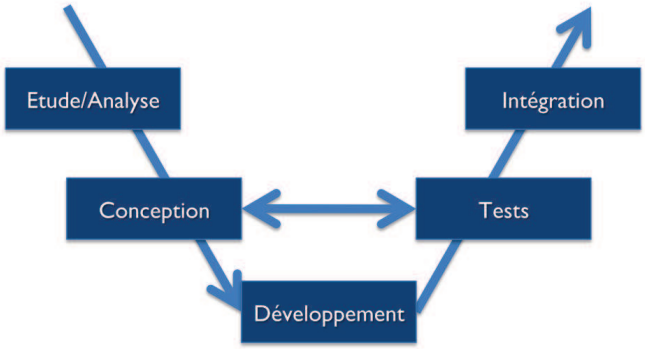


FIGURE 5.3: Le cycle en V simplifié

Les objectifs voulus et l'approche choisie nous oriente vers l'utilisation d'un système permettant de construire un protocole en choisissant les bons éléments à mesurer pour analyser les données. Pour choisir les bons éléments, nous souhaitons exploiter l'historique d'évaluations déjà réalisés avec ou sans l'outil. Des techniques de fouilles de données (data-mining) permettent d'identifier des règles. Les règles extraites permettent de définir des liens logiques entre les éléments composants un protocole car nous pensons que les types d'éléments sont choisis logiquement et sont dépendants les uns par rapport aux autres. Concernant la mesure et l'analyse des données, nous pensons à une approche permettant de contrôler le déroulement de l'évaluation en mesurant les données choisies au préalable de manière automatique. Ces données seront ensuite soumises à une analyse.

L'outil que nous proposons se nomme 3DUI-EF (3D Users Interfaces - Evaluation Framework) et a pour but de permettre une mise en place facile d'évaluations empiriques. Le système d'évaluation est composé de deux outils distincts. Le premier outil permet la conception du protocole expérimental en exploitant une base de données qui intègre les résultats d'évaluations antérieures. Le second outil permet de mesurer, d'analyser les données et de gérer le déroulement de l'évaluation. Il permet dans la phase de pré-évaluation de régler des problèmes comme par exemple l'ajustement des trajectoires pour l'évaluation d'une technique de navigation où on souhaite la comparer à d'autres techniques. La figure 5.4 illustre le concept de notre outil d'assistance à l'évaluation où l'on retrouve les deux outils.

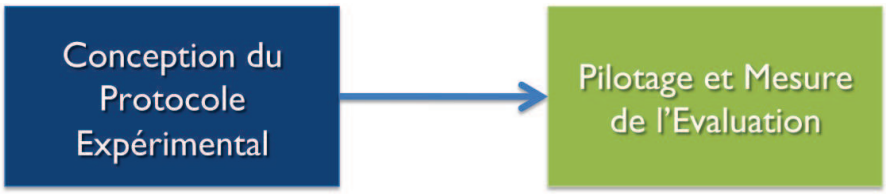


FIGURE 5.4: Illustration du concept pour notre outil d'évaluation. Celui-ci distingue deux outils, l'un destiné à la conception de protocoles, le second permettant la récupération des données. Le lien entre les deux outils, signifie qu'il est nécessaire de concevoir au préalable le protocole avant de procéder à l'enregistrement des données.

5.3 La création du protocole expérimental

5.3.1 Conception de l'outil

Par définition un protocole expérimental consiste à tester par des expériences répétées la validité d'hypothèses afin d'obtenir des résultats quantitatifs ou qualitatifs. Il regroupe la description des conditions et du déroulement du test. La mise en place d'un protocole passe par une première phase de préparation où le concepteur va mettre en place une tâche à réaliser via sa technique d'interaction. Une fois que cette étape est réalisée, le concepteur va choisir les éléments mesurables et les facteurs influents permettant de vérifier ou de réfuter les hypothèses. Nous proposons une procédure de création des protocoles débutant par l'identification des dispositifs que le concepteur souhaite utiliser pour valider sa technique puis les indicateurs et les facteurs. Une fois que les résultats sont obtenus, nous souhaitons l'aider aux choix des outils d'analyses. La figure 5.5 illustre le déroulement de création du protocole jusqu'à l'analyse des données.

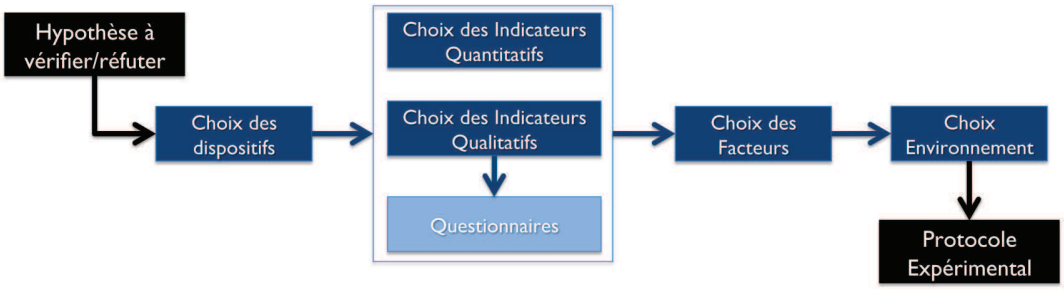


FIGURE 5.5: La méthodologie retenue pour la création du protocole afin de vérifier/réfuter l'hypothèse

Afin de fournir une aide aux choix des indicateurs et facteurs, nous exploiterons des données d'évaluations antérieures. De ces données sont extraites des règles permettant de lier logiquement indicateurs, dispositifs, questionnaires et facteurs influents. Les règles sont déterminées par des algorithmes de fouilles de données ou data-mining. Le

data-mining a pour objet l'extraction de connaissances à partir de grandes quantités de données par des méthodes automatiques ou semi-automatiques. Le data-mining ne nécessite pas d'hypothèses de départ contrairement aux méthodes statistiques traditionnelles. Il est utilisé dans différents secteurs pour :

- Analyser des comportements, en particulier dans la grande distribution, afin de trouver des corrélations entre produits;
- Prédire des événements. Par exemple, les indices de comportement qui permettent de détecter qu'une entreprise va perdre un client;
- Détecter des comportements suspects. On retrouve cette utilisation dans le domaine bancaire pour la détection de fraudes ou d'escroqueries;
- Rechercher des critères pour permettre d'établir des relations;
- Suggérer des informations

Ces méthodes sont classées en deux familles, les méthodes supervisées et les méthodes non supervisées. Par non supervisée, on entend les méthodes qui permettent de travailler sur des données ou des variables qui n'ont pas de relations les unes par rapports aux autres afin d'analyser ou de rechercher des informations. Les techniques supervisées vont s'intéresser à des variables dans la base de données pour prédire, détecter et suggérer des relations. Les méthodes de data-mining font appel à différents types d'algorithmes :

- Structurés: pour identifier des groupes afin de découvrir des comportements;
- Descriptifs: pour trouver des conclusions sur les données;
- Explicatifs: pour prédire des éléments à partir d'autres éléments;
- Associatifs: pour trouver des liens entre les éléments.

L'utilisation du data-mining pour les besoins de notre outil, nous a amené à choisir deux règles. Les règles d'explication qui vont nous permettre de faire le lien entre les périphériques spécifiés par l'utilisateur et les indicateurs. La règle d'explication utilisée par notre outil est basée sur un algorithme d'apprentissage supervisée appelé C4.5 [Quinlan, 1993]. Une classification est supervisée quand toutes les données sont étiquetées cela permet de produire automatiquement des règles à partir d'une base de données qui contient des exemples de cas déjà traités. En second, les règles d'association vont permettre de faire le lien entre les indicateurs de performances et les facteurs. Les propositions de ces règles permettront de guider l'expérimentateur dans la conception du

protocole. Cependant, elles ne seront pas imposées. Le déroulement de la méthodologie est illustré par la figure 5.6.

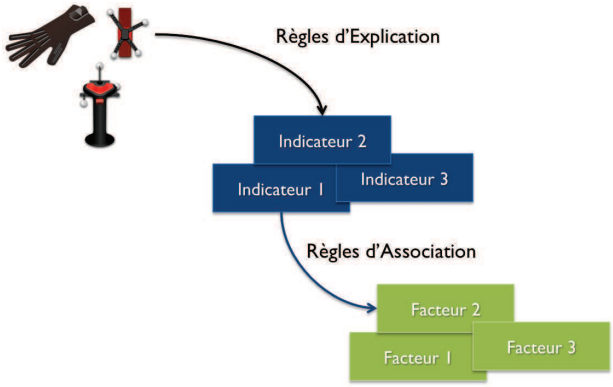


FIGURE 5.6: Illustration du lien entre les différents éléments pour la construction du protocole

L'algorithme C4.5 nous fournit un arbre de décision qui est utilisé pour trouver les relations entre les périphériques et les indicateurs potentiellement exploitable. Les règles d'association pour déterminer des relations entre indicateurs et facteurs. Là encore, l'expérimentateur peut contrôler les éléments manuellement malgré les propositions automatiques du système. Le choix des indicateurs subjectifs va donner la possibilité à l'utilisateur de choisir les questionnaires associés. Pour ce qui est des facteurs, ce sont des règles d'association qui sont utilisées afin de les relier avec les indicateurs choisis.

5.3.2 Implémentation de l'outil

Nous avons exploité la plateforme EVR@ pour implémenter notre outil d'évaluation. L'outil d'évaluation est lui même composé de deux outils. Un premier basé sur une application WEB, qui permet la conception d'un protocole, la récupération de résultats de questionnaire, de concevoir et préparer l'environnement virtuel qui va être utilisé pour évaluer et piloter le déroulement de l'évaluation. Cela s'opère par un enregistrement de toutes les informations du protocole dans un fichier informatique qui sera lu par le second outil. C'est second outil qui a en charge le pilotage et la récolte des données quantitatives durant l'évaluation. Cet outil utilise notre bibliothèque de modules présentée précédemment.
Une base de données et un serveur web ont été ajoutés afin d'implémenter cet outil. La base de données permet de stocker les connaissances sur l'évaluation (indicateurs, facteurs, protocoles antérieurs, etc) sur laquelle nous appliquons les algorithmes de data-mining (voir figure 5.7). L'utilisation d'un serveur web permet l'utilisation de l'outil de conception de protocole de manière indépendante de Virtools. Il peut être utilisé

par d'autres concepteurs pour les assister à concevoir les protocoles. L'outil de conception de protocoles est une application WEB basée sur le CMS (Content Management System) Drupal 6. Nous exploitons certains fonctions de Drupal (questionnaires par exemple) mais nous avons dû intégrer des fonctions supplémentaires. Cet outil offre deux vues: une première vue uniquement dédiée au participant à l'évaluation en affichant les différents questionnaires afin de récolter les données qualitatives. La seconde vue dédiée au concepteur permettant d'une part de récupérer les résultats des questionnaires mais aussi de concevoir des protocoles expérimentaux via l'assistant mis en place. Le protocole construit est enregistré dans la base de données pour alimenter les algorithmes de data-mining.

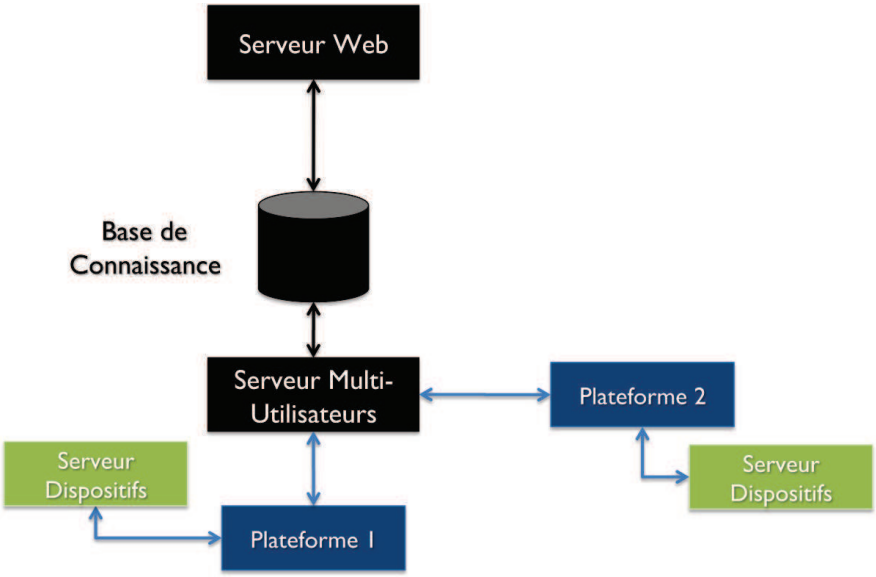


FIGURE 5.7: L'architecture technique de la plateforme

Assistant aux choix des paramètres L'assistant de conception du protocoles est composé de plusieurs formulaires qui permettent de bâtir l'évaluation. Le concepteur est guidé dans sa conception via l'utilisation du data-mining. Il est libre de choisir les éléments qu'ils souhaitent. Lorsque le choix des facteurs est à réaliser, le concepteur doit spécifier les variations à réaliser, à partir d'une liste disponible. Ces variations seront utilisées par les contrôleurs afin d'obtenir des informations.

Les questionnaires L'outil assurant la gestion des questionnaires se décomposent en deux parties. Une première partie permettant de construire le questionnaire via des questions disponibles dans la base de données. Le système est capable de proposer des questions en fonction des indicateurs qualitatifs choisis. Le concepteur a la liberté de choisir lui même les questions (voir figure 5.8) et peut donc parcourir la base de données.



FIGURE 5.8: Création d'un questionnaire pour une évaluation

Il peut écrire de nouvelles questions ainsi que les réponses et peut les rattacher à des indicateurs existants pour que le système puisse par la suite proposer des questions si l'indicateur est choisi. Une seconde partie se consacre au point de vue utilisateur. Cela permet à l'utilisateur de répondre aux questions via l'interface (voir figure 5.9). Le concepteur pourra alors obtenir directement les résultats de chacune des questions et les exporter pour ensuite les analyser.



FIGURE 5.9: L'interface pour la réponse aux questions du questionnaire

Les techniques d'interaction et les environnements pour l'évaluation En exploitant notre bibliothèque, nous avons développé des modules spécifiques. Ces modules représentent des techniques d'interaction et des environnements virtuels basiques. Pour ce qui est des modules de techniques d'interaction, ce sont des modules permettant d'utiliser des techniques que l'on retrouve dans la littérature. Un module HOMER permet d'avoir les objets 3D nécessaires et les algorithmes permettant le fonctionnement de la technique. Ils permettent d'effectuer des évaluations comparatives. Pour les modules d'environnements virtuels, ils sont composés d'objets 3D. Pour une technique de sélection, l'environnement sera composé d'objets à sélectionner. Pour un environnement de navigation, celui ci sera composé d'obstacles. Le choix de ces modules se réalise de manière similaire au choix des indicateurs et facteurs.

5.4 Pilotage et mesure de l'évaluation

5.4.1 Conception de l'outil

Une fois que le protocole est construit, le concepteur va devoir déterminer la tâche à réaliser dans le but de récolter les données désirées. Pour construire la tâche à réaliser, notre approche consiste à assembler deux types de sous-tâches :

- Déplacement: contraindre au déplacement d'un point A à un point B;
- Désignation: permet de valider la sélection d'un objet.

L'assemblage permet d'obtenir un scénario. Ce scénario sera piloté par l'outil d'évaluation qui va de plus assurer la récolte des informations désignées durant la conception du protocole mais aussi modifier certains paramètres en fonction du protocole construit. En effet, lors de l'évaluation d'une technique de navigation, il est très courant de mettre en place plusieurs parcours avec/sans obstacles que les utilisateurs doivent suivre. L'expérimentateur va vouloir procéder à plusieurs mesures comme le temps, les erreurs de trajectoire, etc. Une sous-tâche de navigation va permettre de spécifier un point de départ et un point d'arrivé que l'utilisateur devra atteindre. En combinant plusieurs sous-tâches les unes après les autres, il est donc possible de construire une trajectoire à suivre et donc de réaliser une étude sur une technique de navigation. De manière analogue, pour une tâche de sélection, l'expérimentateur va pouvoir spécifier un objet de l'environnement à saisir. Il est possible en combinant différentes sous-tâches afin de construire des missions mixtes comme par exemple, une sélection mais précédée d'un déplacement.
En prenant par exemple, l'évaluation d'une technique de sélection où un concepteur a décidé de contraindre l'utilisateur à passer par des points de passages obligatoires avant de sélectionner l'objet, nous pouvons construire cela sous forme d'un scénario en assemblant plusieurs sous tâches de déplacement puis une tâche de désignation pour valider la sélection de l'objet. Si dans le protocole, le facteur taille de l'objet a été défini, au prochain essai, l'utilisateur devra refaire la même tâche mais avec un objet de taille différente. La modification de certains paramètres permet donc de modifier les différents facteurs désignés lors de la conception du protocole. Cela dans le but d'obtenir plusieurs cas en fonction de différents paramètres. Les données quantitatives choisies sont mesurées pour chaque sous tâche et chaque essais afin de pratiquer des analyses. La figure 5.10 illustre conceptuellement le pilotage d'une évaluation. Ce sont les indicateurs et facteurs désirés qui vont déterminer le déroulement de l'évaluation. Ici deux sessions car le facteur possède deux valeurs.

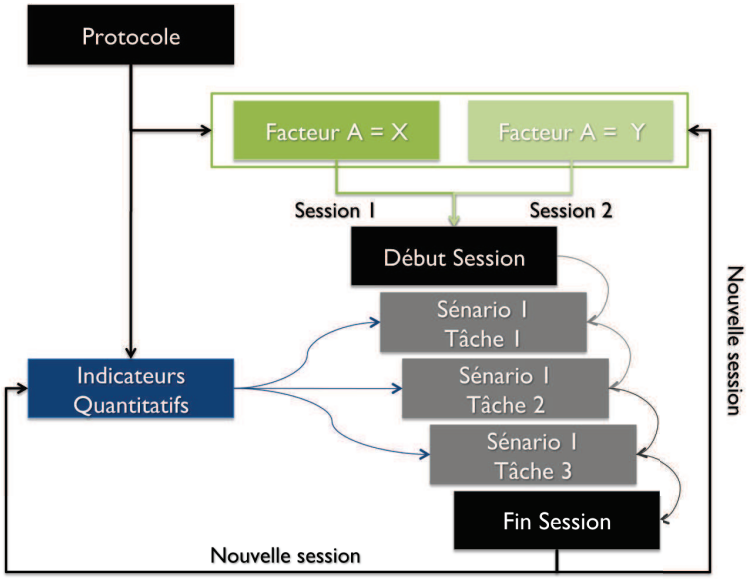


FIGURE 5.10: Le déroulement d'une évaluation. Le facteur A possède deux valeurs, ce qui signifie que l'utilisateur devra réaliser un essai pour chaque valeur du facteur A.

Ensuite, suit une phase de récupération des données qui permettra l'analyse. La figure 5.11 illustre la démarche empruntée pour l'utilisation de l'outil de pilotage de l'évaluation.

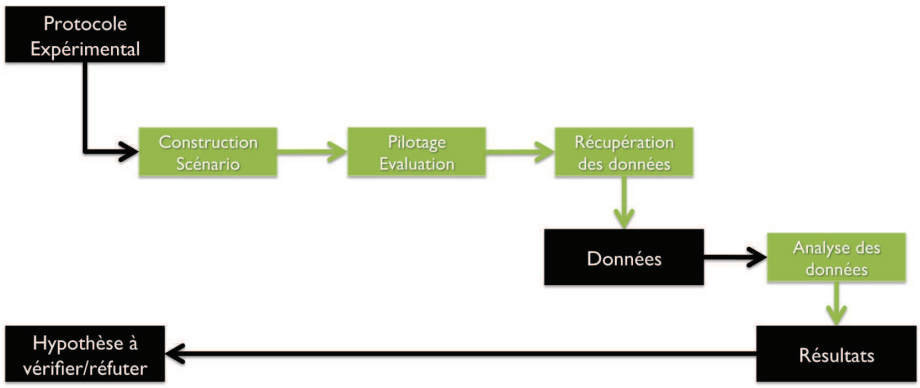


FIGURE 5.11: La méthodologie retenue pour le pilotage de l'évaluation afin de vérifier/réfuter l'hypothèse

5.4.2 Implémentation de l'outil

Contrairement à l'outil de conception de protocoles, les fonctions de mesure, d'analyse et de gestion seront implémentées sur Virtools et donc dépendantes de ce dernier. Cependant les principes sont applicables sur d'autres plateformes de développement. L'outil de pilotage de l'évaluation est implémenté via un module sur la plateforme logicielle de l'équipe. La plateforme logicielle est décrite dans l'annexe B. Cette dernière permet la capitalisation des développements. Elle exploite des modules fonctionnels gérés par

un noyau. Cela permet d'assembler différentes modules fonctionnels et par conséquent d'ajouter des nouvelles fonctions d'applications de RV construites. L'outil d'évaluation est donc un module s'intégrant dans ces applications. Un exemple est illustré sur la figure 5.12 ou nous pouvons voir les modules multi-utilisateurs et périphériques.

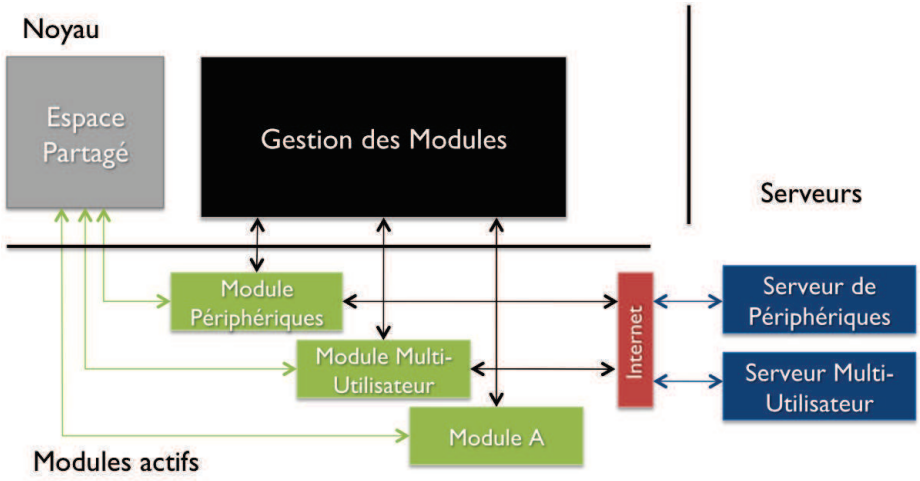


FIGURE 5.12: Illustration de l'intégration de différents modules fonctionnels

Plus précisément, le module d'évaluation se décompose de quatre composantes principales :

- Le gestionnaire des sondes: les sondes sont des éléments permettant de récolter les indicateurs quantitatifs disponibles lors de la conception du protocole. Elles sont gérées par le gestionnaire et activées ou désactivées si nécessaire en fonction du scénario établi;
- Le gestionnaire des contrôleurs: les contrôleurs sont des éléments permettant de faire varier les facteurs. Lors de la conception du protocole l'utilisateur va choisir des facteurs disponibles ainsi que les jeux de variations possibles. Les contrôleurs sont gérés par le gestionnaire qui permet de donner l'ordre de modification en fonction du scénario;
- Construction/gestion de scénarios: le constructeur et gestionnaire de scénario permet à partir des sous-tâches de construire un scénario que les utilisateurs doivent respecter. Cette composante a aussi la charge de gérer le déroulement de l'évaluation;
- Gestion de l'environnement virtuel: cette composante permet de réaliser la passerelle entre les éléments de l'environnement virtuel et les sondes ou contrôleurs agissant durant l'évaluation.

La figure 5.13 illustre l'architecture conceptuelle du module "Evaluation" et les relations entre les différentes composantes.

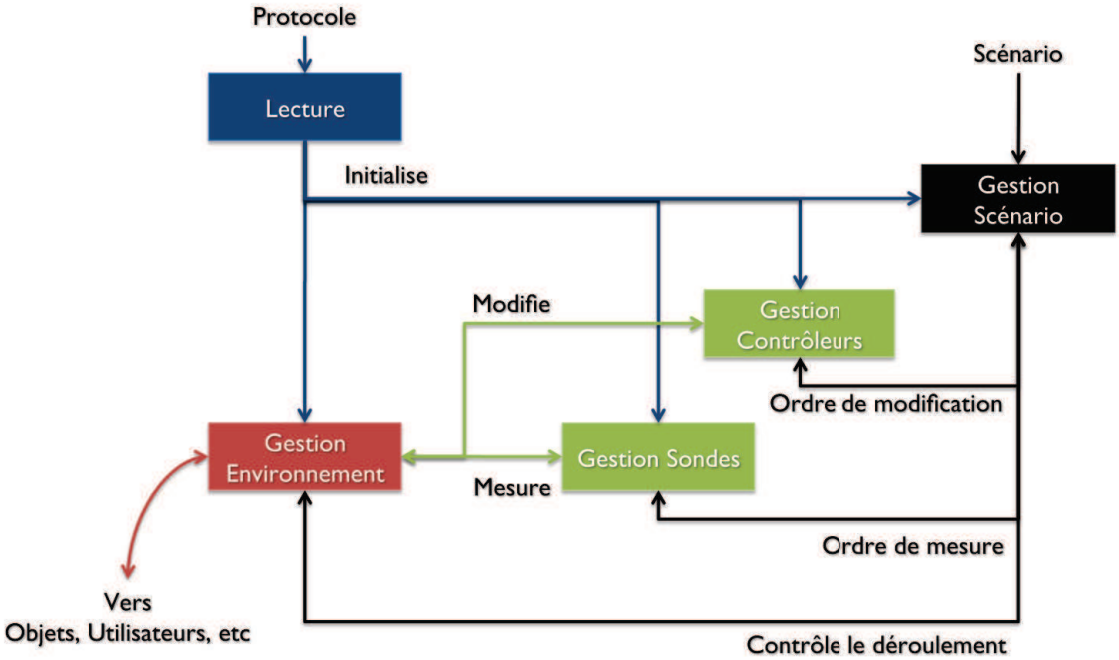


FIGURE 5.13: Architecture conceptuelle du module d'évaluation

Après la lecture du protocole et du scénario construit, le module évaluation peut piloter. La composante "Gestion Scénario" a la responsabilité de donner les différents ordres de mesure ou de modification de paramètres au cours de l'évaluation. Cette dernière va de plus, assurer le changement des sessions composant l'évaluation. La figure 5.14 illustre le gestionnaire de mission en cours de fonctionnement durant l'évaluation 1 du chapitre précédent.

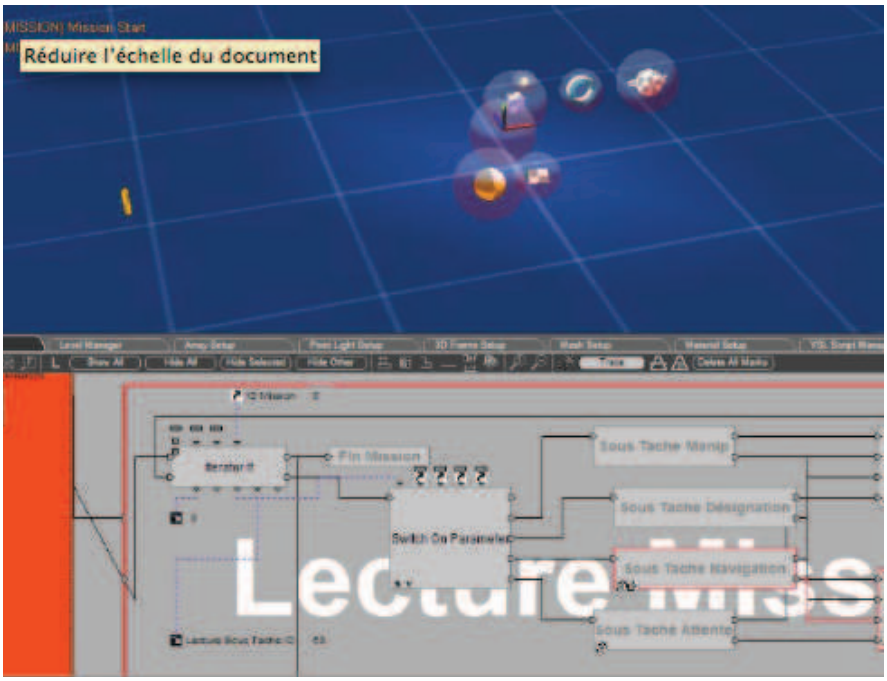


FIGURE 5.14: Illustration du gestionnaire de mission en cours de fonctionnement pour l'évaluation 1 du chapitre 4.

Les sondes de mesure Pour mesurer, on exploite des sondes permettant la récupération des données quantitatives pendant l'évaluation. Ces données sont issues de sources hétérogènes: les dispositifs, le système ou encore la tâche que l'utilisateur réalise (déplacement de son avatar, erreurs de sélection commises). Les sondes sont gérées par le pilote de l'évaluation qui a la capacité de les activer ou bien de les désactiver en fonction du protocole expérimental et du scénario établi. Si aucun pilotage est actif, le concepteur peut spécifier les sondes qu'il souhaite afin de mesurer les données. Cela lui permet dans des phases de développement de modifier certains paramètres. Les données peuvent être affichées via le logiciel Matlab en temps réel. Le détail des sondes est donné dans l'annexe C.

Sondes Tâche Ce type de sondes est dédiée aux mesures concernant la tâche réalisée par les utilisateurs durant l'évaluation. Par exemple, une sonde temps s'occupera de la mesure du temps de chaque sous-tâche composant la mission et une sonde vitesse de la vitesse de déplacement de l'utilisateur.

Sondes Système Les sondes systèmes sont quant à elles dédiées à la mesure des données de l'environnement virtuel et de la machine l'accueillant. On trouve dans cette catégorie des sondes permettant le mesure du débit réseau, du nombre d'objets visibles ou encore du nombre d'images par secondes.

Sondes Interface Les sondes interface concernent la mesure des données des interfaces homme machine d'entrée et de sortie. Des sondes sont dédiées à la récupération des données provenant des dispositifs de Réalité Virtuelle.

Les contrôleurs Pour modifier les paramètres de l'évaluation, on utilise des contrôleurs qui ont en charge de modifier un facteur (modifier les couleurs d'un objet par exemple). Les facteurs et les variations possibles sont inscrits dans le protocole expérimental. Le protocole expérimental fournit aux contrôleurs les différentes variations spécifiées pour les facteurs (voir la figure 5.15 pour un exemple d'utilisation).

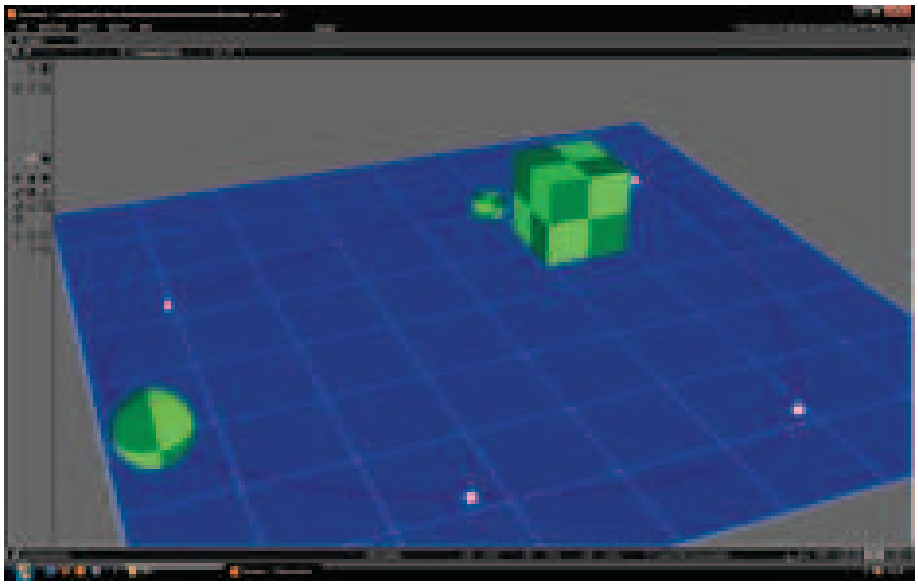


FIGURE 5.15: Illustration du résultat de deux contrôleurs ayant la capacité de modifier la taille et la couleur des objets de l'environnement

Contrôleurs Tâche Les contrôleurs tâche peuvent modifier les paramètres des objets comme la taille des objets ou encore leurs couleurs pour des l'évaluation de tâche de sélection/manipulation. Pour la navigation, des contrôleurs peuvent ajuster la position initiale de l'utilisateur ou modifier le nombre/type d'obstacles.

Contrôleurs Système et Interface Ces contrôleurs peuvent modifier les paramètres du système comme l'ajout d'un retard réseau ou la modification de la qualité d'une texture en modifiant sa taille. Les contrôleurs interfaces peuvent modifier par exemple un mode de visualisation en passant de la vision monoscopique à la vision stéréoscopique. Ces derniers sont donc dédiés à l'interface homme machine.

La gestion et la création des scénarios La création d'un scénario permet au concepteur de réaliser la mission que les utilisateurs vont devoir réaliser lors de l'évaluation. Pour cela une interface lui permet de spécifier les sous-tâches qu'il souhaite utiliser. Le scénario est un assemblage de sous-tâches. Pour chaque sous-tâche, il est nécessaire de spécifier différents paramètres: Pour un déplacement, il est nécessaire de spécifier le point de départ et le point d'arrivé. Le concepteur se déplace manuellement dans l'environnement et valide dans un premier temps, le premier point puis le second point. Le système lui propose alors d'ajouter une nouvelle sous-tâche ou de terminer le scénario. Les points spécifiés permettent de construire une trajectoire, plus précisément une courbe. Pour une sous-tâche de désignation, cela permet de spécifier l'objet à sélectionner et qui sera ensuite déplacer. Le système effectue une mesure des données désirées via les sondes pour chacunes des sous-tâches du scénario. Cela permet d'avoir des informations sur tout le processus. La figure 5.16 illustre conceptuellement l'intervention de la sonde temps durant l'évaluation.

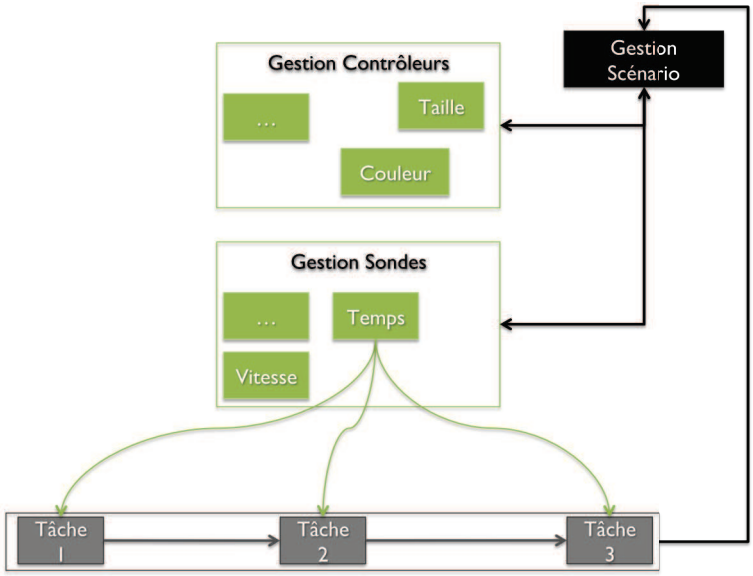


FIGURE 5.16: Illustration de la mise en évidence de l'intervention de la sonde temps durant l'évaluation

5.5 Conclusion

Malgré les avancés technologiques dans le domaine de l'évaluation de l'IHM 3D et de la RV, les recherches dans le domaine de l'évaluation restent encore pauvres par rapport aux techniques existantes pour évaluer les IHM 2D. Pourtant, l'évaluation représente la base nécessaire pour obtenir une interaction efficace dans un EV/EVC. L'évaluation est une tâche complexe qui demande une certaine préparation concernant, le choix des différents éléments qui la compose, de l'environnement virtuel de test et des utilisateurs

qui y participeront.

L'outil d'aide à l'évaluation proposé se décompose en deux éléments: d'une part une partie "pilotage et mesures des variables" au coeur de l'application de RV et d'autre part, une partie "expérimentale" composée d'une base de connaissances regroupant tous les éléments pour la mise en place d'un protocole expérimental (questionnaires, liste des facteurs et indicateurs, références et exemples). Outre la base de connaissance, la partie expérimentale assiste l'évaluateur, pour qu'il puisse faire le bon choix des indicateurs permettant d'obtenir des mesures, mais aussi les facteurs qui modifient fortement ces mesures. Cela est rendu possible par l'utilisation d'algorithmes statistiques de décision permettant de pré sélectionner des paramètres. La partie applicative a été implémentée de manière informatique via Virtools. Cette dernière permet de mesurer les données quantitatives ainsi que de piloter les différents cas de l'évaluation que l'expérimentateur aura spécifié durant la création du protocole expérimental.

Chapitre 6

Expérimentations et Évaluations

Mots clés Évaluation, Interaction 3D mono et multi-utilisateurs, Collaboration, Assistance, Téléoperation.

6.1 Introduction

D'une part, dans le chapitre 4, nous avons présenté notre modèle de gestion et d'organisation de l'interaction 3D d'un groupe d'utilisateurs présents dans un même EVC. Cette contribution a abouti à un modèle de gestion du workflow pour l'interaction 3D multi-utilisateurs assistant les utilisateurs, en favorisant en particulier la coordination. Grâce à l'utilisation de la matrice d'états prévue dans notre modèle, notre système a la capacité de connaître les intentions des utilisateurs (anticipation) lors de la réalisation des tâches d'interaction 3D, afin de fournir des outils d'assistance à la coordination des actions des utilisateurs.
D'autre part, dans le chapitre 5, nous avons présenté une seconde contribution qui prend la forme d'un outil destiné à l'évaluation rapide des systèmes d'I3D en cours de développement. L'outil proposé repose sur le concept d'assistance à l'évaluation et permet, d'une part, de construire de manière assistée un protocole expérimental et, d'autre part, de piloter et de mesurer le déroulement de l'évaluation afin d'établir des analyses statistiques sur la "qualité" du système d'I3D étudié.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les expérimentations préliminaires de notre modèle d'organisation et de gestion de l'interaction 3D (chapitre 4) dans des environnements simples avec l'aide de notre outil d'assistance à l'évaluation (chapitre 5). Deux expérimentations ont été menées et se sont focalisées sur les tâches de navigation/sélection (mono-utilisateur) et de manipulation (multi-utilisateurs). Dans un

premier temps, nous avons mené une expérimentation sur la tâche de sélection afin de vérifier l'apport des fonctions d'assistance issues de l'utilisation de la matrice d'états dans le cas mono-utilisateur, qui est notre cas "limite". La seconde expérimentation concerne la manipulation synchrone d'un objet par deux utilisateurs. L'objectif a été de tester les performances des assistances durant la manipulation d'une planche sur laquelle un cylindre est posé et peu rouler lorsque la planche est inclinée par rapport à la verticale.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le projet de télérobotique ARITI (Augmented Reality Interface for Teleoperation via Internet) [1] qui va permettre d'appliquer notre modèle dans un contexte applicatif réel. ARITI est le premier système en France de téléopération en Réalité Augmentée et est disponible en deux versions distinctes: une version accessible depuis un navigateur Internet [Khezami, 2005] et une seconde version accessible depuis la plateforme de Réalité Virtuelle du laboratoire [Ligeour et al., 2006], permettant un contrôle plus intuitif du robot distant. Ensuite, nous présenterons les développements réalisés durant cette thèse, dont l'objectif est de rendre le système actuel utilisable simultanément via le WEB et la plateforme de RV. Les objectifs sont, d'une part, d'intégrer des capacités multi-utilisateurs sur la version RV et, d'autre part, de permettre la collaboration entre les versions WEB et RV. Les modifications apportées au projet ARITI ont été tout d'abord publiées dans [Boudoin et al., 2008] et [Domingues et al., 2008b], qui présentent les premières avancées techniques, puis dans [Domingues et al., 2009b] et [Domingues et al., 2009a] qui présentent les évolutions successives et des cas d'application.
Pour terminer, nous proposons un protocole expérimental qui permettra, en perspective du travail de thèse, de tester notre méthode d'interaction 3D multi-utilisateurs sur le système ARITI collaboratif.

6.2 Expérimentations du modèle de gestion de l'interaction du groupe

Dans cette section, nous proposons de tester notre modèle d'assistance en établissant deux expériences: l'une, proposant une interaction mono-utilisateur, permet de tester des outils d'assistances pour une tâche de sélection, l'autre dans laquelle nous avons expérimenté une tâche manipulation à deux utilisateurs. Les deux expériences se basent sur le modèle proposé dans le chapitre 4 et utilisent des matrices d'état représentant l'état de l'EVC à un instant précis, permettant d'anticiper les actions dans l'EVC. Cet outil

[1] http://ariti.ibisc.univ-evry.fr

nous permet de déterminer l'intention des utilisateurs à se déplacer vers une source ou de la sélectionner en vue d'une manipulation coordonnée future. Cette connaissance permet d'une part de fournir une assistance dite mono-utilisateur à la navigation des participants (la matrice d'états se basant uniquement sur les données propres de l'utilisateur) et, d'autre part, de fournir une assistance multi-utilisateurs à tous les participants de l'EVC pour favoriser la coordination des actions communes, à partir des données globales de l'EVC (matrices d'états utilisateurs et objets).

6.2.1 Expérimentation et évaluation préliminaire

Nous proposons de tester notre modèle d'assistance et de mesurer les premiers résultats sur son utilisabilité et son efficacité dans le cas mono-utilisateur pour la tâche de sélection.

6.2.1.1 Objectifs

Cette première expérimentation nous permet d'analyser la réaction des participants vis-à-vis de l'utilisation de notre modèle d'assistance ainsi que d'avoir une première appréciation globale des outils d'assistance issus de la matrice d'états. Nous avons fait le choix de proposer un environnement virtuel simple pour cette expérimentation, car nous pensons qu'à ce premier stade de l'évaluation, il est plus important de concentrer l'étude sur le modèle d'assistance. Cette expérimentation a pour objectif de comparer les performances en sélection avec ou sans assistance. La sélection en mono-utilisateur est une tâche préalable nécessaire pour chaque utilisateur de l'EVC avant de manipuler les objets ensemble.

6.2.1.2 Présentation de l'expérimentation

Dispositif matériel La figure 6.1 présente le dispositif expérimental de cette expérience réalisée sur la plateforme EVR@ [2].

[2] http ://evra.ibisc.univ-evry.fr



FIGURE 6.1: L'utilisateur sur la plateforme réalisant la première expérience utilisant un flystick pour interagir dans l'environnement.

La plateforme EVR@ se compose d'un écran de grande taille (3.2mX2.4m) et d'un projecteur DLP 120Hz MIRAGE4000 qui assure une stéréoscopie active. Les lunettes stéréoscopiques sont de type Crystal Eyes 3. Cependant, nous n'avons pas utilisé la stéréoscopie pour notre expérimentation. L'interaction est assurée par un flystick que l'utilisateur tient à la main. Le flystick comporte un ensemble de marqueurs qui permettent le suivi de la main trackée en temps réel grâce à deux caméras infrarouge ARTTrack1.

Description de l'environnement virtuel L'environnement virtuel collaboratif utilisé pour cette expérience est illustré dans la figure 6.2. Il est composé d'un avatar et de plusieurs objets (sphère, cube, cylindre, anneau, etc.). Ces objets peuvent être sélectionnés et sont entourés de leur aura. Celles-ci sont proportionnelles à l'échelle de l'objet, ce qui permet d'éviter d'obtenir des auras de très grandes taille entourant des objets très petits. Tous les objets sont de la même couleur. Les utilisateurs sont représentés par des avatars de forme cylindrique. Les auras varient de couleur, comme nous l'avons expliqué précédemment dans le chapitre 4, et disparaissent lorsque l'utilisateur entre dans la phase de sélection. Les guides virtuels sont de forme conique et ont pour couleur initiale le bleu. Leurs couleurs varient en fonction de la position de l'utilisateur, comme expliqué dans le chapitre 4.



FIGURE 6.2: L'environnement virtuel utilisé pour réaliser la première expérience.

Technique d'interaction 3D Les tâches d'interaction 3D sont assurées par des techniques classiques auxquelles nous avons appliqué notre modèle d'assistance. La navigation est libre et la tâche de sélection est assurée par la technique de la main virtuelle simple. Toutes ces méthodes ont été décrites dans le chapitre 2. Le déplacement de l'avatar nécessite l'appui sur la gâchette du flystick. La validation de la sélection se réalise par l'appui sur le bouton central du flystick (voir figure 6.3).

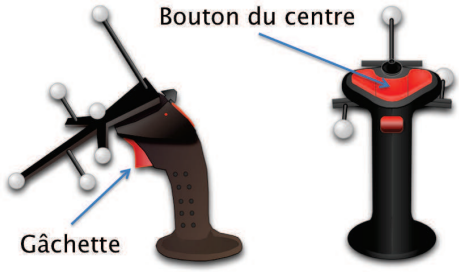


FIGURE 6.3: Gestion des tâches par le flystick

Assistance Dans cette expérience, le vecteur d'état de l'utilisateur (V_U) correspond à la matrice d'état des utilisateurs (ME_U), car il n'y a qu'un seul utilisateur dans l'EVC (voir équation 6.1). Nous avons uniquement utilisé P_{u_0} qui correspond à la position de l'utilisateur u_0 dans l'EVC. À partir de cette matrice d'état, nous allons modifier les couleurs des auras représentées par des sphères, en fonction de la position P_{u_0} de l'avatar. Cette fonction de navigation, qui est présentée dans le chapitre 4 (voir Section 4.3.2), va gérer ce type d'assistance.

$$V_U = ME_U = \left[P_{u_0}\right] \tag{6.1}$$

Dès que l'utilisateur pénètre dans l'aura de l'objet à sélectionner, des guides virtuels apparaissent. Il y a autant de guides virtuels que de points d'attache disponibles (voir le chapitre 4, Section 4.3.3). Ce nombre de points est déterminé par l'expérimentateur. Sur ce point d'attache apparaît un guide virtuel; sa couleur se modifie en fonction de la position de l'utilisateur dans le guide virtuel. Pour cela, nous utilisons la matrice d'état des utilisateurs et plus particulièrement la position de l'utilisateur P_{u_0}. La matrice d'état de l'EVC est formée par les deux matrices (Utilisateurs et Sources).

6.2.1.3 Déroulement de l'expérience

Un essai consiste à naviguer dans l'EV dans un plan 2D en suivant des points de contrôle, puis à sélectionner un des points d'attache du cube (voir la figure 6.4) dans l'environnement virtuel. L'essai prend fin lorsque l'utilisateur valide la sélection du point d'attache. Les points d'attache sont, dans notre modèle, les points utilisés pour créer la liaison mécanique décrite dans le chapitre 4 qui permettra aux utilisateurs de l'EVC de manipuler un objet en commun. Ils permettent de plus de spécifier le nombre de participants nécessaires pour la manipulation de l'objet sélectionné.

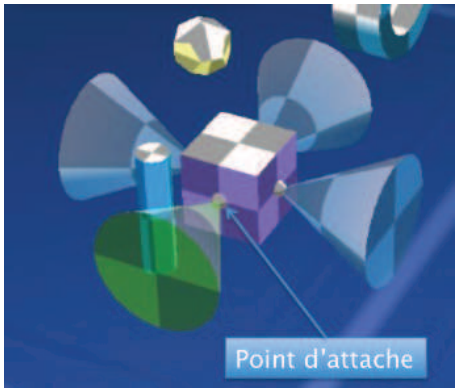


FIGURE 6.4: Les points d'attache à atteindre avec la main virtuelle simple pour valider la sélection

Avant d'atteindre le cube à sélectionner, les sujets doivent préalablement naviguer en passant par des points de contrôle matérialisés par des repères 3D. Ce chemin imposé va contraindre les utilisateurs à visualiser l'ensemble de l'environnement virtuel et, en particulier, à expérimenter la visualisation des auras autour des objets, qui sera l'objet de questionnaires après l'expérience. Néanmoins, nous n'allons pas tester les performance quantitatives de navigation des sujets, qui déplacent leur avatar dans un plan 2D.

Il est demandé aux sujets de réaliser chaque essai le plus rapidement possible. L'essai est terminée lorsque le sujet valide la sélection par l'appui d'une touche et que l'avatar

est assez proche d'un point d'attache du cube, ou lorsque la durée de l'essai a dépassé de 2 minutes. Au début de chaque essai, les paramètres (position de la caméra virtuelle, position des objets, position du repère 3D, etc.) sont ré-initialisés à une valeur fixe.

L'expérience comporte deux catégories d'essais qui se distinguent par deux conditions d'assistance différentes :

- Condition A (CA) : aucune assistance à la sélection;
- Condition B (CB) : présence d'assistance à la sélection.

Le sujet effectue, en tout, huit essais dont quatre pour chacune des deux conditions, dans l'ordre suivant: CA,CB,CA,CB,CA,CB,CA,CB.

6.2.1.4 Facteurs et indicateurs

Facteurs Nous n'utiliserons pas de facteurs concernant les périphériques, les techniques d'interaction ou encore le type de rendu visuel. En effet, ces facteurs seront fixes et seront spécifiés comme indiqué ci-dessous :

- Périphérique d'interaction : flystick;
- Technique d'interaction : main virtuelle simple;
- Vision monoscopique;
- Couleurs et tailles des objets/avatars fixes durant l'expérience.

Néanmoins, outre l'utilisation du facteur "conditions" qui représente les deux conditions CA et CB, nous avons choisi les facteurs subjectifs démographiques couramment utilisés (âge, sexe, expérience en RV) dans les évaluations de RV. Ces derniers permettent d'identifier des classes d'individus. Les facteurs subjectifs sont relevés par l'intermédiaire de questionnaires.

Indicateurs Un des indicateurs quantitatifs les plus couramment utilisés est l'indicateur de performance temps. Nous mesurerons ici la durée de sélection, qui correspond au temps mis pour atteindre le point d'attache, une fois que l'utilisateur a pénétré dans l'aura de l'objet. Le deuxième indicateur utilisé concerne le nombre moyen d'erreurs de sélection. Une erreur est comptabilisée si l'utilisateur valide la sélection alors qu'elle n'est pas possible (l'avatar n'est pas assez proche d'un point d'attache). Concernant les indicateurs subjectifs, nous avons proposé des questions (conjointement aux questions

démographiques) qui nous permettent d'avoir les avis sur l'utilisation des assistances dans les différents cas suivants :

- Préférences et satisfaction: afin d'obtenir les avis des utilisateurs concernant les différents cas testés;
- Utilisabilité: afin de recueillir des informations d'utilisabilité sur la tâche à réaliser.

Les questionnaires sont disponibles dans l'annexe A.

6.2.1.5 Résultats

Plan d'analyse Les résultats obtenus se basent sur un panel de dix utilisateurs composé de huit hommes et de deux femmes, âgés de 22 ans à 29 ans. Les participants utilisent très souvent un ordinateur. Cependant, certains d'entre-eux n'ont pas eu l'occasion d'utiliser des périphériques de Réalité Virtuelle auparavant. Les sujets ont jugé d'eux-même de leur niveau d'expertise (Expert, Intermédiaire, Novice) en RV via le questionnaire.
Nous utilisons l'Analyse de la Variance (ANOVA) pour déterminer l'influence des facteurs (et en particulier de la condition d'assistance) sur les indicateurs (durée et nombre moyen d'erreurs). Ces analyses ont été effectuées grâce au logiciel libre TANAGRA [3]. TANAGRA est un logiciel de DATA MINING destiné à l'enseignement et à la recherche. Il implémente une série de méthodes de fouilles de données issues du domaine de la statistique exploratoire, de l'analyse de données, de l'apprentissage automatique et des bases de données. Le but de cette analyse est de confirmer le gain apporté par le modèle d'assistance dans la sélection.
Au préalable, nous allons tester notre échantillon et vérifier qu'il suit une loi normale, qui est une condition nécessaire pour réaliser des ANOVA (test de Shapiro-Wilk).

Durée de sélection à partir de l'entrée dans l'aura du cube Concernant la durée de sélection à partir de l'entrée dans l'aura du cube, la figure 6.5 nous donne des premiers éléments de réponse. Les guides virtuels améliorent les performances en sélection. C'est un résultat attendu qui est logique car la main virtuelle simple n'est que très peu efficace pour la sélection d'objets petits (ce qui correspond aux points d'attache). Dans les essais sans assistance, la durée moyenne de sélection t_s est de 3,25 secondes (écart-type: 1,0 secondes) alors qu'elle est de 2 secondes (écart-type: 0,58 secondes) pour les essais avec assistance (présence de guides virtuels). L'ANOVA confirme l'influence des guides virtuels sur les performances en sélection (ANOVA $f = 14,86$, $p < 0,01$).

[3] http://eric.univ-lyon2.fr/ricco/tanagra/fr/tanagra.html

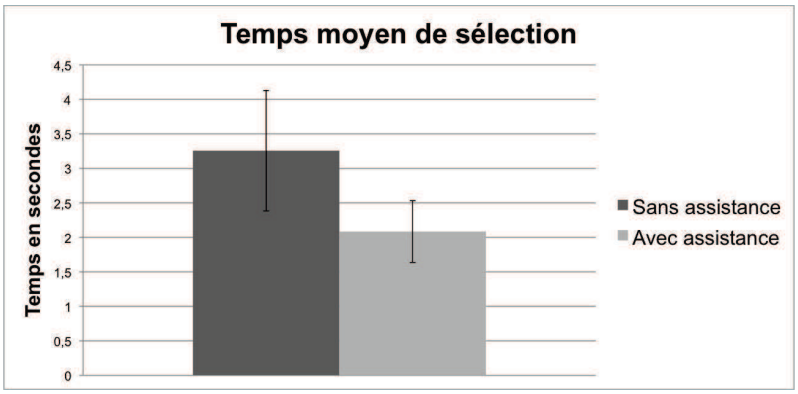


FIGURE 6.5: Moyenne du temps de sélection pour chaque essai

Erreurs de sélection Les essais sans assistance ont engendré plus d'erreurs de sélection contrairement aux essais avec assistance (voir figure 6.6). La présence d'erreurs commises par les sujets est fortement dépendante des conditions correspondant aux cas de présence des guides virtuels (ANOVA $f = 4,69$, $p < 0,01$) pour l'aide à la sélection.

Les deux résultats obtenus concernant la durée de sélection et le nombre d'erreur de sélection ne sont pas étonnants car la technique Main Virtuelle Simple est délicate à utiliser lorsque les objets à sélectionner sont petits, ce qui est le cas ici pour les points d'attache du cube. Le guide virtuel améliore notablement la perception de la distance entre l'avatar et le point d'attache, ce qui diminue à la fois le nombre d'erreurs de sélection et la durée de sélection par rapport au cas sans assistance. Sans assistance, l'utilisateur a du mal à être suffisamment précis et à tendance à valider plusieurs fois sa sélection sans succès avant de parvenir à la fin de l'essai. Cela induit une augmentation de la durée de sélection dans le cas sans assistance.

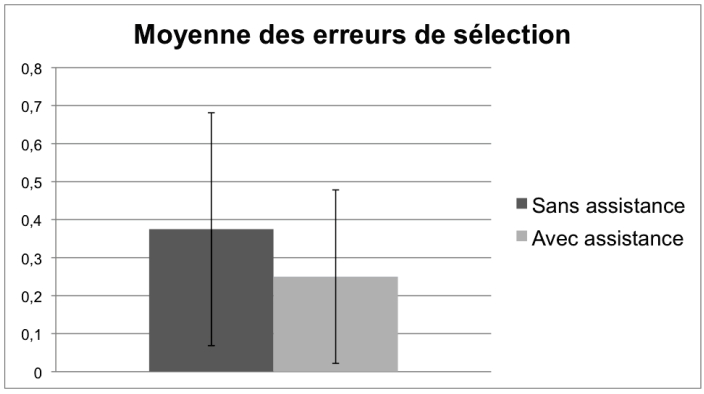


FIGURE 6.6: Influence de l'assistance en sélection sur le nombre d'erreurs

Analyse subjective Concernant les résultats subjectifs, les utilisateurs apprécient la présence de l'aura ainsi que la modification des couleurs selon la proximité de l'avatar à un objet sélectionnable. Cela permet aux utilisateurs d'avoir une meilleure approche

des objets lorsqu'ils se dirigent vers les objets pour les sélectionner. Cependant certains utilisateurs n'ont pas compris l'objectif de l'aura malgré les explications données avant le début de l'expérience. Ainsi, à la question "Je pense que j'ai compris le rôle de l'aura rapidement?", nous obtenons uniquement 60% de "Oui". De fait, nous constatons que l'utilisation des auras a besoin d'un apprentissage par les utilisateurs. Cependant, nous obtenons 90% de "Oui" et 10% de "Probablement Oui" à la question "La variation des couleurs de l'aura est-elle utile?". Après dépouillement des questionnaires, nous constatons que la modification des couleurs de l'aura a aidé les utilisateurs à se diriger vers les objets et à suivre la trajectoire imposée. Les utilisateurs ont donc tiré profit de la variation des couleurs et de l'assistance qu'elles apportent. Cependant, ils n'ont pas forcément compris le rôle de l'aura. Mais, les utilisateurs ont saisi rapidement le rôle des guides virtuels dans la phase de sélection et les ont trouvé efficaces.

6.2.1.6 Conclusion intermédiaire

Cette première expérience nous a permis tout d'abord de mettre en pratique notre modèle de gestion de l'interaction 3D ainsi que de récupérer des informations concernant nos outils d'assistance. Les informations obtenues nous permettent de confirmer que les guides virtuels sont des outils d'assistance à la sélection facilitant la sélection d'objets petits, qui est un résultat attendu et déjà confirmé. La seconde expérience va tester note modèle dans un cadre réellement collaboratif avec deux utilisateurs.

6.2.2 Expérience de manipulation à deux utilisateurs

Dans cette section, nous proposons de tester notre modèle d'assistance et de mesurer les premiers résultats de son utilisabilité ainsi que son efficacité dans le cas multi-utilisateurs pour une tâche de manipulation synchrone d'un objet par deux utilisateurs.

6.2.2.1 Objectifs

L'expérimentation de manipulation à deux utilisateurs nous permet d'analyser la réaction des participants vis-à-vis de l'utilisation de notre modèle et d'avoir une première appréciation globale des outils d'assistance pour la coordination. Comme la première expérience, nous avons fait le choix de proposer un environnement virtuel simple afin de nous concentrer sur l' étude des outils d'assistance durant cette tâche collaborative. L'objectif est de comparer les performances durant la manipulation à deux utilisateurs avec les deux types d'assistance (assistance visuelle et assistance visuelle et de manipulation) au cas sans assistance.

6.2.2.2 Présentation de l'expérimentation

Dispositif matériel Nous utilisons les mêmes périphériques que pour l'expérience préliminaire, en incluant un second flystick pour le second participant. La figure 6.7 présente le dispositif expérimental de cette expérience.

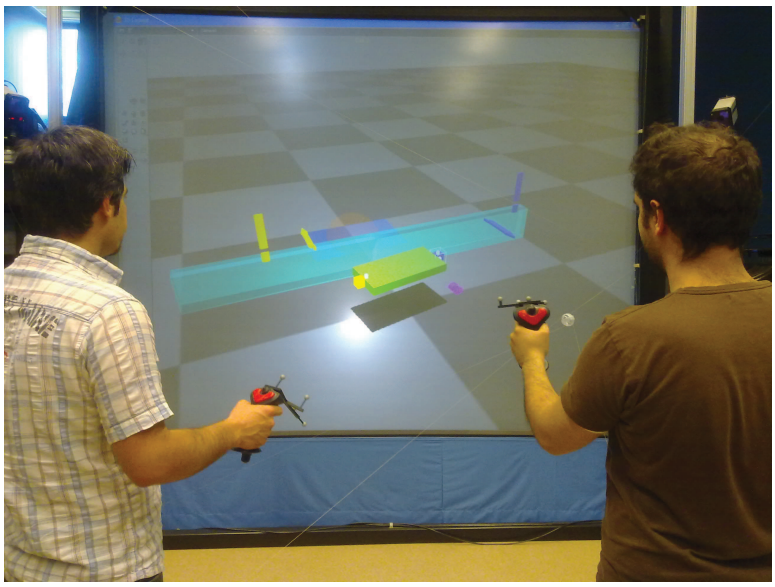


FIGURE 6.7: Le dispositif expérimental de l'expérience où deux utilisateurs manipulent une planche virtuelle via leur flystick.

Description de l'environnement virtuel L'Environnement Virtuel Collaboratif (EVC) est illustré sur la figure 6.8. Cet EVC se compose de deux avatars (pour les deux utilisateurs), et d'une planche sur laquelle est posé un cylindre. Les utilisateurs doivent déplacer la planche jusqu'à une zone de dépôt qui sera utilisée pour valider la fin de la manipulation, sans faire chuter le cylindre qui est posé dessus. Les deux avatars de forme cubique sont de même taille mais de couleurs différentes. La couleur jaune représente le premier utilisateur et le bleu le second. La zone de dépôt est quant à elle de couleur bleu. L'accès à la zone de dépôt se trouve derrière un mur, bloquant ainsi le passage des utilisateurs.

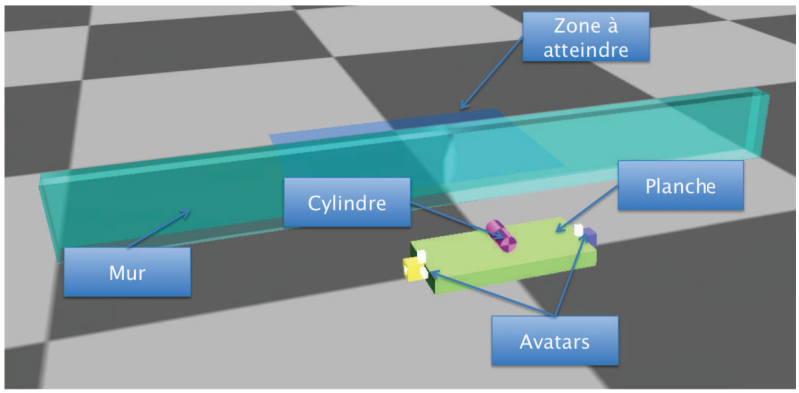


FIGURE 6.8: L'environnement virtuel utilisé pour réaliser la seconde expérience

Technique d'interaction 3D Comme pour la première expérience, nous utilisons une technique de manipulation classique pour la manipulation de l'objet (main virtuelle simple), à laquelle nous avons appliqué notre modèle d'assistance. Le déplacement des avatars nécessite l'appui sur les gâchettes des flysticks.

Manipulation et assistances Les avatars des utilisateurs sont liés aux points d'attache de la planche via une liaison mécanique de type encastrement (aucun degré de liberté). Cela signifie que l'avatar reste fixe par rapport à la planche car la liaison ne permet de translation ou bien de rotation entre l'avatar et la planche (voir figure 6.9).

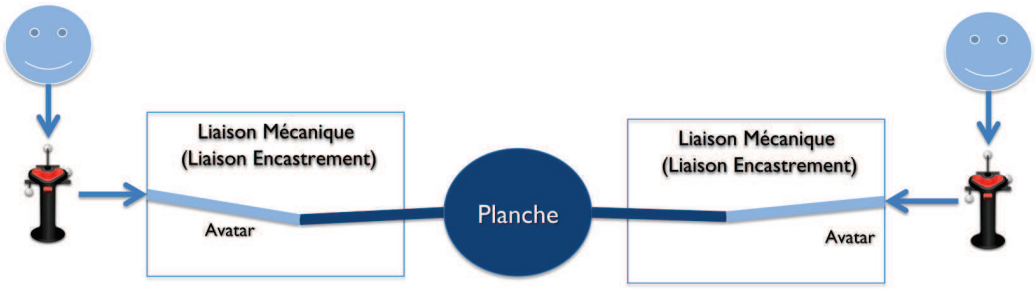


FIGURE 6.9: Liaisons entre les deux avatars et la planche

La liaison que nous avons utilisée permet à l'avatar de transmettre un effort à la planche car le mouvement relatif est bloqué (aucun degré de liberté). L'effort transmis est déterminé à partir de la matrice d'état des utilisateurs ME_U (voir équation 6.2) et, plus précisément, des vecteurs d'états des deux utilisateurs. Cette matrice contient les vitesses de déplacement des utilisateurs (V_{u_0} et V_{u_1}). Nous pouvons donc déterminer la force (F_{u_0} et F_{u_1}) que les utilisateurs exercent sur leurs avatars respectifs et, par conséquent, sur la planche via les liaisons. La position et l'orientation de l'objet ($P_{Planche}$ et $O_{Planche}$) sont déterminées par notre fonction qui utilise le Principe Fondamental de

la Dynamique (PFD) (voir chapitre 4 : Section 4.2.3.2). Cette fonction de calcul du PFD va donc modifier la matrice d'état des sources qui est représentée par l'équation 6.3.

$$ME_U = \begin{bmatrix} P_{u_0} & P_{u_1} \\ O_{u_0} & O_{u_1} \\ V_{u_0} & V_{u_1} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

$$ME_S = \begin{bmatrix} P_{Cylindre} & P_{Planche} \\ O_{Cylindre} & O_{Planche} \\ V_{Cylindre} & V_{Planche} \\ 0,1 & 0,5 \end{bmatrix} \tag{6.3}$$

Les constantes dans les deux matrices représentent les masses que nous avons attribuées aux objets :

- Avatars: 1 Kg;
- Cylindre: 0,1 Kg;
- Planche: 0,5 Kg.

Deux types d'assistances à la manipulation ont été testés dans cette expérience :

- Assistance visuelle: des indications visuelles 3D (flèches, point d'exclamation) apparaissent durant la manipulation, indiquant aux utilisateurs des problèmes à propos de la stabilité du cylindre. Les flèches sont utilisées pour indiquer aux utilisateurs le sens du déplacement à effectuer pour éviter la chute du cylindre. Le point d'exclamation apparaît si la correction n'est pas réalisée par les utilisateurs. La fonction réalisant cela se nomme "Fonction d'assistance visuelle" et son algorithme est détaillé dans le chapitre 4 (voir Section 4.3.4);
- Assistance visuelle et à la manipulation: en supplément des indications visuelles, une fonction agissant sur le mouvement de la planche est ajoutée. Celle-ci se base sur l'inclinaison de la planche et va modifier le comportement de la liaison mécanique pour restreindre certains mouvements jugés inopportuns pour la stabilisation du cylindre sur la planche. Elle est donc destinée à éviter le basculement de la planche et donc la chute du cylindre. Cette fonction se nomme

"Fonction de commande" et son algorithme est détaillé dans le chapitre 4 (voir Section 4.3.4). Cependant, les utilisateurs peuvent "forcer" cette aide à la stabilisation s'ils souhaitent réellement faire basculer la planche.

Ces deux fonctions vont utiliser la matrice d'état de l'EVC. Nous avons représenté l'utilisation des données de la matrice d'état par les fonctions sur la figure 6.10. La fonction d'assistance visuelle nécessite les vitesses des utilisateurs (V_{u_0} et V_{u_1}) et la position de la planche ($P_{Planche}$). La fonction d'assistance à la manipulation est activée par la fonction d'assistance visuelle; elle utilise les mêmes informations que cette dernière. Néanmoins, elle va agir directement sur la source sans passer par la fonction d'assistance visuelle.

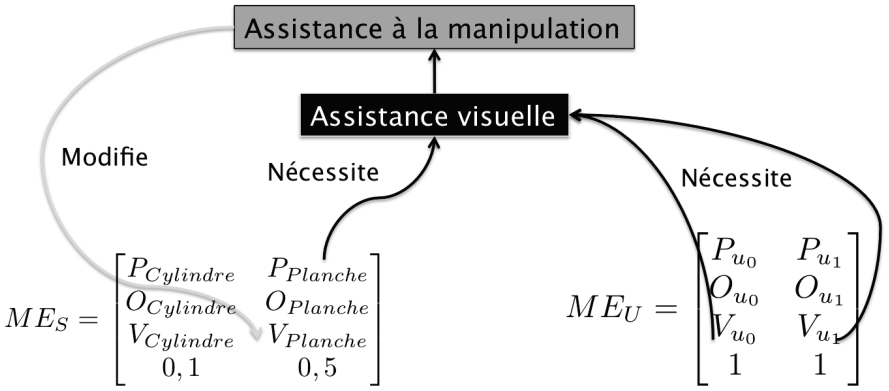


FIGURE 6.10: Utilisation des données de la matrice d'état par nos fonctions d'assistance

6.2.2.3 Déroulement de l'expérience

Un essai consiste, pour les couples de sujets, à déposer le plus vite possible la planche préalablement sélectionnée sur une zone de dépôt prévue à cet effet, sans que le cylindre ne chute durant la manipulation. L'expérience est terminée dans l'un des deux cas suivants :

- Le couple d'utilisateurs dépose la planche - avec ou sans cylindre - sur la zone de dépôt en moins de 2 minutes;
- Le temps maximum de 2 minutes est atteint.

Au début de chaque essai, les paramètres (position de la caméra virtuelle, position des objets, position de la planche, position du cylindre, etc.) sont ré-initialisés.

Un couple d'utilisateurs effectue, en tout, six essais, dont deux pour chacune des conditions d'assistance suivantes :

- Condition A (CA) : sans assistance;
- Condition B (CB) : assistance visuelle;
- Condition C (CC) : assistances visuelles et de manipulation.

Pour chaque couple d'utilisateurs, l'enchainement des six essais est le suivant: CA,CB,CC,CA,CB,CC.

6.2.2.4 Facteurs et indicateurs

Facteurs Les facteurs de cette expérience sont identiques à la première expérience. L'ombre portée de la planche est ajoutée dans toutes les conditions d'assistance afin d'aider les utilisateurs pour mieux repérer la profondeur de la planche.

Indicateurs Nous avons découpé le parcours en trois secteurs jusqu'à la zone de dépôt (voir la figure 6.11). Le secteur 1 correspond à la phase de montée de la planche, le secteur 2 à la phase de déplacement horizontal de la planche pour passer au dessus du mur et le troisième secteur correspond à la phase de descente de la planche. Dans ces différents secteurs, nous avons mesuré les indicateurs suivants :

- La durée de manipulation: elle correspond au temps entre le début de l'essai et la pose de l'objet sur la zone. Elle est découpée en trois durées correspondant au passage dans les trois secteurs;
- La durée de manipulation sans chute du cylindre: elle correspond au temps entre le début de l'essai et la chute du cylindre le cas échéant et est égale à la durée de manipulation si le cylindre ne chute pas durant l'essai;
- Le taux d'erreurs de manipulation: il correspond au nombre moyen de chutes de cylindre tout utilisateur et tout essai confondus.

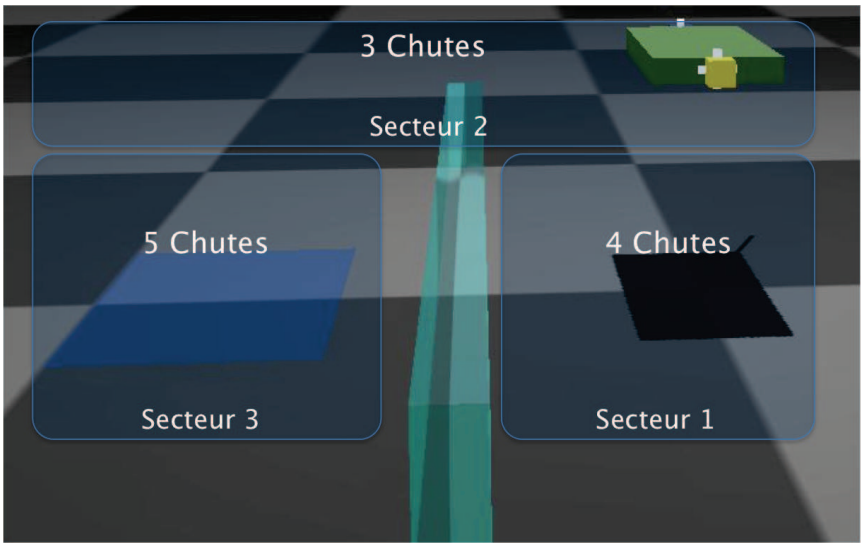


FIGURE 6.11: Les trois secteurs pour déterminer le nombre de chute durant la manipulation à deux utilisateurs

Concernant les indicateurs subjectifs, nous avons proposé des questionnaires pour l'expérience dans sa globalité et non pas pour les différentes conditions, permettant d'obtenir des informations concernant :

- La satisfaction: afin d'obtenir les avis des utilisateurs concernant les différentes conditions;
- l'utilisabilité: afin de recueillir des informations d'utilisabilité sur la tâche à réaliser;
- l'implication et la conscience du groupe: en exploitant certaines questions issues de [Gerhard et al., 2001];
- l'effort collaboratif : en exploitant certaines questions issues de [Biocca et al., 2001].

6.2.2.5 Résultats

Plan d'analyse Les résultats obtenus se basent sur un panel de dix couples principalement masculins à l'exception de deux couples mixtes. Les participants sont âgés de 22 ans à 29 ans. Les sujets ont jugé d'eux-mêmes de leur niveau d'expertise (expert, intermédiaire, novice) en RV via le questionnaire. Les sujets ont répondu séparément aux questionnaires.

Observation des sujets L'observation des différents essais nous permet de constater les difficultés de manipulation dans les différents secteurs. Le secteur 1 (phase verticale ascendante) est le passage qui est le plus facile; cependant il est nécessaire que les

utilisateurs se coordonnent correctement afin d'éviter les chutes. Le passage le plus difficile est le secteur 2 (phase horizontale). Si les utilisateurs effectuent un déplacement trop rapide, le cylindre peut chuter en raison de l'effet combiné des faibles frottements sur la planche et de l'accélération horizontale. Le secteur 3 (phase verticale descendante) présente une difficulté, qui est que si les utilisateurs descendent trop rapidement ou bien sans se coordonner (l'un après l'autre, de manière asynchrone), le cylindre peut se décoller de la planche et se retrouve en chute libre.

Taux d'erreur de manipulation De manière générale, nous remarquons que les assistances (Conditions B et C) permettent de limiter le nombre de chutes du cylindre (voir figure 6.12). En effet, l'assistance visuelle est un outil permettant d'anticiper la chute; elle permet par conséquent aux utilisateurs de se corriger. D'autre part, l'ajout d'une correction aux mouvements effectués par les deux utilisateurs permet de stabiliser la planche pour éviter autant que possible la chute du cylindre.

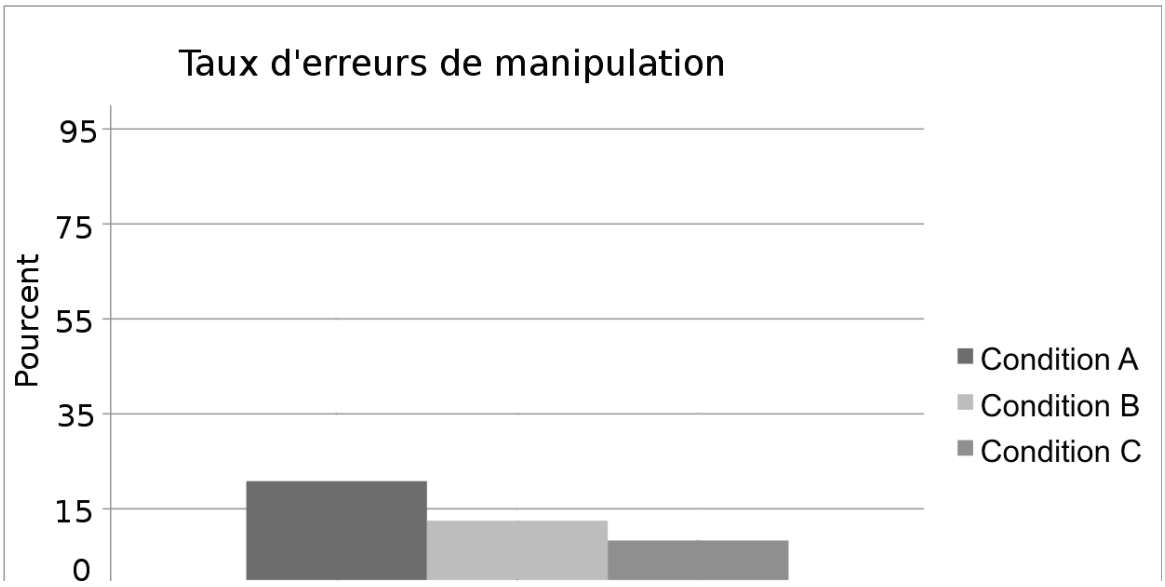


FIGURE 6.12: Taux d'erreurs de manipulation en fonction des trois conditions d'assistance (CA, CB et CC)

Ce sont les secteurs 1 et 3 dans lesquels les chutes sont les plus nombreuses tous essais confondus (voir figure 6.13). Cependant, si on analyse plus en détail, on constate que le taux d'erreur de manipulation par secteur dépend de l'assistance proposée. En effet, le constat précédent est particulièrement valable pour les conditions A et B. Les secteurs 1 et 3 correspondent aux phases de montée et de descente, et nécessitent donc une très bonne coordination, qui n'est pas assez facilitée pour les conditions A et B. Cependant, dans le secteur 2 (déplacement horizontal de la planche), la condition C est associée à un

nombre important de chutes du cylindre. Nous voyons deux raisons pouvant expliquer cela et qui sont très certainement liées :

- Dans les conditions A et B, le cylindre chute souvent dans le secteur 1. Étant donné que, dans le protocole, il est spécifié que le cylindre n'est pas repositionné sur la planche après la chute, il se peut que les chutes se retrouvent au secteur 2;
- La planche s'arrête brutalement ce qui implique le passage d'une vitesse constante à une vitesse nulle quasi instantanément. Durant la manipulation dans le secteur 2, le cylindre dispose d'une vitesse constante égale à la vitesse déplacement horizontale de la planche. Lors de l'arrêt net de la planche, le cylindre continue à posséder une composante horizontale de la vitesse non nulle, en raison des faibles frottements. Par conséquent, le cylindre continue sur un mouvement rectiligne uniforme dans le sens de déplacement horizontal par rapport au référentiel "monde" de l'environnement virtuel. Or, la fonction d'assistance proposée dans la condition C ne permet pas de pallier l'arrêt brutal de la planche, ce qui implique que le secteur 2 soit le plus délicat pour cette condition. Néanmoins, l'arrêt brutal après mouvement vertical de la planche ne pose aucun problème car la vitesse exercée su le cylindre est également verticale et ne le déstabilise pas.

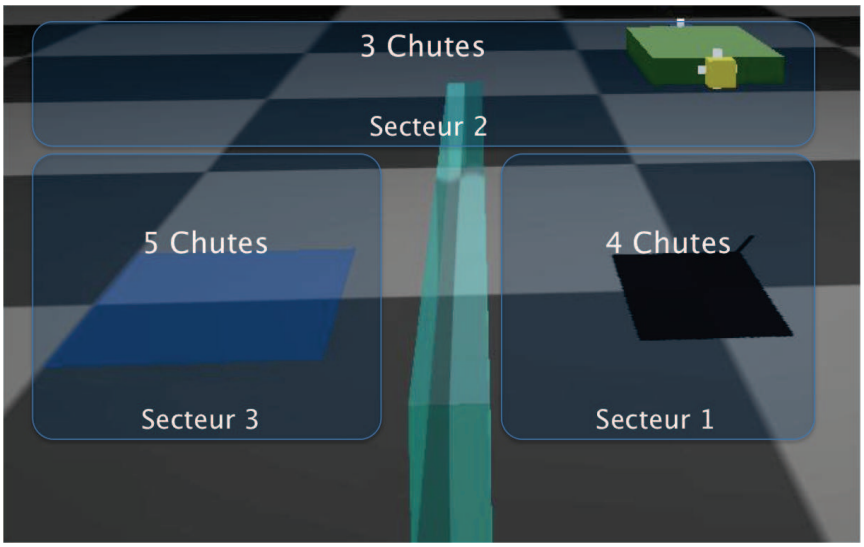


FIGURE 6.13: Nombre total de chutes dans les différents secteurs tous essais confondus

Analyse de la durée de manipulation L'indicateur *durée de manipulation* a été relevé pour chaque essai et a été découpé en trois durées intermédiaires afin de mesurer les temps de passage dans les différents secteurs. La figurefigure 6.14 illustre les durées de manipulation moyennes pour chaque secteur. On constate que le secteur 2 nécessite le plus de temps pour le déplacement de la planche.

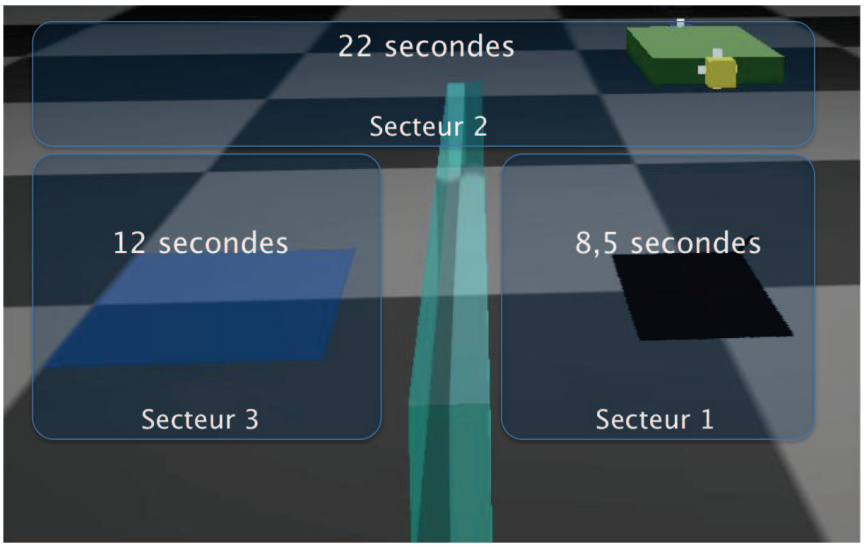


FIGURE 6.14: Les temps moyens de passage dans les différents secteurs tous essais confondus

La figure 6.15 illustre la durée moyenne de manipulation dans chacune des trois conditions d'assistance. En moyenne, les essais sous la condition C sont plus rapides que ceux correspondant à la condition B. En effet, les assistances visuelles permettent certes d'éviter la chute dans une certaine mesure en visualisant la manière de corriger le mouvement de la planche plus facilement, mais l'assistance s'effectue au détriment de la durée de manipulation. En effet, nous avons observé lors des essais sous la condition B que, lorsque les assistances visuelles apparaissent (ce qui signifie une chute possible future), les utilisateurs prennent du temps pour dialoguer et discuter d'une stratégie pour corriger et éviter la chute: ils perdent alors du temps. Sans assistance (condition A), les utilisateurs ne sont pas informés d'une chute possible du cylindre et le constatent uniquement lorsque celui-ci se met à rouler sur la planche, ce qui en général cause la chute du cylindre. Cependant, dans la condition A, les utilisateurs ne s'arrêtent pas de manipuler mais essayent d'éviter la chute tout en dialoguant. Dans la suite, nous allons corréler le taux de chute et la durée de manipulation afin de comparer la durée des essais avec et sans chute dans les différents secteurs et selon les trois conditions.

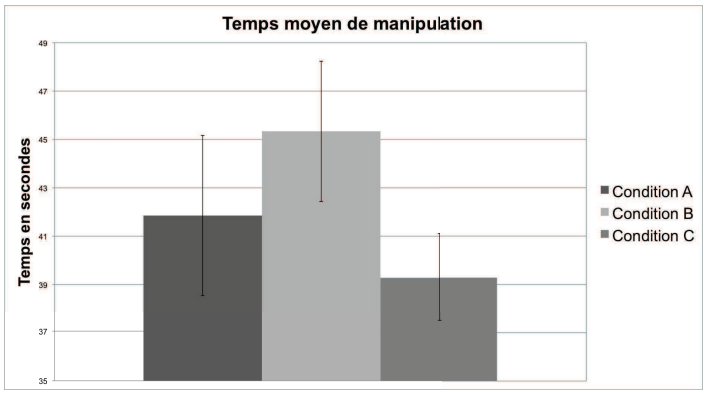


FIGURE 6.15: Le temps moyen total pour les trois conditions

Le graphique suivant (voir figure 6.16) présente les temps de passage moyens dans les trois secteurs selon les trois conditions. Logiquement, la condition C est la condition pour laquelle les utilisateurs passent le moins de temps dans les différents secteurs, car la stabilisation de la planche leur permet d'avoir moins besoin de concentration pour effectuer leur tâche. Les temps de passage pour les conditions A et B sont assez similaires dans les secteurs 1 et 3, alors qu'il est plus important dans le secteur 2. En effet, le secteur 2 est le secteur demandant le plus de temps de manipulation et est particulièrement délicat en raison de la présence d'une composante horizontale de la vitesse du cylindre difficile à contrôler. Dans la condition 2, les utilisateurs se stoppent lors de l'apparition des assistances visuelles et dialoguent. Durant cette phase de dialogue, un des utilisateurs va vouloir "diriger" et donner des instructions pour éviter la chute.

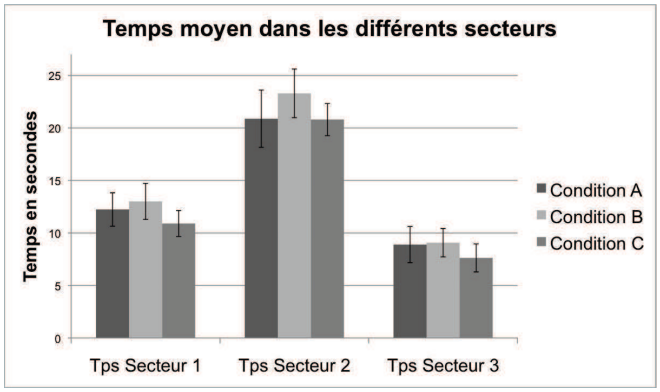


FIGURE 6.16: Durée moyenne de manipulation dans chaque secteur pour les trois conditions.

Analyse de la durée de manipulation sans chute Les analyses indépendantes des deux premiers indicateurs (taux d'erreurs de manipulation et durée de manipulation) nous ont permis de constater certains faits :

- La condition C est associée à un taux d'erreur de manipulation plus faible que les deux autres condition, même si les performances dans le secteur 2 sont dégradées par rapport aux deux autres secteurs;
- Les secteurs 1 et 3 sont défavorables aux conditions A et B;
- La durée d'un essai est plus faible sous la condition C alors que la condition B implique une durée de manipulation plus importante.

Mais, comme la chute du cylindre n'est pas considérée comme un signal de fin de l'essai, il est nécessaire de moduler les résultats précédents concernant la durée de manipulation. En effet, il est légitime de penser qu'une fois la chute du cylindre produite, le moindre besoin de concentration des utilisateurs (surtout pour les conditions A et B) va impliquer une fin de manipulation plus rapide. Il semble donc nécessaire d'analyser la durée de manipulation pour tous les essais se terminant avec succès (sans chute). En effet, si le cylindre ne tombe pas durant l'essai, la durée totale augmente car les utilisateurs ont besoin de concentration pour réussir l'essai. C'est ce que montre la figure figure 6.17. On s'aperçoit que les conditions A et B sont proches en terme de temps lorsque le cylindre ne chute pas. La durée moyenne de l'essai avec l'assistance visuelle (Condition B) est légèrement plus importante. En effet, les assistances visuelles permettent de stabiliser la planche, mais ralentissent les utilisateurs car ils prennent le temps de se coordonner oralement pour éviter la chute du cylindre. Ainsi, un utilisateur en avance va attendre l'autre dès que l'assistance visuelle apparaît. Sous la condition A, l'utilisateur en avance réagit, mais beaucoup plus tard. Si, durant l'essai sous la condition A, les utilisateurs ne sont pas bloqués car ils sont bien coordonnés, cela permet d'expliquer la légère diminution du temps moyen pour les essais sous la condition A.

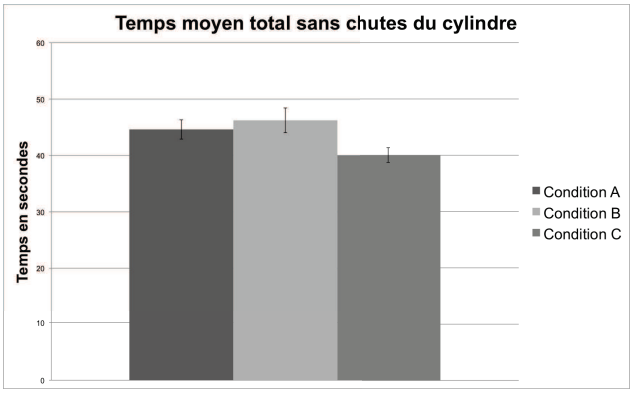


FIGURE 6.17: Durée moyenne totale d'un essai selon les trois conditions, dans les cas où l'essai est réussi.

Analyse subjective Les dix couples d'utilisateurs ont trouvé l'utilisation du fly-stick simple pour la tâche demandée (90% de "Oui", 5% de "Probablement Oui" et

5% de "Non"). L'utilisation des outils d'assistance n'engendrent pas de difficultés supplémentaires pour les utilisateurs. En effet, les assistances visuelles sontcompréhensibles pour tous les sujets et aident beaucoup durant la coordination (80% de "Oui" et 20% de "Probablement Oui"). Cependant l'esthétique des flèches n'est pas appréciée.
L'analyse subjective nous révèle la préférence des utilisateurs pour la condition C qui est la condition pour laquelle les deux types d'assistances sont disponibles. Ce mode de fonctionnement facilite le déplacement de la planche dans les secteurs 1 et 3. Cependant, dans le secteur 2, elle engendre des chutes du cylindre (cela nécessite une modification de la fonction d'assistance à la manipulation pour la prise en charge de l'arrêt net de la planche).
Les aspects d'implication et de conscience (voir annexe A et [Gerhard et al., 2001]), nous donnent des informations sur le ressenti des utilisateurs durant l'expérience. Les utilisateurs se sont globalement tous impliqués durant l'expérience. 90% des sujets ont répondu "Oui" et 10% "Non" à la question : "Avez vous apprécié de travailler avec votre coéquipier?". Cela montre que les utilisateurs se sont impliqués dans la tâche commune. Cela nous semble logique car l'expérience est plutôt ludique et présente un challenge. À la question : "J'ai été un participant très actif dans les phases de dialogue?", nous obtenons 80% de "Oui" et 20% de "Probablement Oui". Ce résultat subjectif confirme bien l'implication des utilisateurs dans la tâche. Cependant, il souligne aussi que des utilisateurs d'un même couple ont probablement ressenti qu'ils s'impliquaient plus que l'autre partenaire.
Concernant l'effort collaboratif, nous avons plus de questions qui ont été posées aux sujets. Cependant, nous ne traitons que les questions que nous avons jugés comme significatives :

- Q1: "Les idées des autres participants étaient-elles claires?" (70% de "Non" et 30% de "Oui");
- Q2: "Mes idées étaient-elles claires pour les autres participants?" (80% de "Oui" 10%, de "Probablement Oui" et 10% de "Non");
- Q3: "J'ai souvent repris l'autre participant? " (90% de "Oui" et 10% de "Probablement Oui");
- Q4: "L'autre participant m'a souvent repris?" (70% de "Oui", 10% de "Probablement Oui" et 20% de "Non").

Les réponses aux questions Q1 et Q2 confirment que les utilisateurs pensent qu'ils ont fournit des informations claires à l'autre alors que l'autre utilisateur pense dans un même temps que ce n'était pas le cas. Pour les questions Q3 et Q4, les utilisateurs pensent que

leur partenaire d'expérience a souvent demandé des corrections (70% de Oui). Dans un même temps, ils pensent qu'ils ont souvent repris leur partenaire. Cela confirme l'aspect implication dans l'expérience.
La première constatation concernant les réponses à ces questions sont qu'elles soulignent de nombreuses incohérences dans un même couple d'utilisateurs. En effet, cela rejoint un peu l'aspect implication, dans lequel les utilisateurs d'un même couple vont penser que leur propre contribution est plus importante que celle du partenaire. Cela souligne probablement un problème dans notre modèle qui ne met pas assez en valeur le résultat commun. De plus, l'affichage des assistances visuelles, qui indique une correction à apporter par un utilisateur, engendre certainement chez l'autre un sentiment de supériorité. Ces résultats ne sont probablement valables que pour les expériences dans lesquelles les utilisateurs sont co localisés.

6.2.3 Conclusion intermédiaire

Les résultats de la première expérience ont souligné l'apport des guides virtuels lors de la phase de sélection pour la sélection d'objets petits. C'est un résultat que Ouramdane et associés avaient noté dans [Ouramdane, 2009]. En effet, les utilisateurs doivent sélectionner des points d'attache qui correspondent à des objets petits. Ces derniers sont les points où la sélection est réalisée. C'est donc en ces points que la liaison mécanique s'applique conformément à notre modèle.
Concernant la manipulation, nous avons constaté l'apport des assistances visuelles et des assistances à la commande (voir figure 6.18). Lors de l'utilisation de l'assistance visuelle seule, le nombre de chutes diminuent par rapport aux essais sans assistances. Cependant, la durée moyenne total augmente sensiblement. Nous pensons que cela est dû à une phase de communication entre les deux utilisateurs, même si nous ne l'avons pas mesuré (pas d'enregistrement des conversations entre utilisateurs). Pour les cas dans lesquels l'assistance à la manipulation est disponible, de nombreuses chutes sont comptabilisées, surtout dans le secteur 2. La raison principale est d'ordre physique: le système d'assistance permet un arrêt immédiat de la planche; or, dans la phase de manipulation horizontale de la planche, cela implique que le cylindre rentre dans un mouvement rectiligne uniforme à l'arrêt de la planche. Néanmoins, il faut souligner que le système d'assistance permet une diminution de la durée de manipulation. Il serait intéressant de proposer une adaptation de la fonction d'assistance à la manipulation permettant d'éliminer ce mouvement en faisant subir au cylindre une nouvelle force ou en éliminant la discontinuité de vitesses inhérentes à notre fonction d'assistance testée. Cela est théoriquement possible avec notre modèle actuel, car les matrices d'états comportent les données nécessaires pour cela (en particulier, la vitesse de la planche). Il faudrait

rajouter une "mémoire" pour avoir accès à l'évolution de la vitesse de la planche et ainsi compenser une discontinuité de la vitesse au cours du temps, qui induit la déstabilisation du cylindre.

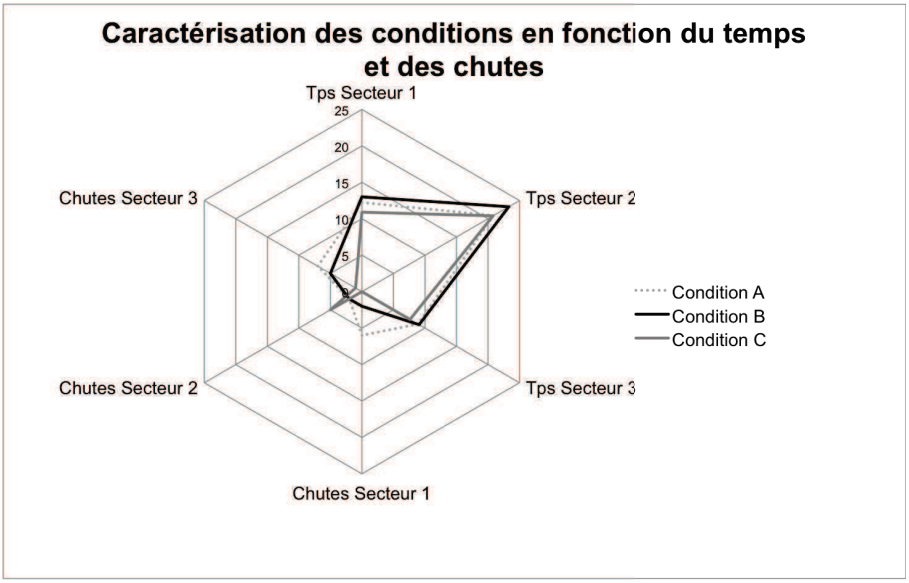


FIGURE 6.18: Récapitulatif des résultats quantitatifs pour les différentes conditions d'assistance.

L'analyse subjective révèle quant à elle la nécessité de traiter un aspect "cognitif" pour l'interaction collaborative. Nous pensons que le sentiment qu'un utilisateur possède à propos du rôle plus important de sa contribution par rapport à son partenaire est présent et affecte les performances communes, même si nous n'avons pas de mesure pour étayer cela. De plus, nous pensons que l'affichage de l'assistance visuelle pour un utilisateur qui est visible par les deux utilisateurs dans notre expérience, indique les corrections à apporter, mais jouent très certainement un rôle de "répression" en indiquant le mauvais élève du couple. Cela a d'ailleurs engendré de l'énervement chez certains participants et de la frustration.

6.3 Application au projet ARITI

Dans cette section du chapitre, nous présentons le projet ARITI ainsi que nos contributions au projet, apportées durant cette thèse. Cela va permettre l'application de notre modèle à un contexte applicatif plus complexe et réel.

6.3.1 La téléopération

La Téléopération est le processus de contrôle d'une machine par un utilisateur distant qu'on appelle Téléopérateur. Ce processus est très souvent associé à la robotique pour le contrôle de robots fixes ou bien mobiles qu'on nomme aussi Télérobotique. Elle a pris ses origines dans le besoin de pouvoir travailler dans des endroits dangereux ou inaccessibles par l'homme ou bien encore dans la réalisation de tâches nécessitant précision et force. Les domaines d'application sont très variés et touchent de nombreux thèmes de recherche (nucléaire, médicale, spatiale, militaire, etc.). Bien que les premiers systèmes de téléopération soient apparus dans les années 60, de nombreux travaux en cours se concentrent sur la résolution de plusieurs problèmes. Notamment la dégradation de l'information sensorielle de l'environnement distant. Cela se traduit par des problèmes de concentration et de fatigue pour l'opérateur. La sensation de distance de l'opérateur rend difficile l'exécution des tâches. Pour finir, nous pouvons citer, les délais et les limitations des débits de transmissions qui en fonction des contraintes (transmission eau) peuvent être plus ou moins importants.

6.3.1.1 Quelques domaines d'application

Le nucléaire a été un des premiers domaines à exploiter les systèmes de téléopération pour la manipulation de produits radioactifs. Cette manipulation est effectuée dans des cellules spécialisées en utilisant des bras manipulateurs afin de protéger les opérateurs, mais aussi pour la maintenance des installation, le démantèlement d'installation et l'intervention suite à un incident.
Le domaine spatial est un domaine de prédilection pour la téléopération. Ce domaine a trouvé dans la téléopération plusieurs avantages [Sheridan and MIT, 1993] comme le temps, la sécurité et le coût. En effet, certaines missions spatiales demandent plusieurs années pour atteindre les objectifs. L'envoi de robots dans des milieux inconnus, est moins dangereux que l'envoi d'humains et, de plus le transport est beaucoup moins coûteux. Cependant, la distance séparant le robot de l'opérateur est très grande, ce qui engendre des problèmes de communication et de retard. On retrouve ce type de contrôle dans le contrôle de satellites ou de véhicules mobiles pour l'exploration de Mars.
L'exploration sous marine utilise des systèmes de téléopération. L'intérêt est de pouvoir accéder à certaines profondeurs inaccessibles pour les plongeurs. Les missions types pour ces robots sous marins sont l'inspection, la recherche ou la construction d'installation sous marines (câbles électrique ou de télécommunications).
Pour les besoins militaires, la téléopération peut être utilisée dans les missions de surveillance, de protection, de détection des ennemis ou de déminage.

6.3.2 Le projet ARITI

L'objectif scientifique du projet ARITI (Augmented Reality Interface for Telerobotic applications via Internet) est l' étude et la mise en oeuvre de nouvelles méthodes d'assistance au télétravail collaboratif. Les recherches se situent au niveau de la modélisation, de la conception et de l'évaluation en situation réelle de ces méthodes. La finalité concerne le développement d'interfaces à faible coût via les technologies Web et le développement d'interfaces multisensorielles et multimodales utilisant la Réalité virtuelle et augmentée.
ARITI constitue un système expérimental permettant à un opérateur humain de superviser et de commander un robot via le réseau Internet, il est le premier système en France de téléopération en réalité augmentée via Internet. Au-delà de la réalisation technique, les apports de ARITI résident dans la mise en oeuvre d'assistance à l'opérateur humain pour la perception de la scène, la supervision des tâches et le contrôle du robot notamment par l'insertion de guides virtuels actifs. L'architecture du système a été ensuite améliorée pour supporter du Télétravail coopératif (plusieurs personnes se trouvant à des endroits différents peuvent participer et travailler ensemble pour réaliser une mission). Le système a été réalisé en prenant en compte des contraintes liées aux domaines de la Télé-robotique (instabilité des systèmes en présence de délai) et de la Télécommunication (transmission de données informatiques).

ARITI Web Le projet a été initié par Samir Otmane pendant sa thèse en 1996 [Otmane, 2000]. Les premiers travaux ont amené à la mise en place du premier système de téléopération robotique en Réalité Augmentée en France. Il permet d'assister un utilisateur afin de manipuler des objets réels distants par un robot via un navigateur Web figure 6.19. Les outils utilisés ont permis d'apporter une assistance à l'opérateur en situation de télétravail, une assistance à la perception de l'environnement et à la commande du robot dans le but de garantir la sécurité durant le processus.

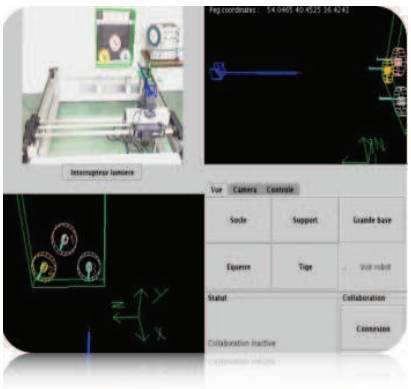


FIGURE 6.19: Illustration de la première interface pour l'assistance à la téléopération en réalité augmentée

Les recherches ont été poursuivies notamment sur les aspects de télétravail collaboratif. En effet, de nombreuses missions (téléchirurgie, télémaintenance ou encore téléopération en milieux hostiles) nécessitent une collaboration entre plusieurs personnes. C'est dans ce contexte que des travaux ont été entrepris [Khezami et al., 2005] et ont mené à la conception d'un collecticiel de téléopération via le WEB figure 6.20. L'objectif de ces travaux concerne la modélisation et la conception d'un système multi-agents de collaboration pour l'assistance à la préparation de missions et l'exécution des tâches collaboratives.

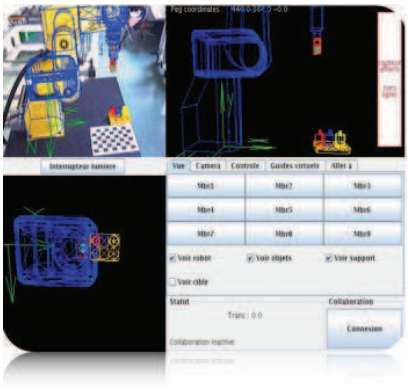


FIGURE 6.20: Illustration présentant la seconde interface pour l'assistance à la téléopération collaborative. Des fonctions de travail collaboratif sont présentes et permettent à des utilisateurs de communiquer et de se coordonner en vue de réaliser des missions

ARITI via des plateformes de RV/RA Cette version d'ARITI sur une plateforme de Réalité Virtuelle permet d'interagir naturellement avec le robot distant via l'utilisation d'interfaces homme-machine 3D (voir la figure 6.21). Une toute première version a vu le jour permettant le contrôle du robot par un utilisateur. Par la suite, des expériences ont été réalisées sur la téléopération collaborative entre deux plateformes de Réalité Virtuelle et Augmentée distantes [Ligeour et al., 2006]. L'objectif est d'étudier et de déterminer les principales exigences qu'impose un télétravail collaboratif, en particulier dans le cas de la téléopération. Cette étude a mis en évidence plusieurs problèmes notamment, ceux qui concernent le manque d'informations sur l'interaction du groupe et le manque d'outils de coordination des tâches et des utilisateurs. C'est dans ce contexte, que nous avons appliqué notre modèle de gestion de l'interaction d'un groupe d'utilisateurs.



FIGURE 6.21: L'application ARITI sur la plateforme EVR@

Dans ce qui suit, nous aborderons les aspects techniques sous-jacents permettant la téléopération collaborative sur des plateformes de Réalité Virtuelle et via le Web. Cet aspect nous permettra d'implémenter notre modèle dans le cadre d'une application réelle.

6.3.3 Architecture du système

Le projet ARITI se présente donc sous deux formes. Tout d'abord, ARITI Web qui permet la téléopération collaborative d'un robot. L'interaction avec le robot s'effectue à tour de rôle pour les différents utilisateurs. Une seconde forme concerne la téléopération de ce même robot sur une plateforme de réalité virtuelle par un utilisateur. L'utilisateur peut contrôler le robot via l'utilisation d'un dispositif de tracking optique. Les deux formes ne peuvent cohabiter ensemble et il n'est pas possible pour un utilisateur de travailler avec un autre utilisateur n'étant pas sur le même type de plateforme. Cela, nous a amené à redéfinir les aspects techniques du projet ARITI afin de permettre de la téléopération collaborative de manière synchrone sur les deux types de plateformes.

6.3.3.1 Sites Maîtres

Cette section abordera uniquement l'aspect logiciel du projet ARITI. En effet, le matériel de la plateforme EVRA a été présenté dans le chapitre 5. Nous exploiterons la bibliothèque de modules que nous avons présenté dans le chapitre 5 pour concevoir le système de téléopération multi-utilisateurs. En effet, elle permet de construire des applications de réalité virtuelle multi-utilisateurs via l'assemblage de modules spécifiques. Dans le cas de la téléopération, de nouveaux modules ont dû être conçus, notamment, des modules permettant le contrôle du robot réel et virtuel ainsi que d'un module de visualisation vidéo stéréoscopique afin de visualiser les robot distants en 3D. Nous superposerons alors le flux distant aux robots virtuels. Ces nouvelles fonctions ont été regroupées sous un module intitulé "téléopération" (voir figure 6.22).

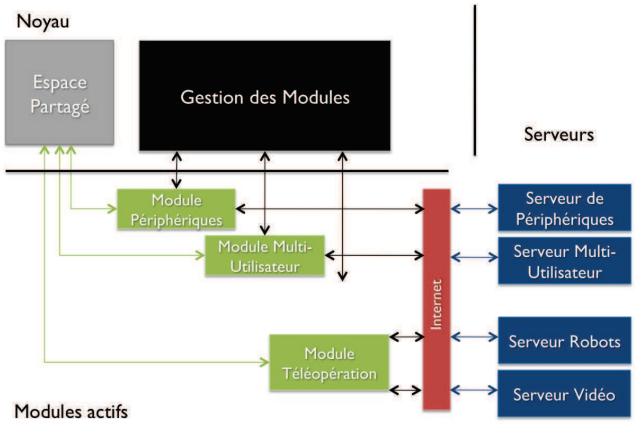


FIGURE 6.22: Assemblage des différents modules pour la mise en place du système de téléopération multi-utilisateurs

Cette nouvelle version va permettre à plusieurs opérateurs qu'ils soient distants ou sur le même site et ayant chacun sa propre interface de téléopérer des robots distants ainsi que de collaborer, pour réaliser des tâches communes (par exemple: déplacer des poids lourds grâce à plusieurs robots). Les utilisateurs peuvent activer ou désactiver des fonctions durant l'utilisation comme par exemple désactiver la réalité augmentée ou ajouter des fonctions de création de trajectoires.

Virtools permet de déployer des applications Web très facilement. Cette dernière est ensuite lisible moyennant l'installation d'un plugin sur le navigateur. Cela présente l'avantage de ne développer qu'une seule application compatible avec une plateforme de Réalité Virtuelle ou sur le Web. La figure 6.23 présente l'interface d'ARITI multi-utilisateurs, plus particulièrement, elle correspond à l'interface Web. En effet, cette dernière dispose d'un panneau de contrôle permettant le déplacement du robot axes par axes via l'appui sur les boutons prévus (en vert sur figure 6.23) à cette effet.

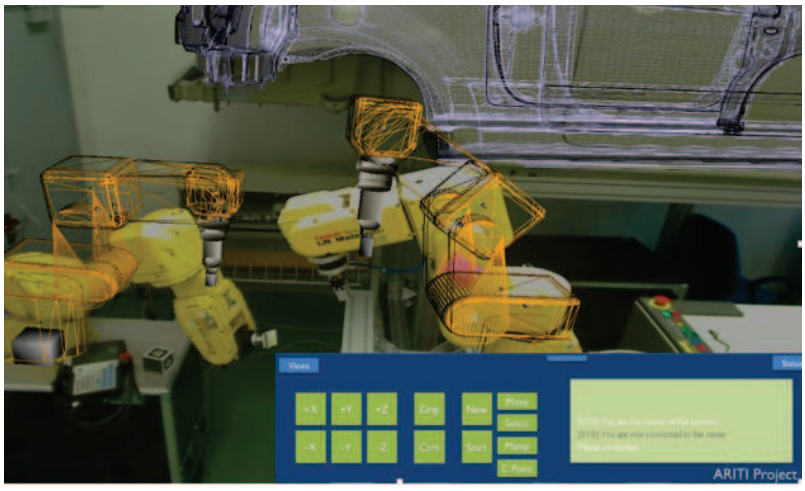


FIGURE 6.23: L'interface d'ARITI multi-utilisateurs sous Virtools

6.3.3.2 Site Esclave: les robots et leur environnement

Les robots Les deux robots sont des Fanuc Lr Mate 200i (voir annexe D). Ces derniers sont de type bras manipulateur et possèdent six degrés de liberté. Ils sont composés de deux sous-ensembles distincts : un organe terminal (l'effecteur) et une structure mécanique articulé. Les équations géométriques directes et inverses du Fanuc Lr Mate sont disponibles dans l'annexe D. Le robot et ses équations ont été modélisés informatiquement sous 3DSMAX et Virtools permettant ainsi la simulation d'un robot simulé.



FIGURE 6.24: Un robot Fanuc LR Mate 200i

Environnement des robots Les robots sont reliés à Internet via une prise RJ45. Nous avons modifié les technologies utilisées sur ARITI afin de permettre d'une part le partage des flux vidéos entre tous les participants qu'elle que soit la nature de leur interface (Web ou RV) et d'autre part l'ajout de nouveaux points de vue permettant de visualiser l'environnement sous un autre point de vue.
Les robots sont filmés par quatre caméras USB Logitech 900 qui permettent, le cas échéant, de restituer deux flux vidéo stéréoscopique et audio aux sites maîtres sous forme de streaming vidéo. La diffusion des flux peut être utilisée via plusieurs protocoles comme Unicast ou Multicast. Dans l'annexe D, nous présentons les méthodes de diffusion utilisées pour la retransmission des flux distants.
Un PC présent sur le site esclave, relié aux caméras, héberge un serveur de commande pour piloter les robots et un serveur de streaming vidéo pour restituer le flux vidéo. Dans le cadre de ARITI multi-utilisateurs, le serveur multi-utilisateurs de la plateforme EVRA est utilisé afin de permettre la connexion, la communication, la coordination et la production d'un ensemble de personnes situées sur les différents sites maîtres (voir figure 6.25). Dans l'annexe D et dans l'annexe B, nous présentons une vue d'ensemble des développements réalisés durant cette thèse.

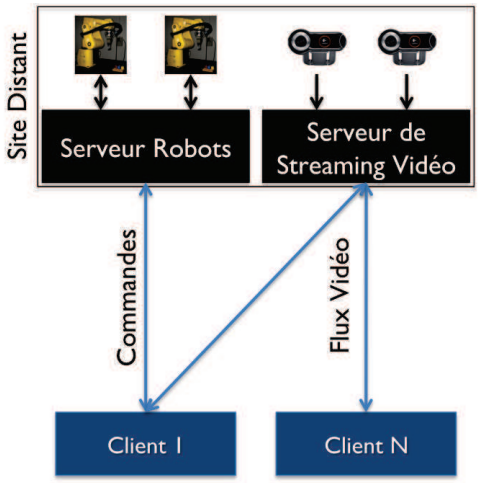


FIGURE 6.25: Les serveurs du site esclave

En résumé, le projet ARITI comporte les serveurs présentés sur la figure 6.26.

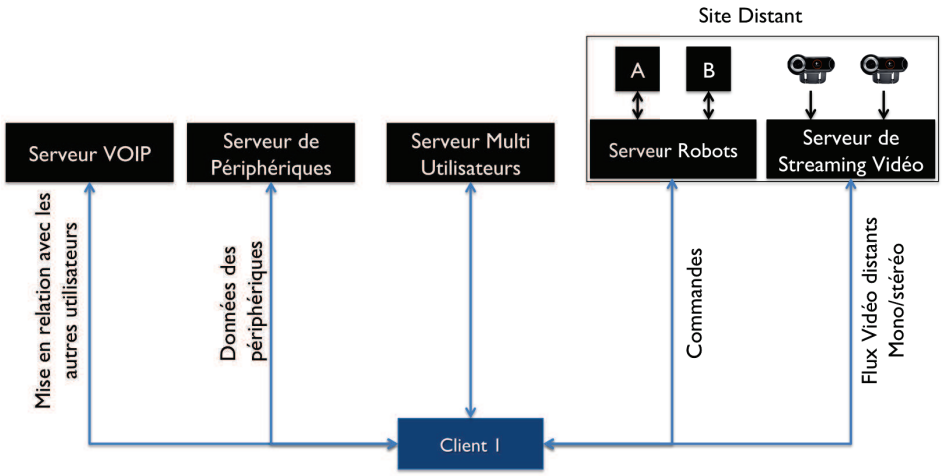


FIGURE 6.26: L'architecture réseau du projet ARITI multi-utilisateurs

Tâche d'application Le projet ARITI comporte une démonstration, accessible soit à partir du WEB, soit à partir des deux plateformes de RV. Pour le robot FANUC, il s'agit de le téléopérer à partir du site maître afin de saisir un à un, trois objets géométriques de forme et de couleur différentes disposés sur un socle et de les déposer dans les emplacements qui leurs sont associés. Cette manipulation, en apparence très simple, se révèle très compliquée sans assistance proposée à l'utilisateur, car les précisions au moment de la sélection et de la dépose de chacun des objets sont de l'ordre de 3 millimètres.
Dans le cadre de cette thèse afin de tester notre modèle dans le cadre d'une application réelle, nous avons mis en place une nouvelle tâche applicative à réaliser par deux utilisateurs, soit par le Web, soit à partir des deux plateformes de RV ou soit de manière mixte. Cette application se base sur les développements réalisés sur le projet ARITI que

nous avons présenté précédemment. En effet, les modifications apportées au projet ARITI permettent la conception d'une application à partir de modules. Nous avons donc utilisé le travail réalisé sur le projet ARITI et sur le quatrième chapitre pour intégrer notre système de gestion du workflow (voir figure 6.27). Cependant, nous n'avons pas exploité la diffusion vidéo ainsi que la superposition réel-virtuel. Nous étudierons dans un premier temps, la réalisation de cette tâche en simulation. L'adaptation au monde réel de cette tâche nécessite différents ajustements afin de garantir le succès de la tâche en terme de sécurité et de précision.

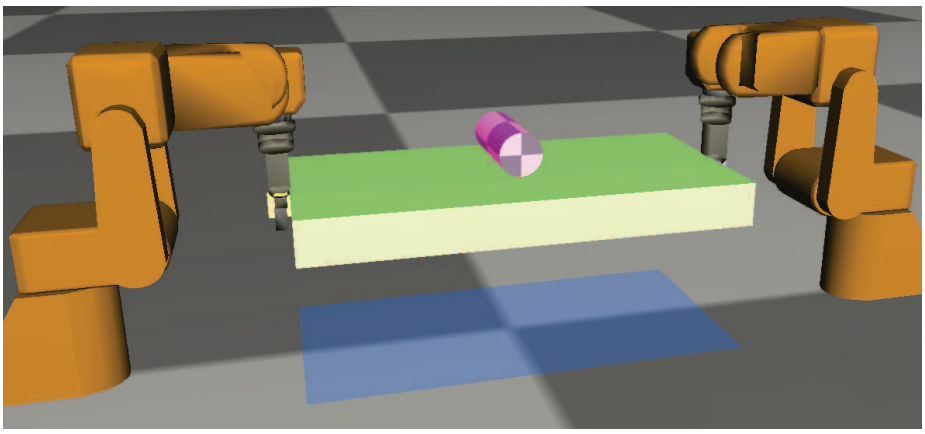


FIGURE 6.27: L'environnement virtuel pour la réalisation de la tâche

Cette tâche consiste à déposer une planche, préalablement saisie par les deux robots FANUC virtuels sans faire chuter l'objet déposé dessus. C'est une tâche que l'on retrouve dans le monde industriel pour le déplacement d'objets sensibles par plusieurs robots. Nous avons établi un protocole expérimental pour expérimenter notre modèle de gestion du Workflow. Ce protocole expérimental prend en compte les problèmes que nous avons eu durant la première expérimentation.

6.3.4 Proposition d'une expérimentation

Cette section aborde le protocole expérimental que nous avons mis en place dans le but d'évaluer notre modèle de gestion du Workflow dans le cadre d'une application de téléopération collaborative en Réalité Virtuelle. La tâche est présentée précédemment. Dans cette expérimentation, les deux utilisateurs vont devoir déplacer jusqu'à une zone prévue un objet ensemble. Cette expérimentation est similaire à l'expérimentation de la manipulation à deux utilisateurs. Cependant, nous avons apporté des modifications, afin de la limiter à un unique secteur de passage. Nous souhaitons tester les différents types d'assistances (visuelles et modification de la commande) afin de déterminer leurs apports sur les performances dans une tâche de téléopération collaborative. Nous proposons

alors un protocole d'évaluation permettant de connaître les performances. Compte tenu des résultats que nous avons obtenu, nous avons modifié l'expérience du chapitre 4. En effet, nous avons supprimé les différents secteurs de passage. Les deux utilisateurs doivent déposer la planche avec le cylindre posé, ce qui correspond au secteur 3. L'expérimentation prend fin lorsque la planche est déposée.

6.3.4.1 Présentation de l'expérimentation

Dispositif matériel Nous utiliserons le même dispositif que pour les deux expériences qui est illustré sur la figure 6.28. L'EVC est composé de deux robots virtuels FANUC LRMate 200i simulés, pour chacun des deux utilisateurs, d'un objet en forme de planche à manipuler avec un cylindre posé sur le dessus et d'une zone de dépôt qui sera utilisée pour valider la fin de la manipulation. Les deux robots sont de même taille et de couleur jaune. Le premier utilisateur étant à gauche et le second à droite de l'objet.

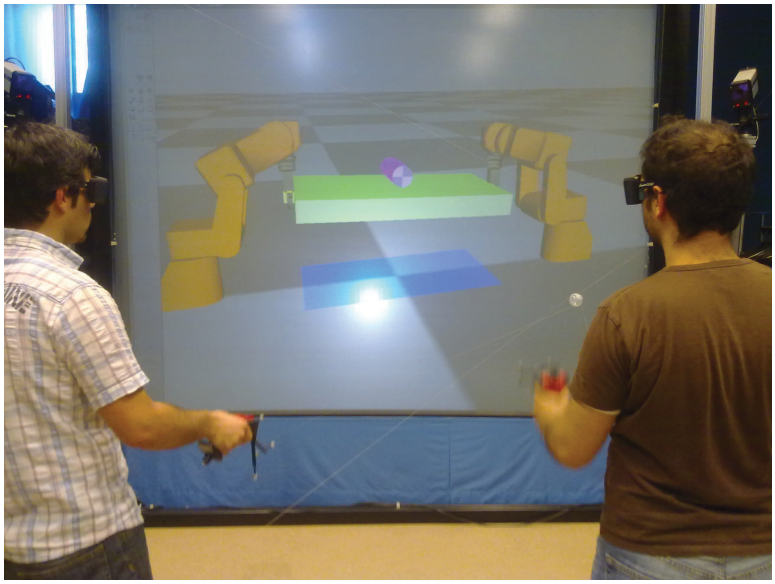


FIGURE 6.28: Le dispositif expérimental de l'expérience

Technique d'interaction 3D Comme pour la première expérience, nous utilisons une technique de manipulation classique pour la manipulation de l'objet (Main virtuelle simple), aux quelles nous avons appliqué notre modèle d'assistance. Le déplacement des robots nécessite l'appui sur les gâchettes des Flystick.

Les robots des utilisateurs sont liés aux points d'attache de la planche via une liaison mécanique de type encastrement simulant le serrage d'un objet par les pinces des robots. Deux types d'assistances à la manipulation seront testées dans cette expérience :

- Assistance visuelle;

- Assistance visuelle et à la manipulation.

L'utilisation des assistances est similaire à la seconde expérience présentée précédemment. Cependant, les avatars sont remplacés par les deux robots virtuels FANUC. Le mouvement de l'avatar n'est plus libre mais contraint le système articulaire du robot.

6.3.4.2 Déroulement de l'expérience

L'expérience pour les couples de sujets, consiste à déposer la planche préalablement sélectionnée sur une zone de dépôt prévue à cette effet le plus vite possible. Cependant, ils ne doivent pas faite chuter le cylindre durant la manipulation et doivent éviter l'obstacle. L'expérience est terminée si: soit le couple dépose la planche avec ou sans cylindre sur la zone, soit le temps maximum est atteint. Un couple effectue, en tout, six essais dont deux pour chaque condition. Au début de chaque essai, les paramètres (position de la caméra virtuelle, position des objets, position de la planche, position du cylindre, etc.) sont rée initialisés. Les conditions de cette expérience sont:

- Condition A (CA) : sans assistance;
- Condition B (CB) : assistance visuelle;
- Condition C (CC) : assistances visuelles et de manipulation.

6.3.4.3 Facteurs et indicateurs

Les facteurs et les indicateurs sont similaires à ceux utilisés pour la seconde expérience.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé des expérimentations nous permettant de constater l'intérêt de notre modèle dans les tâches mono et multi-utilisateurs de l'interaction 3D. Les évaluations ont été réalisées via notre outil d'assistance à l'évaluation. Celui-ci a été construit en parallèle et nous a permis d'évaluer durant la conception afin de déceler les problèmes. Deux expérimentations ont été menées et se sont focalisées sur les trois tâches (navigation, sélection et manipulation). Dans un premier temps, nous avons mené une expérimentation sur les tâches de navigation et de sélection. L'utilisateur a réalisé l'évaluation sur la plateforme de Réalité Virtuelle EVRA. L'objectif était ici de vérifier l'apport des assistances dans les tâches mono-utilisateur. La seconde

expérimentation concerne quant à elle la manipulation synchrone d'un objet par deux utilisateurs. L'objectif ici a été de tester les performances des assistances durant la déplacement d'un objet sur lequel était posé un cylindre. En effet, une des difficultés de l'interaction multi-utilisateurs est l'aspect coordination durant la réalisation d'une tâche. Cette expérimentation a démontré des faiblesses dans la conception du protocole expérimental qui nécessite une étude plus approfondie au cas par cas ainsi que dans la fonction d'assistance à la manipulation qui engendre un mouvement du cylindre dans le second secteur lorsque les utilisateurs stoppent le déplacement. Cela est dû au fait que le cylindre se retrouve dans un mouvement rectiligne uniforme accéléré. Pour cela, il est nécessaire de composer cela pour éviter un mouvement. De plus, il est nécessaire que notre modèle de gestion et d'organisation traite de l'aspect sociologique du groupe. Cela dans le but, d'éviter que certains participants pensent que leur contribution est plus importante que l'autre.
D'autre part, de nouvelles expérimentations sont nécessaires. En effet, cette expérimentation abordée de manière très générale, nous a obligé à identifier plusieurs conditions de mesure. Il serait intéressant de procéder à de nouvelles expérimentations, en particulier en permettant le re-positionnement du cylindre lors de sa chute afin de comptabiliser le nombre de chutes pendant le déplacement. Ainsi qu'une évaluation avec deux utilisateurs sur des sites différents. Ensuite, nous avons placé notre modèle de gestion de

l'interaction multi-utilisateurs dans le contexte applicatif de la téléopération à plusieurs opérateurs. Pour ce faire, nous avons dû effectuer un travail préliminaire, consistant à adapter les travaux existants en vue de permettre une collaboration synchrone par plusieurs utilisateurs avec plusieurs robots. Pour cela, nous avons proposé une nouvelle plateforme de téléopération permettant :

- La multi-diffusion distante des robots;
- La prise en charge de plusieurs utilisateurs sur différentes plateformes matériels (EVRA, EVRA Mobile et WEB);
- La généricité des développements via l'approche sous forme de modules indépendants.

Nous avons conçu une application autour de cette plateforme pour intégrer notre modèle de gestion de l'interaction 3D du groupe. Nous avons proposé un protocole expérimental pour l'évaluation du modèle dans ce contexte avec cette application.

Conclusion et Perspectives

Conclusions

Le travail présenté dans cette thèse repose sur deux observations principales.
La première concerne le besoin d'assister les utilisateurs lors du processus de l'interaction 3D collaborative dans un Environnement Virtuel Collaboratif (EVC). En effet, ces environnements sont composés de plusieurs utilisateurs qui interagissent entre eux, afin de réaliser des actions communes (déplacement en groupe, sélection d'objets, manipulation d'objets, dialogue, etc.). Cependant, la réalisation de ces différentes actions nécessite le respect de plusieurs contraintes, plus particulièrement, celles liées à la coordination des différents utilisateurs et à la conscience de présence des utilisateurs dans l'EVC. Ces contraintes apportent à ce domaine de recherche, plusieurs verrous technologiques et scientifiques que nous avons identifiés. Pour cela, deux questions sont posées : Quel modèle pour organiser et gérer l'interaction 3D du groupe dans un EVC ? Et comment améliorer la perception des utilisateurs lors du processus d'interaction collaborative ?
La seconde observation concerne la nécessité d'aider les utilisateurs (développeurs) dans la conception de protocoles expérimentaux afin d'évaluer rapidement des systèmes d'interaction 3D. En effet, actuellement l'évaluation des techniques d'interaction 3D est un des problèmes majeurs dans la majorité des applications de RV. La manière d'étudier les méthodes d'interactions 3D n'est pas aujourd'hui complètement maîtrisée et il est difficile de connaître leurs performances en raison d'un certain nombre de spécificités liées à l'interaction 3D : beaucoup de dispositifs pour interagir ; immaturité de la méthodologie de conception des interactions 3D [Rizzo et al., 2005] et du fait qu'il existe peu de spécialistes en évaluation. Pour cela, nous nous sommes intéressés à la question suivante : Comment faciliter la conception des protocoles expérimentaux pour évaluer des systèmes d'interaction 3D afin de réaliser des expérimentations plus souvent ?
Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux questions posées par la première observation et qui concerne l'assistance à l'interaction 3D du groupe dans un EVC. Afin de tenter de répondre à ces questions, nous avons effectué une étude sur les différents systèmes et projets traitants des EVC, ainsi que sur les modèles associés

à la gestion de l'interaction du groupe, à la conscience et à la présence d'un groupe d'utilisateurs. Ce premier travail nous a permis de comprendre, comment s'opère la gestion des actions des différents participants avec les entités ou entre eux dans l'EVC. Dans un second temps, nous avons passé en revue les techniques d'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs existantes. Ce travail est nécessaire pour comprendre le fonctionnement des moyens dont disposent les utilisateurs pour agir dans les EVCs. Ces deux études (chapitres 1 et 2) sont utilisées comme base pour l'approche proposée dans le quatrième chapitre.
Dans un second temps, afin d'essayer de répondre à la question relative à la deuxième observation, nous avons étudié (dans le chapitre 3) les différentes approches d'évaluation pour les systèmes d'interaction 3D : analytiques et empiriques. L'étude réalisée nous a amené à la conclusion que les approches analytiques ne sont pas adaptées à l'évaluation des systèmes d'interaction 3D dû à une très grande diversité des périphériques et des techniques d'interaction 3D, qui ne permettent pas d'avoir des méthodes analytiques adaptées. Par conséquent, nous avons étudié plus précisément l'approche empirique. Cependant, cette dernière est complexe à mettre en œuvre et nécessite de choisir correctement les différents paramètres (indicateurs de performances, facteurs extérieurs, etc.).

En conséquence, deux contributions ont émergées de ces questionnements.
La première contribution (chapitre 4) s'appuie sur les résultats des études réalisées dans les deux premiers chapitres. Nous avons proposé un concept permettant d'assurer l'interaction du groupe dans l'EVC. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur la boucle de **perception-action** que nous avons modifiée afin d'intégrer une composante de workflow. Cette composante va perturber le cycle "Perception-Action" afin de modifier la perception des participants pour qu'ils puissent interagir de manière synchrone dans l'EVC et plus précisément, cela va permettre la coordination des utilisateurs. Afin de structurer l'interaction 3D collaborative, nous avons proposé une spécification fonctionnelle incluant les quatre composantes de notre modèle : la navigation, la sélection, la manipulation/production et la communication. Cette spécification exploite les concepts de **Focus, de Nimbus, d'Aura, d'Assistants et de vecteur d'états** qui représentent le formalisme de gestion de l'interaction du groupe qui permet l'organisation et la gestion de l'interaction 3D dans un EVC.
La deuxième contribution (chapitre 5) se base sur les résultats de l'étude réalisée dans le troisième chapitre. Nous avons proposé un outil d'aide à l'évaluation qui se décompose en deux éléments: d'une part une partie **"pilotage et mesures des variables"** qui permet de piloter les différents cas de l'évaluation que l'expérimentateur aura spécifié durant la création du protocole expérimental, et d'autre part, une partie **"expérimentale"** composée d'une base de connaissances. Outre la base de connaissance, la partie expérimentale

assiste l'évaluateur, pour qu'il puisse faire le bon choix des indicateurs permettant d'obtenir des mesures, mais aussi les facteurs qui modifient fortement ces mesures. Cela est possible par l'utilisation d'algorithmes statistiques de décision permettant une présélection des paramètres.
Enfin, nous avons réalisé deux expérimentations nous permettant de connaître les performances de notre modèle dans des tâches d'interaction 3D mono-utilisateur et multi-utilisateurs. Les évaluations ont été réalisées en utilisant notre outil d'assistance proposé dans le chapitre 5. La première expérimentation (en mono-utilisateur) est réalisée sur une tâche de sélection. L'objectif principal est de vérifier l'apport du modèle d'assistance proposé sur des tâches de sélection élémentaires. En effet, les tâches de sélection mono-utilisateur représentent des pré-requis nécessaires, afin d'obtenir par la suite une bonne coordination pour les tâches multi-utilisateurs. La seconde expérimentation concerne quant à elle la manipulation synchrone d'un objet par deux utilisateurs. L'objectif est de tester les performances de l'assistance durant le déplacement d'un objet sur lequel est posé un objet "cylindre". Cette expérimentation a démontré des faiblesses dans la conception du protocole expérimental qui nécessite une étude plus approfondie au cas par cas. Enfin, nous avons appliqué notre modèle de gestion de l'interaction de groupe dans le cadre du projet ARITI avec deux robots virtuels. Nous avons proposé un protocole d'expérimentation prenant en compte les conclusions des premières expérimentations.

Contributions

En résumé, les travaux réalisés durant cette thèse présentent des originalités. En effet, le concept de gestion à base de workflow pour l'interaction 3D multi-utilisateurs permet la coordination des utilisateurs dans un EVC afin qu'ils réalisent des tâches de l'interaction 3D en commun et cela via l'utilisation de techniques mono-utilisateur. Nous abordons ici le thème de l'interaction 3D multi-utilisateurs en nous intéressant aux méthodes permettant l'organisation et à la gestion de l'interaction du groupe, donc à la **coordination**. Cela permet l'utilisation de techniques d'interaction mono-utilisateur (Main Virtuelle, Ray Casting, etc.). En effet, le système a la capacité de connaître les intentions des utilisateurs lors de la réalisation des tâches de l'interaction 3D, il pourra donc fournir les outils d'assistance nécessaires à la coordination. Ce concept a été implémenté dans un EVC et expérimenté via l'utilisation de notre outil d'assistance à l'évaluation des IHM 3D. L'outil proposé repose sur le concept d'assistance à l'évaluation et permet, d'une part, de construire de manière assistée un protocole expérimental. D'autre part, il permet de piloter et de mesurer le déroulement de l'évaluation afin d'établir des analyses. Enfin, le concept de gestion du workflow dédiée à l'interaction 3D multi-utilisateurs a

été également utilisé dans une application de téléopération de robots (télémanipulation d'un seul objet par deux robots simultanément).

Perspectives

Les perspectives à court terme portent sur l'intégration d'une assistance à la manipulation pour la prise en charge de la décélération des utilisateurs lors du déplacement d'un objet. De plus, le rendu visuel utilisé pour notre système d'assistance, peut être enrichi par des rendus haptiques ou sonores, d'autant plus que notre modèle peut supporter ces ajouts via la création de nouvelles fonctions. En effet, il peut être intéressant de "sentir" les effets des autres utilisateurs durant la manipulation d'un objet (What You feel is What I feel). Cependant, l'ajout de ces modalités ne peut intervenir qu'après de nouvelles évaluations de l'approche.
En effet, la phase expérimentale concernant notre modèle de Workflow pour la gestion de l'interaction du groupe, nécessite quelques améliorations et plus particulièrement en ce qui concerne la manipulation d'un objet à plusieurs. En effet, notre première expérimentation plutôt, nous a permis d'identifier différents problèmes mais il serait intéressant de poursuivre en évaluant plus précisément les outils d'assistance dans plusieurs cas qui nous semblent intéressants :

- Évaluer la tâche de manipulation indépendamment dans chaque secteur;
- Utiliser d'autres techniques mono-utilisateur de manipulation;
- Utiliser d'autres types de liaisons mécaniques entre les avatars et l'objet;
- Intégrer d'autres participants pour la manipulation de l'objet;
- Utiliser des dispositifs différents pour les utilisateurs en co-localisés (Flystick-SPIDAR);
- Réaliser l'expérience sur deux sites distants avec dans un premier temps des dispositifs d'interaction similaires (par exemple Flystick-Flystick) et dans un second des dispositifs différents (Flystick-SPIDAR).

Concernant l'outil d'aide à l'évaluation, les perspectives à court terme sont d'ordre technique. Elles portent sur l'intégration de nouvelles données provenant des expérimentations (nouveaux questionnaires, nouveaux indicateurs) ainsi que sur la possibilité de générer des environnements virtuels pour l'évaluation. Ces environnements sont générés à partir des éléments choisis par l'expérimentateur.

A moyen ou plus long terme, nous pensons qu'il est nécessaire de prendre en compte les comportements/caractères des utilisateurs lorsqu'ils collaborent ensemble afin de proposer des assistances personnalisées. Une personnalisation qui peut tout d'abord prendre en compte le degré d'expertise des utilisateurs, mais aussi le caractère (compétiteur et rapide, un utilisateur qui prend son temps, etc.). Un système capable de "satisfaire" les utilisateurs en donnant le sentiment que toutes les contributions sont indispensables afin d'éviter de la frustration. Pour cela il serait intéressant d'établir le lien entre les chapitres 4 et 5 afin d'intégrer de nouveaux paramètres dans les vecteurs d'états des utilisateurs (préférences, comportement, expertise) ou bien d'autres paramètres orientés techniques (retard réseau, type d'interface). En effet, la composante de mesure du système d'aide à l'évaluation pourrait mesurer ces nouvelles données et compléter les vecteurs d'états des utilisateurs. Ces nouveaux états peuvent permettre le développement de nouveaux outils d'assistance adaptés au contexte des tâches et des utilisateurs.
Concernant l'évaluation, il est nécessaire de proposer des modèles prédictifs qui permettent de prévoir les performances des IHM 3D à l'image des IHM 2D. Cependant notre outil ne peut pas proposer cela car il est dédié à l'approche empirique. Mais, il peut être utilisé pour la proposition de modèles analytiques (le concept de l'outil est de "conserver une trace" des expériences). Des ergonomes peuvent alors utiliser les données accumulées afin de proposer des approches analytiques génériques.

Partie III

Bibliographie

Bibliographie

[Aguerreche et al., 2009a] Aguerreche, L., Duval, T., and Arnaldi, B. (2009a). Analyse de techniques de coopération en environnements virtuels 3d. *TSI. Technique et science Informatiques*, 28(6-7):767–797.

[Aguerreche et al., 2009b] Aguerreche, L., Duval, T., and Lécuyer, A. (2009b). Short paper: 3-hand manipulation of virtual objects. *Joint Virtual Reality Conference of EGVE - ICAT - EuroVR*, pages 153–156.

[Arthur et al., 1998] Arthur, K., Preston, T., Taylor, R., Brooks, F., Whitton, M., and Wright, W. (1998). Designing and building the pit: a head-tracked stereo workspace for two users. *Proc. of 2nd International Immersive Projection Technology Workshop*.

[Aukstakalnis and Blatner, 1992] Aukstakalnis, S. and Blatner, D. (1992). Silicon mirage: The art and science of virtual reality. *Peachpit Press*.

[Azuma, 1997] Azuma, R. (1997). A survey of augmented reality. *In Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4):355–385.

[Benford and Fahlen, 1993] Benford, S. and Fahlen, L. (1993). A spatial model of interaction in large virtual environments. *Proceedings of the third conference on European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, pages 109–124.

[Bharadwaj et al., 2005] Bharadwaj, V., Reddy, Y., and Reddy, S. (2005). Integrating awareness sources in heterogeneous collaboration environments. *Doctoral Consortium Enterprise Information Systems ICEIS 2005*, pages 18–27.

[Biocca et al., 2001] Biocca, F., Harms, C., and Gregg, J. (2001). The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity. *4th annual International Workshop on Presence, Philadelphia, PA*.

[Bolt, 1980] Bolt, R. (1980). "put-that-there": Voice and gesture at the graphics interface. *Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 262–270.

[Boudoin et al., 2008] Boudoin, P., Domingues, C., Otmane, S., Ouramdane, N., and Mallem, M. (2008). Towards multimodal human-robot interaction in large scale virtual environment. *in the 3rd ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction (HRI)*, pages 359–366.

[Bouguet et al., 2007] Bouguet, A., Coldefy, F., Guérin, J., dit Picard, S. L., and Pavy, D. (2007). Environnement virtuel pour télépresence collaborative 3d. *Actes des 2èmes journées AFRV*, pages 33–37.

[Bowers, 1993] Bowers, J. (1993). Modelling awareness and interaction in virtual spaces. *in Proceedings of the 6th MultiG Workshop*.

[Bowman, 1999] Bowman, D. (1999). Interaction techniques for common tasks in immersive virtual environments. *Thèse - Georgia Institute of Technology*.

[Bowman and Hodges, 1999] Bowman, D. and Hodges, L. (1999). Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments. *Journal of Visual Languages and Computing*, 10(1):37–53.

[Bowman et al., 2001a] Bowman, D., Johnson, D., and Hodges, L. (2001a). Testbed evaluation of virtual environment interaction techniques. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(1):75–95.

[Bowman et al., 2001b] Bowman, D., Kruijff, E., Jr, J. L., and Poupyrev, I. (2001b). An introduction to 3d user interface design. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(1):96–108.

[Bowman et al., 2004] Bowman, D., Kruijff, E., LaViola, J., and Poupyrev, I. (2004). 3d user interfaces: Theory and practice. *MIT Press*.

[Bowman et al., 1998] Bowman, D., Wineman, J., and Hodges, L. (1998). Designing animal habitats within an immersive ve. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(5):9–13.

[Bowman et al., 2001c] Bowman, D., Wingrave, C., Campbell, J., and Ly, V. (2001c). Using pinch gloves for both natural and abstract interaction techniques in virtual environments. *Proceedings of HCI International*, pages 629–633.

[Burdea and Coiffet, 1993] Burdea, G. and Coiffet, P. (1993). La réalité virtuelle. *Edition Hermes Sciences Publication*.

[Burkhardt, 2003] Burkhardt, J. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie: quelques apports réciproques. *Le travail humain - P.U.F*, 96(1).

[Churchill and Snowdon, 1998] Churchill, E. and Snowdon, D. (1998). Collaborative virtual environments: an introductory review of issues and systems. *Virtual Reality*, 3(1):3–15.

[Coquillart et al., 2003] Coquillart, S., Grosjean, J., and Paljic, A. (2003). Interaction 3d, paradigmes et métaphores. *Traité de la réalité virtuelle, Chapitre 12, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, pages 331–380.

[Damer, 1997] Damer, B. (1997). Demonstration and guided tours of virtual worlds on the internet. *CHI '97 extended abstracts on Human factors in computing systems: looking to the future. SESSION: Demonstrations: virtual worlds and reality*, pages 10–11.

[Ding and Zhu, 2003] Ding, D. and Zhu, M. (2003). A model of dynamic interest management: interaction analysis in collaborative virtual environment. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 223–230.

[Dodds and Ruddle, 2008a] Dodds, T. and Ruddle, R. (2008a). Mobile group dynamics in large-scale collaborative virtual environments. *Virtual Reality Conference, 2008. VR '08. IEEE*, pages 59–66.

[Dodds and Ruddle, 2008b] Dodds, T. and Ruddle, R. (2008b). Using teleporting, awareness and multiple views to improve teamwork in collaborative virtual environments. *Proceedings of the 14th eurographics symposium on virtual environments (EGVE'08), Eindhoven, The Netherlands*, pages 81–88.

[Domingues et al., 2007] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., and Mallem, M. (2007). Empirical evaluation assistant tool for 3d interaction techniques. *In 4th International Conference on Enactive Interfaces (ENACTIVE'07)*, pages 89–92.

[Domingues et al., 2008a] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., and Mallem, M. (2008a). Creating 3d interaction technique empirical evaluation with the use of a knowledge database of interaction experiments. *IEEE Conference on Human System Interaction (HSI 2008), Krakow : Pologne (2008)*, pages 1–6.

[Domingues et al., 2008b] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., and Mallem, M. (2008b). A distributed software architecture for collaborative teleoperation based on a vr platform and web application interoperability. *18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ACM ICAT 2008)*, pages 265–268.

[Domingues et al., 2008c] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., and Mallem, M. (2008c). Software architecture to prototype 3d interaction technique empirical evaluation. *In Virtual Reality International Conference (VRIC'08)*, pages 45–55.

[Domingues et al., 2009a] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., and Mallem, M. (2009a). Towards multi-platform software architecture for collaborative teleoperation. *2nd Mediterranean Conference on Intelligence Systems and Automation (CISA 09)*, 1107:347–349.

[Domingues et al., 2009b] Domingues, C., Otmane, S., Davesne, F., Mallem, M., and Benchikh, L. (2009b). A distributed architecture for collaborative teleoperation using virtual reality and web platforms. *in 6th IEEE Conference Consumer Communications and Networking, 2009. CCNC 2009.*, pages 1–5.

[Domingues et al., 2010] Domingues, C., Otmane, S., and Mallem, M. (2010). 3dui-ef: Towards a framework for easy empirical evaluation of 3d user interfaces and interaction techniques. *The International Journal of Virtual Reality 2010*, 9(1):73–80.

[Dourish and Bly, 1992] Dourish, P. and Bly, S. (1992). Portholes: supporting awareness in a distributed work group. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 541–547.

[Dumas et al., 1998] Dumas, C., Saugis, G., Chaillou, C., and Degrande, S. (1998). Spind : A 3-d interface for cooperative work. *Springer-Verlag*, 4(1):15–25.

[Dünser et al., 2008] Dünser, A., Grasset, R., and Billinghurst, M. (2008). A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses*, (5).

[Duval and Fleury, 2009] Duval, T. and Fleury, C. (2009). An asymmetric 2d pointer/3d ray for 3d interaction within collaborative virtual environments. *3D technologies for the World Wide Web. Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology*, pages 33–41.

[Duval et al., 2006] Duval, T., Lecuyer, A., and Thomas, S. (2006). Skewer: a 3d interaction technique for 2-user collaborative manipulation of objects in virtual environments. *Proceedings of the 3D User Interfaces (3DUI'06)*, pages 69–72.

[Duval and Tenier, 2004] Duval, T. and Tenier, C. L. (2004). Interactions 3d coopératives en environnements virtuels avec openmask pour l'exploitation d'objets techniques. *Mécanique & Industries, Elsevier*, 5(2):129–137.

[Ellis et al., 1991] Ellis, C., Gibbs, S., and Rein, G. (1991). Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1):58.

[Fitts, 1954] Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47:381–391.

[Forsberg et al., 1996] Forsberg, A., Herndon, K., and Zeleznik, R. (1996). Aperture based selection for immersive virtual environments. *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 95–96.

[Fraser et al., 1999] Fraser, M., Benford, S., Hindmarsh, J., and Heath, C. (1999). Supporting awareness and interaction through collaborative virtual interfaces. *Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 27–36.

[Freeman et al., 2000] Freeman, J., Avons, S., Meddis, R., and Pearson, D. (2000). Using behavioral realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9(2):149–164.

[Fuchs et al., 2006a] Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., Coquillart, S., Vercher, J., Burkhardt, J., and Auvray, M. (2006a). Le traité de la réalité virtuelle: Volume 2, interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel. *Presses de l'Ecole des mines*.

[Fuchs et al., 2006b] Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., Vercher, J., and Auvray, M. (2006b). Le traité de la réalité virtuelle: Volume 1, l'homme et l'environnement virtuel. *Presses de l'Ecole des mines*.

[García et al., 2008] García, A., Molina, J., Martínez, D., and González, P. (2008). Enhancing collaborative manipulation through the use of feedback and awareness in cves. *Virtual Reality Continuum And Its Applications. Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, (32).

[Gerhard et al., 2001] Gerhard, M., Moore, D., and Hobbs, D. (2001). Continuous presence in collaborative virtual environments: Towards a hybrid avatar-agent model for user representation. *Lecture notes in computer science*, 2190(2001):137–155.

[Gibson, 1989] Gibson, W. (1989). Neuromancer. *Ace*.

[Glencross et al., 2002] Glencross, M., Marsh, J., Cook, J., Daubrenet, S., Pettifer, S., and Hubbold, R. (2002). Divipro: Distributed interactive virtual prototoyping. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications*, pages 170–170.

[Greenberg, 1990] Greenberg, S. (1990). Sharing views and interactions with single-user applications. *ACM SIGOIS Bulletin*, 11(2-3):227–237.

[Greenberg et al., 1996] Greenberg, S., Gutwin, C., and Cockburn, A. (1996). Awareness through fisheye views in relaxed-wysiwis groupware. *Proceedings of Graphics Interface - Morgan-Kaufmann*, pages 28–38.

[Greenhalgh, 1997] Greenhalgh, C. (1997). Large scale collaborative virtual environments. *Thèse - University of Nottingham*.

[Greenhalgh and Benford, 1995] Greenhalgh, C. and Benford, S. (1995). Massive: A collaborative environment for teleconferecing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2(3):239–261.

[Greenhalgh and Benford, 1997] Greenhalgh, C. and Benford, S. (1997). Boundaries, awareness and interaction in collaborative virtual environments. *Proceedings of the 6th Workshop on Enabling Technologies Infrastructure for Collaborative Enterprises*, pages 193–198.

[Greenhalgh and Benford, 1999] Greenhalgh, C. and Benford, S. (1999). Supporting rich and dynamic communication in large-scale collaborative virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(1):14–35.

[Greenhalgh et al., 2000] Greenhalgh, C., Purbrick, J., and Snowdon, D. (2000). Inside massive-3: Flexible support for data consistency and world structuring. *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*, pages 119–127.

[Gross et al., 2003] Gross, M., Wurmlin, S., Naef, M., Lamboray, E., Spagno, C., Kunz, A., Koller-Meier, E., Svoboda, T., Gool, L. V., and Lang, S. (2003). blue-c: A spatially immersive display and 3d video portal for telepresence. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):819–827.

[Gutwin and Greenberg, 2002] Gutwin, C. and Greenberg, S. (2002). A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *Computer Supported Cooperative Work*, 11:411–446.

[Heim, 1995] Heim, M. (1995). The design of virtual reality. *Body & Society*, 1(3-4):65–77.

[Hindmarsh et al., 1998] Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., and Benford, S. (1998). Fragmented interaction: establishing mutual orientation in virtual environments. *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pages 217–226.

[Hindmarsh et al., 2000] Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., and Benford, S. (2000). Object-focused interaction in collaborative virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(4):477–509.

[Hix et al., 1999] Hix, D., Swan, J., Gabbard, J., McGee, M., and Durbin, J. (1999). User-centered design and evaluation of a real-time battlefield visualization virtual environment. *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, pages 96–96.

[Hrimech, 2009] Hrimech, H. (2009). Evaluation de métaphores d'interaction pour le travail collaboratif entre sites distants d'immersion virtuelle. *Thèse - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*.

[Igarashi et al., 2007] Igarashi, T., Matsuoka, S., and Tanaka, H. (2007). Teddy: a sketching interface for 3d freeform design. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM SIGGRAPH 2007 courses*, (21).

[Iwata, 1999] Iwata, H. (1999). Locomotion interface for virtual environments. *Proceedings of the 9th International Symposium*, pages 275–282.

[John et al., 1996] John, W., Richard, C., and David, B. (1996). Locales: Supporting large multiuser virtual environments. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 16(6):50–57.

[Johnson and Rickel, 1997] Johnson, W. and Rickel, J. (1997). Steve: an animated pedagogical agent for procedural training in virtual environments. *SIGART Bulletin*, 8(1-4).

[Kalawsky, 1993] Kalawsky, R. (1993). The science of virtual reality and virtual environments. *Addison Wesley Longman Publishing Co, Inc.*

[Karaseitanidis et al., 2006] Karaseitanidis, I., Amditis, A., Patel, H., Sharples, S., Bekiaris, E., Bullinger, A., and Tromp, J. (2006). Evaluation of virtual reality products and applications from individual, organizational and societal perspectives—the "view" case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(3):251–266.

[Kaur, 1997] Kaur, K. (1997). Designing virtual environments for usability. *Proceedings of the IFIP TC13 Interantional Conference on Human-Computer Interaction*, 96:636–639.

[Kennedy et al., 1993] Kennedy, R., Lane, N., and Berbaum, K. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220.

[Khezami, 2005] Khezami, N. (2005). Vers un collecticiel basé sur un formalisme multi-agent destiné à la téléopération collaborative via internet. *Thèse - Université d'Evry Val d'Essonne*.

[Khezami et al., 2005] Khezami, N., Otmane, S., and Mallem, M. (2005). An approach to modelling collaborative teleoperation. *Advanced Robotics, 2005. ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on*, pages 788–795.

[Lang et al., 2003] Lang, S., Naef, M., Gross, M., Hovestadt, L., and Zurich, E. (2003). In: Shop-using telepresence and immersive vr for a new shopping experience. *Proceedings of the 8th International Fall Workshop on Vision, Modelling and Visualization 2003*.

[Lanier, 1992] Lanier, J. (1992). Virtual reality: The promise of the future. *Interactive Learning International*, 8(4):275–279.

[Leiva-Lobos and Covarrubias, 2002] Leiva-Lobos, E. and Covarrubias, E. (2002). The 3-ontology: a framework to place cooperative awareness. *Groupware Design, Implementation and Use. Lecture notes in computer science*, 2440:511–518.

[Liang et al., 1994] Liang, J, Green, and M (1994). Jdcad: A highly interactive 3d modeling system. *3rd International Conference on CAD and Computer Graphics*, 18(4):499–506.

[Liang and Green, 1994] Liang, J. and Green, M. (1994). Jdcad: A highly interactive 3d modeling system. *3rd International Conference on CAD and Computer Graphics*, 18(4):499–506.

[Ligeour et al., 2006] Ligeour, V. L., Otmane, S., Mallem, M., and Richard, P. (2006). Distributed software architecture for collaborative teleoperation based on networked mixed reality platforms. *Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA '06. 2nd*, pages 3498–3503.

[Macedonia et al., 1994] Macedonia, M. R., Zyda, M. J., Pratt, D. R., Barharn, P. T., and Zeswitz, S. (1994). Npsnet: A network software architecture for large scale virtual environments. *Presence*, 3(4):256–287.

[MacKenzie and Buxton, 1992] MacKenzie, I. and Buxton, W. (1992). Extending fitts' law to two-dimensional tasks. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 219–226.

[Mapes and Moshell, 1995] Mapes, D. and Moshell, J. (1995). A two-handed interface for object manipulation in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):260–302.

[Mer et al., 2001] Mer, P. L., Perron, L., Chaillou, C., and Saugis, G. (2001). Collaborating with virtual humans. *In: Proceedings of the HCI01 Conference on People and Computers XV*, pages 83–104.

[Mer et al., 2004] Mer, P. L., Soler, L., Pavy, D., and Bernard, A. (2004). Argonaute 3d: a real-time cooperative medical planning software on dsl network. *Studies in health technology and informatics*, (98):203–209.

[Milgram and Kishino, 1994] Milgram, P. and Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *EICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12):1321–1329.

[Mine, 1995] Mine, M. (1995). Virtual environment interaction techniques. *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report: TR95-018*.

[Mine et al., 1997] Mine, M., Jr, F. B., and Sequin, C. (1997). Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 19–26.

[Murata and Iwase, 2001] Murata, A. and Iwase, H. (2001). Extending fitts' law to a three-dimensional pointing task. *Human movement science*, 20(6):791–805.

[Nielsen, 1994] Nielsen, J. (1994). Heuristic evaluation. *Usability inspection methods*.

[Noma and Miyasato, 1997] Noma, M. and Miyasato, T. (1997). Cooperative object manipulation in virtual space using virtual physics. *Proceeding of Dynamic System and Control ASME*, 61:101–106.

[Normand et al., 1999] Normand, V., Babski, C., Benford, S., and Bullock, A. (1999). The coven project: exploring applicative, technical and usage dimensions of collaborative virtual environments. *Presence*, 8(2):218–236.

[OBrien et al., 1998] OBrien, J., Buscher, M., Rodden, T., and Trevor, J. (1998). "red is behind you": The experience of presence in shared virtual environments. *Presented at the BT Workshop on Presence in Shared Virtual Environments*.

[Otmane, 2000] Otmane, S. (2000). Teletravail robotise et realite augmentee: Applicationa la teleoperation via internet. *Thèse - Université d'Evry Val d'Essonne*.

[Otmane et al., 2010] Otmane, S., Domingues, C., Davesne, F., and Mallem, M. (2010). Collaborative 3d interaction in virtual environments: a workflow-based approach. *Book chapter in Virtual Reality, INTECH International, in press*.

[Otmane et al., 2000] Otmane, S., Mallem, M., Kheddar, A., and Chavand, F. (2000). Active virtual guides as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the internet. *Proceedings of the 33rd Annual Simulation Symposium*, pages 185–191.

[Otmane et al., 2007] Otmane, S., Ouramdane-Djerah, N., and Mallem, M. (2007). Towards a collaborative 3d interaction model for cooperative design in virtual environments. *11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2007.*, pages 198–203.

[Ouramdane, 2009] Ouramdane, N. (2009). Vers un système d'assistance à l'interaction 3d pour le travail et le télétravail collaboratif dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée. *Thèse - Université d'Evry Val d'Essonne.*

[Ouramdane-Djerrah et al., 2007] Ouramdane-Djerrah, N., Otmane, S., and Mallem, M. (2007). A new model of collaborative 3d interaction in shared virtual environment. *Lecture Notes in Computer Science, Human-Computer Interaction.*, 4551:663–672.

[Partage, 2007] Partage (2007). Projet rntl part@ge. *http://partage.ingenierium.com.*

[PERV-RV, 2004] PERV-RV (2004). Perf-rv: Plate-forme française de réalité virtuelle. *http://www.perfrv.org.*

[Pierce et al., 1997] Pierce, J., Forsberg, A., Conway, M., Hong, S., Zeleznik, R., and Mine, M. (1997). Image plane interaction techniques in 3d immersive environments. *Symposium on Interactive 3D Graphics. Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 39–ff.

[Pierce et al., 1999] Pierce, J., Stearns, B., and Pausch, R. (1999). Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments. *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 141–145.

[Pinho et al., 2002] Pinho, M., Bowman, D., and Freitas, C. (2002). Cooperative object manipulation in immersive virtual environments: framework and techniques. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 171–178.

[Poupyrev et al., 1996] Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S., and Ichikawa, T. (1996). The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr. *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 79–80.

[Poupyrev et al., 1997] Poupyrev, I., Weghorst, S., and Billinghurst, M. (1997). A framework and testbed for studying manipulation techniques for immersive vr. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 21–28.

[Poupyrev et al., 1998] Poupyrev, I., Weghorst, S., and Billinghurst, M. (1998). A study of techniques for selecting and positioning objects in immersive ves: effects of distance, size, and visual feedback. *Proceedings of ACM CHI'98.*

[Prada and Payandeh, 2009] Prada, R. and Payandeh, S. (2009). On study of design and implementation of virtual fixtures. *Virtual Reality*, 13(2):117–129.

[Quinlan, 1993] Quinlan, J. (1993). *C4.5: programs for machine learning*.

[Rheingold, 1991] Rheingold, H. (1991). Virtual community: Homesteading on the electronic frontier. *MIT Press Cambridge*.

[Riege et al., 2006] Riege, K., Holtkamper, T., Wesche, G., and Frohlich, B. (2006). The bent pick ray: An extended pointing technique for multi-user interaction. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 2006.*, pages 62–65.

[Rizzo et al., 2005] Rizzo, A., Kim, G., Yeh, S., and Thiebaux, M. (2005). Development of a benchmarking scenario for testing 3d user interface devices and interaction methods. *Proceedings of the 11th International Conference on Human Computer Interaction*.

[Rodden, 1996] Rodden, T. (1996). Populating the application: a model of awareness for cooperative applications. *Proceedings of the 1996 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pages 87–96.

[Sandor et al., 1997] Sandor, O., Bogdan, C., and Bowers, J. (1997). Aether: an awareness engine for cscw. *Proceedings of the fifth conference on European Conference on Supported Collaborative Work, ECSCW'97*, pages 221–236.

[Schal and Schael, 1996] Schal, T. and Schael, T. (1996). Workflow management systems for process organizations. *Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA*.

[Schroeder et al., 2001] Schroeder, R., Steed, A., Axelsson, A., Heldal, I., Abelin, Å., Wideström, J., Nilsson, A., and Slater, M. (2001). Collaborating in networked immersive spaces: as good as being there together? *Computers & Graphics*, 25(5):781–788.

[Schuemie et al., 2001] Schuemie, M., Straaten, P. V. D., Krijn, M., and Mast, C. V. D. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):183–201.

[Sheridan, 1992] Sheridan, T. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–126.

[Sheridan and MIT, 1993] Sheridan, T. and MIT, C. (1993). Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5):592–606.

[Simmross-Wattenberg et al., 2005] Simmross-Wattenberg, F., Carranza-Herrezuelo, N., Palacios-Camarero, C., de-la Higuera, P. C., Martín-Fernández, M., Aja-Fernández, S., Ruiz-Alzola, J., Westin, C., and Alberola-Lopez, C. (2005). Groupslicer: A collaborative extension of 3d-slicer. *Journal of Biomedical Informatics*, 38(6):431–442.

[Stanney et al., 2003] Stanney, K., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R., and Graeber, D. (2003). Usability engineering of virtual environments (ves): identifying multiple criteria that drive effective ve system design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(4):447–481.

[Sternberger, 2006] Sternberger, L. (2006). Interaction en réalité virtuelle. *Thèse - Université Louis Pasteur*.

[Sternberger et al., 2008] Sternberger, L., Bechmann, D., and Gerber, D. (2008). L'interaction en réalité virtuelle: Etat de l'art. *Technique et Science Informatiques*, 27(9-10):1155–1188.

[Stewart et al., 1999] Stewart, J., Bederson, B., and Druin, A. (1999). Single display groupware: a model for co-present collaboration. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit*, pages 286–293.

[Stoakley et al., 1995] Stoakley, R., Conway, M., and Pausch, R. (1995). Virtual reality on a wim: Interactive worlds in miniature. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 265–272.

[Sutcliffe, 2000] Sutcliffe, A. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour and Information Technology*, 19(6):415–426.

[Sutherland, 1968] Sutherland, I. (1968). A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*, pages 757–764.

[Tisseau, 2001] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle: autonomie in virtuo. *Habilitation à Diriger des Recherches - Université de Rennes 1*.

[Ullah et al., 2008] Ullah, S., Ouramdane, N., Otmane, S., and Richard, P. (2008). Augmenting 3d interactions with haptic guide in a large scale virtual environment. *Proceedings of The 7th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, (22).

[Wideström et al., 2000] Wideström, J., Axelsson, A., Schroeder, R., and Nilsson, A. (2000). The collaborative cube puzzle: a comparison of virtual and real environments. *Proceedings of the third international conference on Collaborative virtual environments*, pages 165–171.

[Wikimedia et al., 2010] Wikimedia, Fundation, and Inc (2010). Wikipédia. *http://www.wikipedia.fr*.

[Zammar, 2005] Zammar, C. E. (2005). Interactions cooperatives 3d distantes en environnements virtuels : gestion des problemes reseau. *Thèse - INSA Rennes*.

[Zeltzer, 1992] Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):127–132.

Partie IV

Annexes

Annexe A

Les questionnaires

A.1 Questionnaire toutes évaluations: Informations des participants

1. Quel est vôtre âge ?
2. Vous êtes?
   (a) Un homme
   (b) Une femme
3. Vous êtes?
   (a) Gaucher
   (b) Droitier
   (c) Ambidextre
4. A quelle fréquence utilisez-vous un ordinateur ?
   (a) Très Souvent
   (b) Assez souvent
   (c) Rarement
   (d) Jamais
5. Avez-vous déjà utilisé un dispositif de réalité virtuelle ?
   (a) Oui
   (b) Non
6. Si oui, quel(s) dispositif(s) ?

   (a) Gants de données

   (b) Flystick

   (c) Systèmes à retour d'efforts

7. Jouez-vous aux jeux vidéo ?

   (a) Oui

   (b) Non

8. Maintenant, vous êtes plutôt?

   (a) Nerveux

   (b) Tendu(e)

   (c) Fatigué(e)

   (d) Calme

   (e) Stressé(e)

   (f) Détendu(e)

   (g) Excité(e)

9. Travaillez vous en équipe dans la vie de tous les jours?

   (a) Oui

   (b) Non

A.2 Questionnaire Expérience 1: Utilisabilité

1. Le déplacement de l'avatar vous semble t-il facile?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

2. J'ai réussi à déplacer mon avatar dès les premiers instants?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

3. Je pense que j'ai compris le rôle de l'aura rapidement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

4. Je pense que j'ai compris le rôle des guides virtuels rapidement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

5. Les couleurs de l'aura et des guides virtuels sont utiles?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

6. Les couleurs de l'aura et des guides virtuels sont-elles représentatives de vos actions?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

A.3 Questionnaire Expérience 1: Préférences et Satisfaction

1. Pensez vous que les guides visuels sont correctement affichés?
   (a) Oui
   (b) Probablement oui
   (c) Non
   (d) Probablement non
   (e) Ne se prononce pas (NSP)
2. Pensez vous que les informations affichées à l'écran sont trop nombreuses?
   (a) Oui
   (b) Probablement oui
   (c) Non
   (d) Probablement non
   (e) Ne se prononce pas (NSP)
3. Pensez vous que les informations affichées à l'écran sont pertinentes?
   (a) Oui
   (b) Probablement oui
   (c) Non
   (d) Probablement non
   (e) Ne se prononce pas (NSP)
4. Pensez vous que cette information est utile?
   (a) Oui
   (b) Probablement oui
   (c) Non
   (d) Probablement non
   (e) Ne se prononce pas (NSP)
5. Jugez vous avoir été surchargé d'informations durant le processus?
   (a) Oui
   (b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

6. Pensez vous que vous avez eu connaissance des informations nécessaires?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

7. Pensez vous que les éléments visuels ont un intérêt?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

A.4 Questionnaire Expérience 2: Effort Collaboratif

1. J'ai pu ressentir ce que voulais réaliser l'autre participant

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

2. J'ai compris ce que voulais faire les autres participants?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

3. J'ai souvent repris l'autre participant?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

4. L'autre participant m'a souvent repris

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

5. J'ai regardé ce que faisait l'autre participant virtuellement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

6. J'ai regardé ce que faisait l'autre participant réellement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

7. Je pense que l'autre participant m'a observé virtuellement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

8. Je pense que l'autre participant m'a observé réellement?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

9. J'ai ignoré mes partenaires?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

10. Je pense que l'autre participant m'a ignoré? :

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

11. Mes idées étaient claires pour les autres participants?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

12. Les idées des autres participants étaient claires?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

13. Les autres participants ont compris ce que je voulais faire?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

14. J'ai compris ce que voulais faire les autres participants?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

15. Mes actions étaient dépendantes des autres participants?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

16. Les actions des autres participants dépendaient de mes actions?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

17. Les autres ne m'ont pas aidé?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

18. Je n'ai pas aidé les autres participants?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

A.5 Questionnaire Expérience 2: Implication et Conscience (Awareness) du groupe

1. J'ai été un participant très actif dans les phases de dialogue?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

2. Avez vous perdu la notion du temps durant l'utilisation?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

3. Des événements extérieurs vous ont ils perturbés?

    (a) Oui

    (b) Probablement oui

    (c) Non

    (d) Probablement non

    (e) Ne se prononce pas (NSP)

4. Avez vous apprécié travailler avec votre coéquipier?

    (a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

A.6 Questionnaire Expérience 2: Utilisabilité

1. Le déplacement de l'objet vous semble t-il facile?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

2. J'ai réussi à déplacer l'objet dès les premiers instants?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

3. Je pense que j'ai réussi facilement à déplacer l'objet?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

4. Les aides visuelles sont utiles?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

5. Les informations données par les aides visuelles sont utiles?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

6. L'aide à la commande est elle utile?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

7. L'aide à la commande vous empêche t-elle de manipuler correctement l'objet?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

A.7 Questionnaire Expérience 2: Préférences et Satisfaction

1. Pensez vous que les assistances visuelles sont correctement affichées?

   (a) Oui

   (b) Probablement oui

   (c) Non

   (d) Probablement non

   (e) Ne se prononce pas (NSP)

2. Pensez vous que les informations affichées à l'écran sont trop nombreuses?

   (a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

3. Pensez vous que les informations affichées à l'écran sont pertinentes?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

4. Pensez vous que cette information est utile?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

5. Jugez vous avoir été surchargé d'informations durant le processus?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

6. Pensez vous que vous avez eu connaissance des informations nécessaires?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

7. Pensez vous que les éléments visuels ont un intérêt?

(a) Oui

(b) Probablement oui

(c) Non

(d) Probablement non

(e) Ne se prononce pas (NSP)

8. Que est le mode que vous aimez le plus?

(a) Mode 1: Sans assistance

(b) Mode 2: Assistance visuelle

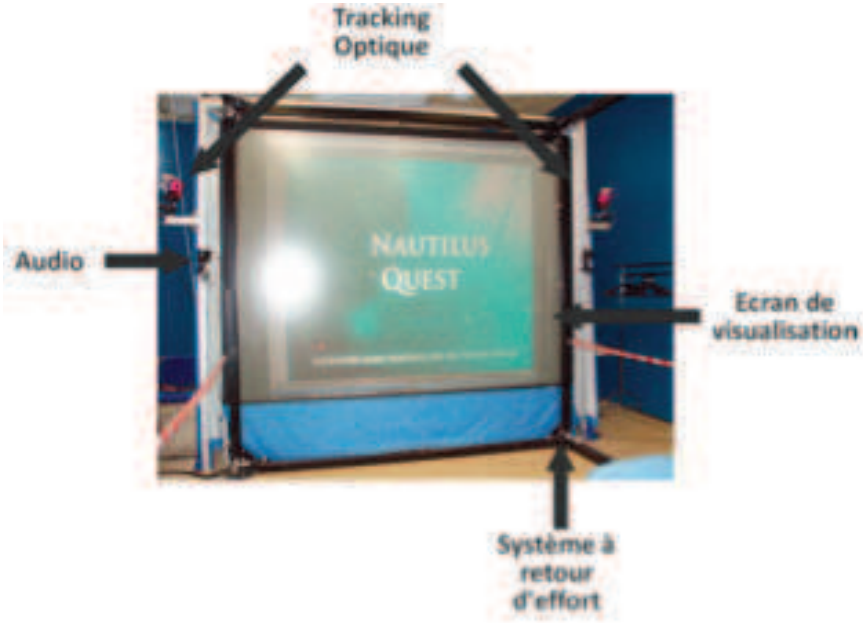
(c) Mode 3: Assistance complète

Annexe B

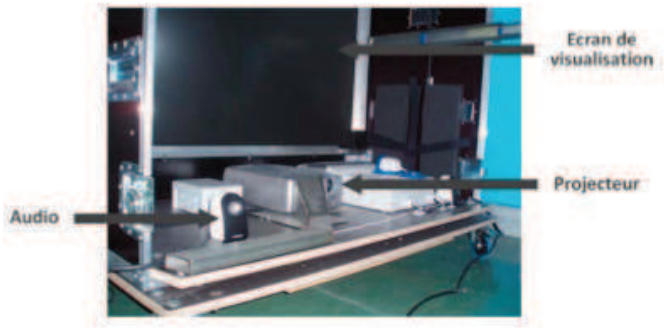
La plateforme EVR@ et la bibliothèque de modules

B.1 La plateforme technologique EVR@

La plateforme EVR@ (Environnements Virtuels et de Réalité Augmentée) est une plateforme technologique du laboratoire IBISC. Elle a été financée en partie par le CNRS et le conseil général de l'Essonne. Elle regroupe deux sous-plateformes installées dans deux salles différentes. Dans une première salle, on trouve une plateforme de RM (voir figure B.1(a)) dans laquelle l'utilisateur peut être en semi-immersion et dans la seconde, une plateforme de RM mobile (voir figure B.1(b)). Les deux noeuds de la plateforme EVR@ forment une base technologique dédiée au télétravail collaboratif. Les domaines d'application que nous étudions concernent particulièrement la téléopération de robots. La plateforme EVR@ est élaborée dans le but de pouvoir réaliser des interactions mono-utilisateur ou multi-utilisateurs avec des environnements complexes tels que des environnements de RM.



(a) La plateforme EVRA



(b) Les composantes de la plateforme EVRA Mobile

FIGURE B.1: Les plateformes de Réalité Virtuelle du laboratoire

B.1.0.4 Les dispositifs d'entrée/sortie

Visualisation La plateforme est composée d'un écran de grande taille (3.2m X 2.4m) pour la vision stéréoscopique. Pour cela, un projecteur DLP 120Hz a été choisi pour ses excellentes caractéristiques en stéréoscopie active (voir figure B.2). Ce même projecteur est placé derrière l'écran (en rétroprojection) afin de laisser l'utilisateur libre de ses mouvements. Ce dernier dispose d'une carte graphique Quadro FX4500. Pour ce qui est des lunettes, ce sont des Crystal Eyes 3 avec leurs émetteurs qui sont utilisées. EVR@ Mobile dispose quant à elle d'un écran plus petit avec des capacités de stéréoscopie active.



FIGURE B.2: Le projecteur DLP de la plateforme fixe

Tracking Optique L'interaction homme-machine est réalisée par l'intermédiaire d'un "flystick" (voir la figure B.3) que l'utilisateur tient à la main. Ce "flystick" est composé de boules blanches réfléchissantes qui sont suivies en temps réel par deux caméras infrarouges ARTTrack1, placées sur les deux cotés de l'écran. Le "matching" de la forme géométrique composée par les boules réfléchissantes avec des formes préétablies permet d'obtenir la position et l'orientation du flystick avec une précision de l'ordre de $0,1$ mm en position et $0,1$ degré en orientation. L'utilisateur est donc libre de ses mouvements qui peuvent être retranscrits dans un environnement virtuel. Le flystick n'est pas le seul élément qui peut être "tracké". La plateforme EVR@ dispose d'un marqueur pour la main et d'un marqueur pour les lunettes stéréoscopiques afin de suivre la main et le mouvement de la tête. EVR@ mobile ne dispose pas de ce type de dispositifs.



FIGURE B.3: Le flystick

Gants de données Deux paires de gants sont disponibles: une première version comportant quatorze capteurs et une autre version comportant cinq capteurs (voir la figure B.4). Ces deux paires de gants ont été conçues par 5DT (Fifth Dimension). Les deux paires fonctionnent sans fil. La version de cinq capteurs comporte un capteur par doigt et permet donc de mesurer la flexion des cinq doigts. La version avec quatorze capteurs comportent deux capteurs par doigt, un capteur au niveau des phalanges du métacarpe, les autres sur les phalanges. Ces nouveaux capteurs nous permettent de mesurer, si le poing de la main est plus ou moins fermé. Quatre autres capteurs sont positionnés entre deux doigts, ces derniers permettent de mesurer l'écartement entre les doigts.



FIGURE B.4: Un gant de données 5DT disposant de quatorze capteurs

SPIDAR Pour finir, les deux plateformes ont chacune un SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality). Le SPIDAR est un système à câbles et à encodeurs permettant d'obtenir un retour haptique mais aussi d'obtenir position et orientation. Le préhenseur est relié par des fils aux huit blocs moteurs. Ces huit moteurs sont disposés aux huit sommets de la structure Spidar de forme cubique. Les fils s'enroulent sur des poulies et sont entraînés par les moteurs. Ce dispositif possède donc une mécanique simplifiée par rapport à des systèmes comme le PHANToM6D et dispose d'un plus grand volume de travail.

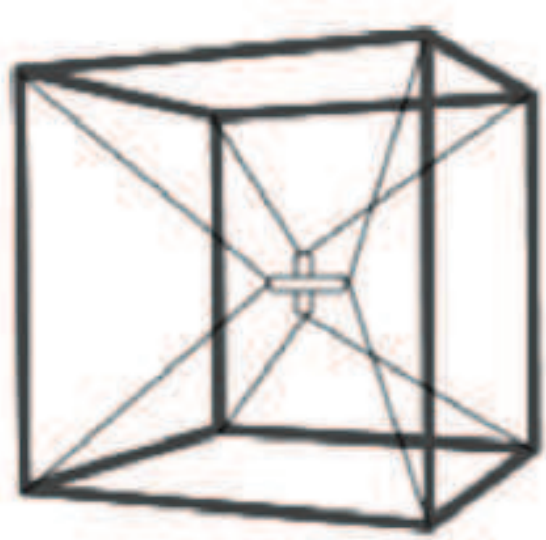


FIGURE B.5: Le SPIDAR

B.2 La plateforme logicielle

La plateforme EVR@ peut être exploitée via le logiciel Virtools. Celui-ci est un logiciel de développement et de déploiement d'applications 3D pour la réalité virtuelle et pour les jeux vidéo. L'originalité de Virtools est que "la programmation" se réalise par l'ajout et la connexion de blocs. Un bloc permet d'appliquer un comportement sur un élément 3D afin de pouvoir le déplacer ou bien le faire tourner.
Afin de réaliser des applications multi-utilisateurs, nous avons opté pour une solution compatible avec Virtools. Cette option via l'ajout d'un serveur spécialisé permet de réaliser des environnements multi-utilisateurs en fournissant des fonctions dédiées aux partage des informations entre les différents clients. Les clients communiquant entre eux directement sans passer par le serveur, ce dernier étant utilisé à l'initialisation pour mettre en relation les différents participants. Cependant, les fonctionnalités de cette option sont limitées et ne permettent pas de gérer des communications audio/vidéo entre les participants. Par conséquent, nous avons intégré un serveur Voix par IP (VOIP).

B.2.1 Serveur VOIP

Le serveur de VOIP permet les communications audio et vidéo entre les participants se connectant au système collaboratif. La solution retenue est basée sur Asterisk. Asterisk est un PABX open source pour systèmes UNIX créé en 1999. Asterisk permet, entre autre, la messagerie vocale, les conférences, les files d'attente, les agents d'appels, les musiques d'attente et les mises en garde d'appels, la distribution des appels sont toutes des fonctionnalités standard intégrées directement au logiciel. Asterisk implémente les protocoles H.320, H.323 et SIP, ainsi qu'un protocole spécifique nommé IAX (Inter-Asterisk eXchange). Ce protocole IAX permet la communication entre deux serveurs Asterisk ainsi qu'entre client et serveur Asterisk.
En effet, nous avons opté pour cette solution étant donné que le laboratoire dispose de deux systèmes de vidéoconférence Polycom VSX 5000. Ce système permet de communiquer en exploitant les protocoles H323 et SIP. Asterisk permet l'hébergement d'une salle de conférence qui sera exploitable par tous les utilisateurs disposant d'un client compatible SIP qu'il soit matériel ou logiciel. De cette manière, tous les participants de l'EVC peuvent communiquer entre eux via des systèmes ouverts et libres.
Les utilisateurs disposent d'un compte avec un numéro de téléphone associé. Cela permet d'identifier les participants afin de les mettre en relation.

B.2.2 Serveur multi-utilisateurs Virtools

La figure B.6 illustre la configuration du serveur multi-utilisateurs Virtools permettant la synchronisation entre les participants. Alors que la figure B.7 illustre le code source sous permettant l'exploitation par les utilisateurs des fonctions multi-utilisateurs.

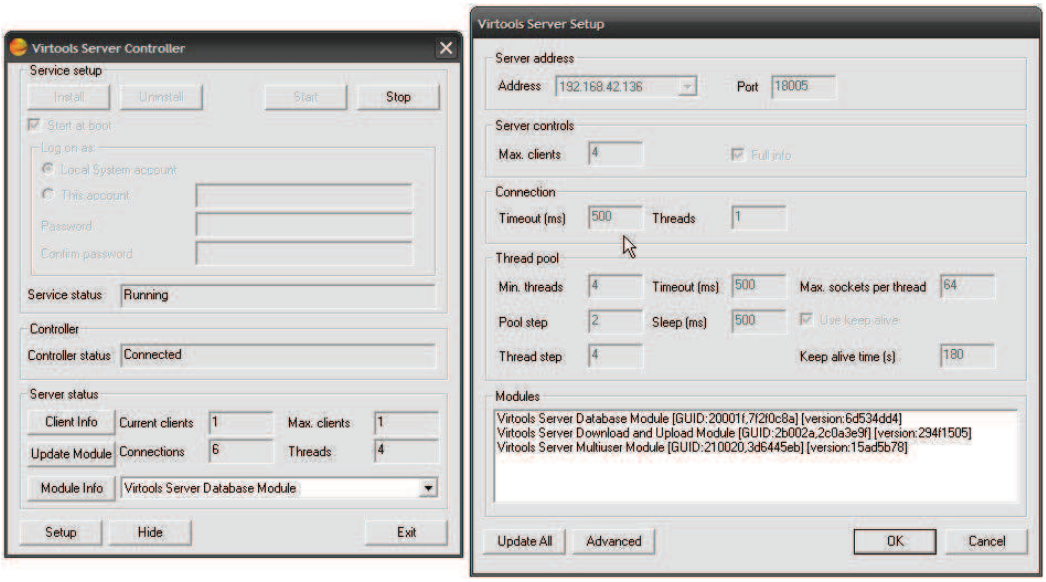


FIGURE B.6: Configuration du serveur multi-utilisateurs

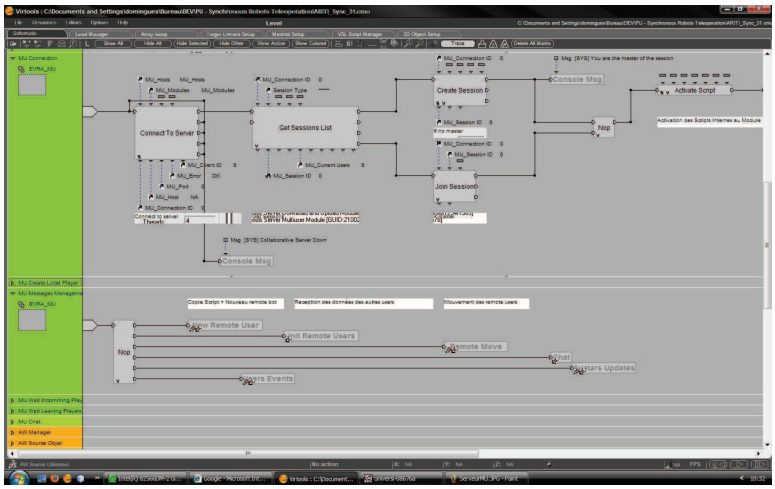


FIGURE B.7: Le code source permettant la connexion au serveur multi-utilisateurs

B.2.3 Modules

Une bibliothèque de modules a été mise en place. Elle permet le développement d'environnements virtuels multi-utilisateurs. Ainsi par exemple, par un assemblage de modules nous pouvons obtenir un environnement composé d'objets à sélectionner via une technique de sélection. Un module correspond à un ensemble d'objets et de fonctions leur étant associés. On peut distinguer par exemple un module HOMER qui permet d'intégrer la technique de sélection HOMER dans l'environnement virtuel, à savoir la représentation graphique ainsi que l'algorithme. Un noyau (voir figure B.8) se charge de lier les modules entre eux.

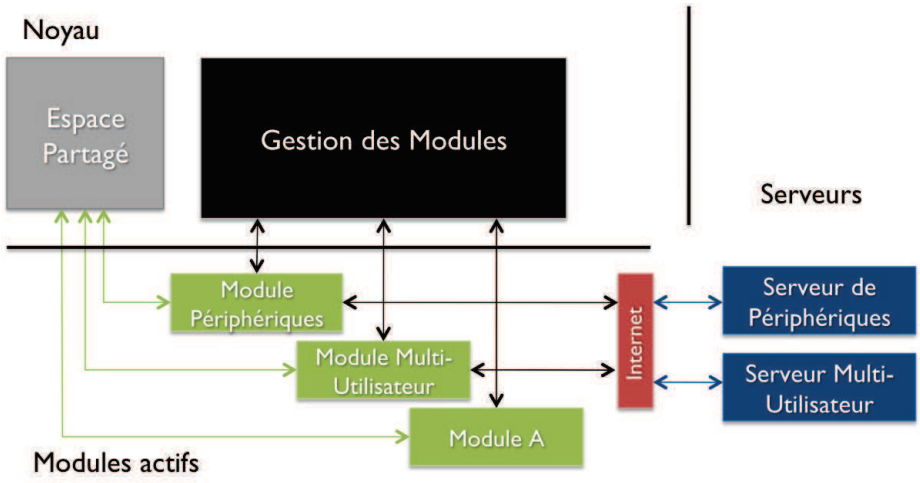


FIGURE B.8: Illustration de l'intégration de différents modules fonctionnels

B.2.3.1 Le noyau

La figure B.9 illustre une vue globale du module core (Noyau) permettant de contrôler les différents modules composants l'EVC.

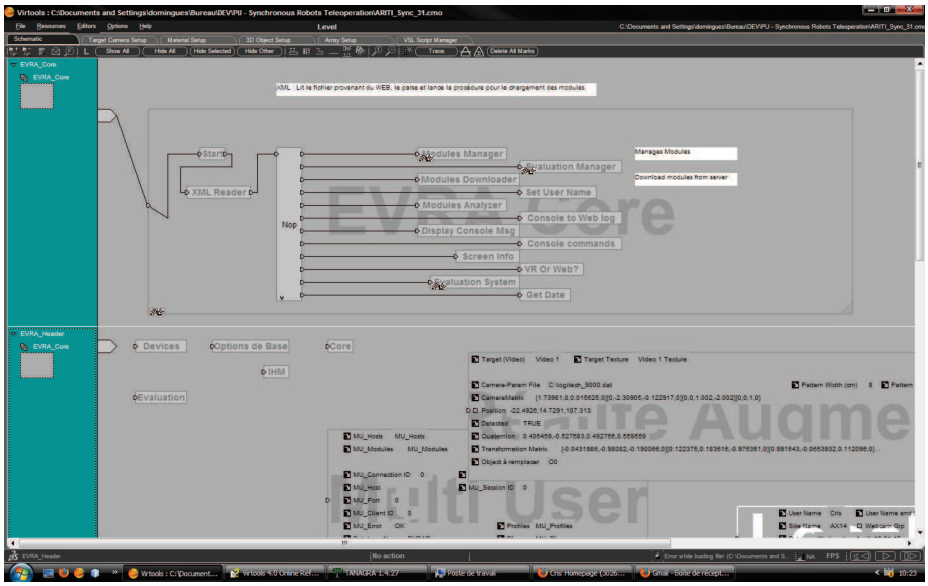


FIGURE B.9: Vue globale de l'implémentation de EVRA Core. On distingue une partie comportant toutes les fonctions et une seconde comportant toutes les variables globales nécessaires aux fonctionnements des différents modules

Téléchargement de modules sur un serveur distant Notre module "Core" permet la récupération de modules à distance présents sur un serveur. Cette fonction est possible en partie grâce aux fonctions du serveur collaboratif proposées par Virtools. Cela permet de stocker les modules et de n'avoir que des versions identiques sur les différents clients (voir figure B.10).

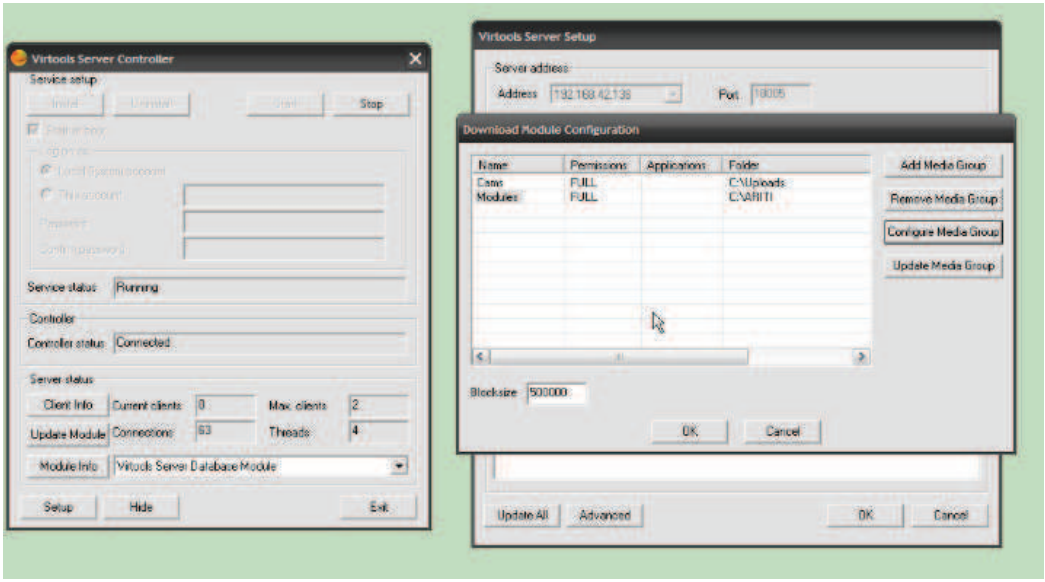


FIGURE B.10: Configuration du serveur collaboratif pour la prise en charge des téléchargements de modules

Connexion à une base de données Le core peut stocker sur une base de données tous les événements qui se réalisent durant que les utilisateurs utilisent l'EVC afin d'identifier des problèmes.

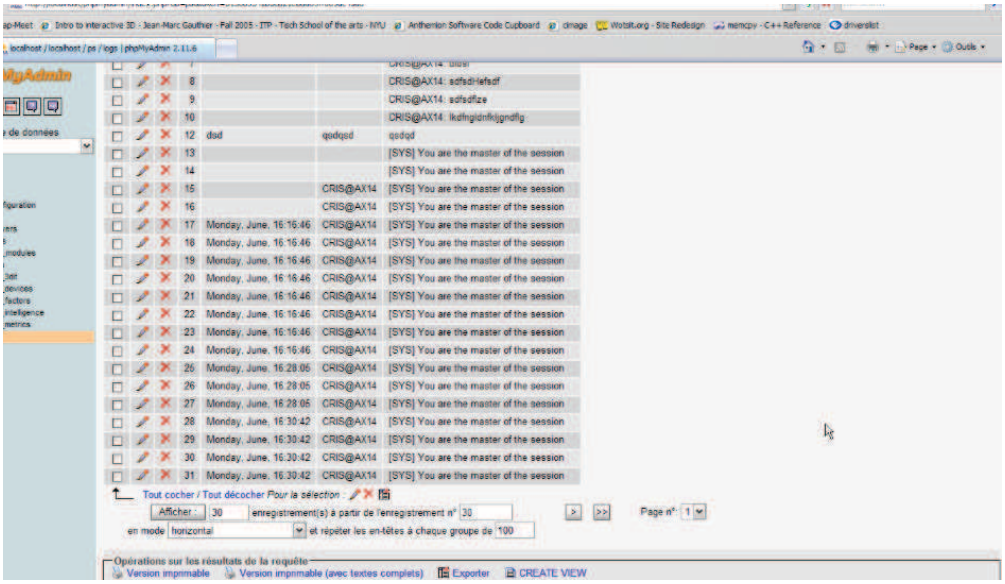


FIGURE B.11: Enregistrement des événements durant l'utilisation de l'EVC dans une base de données

B.2.3.2 Exemple d'un module

La figure B.12 illustre l'application d'un module disponible sur l'application de RV. Tous les modules sont disponibles dans des fichiers ressources. Outre les modules, ce fichier

de ressources regroupe également des fonctions permettant la création de nouveaux modules.

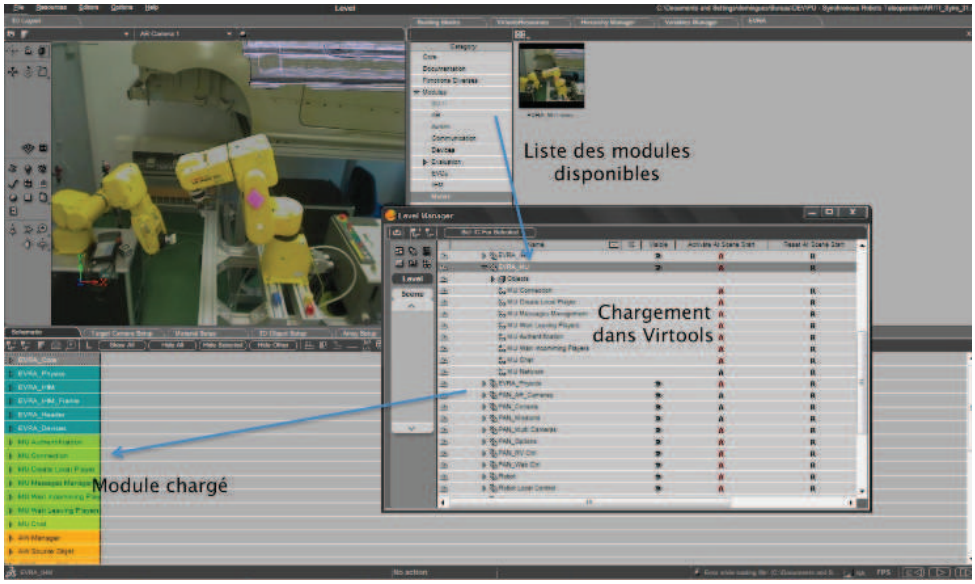


FIGURE B.12: Le module multi-utilisateurs chargé dans Virtools

Annexe C

Système d'évaluation

C.1 Programmation sous Virtools

Le système d'évaluation se présente sous la forme de modules présents dans la bibliothèque de modules présentés dans les annexes. Cette section va uniquement présentée le fonctionnement des différents éléments.

C.1.1 Les sondes

Start/Stop Chrono Ce bloc se charge de la mesure du temps. Il se déclenche pour les différentes sous-tâches qui composent "une mission" d'évaluation.

Vitesse et Accélération Avec ces deux sondes, il est possible de mesurer la vitesse ou l'accélération d'un objet. Elles peuvent être associées au rayon laser du "Ray-Casting" qui lui-même est associé au périphérique d'interaction afin d'obtenir, la vitesse ou l'accélération, selon les trois axes (voir figure C.1 et figure C.2).

Position et Orientation Avec ces deux blocs, il est possible d'enregistrer les coordonnées en position et l'orientation de l'objet. Ils peuvent être associés à un simple objet afin de récupérer la position et orientation du périphérique d'interaction lui-même étant associé à ce même objet.

Erreurs Avec ce bloc, le noyau peut comptabiliser le nombre d'erreurs commises par l'utilisateur. Cette sonde se positionne, à la sortie d'un bloc engendrant un échec ou une erreur. Celui sera alors activé.

Distance Avec ce bloc, il est possible mesurer la distance entre deux objets de l'EVC. Les centres de gravité des objets sont utilisés pour la mesure de cette distance.

Echelle Avec ce bloc, il est possible de récupérer les variations d'échelle qu'un objet subi durant l'évaluation. Il est utilisé dans les tâches de manipulation.

Stats Ce bloc est dédié à la mesure des données du système comme les données du réseau ou encore de l'affichage.

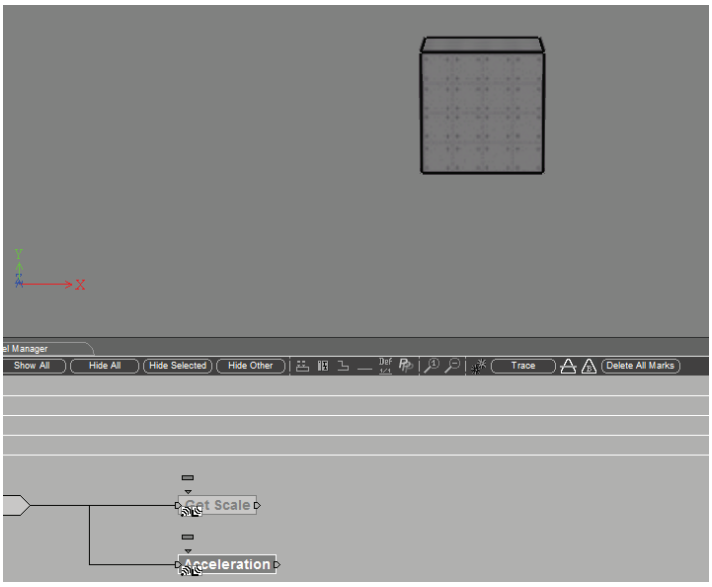


FIGURE C.1: Illustration de deux sondes mesurant les variations d'échelle et l'accélération instantanée du cube.

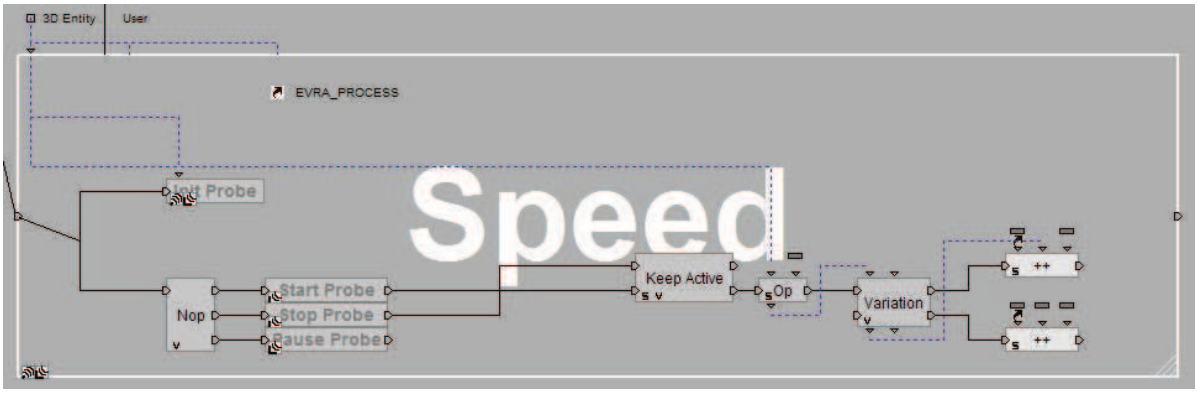


FIGURE C.2: L'anatomie d'une sonde, ici la sonde vitesse. Toutes les sondes se présentent sous la même forme.

C.1.2 Les contrôleurs

Contrôleurs Tâche Les contrôleurs tâche peuvent modifier les paramètres des objets comme la taille des objets ou encore leurs couleurs pour des l'évaluation de tâche de sélection/manipulation. Pour la navigation, des contrôleurs peuvent ajuster la position initiale de l'utilisateur ou modifier le nombre/type d'obstacles.

Contrôleurs Système et Interface Ces contrôleurs peuvent modifier les paramètres du système comme l'ajout d'un retard réseau ou la modification de la qualité d'une texture en modifiant sa taille. Les contrôleurs interfaces peuvent modifier par exemple un mode de visualisation en passant de la vision monoscopique à la vision stéréoscopique. Ces derniers sont donc dédiés à l'interface homme machine.

Contrôleur de Condition Le contrôleur de condition est un élément générique permettant de faire varier les paramètres de l'évaluation. Il correspond au cas générique des différents contrôleurs tâche (taille, position initiale) ou système.

C.1.3 Gestion de la mission

Création d'une mission La figure C.3 illustre l'interface qui permet à un expérimentateur de construire une mission d'évaluation. Une mission d'évaluation se construit via l'assemblage de plusieurs sous tâches (déplacement, désignation, etc.). Pour cela, l'expérimentateur va lui même construire la mission directement depuis l'application de RV.

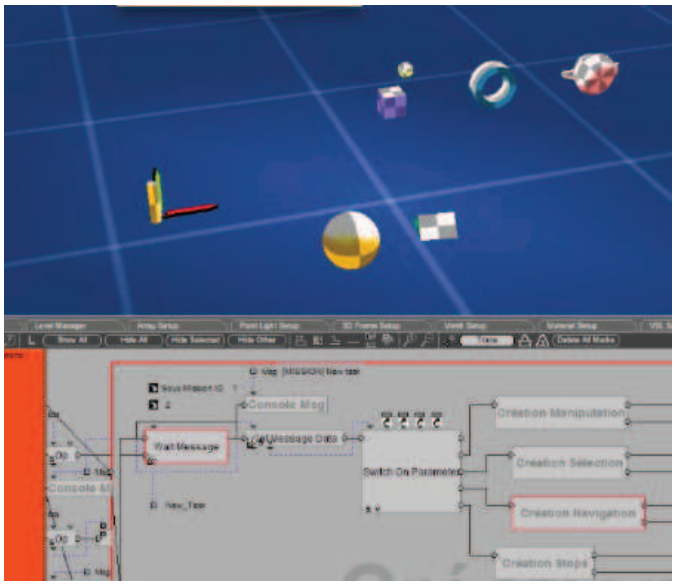


FIGURE C.3: L'évaluateur via un avatar va construire une mission permettant de faire suivre une trajectoire aux participants. Le repère permet de positionner un point à atteindre.

Réalisation de la mission La mission, une fois construite, peut être réalisée par les utilisateurs. La figure C.4 illustre un utilisateur réalisant la mission. La figure C.5 illustre quant à elle, le programme Virtools permettant de gérer le déroulement de la mission.

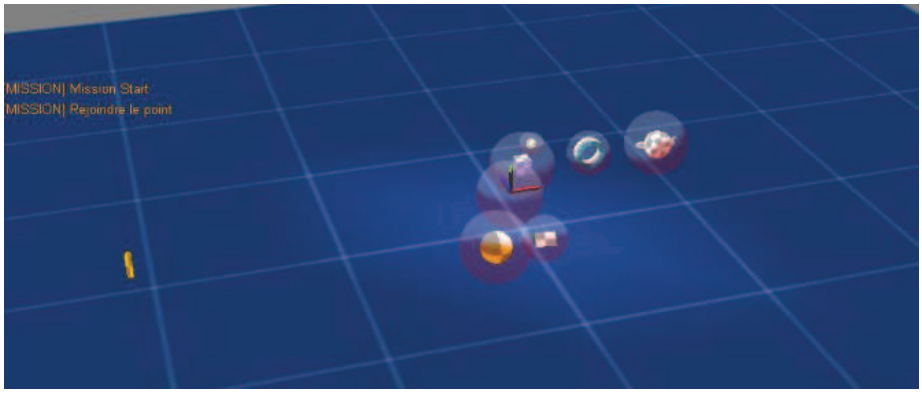


FIGURE C.4: Un utilisateur réalise une mission de déplacement. Il doit pour cela atteindre les points de passage représentés par le repère 3D.

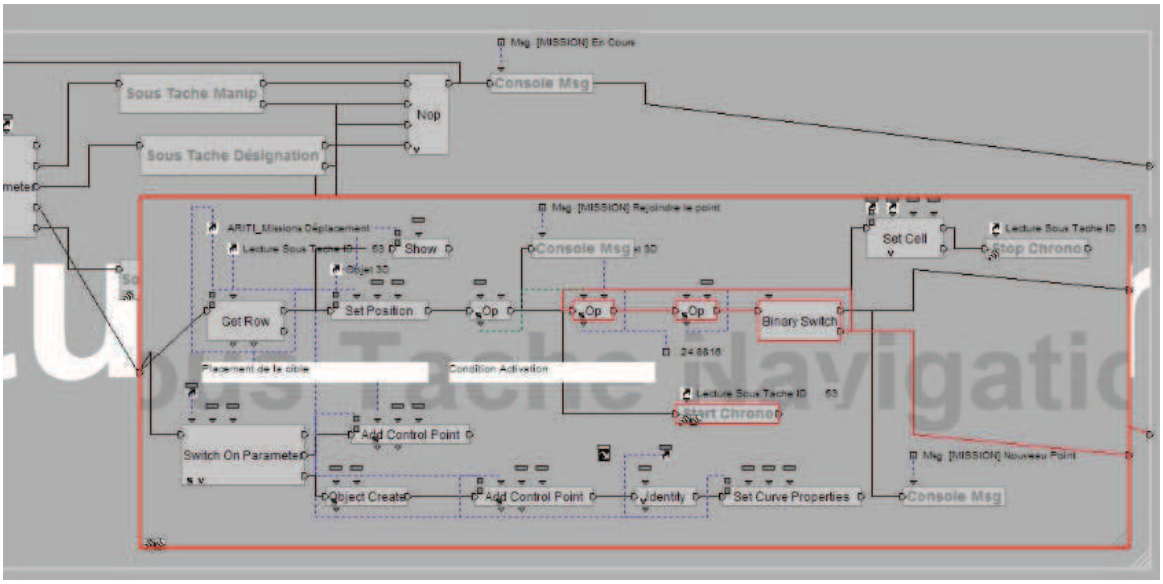


FIGURE C.5: Anatomie du programme Virtools permettant de contrôler le déroulement de la mission d'évaluation. La sonde Chrono permet de mesurer le temps pour réaliser la sous tâche.

C.2 Mise en place du CMS

C.2.1 Plugins utilisés

Le système d'aide à l'évaluation est basé sur le CMS Drupal 6. Nous avons pour cela sélectionné des modules permettant de réaliser des fonctions :

- Création et gestion des questionnaires
- Analyse statistiques des questionnaires
- Gestion des participants pour la collecte des données
- Gestion de l'assistance au choix des indicateurs et facteurs
- Création du fichier protocole

Pour la gestion des questionnaires et des résultats de ces derniers, nous avons exploité le module Quizz 4. Ce module est actuellement en développement par trois partenaires dont l'un des partenaires est le centre Norvégien de Télé-médecine. Ce module permet la conception de questionnaires avec différents types de questions (Vrai/Faux, Réponses longues), de récolter les données et de proposer des analyses statistiques descriptives. Pour gérer le concept d'assistance, nous avons exploité plusieurs modules :

- Webform: Il permet la création de formulaires personnalisés.
- Webform Validation: Ce module ajoute des fonctions à Webform et permet de modifier les règles de validation du formulaire.
- Webform PHP: Il permet d'ajouter à Webform, la possiblité d'exploiter du code PHP lorsque le formulaire est validé par un utilisateur. Il sera utilisé pour implémenter les algorithmes de data-mining sur les facteurs et indicateurs.
- CCK: Il permet de créer des nouveaux champs de contenu. Il est utilisé pour créer des nouveaux contenus comme les périphériques, les indicateurs et les facteurs.
- Views: Il permet de modifier la visualisation du contenu par les utilisateurs.

Annexe D

Travail accompli sur le projet ARITI

D.1 Modélisation géométrique du robot

Pour déterminer le MGD, on utilise les conventions de Denavit Hartenberg qui consistent à associer à chaque articulation un repère. Ces repères sont placés de tel sorte que :

- Tout axe Z_i doit être placé le long de l'articulation i.
- L'axe X_{i-1} doit être porté par la perpendiculaire commune aux axes Z_{i-1} et Z_i

En appliquant ces règles aux robots pour le placement des repères, on obtient le schéma de la figure D.1. Le repère $R7$ est associé à l'effecteur du robot. Déterminer le MGD revient donc à calculer T_{07} la matrice de passage du repère $R0$ au repère $R7$. Il est nécessaire de calculer les matrices de passage ($T_{(ii-1)}$) entre chaque repère (R_i et R_{i-1}) pour $i = 1..7$.

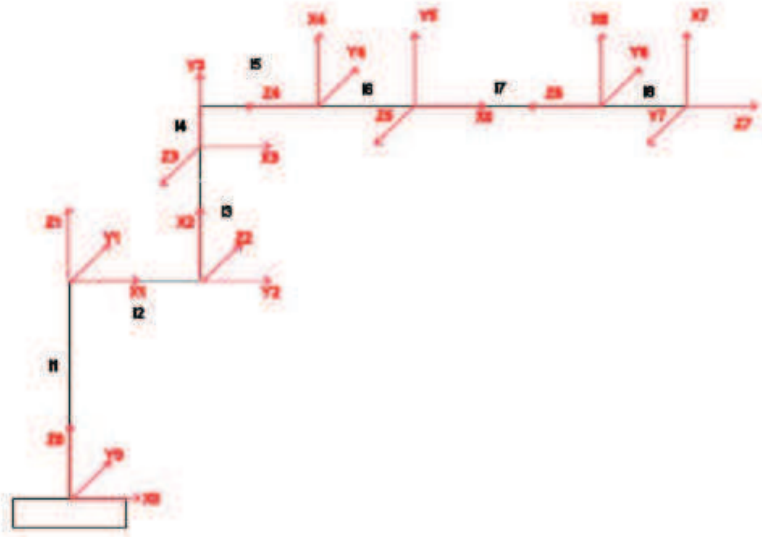


FIGURE D.1: Schéma représentant le placement des repères sur le robot Fanuc

Le calcul du modèle géométrique du robot Fanuc est détaillé en annexe de la thèse de [Ouramdane, 2009].

D.2 Contrôle du robot sur la plateforme EVR@

Le contrôle du robot doit se faire de manière naturelle afin que l'immersion de l'opérateur dans le monde virtuel soit maximum. Ainsi le robot doit suivre le Flystick ou le SPIDAR. Les caméras offrent une vue plongeante sur le robot qui apparaît quasiment de profil. Cela facilite grandement le choix de contrôle :

- En poussant/tirant le Flystick/SPIDAR, le robot se déplace suivant l'axe $Y0$;
- En le montant/descendant le Flystick/SPIDAR, le robot se déplace selon $Z0$. En le déplaçant à gauche/droite le robot se déplace suivant $X0$.

D.3 Réalité Augmentée

D.3.1 Streaming Vidéo

Le streaming vidéo ou lecture en continue de vidéo est une technologie qui permet l'envoi en direct ou avec un léger retard. Cela permet la lecture audio et vidéo d'extraits ou d'enregistrements en direct d'une caméra. Les données sont téléchargées en continu

par le récepteur, analysées et lues sur un lecteur multimédia compatible. La diffusion de flux peut-être utilisée via plusieurs protocoles comme Unicast ou Multicast. Nous débuterons tout d'abord sur une présentation des termes, conteneurs et normes afin de bien appréhender les mécanismes entrant en jeu dans le streaming multimédia :

- La norme est une spécification du format de données. MPGEG 4 est une norme vidéo alors qu'un codec comme le x264 est capable de produire en MPEG4.
- Le codec est un procédé capable de compresser ou de décompresser un signal numérique ou analogique. Les différents algorithmes de compression et de décompression peuvent correspondre à différents besoins en qualité de restitution, de temps de compression ou de décompression, de limitation en termes de ressource processeur ou mémoire, de débit du flux après compression ou de taille du fichier résultant.
- Le conteneur ou mutliplexeur est un format de fichier qui peut contenir divers types de données et celles-ci sont compressées à l'aide de codecs normalisés. Le fichier conteneur est utilisé pour pouvoir identifier et classer les différents types de données. Les formats conteneur les plus simples peuvent contenir différents types de codec audio, tandis que les formats conteneur les plus avancés sont capables de gérer de l'audio, de la vidéo, des sous-titres, des chapitres et des métadonnées (ou tags) et de façon synchronisée pour que les différents flux soient bien lus en même temps.

Pour diffuser les flux vidéo du site distant, nous avons utilisé un logiciel libre, VLC. VLC permet la diffusion de flux provenant de différentes sources, en utilisant différents codecs. Pour une compatibilité native avec Microsoft Windows XP, qui est le système à cette date majoritairement implanté sur les ordinateurs, il est nécessaire d'utiliser des codecs et des protocoles compatibles. Nativement, Windows gère :

- Les protocoles MMS (Microsoft Media Services), RTP et HTTP pour la réception des flux.
- Les codecs vidéo WMV1/2, AVI, ASF, MPEG1/2
- Les codecs audio MP3, WMA, PCM (Wave)
- Les multiplexeurs PS, TS, ASF

D.3.2 Mise en place sous VLC

La diffusion de flux vidéo via VLC se déroule en deux étapes :

- Etape 1: Le transcodage qui consiste à récupérer le flux vidéo d'une source et la convertir dans les bons formats
- Etape 2: La diffusion des flux sur le réseau

Nous avons diffusé quatre flux vidéos permettant en réalité d'obtenir deux points de vue stéréoscopique, via l'assemblage des caméras par pair. Les flux sont diffusés avec les codecs Windows Media en utilisant le protocole MMS, pour une compatibilité idéale avec Windows XP. La figure D.2 illustre le fichier de configuration VLC permettant le transcodage et la diffusion des différents flux vidéo.

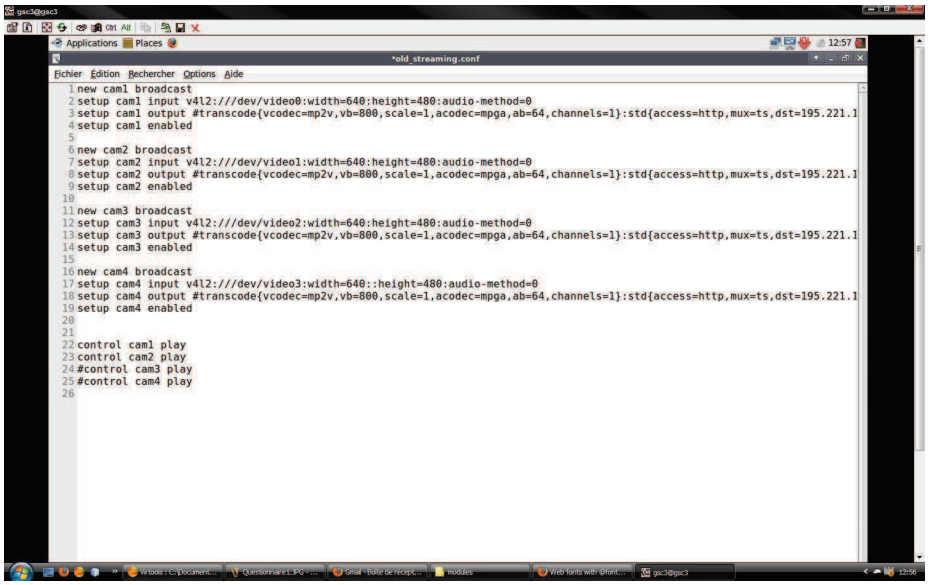


FIGURE D.2: Illustration du fichier de configuration VLC.

D.3.3 Calibration des Caméras

Cette étape est nécessaire pour permettre de superposer un robot virtuel (fantôme) sur le robot réel afin de contourner le problème du retard. Une fois que fantôme atteint la position désiré par l'opérateur, celui-ci valide et le robot réel vient rejoindre son fantôme. Pour cela, il est nécessaire de calibrer les caméras pour que la superposition soit parfaite en déterminant les paramètres des caméras, c'est à dire déterminer la matrice de projection qui transforme un point de l'espace 3D en un point du plan que forme l'image. On calcule numériquement cette matrice en faisant un appariement entre des points 3D connus et les points 2D correspondants.

D.4 Programmation sous Virtools

La figure D.3 illustre la programmation réalisée sous Virtools du projet ARITI. Les fonctions en vert foncé composent le noyau commun aux différents travaux exploitant la plateforme EVR@. Les autres fonctions correspondent à différents modules. En vert clair, on retrouve le module de gestion de l'aspect multi-utilisateurs. En orange, notre modèle de gestion du workflow. En jaune, le module de gestion du robot fanuc virtuel permettant le calcul des données géométriques. En violet, le module permettant la gestion de l'interface graphique pour les utilisateurs de la version WEB (voir la figure D.4 pour une vue de l'interface). En rouge/orange, le module de gestion du déroulement de l'évaluation.

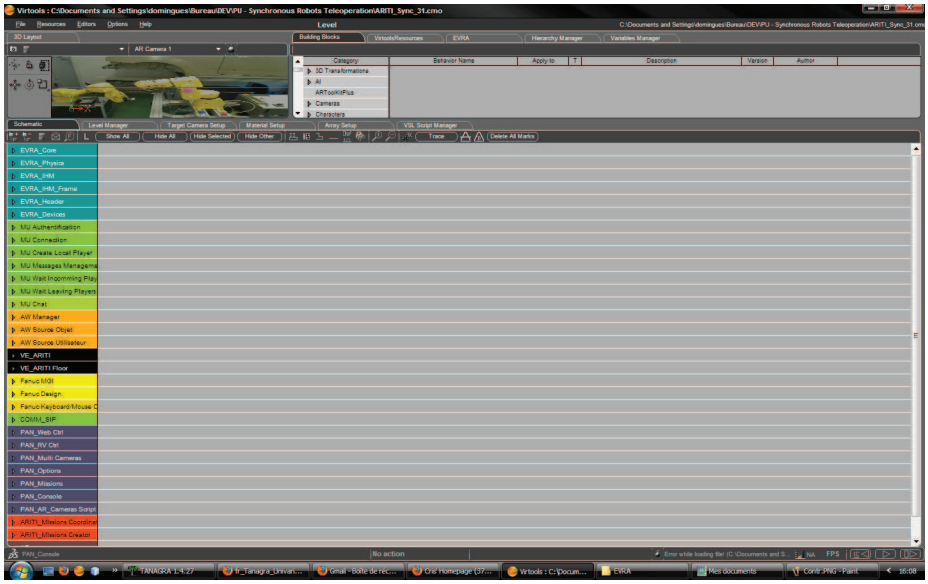


FIGURE D.3: Vue du programme ARITI sous Virtools

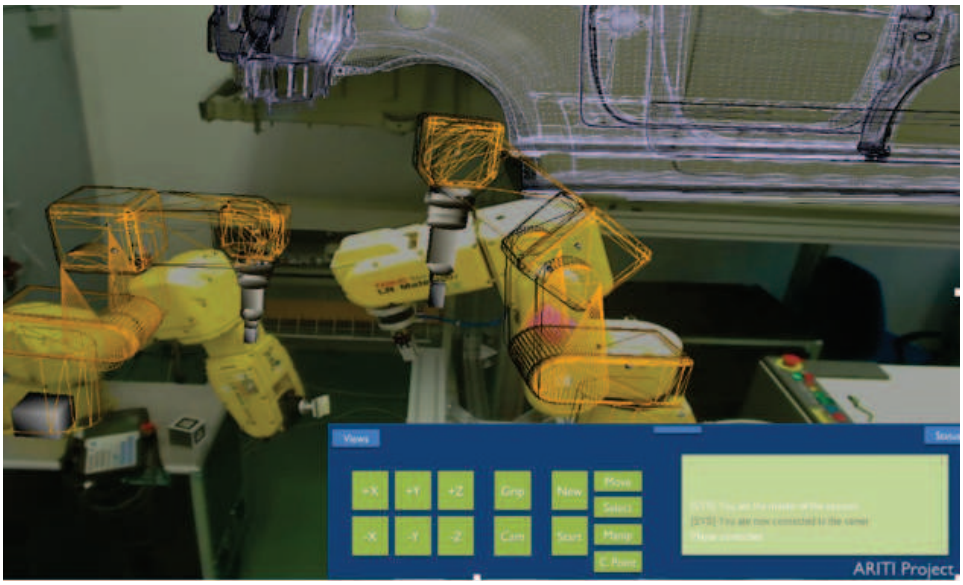


FIGURE D.4: Illustration du projet ARITI depuis une page WEB

D.5 Communication avec les robots

Un protocole avait été préalablement établi. Nous avons uniquement modifié le serveur de communication avec les robots pour supporter plusieurs robots. Pour l'envoi de coordonnées articulaires au robot réel, il faut envoyer une commande de ce type (q1Aq2Bq3Cq4Dq5Eq6FgGsS) avec :

- A,B,C,D,E,F correspondant aux articulations et q1,q2,q3,q4,q5,q6 aux angles calculés
- G correspondant à l'état de la pince et prenant la valeur g: 1 (pince ouverte) ou 0 (pince fermée).
- S correspondant à la vitesse de déplacement du robot réel *s*: 1% à 100%.

Pour l'envoi de coordonnées articulaires au robot réel, il faut envoyer une commande de ce type [xXyYzZwWpPrRgGsS], avec :

- X,Y,Z,W,P,R correspondant aux axes et x,y,z,w,p,r aux valeurs de déplacement ou de rotation à appliquer sur les différents axes
- G correspondant à l'état de la pince et prenant la valeur g: 1 (pince ouverte) ou 0 (pince fermée).
- S correspondant à la vitesse de déplacement du robot réel *s*: 1% à 100%.

Le serveur renvoi les composantes des vecteurs force et moment dans le repère de la pince $R7$: Fx;Fy;Fz;Mx;My;Mz. En cas d'erreur, le serveur renvoi #.