PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Utilisation de la réalité virtuelle dans l'entraînement des astronautes pour la construction de la station spatiale internationale
Auteur: Author:	Régent L'Archevêque
Date:	1998
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	L'Archevêque, R. (1998). Utilisation de la réalité virtuelle dans l'entraînement des astronautes pour la construction de la station spatiale internationale [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6867/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/6867/
Directeurs de recherche: Advisors:	Louis Granger
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

UTILISATION DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS L'ENTRAÎNEMENT DES ASTRONAUTES POUR LA CONSTRUCTION DE LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE

RÉGENT L'ARCHEVÊQUE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

DÉCEMBRE 1998

© Régent L'Archevêque, 1998

National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38688-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

UTILISATION DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS L'ENTRAÎNEMENT DES ASTRONAUTES POUR LA CONSTRUCTION DE LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE

présenté par : L'ARCHEVÊQUE, Régent

en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DAGENAIS Michel, Ph.D., président

M. GRANGER Louis, M.Sc., membre et directeur de recherche

M. MALOWANY Alfred, Ph.D, membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier ma fiancée et future femme, Éliane, ainsi que ma famille pour le support qu'ils m'ont accordé durant les dernières années. Leurs encouragements ont été appréciés autant dans les moments difficiles que dans les moments de réussite.

Je remercie M. Louis Granger, mon directeur d'études, qui m'a permis d'explorer le monde fantastique de la réalité virtuelle, de l'infographie et des systèmes en temps réel. Je lui suis très reconnaissant d'avoir cru en mes capacités et mes aptitudes.

Je remercie M. Michel Vachon, gestionnaire technique du groupe d'entraînement du programme du Système d'entretien mobile. M. Vachon m'a offert la possibilité de travailler sur l'un des plus prestigieux projets d'ingénierie à l'heure actuelle et je lui dois toute ma gratitude.

Ensuite, je tiens à remercier particulièrement les initiateurs du système VOTE, Pierre Allard et Zaven Joukakelian, pour m'avoir accepté dans leur équipe et pour avoir partagé leurs connaissances. Un gros merci à Pierre pour le coup de main qu'il m'a donné dans l'élaboration de la structure du mémoire. Je crois que nous formions la plus belle équipe et j'espère me retrouver avec eux dans de futurs projets.

Finalement, je remercie Eric Perreault et Guillaume Parent, deux amis de l'Agence spatiale canadienne, qui m'ont aidé dans la révision et la correction de ce mémoire. Votre aide a été fructueuse et grandement appréciée.

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet de la SSI (*Station spatiale internationale*), le Canada est responsable des activités de développement, de maintenance, d'opération et d'entraînement liées au SEM (*Système d'entretien mobile*). En raison des difficultés inhérentes à la manipulation des composantes du SEM et de l'environnement hostile de l'espace, l'ASC (*Agence spatiale canadienne*) a développé le système de réalité virtuelle VOTE (*Virtual Operations & Training Environment*). Il s'agit d'un outil qui aide au développement et à la validation des opérations, de même qu'à l'entraînement des astronautes en vue de l'utilisation et de la manipulation des composantes du SEM.

Le système VOTE a comme principal objectif de fournir un environnement 3D qui modélise la SSI et les composantes du SEM. Notamment, il permet aux astronautes de se familiariser avec le SSRMS (*Space Station Remote Manipulator System*), le nouveau bras robotique canadien nécessaire à la construction et à la maintenance de la SSI. Ce système fournit également un modèle fidèle de la SSI lors des différentes étapes de sa construction.

VOTE supporte plusieurs usagers simultanément et génère des vues stéréoscopiques permettant de percevoir en 3 dimensions l'environnement modélisé. Afin d'être complémentaire au simulateur MOTS (*MSS (SEM) Operations and Training Simulator*), VOTE peut s'y connecter via un lien de communication. Ce lien permet d'observer en temps réel, dans l'environnement virtuel, une simulation réalisée sur MOTS.

Afin d'augmenter la valeur informative contenue dans l'environnement virtuel, VOTE incorpore des outils virtuels. Ces outils graphiques ajoutent de l'information et facilitent l'assimilation d'information durant l'entraînement. Les outils aident les usagers à mieux percevoir certains détails et facilitent la construction d'un modèle mental 3D de la SSI et des composantes du SEM.

Ce mémoire décrit tout d'abord la SSI et les composantes du SEM. Il enchaîne avec une description du système VOTE, de ses modules et de ses outils virtuels. Ensuite, il présente la conception de l'architecture matérielle et logicielle du système. Finalement, il traite des résultats obtenus lors des tests temporels réalisés sur certains modules de VOTE. Le mémoire se termine avec les commentaires fournis par les astronautes lors de leur entraînement.

ABSTRACT

Canada's contribution to the ISS (*International Space Station*) is the development, the maintenance, the operation and the training related to the MSS (*Mobile Servicing System*). Due to the difficulties with the MSS manipulation, the Canadian Space Agency (CSA) has created VOTE (*Virtual Operations and Training Environment*), a virtual reality system. VOTE is a tool used to develop and validate operations and to train astronauts with the MSS modules and the ISS.

The main purpose of VOTE is to provide a 3D environment of the ISS and of the MSS modules. Particularly, it allows the astronauts to become familiar with the SSRMS (*Space Station Remote Manipulator System*), the new canadian robotic arm to be used for the construction of the ISS. VOTE provides a faithful 3D model of the ISS at all phases of its construction.

VOTE is a multi-user system generating stereoscopic views and allowing a 3D perception of the virtual environment. A communication link allows VOTE to be connected with the MOTS (*MSS Operations and Training Simulator*). When using this functionality, the user can visualize within the VOTE environment and in real-time, a simulation session executed on MOTS.

To increase the value of the information available through the virtual environment, VOTE includes some virtual tools. These visual cues add valuable information to the VOTE sessions and help to understand the ISS and MSS details. Also, these tools help to get a 3D mental representation of the ISS and of the MSS modules.

This master thesis first describes the ISS and the MSS modules. Then, a description of VOTE, of its modules and of the virtual tools is presented, followed by VOTE's hardware and software architecture. This thesis concludes with some results obtained during performance testing and with astronauts comments given during their training.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vii

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES TABLEAUX xiv

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xv

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 – SYSTÈME D'ENTRETIEN MOBILE 18

1.1 Station spatiale internationale 18

1.1.1 Description 18

1.1.2 Assemblage 19

1.1.3 Difficultés envisagées 20

1.2 Système d'entretien mobile 21

1.2.1 SSRMS 22

1.2.2 Console d'opération robotique 29

1.3 Simulateur du SEM 33

1.3.1 Architecture logicielle 34

1.3.2 Utilisation du simulateur pour l'entraînement 35

CHAPITRE 2 – DESCRIPTION DU SYSTÈME VOTE 37

2.1 Objectifs du système VOTE 37
2.2 Description du système VOTE 38
2.2.1 Interface usager 39
2.2.2 Localisation spatiale 39
2.2.3 Rendu graphique 40
2.2.4 Animation 40
2.2.5 Communication 41
2.2.6 Navigation 41
2.2.7 Mannequin virtuel 42
2.2.8 Maquette du SSRMS 42
2.3 Outils virtuels 42
2.3.1 SSRMS 43
2.3.2 Mannequin 43
2.3.3 Plancher 44
2.3.4 Référentiel 45
2.3.5 Trajectoire linéaire 46
2.3.6 Trajectoire de référentiels 47
2.3.7 Tunnel 47
2.3.8 Caméra 48
2.3.9 Cône de lumière 49
2.3.10 Règle 50
2.4 Entraînement avec VOTE 51

CHAPITRE 3 – IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME VOTE 52

3.1 Configuration matérielle 52
3.1.1 Serveur VOTE 53
3.1.2 Station de commande VOTE 54
3.1.3 Système de localisation spatiale 54
3.1.4 Périphériques vidéos 55

3.1.5 Serveur MOTS 56
3.2 Architecture logicielle 56
3.2.1 Description des mémoires partagées 57
3.2.2 Interface usager 59
3.2.3 Module de rendu graphique 60
3.2.4 Module de localisation spatiale et de navigation 63
3.2.5 Module de communication 65

CHAPITRE 4 – RÉSULTATS, ANALYSES ET TRAVAUX FUTURS 67

4.1 Résultats temporels d'une animation 67
4.1.1 Méthodologie de test 68
4.1.2 Animation hors ligne 69
4.1.3 Animation en ligne 70
4.1.4 Transmetteur MOTS 71
4.1.5 Récepteur VOTE 72
4.2 Analyse de la distorsion du système de localisation spatiale 73
4.3 Travaux futurs 75
4.3.1 Améliorations essentielles 75
4.3.2 Améliorations fonctionnelles 77
4.4 Commentaires des astronautes 79

CHAPITRE 5 - CONCLUSION 81

5.1 Résumé 81
5.2 Contributions au projet VOTE 83
5.3 Avenir de VOTE 85

BIBLIOGRAPHIE 86

LISTE DES FIGURES

Figure 0-1 : Interaction téléopérateur – robot 3
Figure 0-2 : Architecture physique d'un robot 4
Figure 0-3 : Système de contrôle d'une articulation 4
Figure 0-4 : Point, axes et référentiel de résolution 6
Figure 0-5 : Définition d'une matrice homogène 6
Figure 0-6 : Solutions multiples pour la cinématique inverse 7
Figure 0-7 : Continuum réalité augmentée- virtualité augmentée 11
Figure 0-8 : Niveaux de détail d'un objet 13
Figure 1-1 : Configuration finale de la SSI 18
Figure 1-2 : Séquence d'assemblage de la SSI 20
Figure 1-3 : Architecture physique du SSRMS 23
Figure 1-4 : Description physique d'un point d'attache 23
Figure 1-5 : Étapes de la pédipulation 24
Figure 1-6 : Commande avec référentiel interne 28
Figure 1-7 : Commande avec référentiel externe 29
Figure 1-8 : Console d'opération robotique 30
Figure 1-9 : Panneau de commande du SEM 31
Figure 1-10 : Architecture logicielle du simulateur MOTS 34
Figure 2-1 : Modules du système VOTE 39
Figure 2-2 : Modélisation de la SSI et des composantes du SEM dans VOTE 43
Figure 2-3 : Mannequin virtuel 44
Figure 2-4 : Plancher virtuel 45
Figure 2-5 : Référentiel virtuel 46
Figure 2-6 : Trajectoire linéaire et de référentiels 47
Figure 2-7 : Tunnel virtuel 48
Figure 2-8 : Modèle graphique, cône de vision et vue 2D d'une caméra 49

Figure 2-9 : Cône de lumière 49
Figure 2-10 : Règie virtuelle 50
Figure 3-1 : Architecture matérielle de VOTE 52
Figure 3-2 : Architecture inter-processus de VOTE 57
Figure 3-3 : Utilisation des pointeurs dans VOTE 59
Figure 3-4 : Cycle de rendu graphique à 2 pipelines 60
Figure 3-5 : Exécution séquentielle versus exécution en pipeline 61
Figure 3-6 : Parallélépipède de vision 63
Figure 3-7 : Hiérarchie entre les référentiels de navigation de VOTE 64
Figure 3-8 : Protocole de communication VOTE-MOTS 66
Figure 4-1 : Distribution temporelle du module d'animation (hors ligne) 69
Figure 4-2 : Distribution temporelle du module d'animation (en ligne) 70
Figure 4-3 : Distribution temporelle du module de communication (récepteur VOTE) .72
Figure 4-4 : Erreur en position et en orientation de la localisation spatiale 74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Modes de contrôle du SSRMS 26
Tableau 1-2 : Modes d'utilisation des manettes de commande 32
Tableau 3-1 : Référentiels utilisés pour la navigation dans VOTE 65
Tableau 4-1 : Temps et périodes d'exécution du module d'animation (hors ligne) 69
Tableau 4-2 : Temps et périodes d'exécution du module d'animation (en ligne) 71
Tableau 4-3 : Temps et périodes d'exécution du transmetteur MOTS 71
Tableau 4-4 : Temps et périodes d'exécution du module de réception VOTE 73

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADR *Axes de Résolution.* Référentiel qui indique une orientation selon un référentiel parent.

ANSI-C *American National Standards Institute – C.* Norme pour le langage C développé par ANSI.

API *Application Programming Interface.* Bibliothèque de fonctions pour développer des applications logicielles.

APPC *Arm Pitch Plane Change.* Mode d'opération du SSRMS.

ASC *Agence spatiale canadienne.*

AVU *Artificial Vision Unit.* Composantes du SEM qui sert d'outil visuel lors de la manipulation de charge avec le SSRMS ou le SPDM.

CDB *Common Data Base.* Base de données du simulateur MOTS.

CRT *Cathode Ray Tube.* Technologie utilisée pour les périphériques visuels.

FOB *Flock of Bird.* Système de localisation spatiale composé d'un émetteur magnétique et de capteurs.

FOV *Field of View.* Champ de vision.

FBB *Fast Bird Bus.* Lien de communication utilisé par le FOB.

FGB *Functional Cargo Block.* Module de la station spatiale internationale.

FRGF *Flight Releasable Grapple Fixture.* Composante mécanique sur la station spatiale internationale, les composantes du SEM et les charges manipulables, utilisée comme point d'attache.

HPR	***Heading, Pitch, Roll.*** Coordonnées qui permettent de déterminer l'orientation d'un objet selon un référentiel parent (lacet, tangage, roulis)
IP	***Internet Protocol.*** Protocole de communication internet.
ISSACS	***International Space Station Analysis Coordinate System.*** Référentiel absolu utilisé dans l'analyse de la station spatiale internationale.
LCD	***Liquid Crystal Display.*** Écran plat à cristaux liquides.
LDA	***Launch Deployment Assembly.*** Module de la station spatiale internationale utilisé pour le transport et le déploiement du SSRMS.
MAM	***Manual Augmented Mode.*** Mode d'opération du SSRMS.
MBS	***Mobile Base System.*** Base mobile qui permet de déplacer les composantes du SEM le long d'un rail sur la station spatiale internationale.
MCO	***Multi-Channel Option.*** Démultiplexeur vidéo utilisé sur les systèmes SGI.
MOTS	***MSS (SEM) Operations and Training Simulator.*** Simulateur utilisé pour l'entraînement et le développement des opérations liées au SEM.
MRO	***MSS (SEM) Robotics Operator.*** Opérateur robotique du SEM.
MSS	***Mobile Servicing System.*** Système d'entretien mobile (SEM).
MT	***Mobile Transporter.*** Rail situé sur la station spatiale internationale pour le déplacement du MBS.
NASA	***National Aeronautics and Space Administration.***
NTSC	***National Television System Committee.*** Standard de signaux de télévision.
OCJM	***Operator Commanded Joint position Mode.*** Mode d'opération du SSRMS.

OCPM *Operator Commanded POR Mode.* Mode d'opération du SSRMS.

PDGF *Power Data Grapple Fixture.* Composante mécanique située sur la station spatiale internationale, utilisée comme point d'attache, comme source d'énergie et comme lien de communication avec le SSRMS.

PDR *Point de Résolution.* Vecteur qui indique une position selon un référentiel parent.

PJAM *Pre-stored Joint position Auto-sequence Mode.* Mode d'opération du SSRMS.

POR *Point Of Resolution.* Point de résolution (PDR) de l'organe terminal du SSRMS.

PPAM *Pre-stored POR Auto-sequence Mode.* Mode d'opération du SSRMS.

RDR *Référentiel de Résolution.* Référentiel qui indique une position et une orientation d'un objet selon un référentiel parent.

RVB *Rouge, Vert, Bleu.* Standard de couleur utilisé en infographie.

RWS *Robotic Work Station.* Console d'opération robotique du SEM.

SJRM *Single Joint Rate Mode.* Mode d'opération du SSRMS.

SEM *Système d'entretien mobile.* Contribution du Canada pour le développement de la station spatiale internationale.

SPDM *Special Purpose Dexterous Manipulator.* Main agile spécialisée, bras robotique de 15 degrés de liberté utilisé pour des tâches de maintenance.

SRMS *Shuttle Remote Manipulator System.* Bras robotique de 6 degrés de liberté utilisé dans la navette spatiale.

SSI *Station spatiale internationale.*

SSRMS *Space Station Remote Manipulator System.* Bras robotique de 7 degrés de liberté utilisé pour la construction de la station spatiale internationale.

TCP *Transmission Control Protocol.* Protocole de communication avec contrôle des paquets.

UDP *User Datagram Protocol.* Protocole de communication basé sur le datagramme.

VOTE *Virtual Operations & Training Environment.* Système de réalité virtuelle utilisé pour l'entraînement et le développement des opérations du SEM.

INTRODUCTION

Aux cours des prochaines années, près de 16 pays participeront à la construction de la SSI (*Station spatiale internationale*). Les principales tâches du Canada lors de ce projet consistent principalement aux activités de construction, d'opération et de maintenance liées aux composantes du SEM (*Système d'entretien mobile*). Le SEM est composé du SSRMS (*Space Station Remote Manipulator System*), un bras robotique composé de 7 degrés de liberté, de la base mobile MBS (*Mobile Base System*), du transporteur mobile MT (*Mobile Transporter*) et finalement du SPDM (*Special Purpose Dexterous Manipulator*). Contrairement au bras robotique canadien utilisé à bord de la navette spatiale, l'opérateur ne possède pas de vue directe du bras. Pour connaître la posture du SSRMS, l'opérateur doit se construire un modèle mental 3D à partir de 3 images 2D générées à l'aide des caméras situées sur la SSI, les composantes du SEM et la navette spatiale.

En raison du risque élevé et de l'environnement hostile de l'espace, un entraînement intensif est réalisé à l'ASC (*Agence spatiale canadienne*). L'un des outils utilisé est un système basé sur la réalité virtuelle. VOTE (*Virtual Operations and Training Environment*) permet aux futurs téléopérateurs de se familiariser avec la SSI et les composantes du SEM. Ce système permet aux usagers de naviguer à l'intérieur d'un monde virtuel et de visualiser en 3 dimensions le comportement du SSRMS selon les commandes réalisées sur le simulateur MOTS (*MSS (SEM) Operations and Training Simulator*). MOTS est un système temps réel qui modélise la cinématique et la dynamique du SEM. Il inclut une réplique du RWS (*Robotics Work Station*) qui servira de système de contrôle du SEM à l'intérieur de la SSI.

Définition de la télérobotique

Un robot est une machine programmable mécanique, composée d'actuateurs, de capteurs et de contrôleurs qui permettent le positionnement d'un ou de plusieurs organes terminaux. L'objectif d'un organe terminal est de manipuler des objets physiques [Schilling, 1990]. La principale raison de la construction des robots est de réduire les risques inhérents à certaines activités humaines.

La télérobotique est une science qui étudie les systèmes robotiques contrôlés à distance [Creak, 1997]. Cette science comprend la robotique, la télécommunication, les interfaces personne-machine et l'intelligence artificielle. L'environnement d'un système robotique se divise en 2 parties : l'environnement du téléopérateur exempt de danger, et celui du robot généralement situé dans un milieu hostile (Figure 0-1). Des interfaces permettent la communication entre le téléopérateur et le robot. Les commandes du téléopérateur sont transmises par un lien de communication. Elles sont traitées par le robot et celui-ci retourne au téléopérateur les résultats de la commande et l'état du système [Allard, 1997].

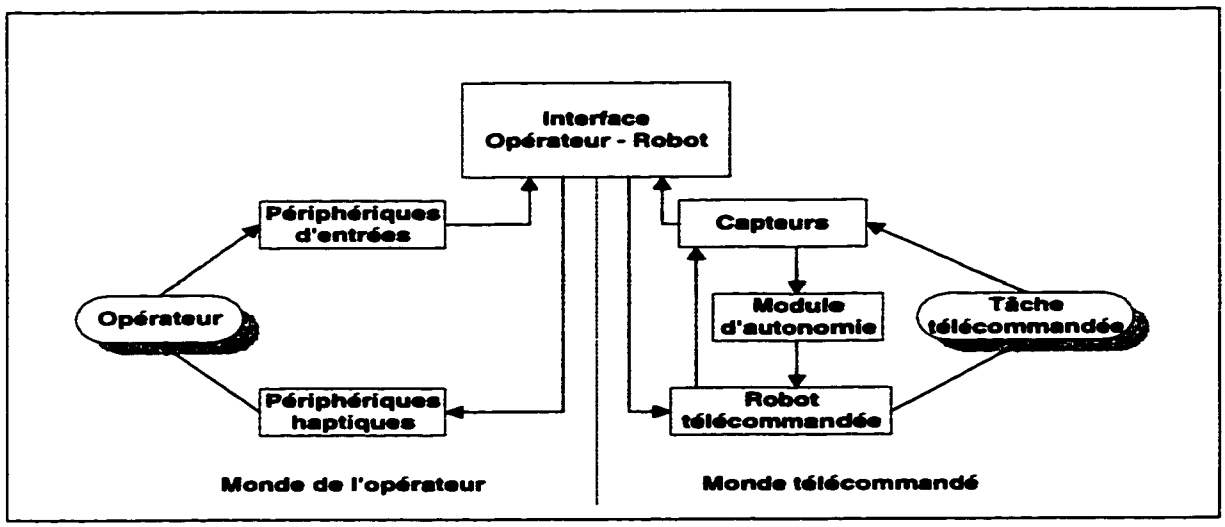

Figure 0-1 : Interaction téléopérateur – robot

Composantes d'un système robotique

Tout comme l'être humain, les robots possèdent des membres reliés par des articulations. Dans le domaine de la robotique, les membres et les articulations sont nommés respectivement membrures et articulations [Critchlow, 1985]. La variation des articulations entraîne le déplacement des membrures de niveau inférieur dans la hiérarchie des membres du robot. En d'autres mots, le déplacement de l'épaule gauche occasionne le déplacement de l'index gauche, mais la tête n'est pas affectée par ce déplacement. Le nombre d'articulations permet de déterminer le nombre de degrés de liberté d'un robot. Plus un robot possède d'articulations, plus il est apte à adopter des configurations variées.

Les actuateurs permettent de modifier physiquement la valeur des articulations d'un robot. Il s'agit en fait de moteurs qui entraînent le déplacement des membrures et des organes terminaux. Généralement, les actuateurs sont hydrauliques, pneumatiques ou

électriques. Les actuateurs sont caractérisés par la puissance, la charge maximale manipulable, la charge minimale manipulable, la vitesse et l'accélération des articulations.

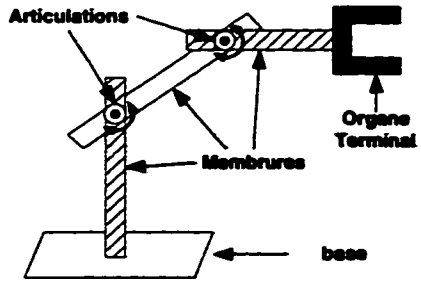

Figure 0-2 : Architecture physique d'un robot

Afin de commander les actuateurs, il est nécessaire d'utiliser des contrôleurs. Ces contrôleurs commandent les actuateurs et vérifient que les valeurs des articulations et leurs déplacements correspondent aux commandes ordonnées par le téléopérateur. Des capteurs permettent aux contrôleurs de lire en temps réel les données relatives aux articulations [Critchlow, 1985]. Ces données correspondent aux valeurs de position, de vitesse et d'accélération liées aux articulations. La Figure 0-3 présente l'interaction entre le contrôleur, l'actuateur et le capteur.

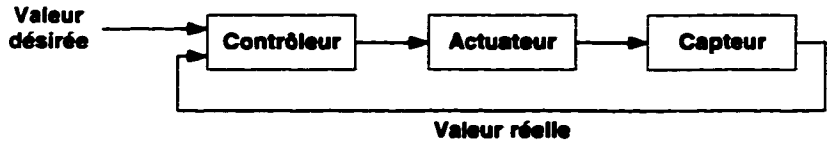

Figure 0-3 : Système de contrôle d'une articulation

Les contrôleurs constituent à eux seuls une partie importante de la robotique [Franklin, 1994]. Ils permettent de caractériser le comportement du robot pour toutes commandes ordonnées par l'opérateur. Les contrôleurs sont divisés en deux classes : les contrôleurs en boucle ouverte et les contrôleurs en boucle fermée. En général, les contrôleurs en

boucle fermée sont plus fréquemment utilisés, car ils permettent une plus grande adaptation du système aux perturbations externes.

Afin d'interagir avec le robot, le téléopérateur doit communiquer avec celui-ci à l'aide d'interfaces. Parmi les interfaces les plus courantes, il y a les manettes, le clavier, les interfaces graphiques logicielles et les panneaux de contrôle.

La problématique entourant la communication entre le téléopérateur et le robot entraîne le développement de nouvelles technologies. Par exemple, il y a la réalité virtuelle et la réalité augmentée [Vallino, 1997]. Pour avoir une meilleure communication, ces technologies utilisent les principes d'immersion, d'interactivité et d'imagination. En utilisant de nouveaux périphériques d'interface comme le casque virtuel, le gant virtuel et autres, il est possible de donner l'impression au téléopérateur de commander et de contrôler le robot in situ. Ces nouvelles interfaces permettent d'enlever virtuellement la barrière qui sépare le monde du téléopérateur et le monde télécommandé (Figure 0-1).

Aspects mathématiques et physiques de la robotique

La position des objets est représentée à l'aide des attributs *x, y, z*. Ce point est appelé PDR (***Point de Résolution***). Afin de déterminer l'orientation spécifiée par les attributs *h, p, r* (***Heading (lacet), Pitch (tangage), Roll (Roulis)***) des objets, les ADR (***Axes de Résolution***) sont utilisés. En juxtaposant le PDR au ADR, on obtient le RDR (***Référentiel de Résolution***). Le RDR spécifie à la fois la position et l'orientation des objets [Tabarah, 1997a].

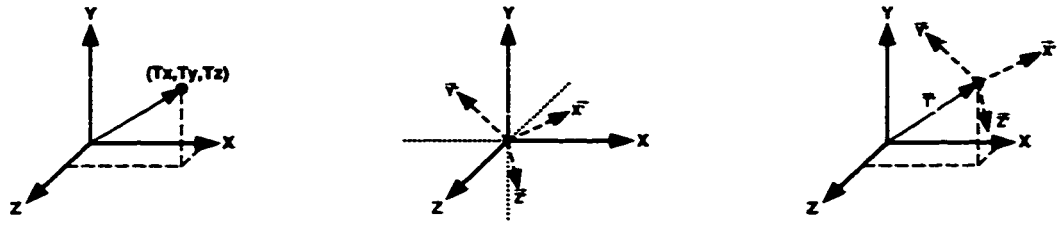

Figure 0-4 : Point, axes et référentiel de résolution

Le RDR correspond à la transformation qui permet d'obtenir une position et une orientation donnée, selon un référentiel parent. Les RDR sont représentés sous forme de quaternions ou de matrices homogènes (fonctions de transfert).

$$\begin{bmatrix} x_i' & y_i' & z_i' & T_x \\ x_j' & y_j' & z_j' & T_y \\ x_k' & y_k' & z_k' & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{x'} = x_i\vec{i} + x_j\vec{j} + x_k\vec{k} \qquad \vec{x'}, \vec{y'}, \vec{z'}$$

$$\vec{y'} = y_i\vec{i} + y_j\vec{j} + y_k\vec{k}$$

$$\vec{z'} = z_i\vec{i} + z_j\vec{j} + z_k\vec{k} \qquad \vec{T'}$$

$$\vec{T'} = T_x\vec{i} + T_y\vec{j} + T_z\vec{k}$$

Axes du référentiel enfant exprimé dans le référentiel parent.

Vecteur déplacement entre les référentiels parent et enfant.

Figure 0-5 : Définition d'une matrice homogène

Dans la hiérarchie d'un robot, chacune des membrures est positionnée et orientée d'après une membrure supérieure. Les RDR sont locaux, c.-à-d. qu'ils sont exprimés dans le référentiel du parent. Les RDR des membrures sont modifiés lorsque les valeurs d'articulations varient. Ces variations entraînent le déplacement des organes terminaux. Afin d'obtenir le RDR selon le référentiel absolu, il est nécessaire d'appliquer toutes les transformées de la hiérarchie supérieure, à l'organe terminal. L'ensemble de ces actions caractérise la cinématique directe et permet d'obtenir la position et l'orientation de l'organe terminal dans le référentiel absolu.

Pour la cinématique inverse, le problème est de déterminer les valeurs des articulations qui permettent d'obtenir un RDR donné d'un organe terminal spécifique. Dans certains cas, aucune solution n'est possible pour un RDR spécifique. Il est possible que la

structure du robot ne permette pas d'atteindre la configuration désirée. Il peut exister également plusieurs solutions possibles pour un même RDR [Schilling, 1990].

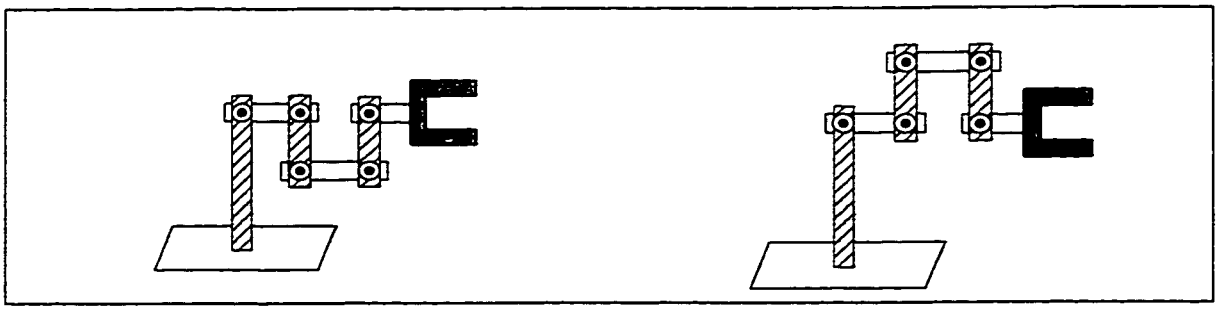

Figure 0-6 : Solutions multiples pour la cinématique inverse

Lors d'une manœuvre, l'opérateur peut perdre un ou plusieurs degrés de liberté au niveau des organes terminaux. En robotique, ces pertes correspondent aux singularités d'un robot. Les singularités sont directement liées à la structure du robot et se divisent en 2 catégories [Tabarah, 1997b] :

- singularités de frontière : L'organe terminal est près de la limite de son espace maximal de travail. En fait, la structure du robot limite l'enveloppe de travail de l'organe terminal;
- singularités intérieures : Il s'agit des autres singularités qui se produisent à l'intérieur de l'enveloppe de travail valide d'un organe terminal. Ces singularités sont causées par la géométrie du robot.

Pour le téléopérateur, les singularités s'observent par un comportement anormal du robot en réponse aux commandes. Le téléopérateur doit éviter les configurations du robot qui se situent près d'une singularité pour éviter les bris et les risques de collision.

La masse des membrures, la flexibilité des articulations, la puissance des actuateurs et la qualité des contrôleurs ont toutes un impact dans le comportement dynamique du robot [Craig, 1989]. Lorsque le téléopérateur commande un déplacement et qu'il décide

soudainement d'effectuer un arrêt, le robot ne répond pas immédiatement à cette commande en raison de son inertie. En état d'apesanteur et en absence de friction d'air, les membrures peuvent continuer à osciller sur de longues périodes avant de s'immobiliser complètement. Le téléopérateur doit comprendre la dynamique du robot afin d'éviter tout risque de bris.

Applications de la télérobotique

La télérobotique est utilisée dans les environnements considérés à haut risque pour l'humain. La télérobotique permet à un opérateur de commander et de contrôler un robot à partir d'un lieu exempt de dangers. La télérobotique se retrouve notamment dans les domaines du désamorçage de bombes, de l'exploitation minière, de la manipulation de déchets dangereux, de l'exploration sous-marine et de la télémédecine [Delp, 1997]. Récemment, une sonde semi-autonome, le *Mars-Pathfinder* permettait à la NASA (*National Aeronautics Space and Administration*) d'explorer en détail le sol de Mars. Un lien de communication permettait à la NASA de contrôler le véhicule à distance à partir d'un endroit sécuritaire. La télérobotique se retrouve aussi dans le domaine de l'assemblage de structures en état d'apesanteur, comme dans le cas du SEM pour l'assemblage et la maintenance de la SSI [NASA, 1998a].

Définition de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle est définie comme étant une interface de haut niveau impliquant une modélisation d'un environnement, une simulation en temps réel de cet environnement modélisé et une interaction avec des périphériques sensoriels (vue, ouïe, odorat, toucher,

goût) [Burdea, 1993]. La réalité virtuelle est un type d'interface où l'humain et l'ordinateur entrent en contact [Logan, 1995].

La réalité virtuelle se compose de 3 aspects fondamentaux : l'immersion, l'interactivité et l'imagination :

- L'immersion donne l'impression à l'utilisateur de faire partie d'un autre monde. En tant qu'observateur, il lui est possible d'explorer ce monde virtuel en se déplaçant et en orientant son champ de vision dans la direction qu'il désire. Au fur et à mesure qu'il se déplace, le système lui procure le rendu visuel, sonore et haptique en temps réel. L'utilisateur peut acquérir les notions de distance [Waller, 1998], de déplacement [Witmer, 1998] et de temps.

- L'interactivité est l'aspect qui permet à l'utilisateur de modifier, par ses actions, l'environnement dans lequel il est en immersion. À l'aide de gants virtuels, de manettes et de commandes vocales, il lui est possible d'être plus qu'un observateur, mais aussi un acteur [Cannon, 1997]. Par exemple, il est capable de déplacer des objets virtuels, d'éclairer une scène avec différentes sources de lumière et même de décomposer un objet complexe en plusieurs parties.

- L'imagination permet à l'utilisateur d'expérimenter de nouvelles facettes qui ne sont pas réalisables dans la réalité. Par exemple, s'il fait jour et que l'utilisateur veut que ce soit la nuit, alors il n'a qu'à déplacer le soleil derrière une montagne. Dans ce cas, l'usager utilise sa créativité et son initiative pour réaliser une action qui n'est pas possible dans la réalité. Cet aspect permet à l'utilisateur d'explorer de nouvelles perspectives et de percevoir l'environnement sous un autre point de vue [Drastic, 1998].

Taxonomie de la réalité virtuelle

Comme il a été mentionné précédemment, la réalité virtuelle implique la modélisation d'un environnement. Selon la complexité du monde, il est plus ou moins coûteux de le modéliser intégralement. C'est pourquoi certains systèmes utilisent une combinaison de réalité augmentée et de virtualité augmentée [Kalawsky, 1993].

Au niveau de la réalité augmentée, le monde virtuel est généré à partir d'une vraie scène. Ce rendu visuel provient habituellement de caméras. Afin d'ajouter de l'information supplémentaire, des modèles sont superposés à la scène. L'intégration de ces modèles est logicielle et nécessite la présence d'un ou plusieurs ordinateurs. Le système final présente à l'usager un environnement virtuel dans lequel l'usager ne peut pas distinguer la réalité et la virtualité. La réalité augmentée est utilisée lorsque la fidélité est essentielle et lorsque le système possède des contraintes temps réel critiques.

Pour la virtualité augmentée, le monde virtuel est entièrement modélisé par ordinateur. Ceci est utile lorsque l'environnement à modéliser n'est pas accessible ou parfois même inexistant. Contrairement à la réalité augmentée, la virtualité augmentée nécessite beaucoup plus de ressources systèmes. Dans le cas où la complexité d'un modèle serait limitée et que la fidélité exacte du modèle ne serait pas nécessaire, la virtualité augmentée peut être utilisée. Milgram définit un continuum décrivant la notion de réalité augmentée et de virtualité augmentée.

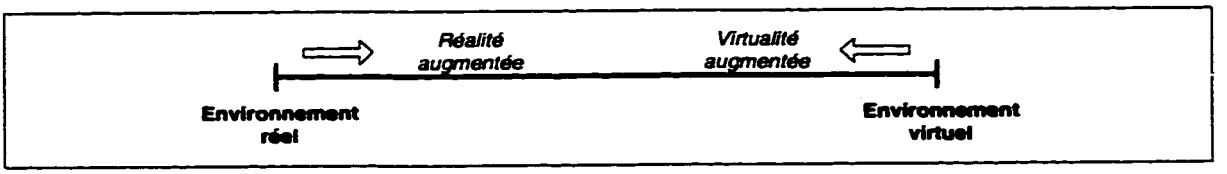

Figure 0-7 : Continuum réalité augmentée- virtualité augmentée

Périphériques utilisés en réalité virtuelle

Plusieurs composantes interviennent au sein d'un système de réalité virtuelle. Ces composantes sont classées selon les catégories suivantes : les ordinateurs, les périphériques d'entrée et les périphériques de sortie [Burdea, 1993].

L'ordinateur est le cœur même d'un système de réalité virtuelle. Il réalise la modélisation de l'environnement, la commande et le contrôle des différents périphériques d'entrée et de sortie [Stampe, 1993]. Certains ordinateurs sont spécialisés pour les applications de simulation et de réalité virtuelle, par exemple les systèmes de la compagnie Silicon Graphics.

Parmi les périphériques d'entrée, il y a les souris 3D, les manettes qui permettent quelques fois plus de 6 degrés de liberté ainsi que le gant virtuel [Sturman, 1993]. La navigation nécessite un système de localisation spatiale. Un tel système est composé d'émetteurs et de récepteurs. Ces systèmes sont mécaniques, ultrasoniques, optiques ou généralement magnétiques. Dans le cas d'un système magnétique, des impulsions sont transmises par un émetteur. Des capteurs reçoivent ces impulsions et retournent leurs positions et leurs orientations sous forme de matrices homogènes [Ascension technology corporation, 1996].

Certains systèmes utilisent des sondes articulées [Burdea, 1993]. Une sonde articulée est composée d'une structure robotique manipulable et de capteurs permettant le contrôle des articulations. En modifiant la configuration du robot miniature, les valeurs des capteurs varient et il est possible de représenter graphiquement la posture de la sonde articulée en temps réel.

Parmi les sorties graphiques, il y a les processeurs vidéos 2D, les processeurs vidéos 3D, les moniteurs et les casques virtuels avec vues stéréoscopiques [Virtual Research System inc, 1995]. Ces casques, composés de 2 écrans, permettent de générer 2 images simultanément. En considérant la disparité visuelle, c.-à-d. la distance entre les 2 yeux d'un utilisateur, il est possible de donner à l'utilisateur une perception de 3D [Davies, 1997]. Le champ de vision du casque permet également d'augmenter l'immersion d'un utilisateur dans le monde virtuel.

Au niveau sonore, on retrouve les cartes audio 2D et 3D. Contrairement aux cartes 2D, les cartes 3D se soucient des aspects de spatialisation du son. Ces cartes augmentent l'immersion, car elles permettent un réalisme accru du rendu sonore.

Finalement, il y a les périphériques haptiques [Burdea, 1993]. Ces derniers utilisent les contacts et les retours de force pour permettre de simuler le sens du toucher. Pour l'instant, la technologie est récente et peu de périphériques sont disponibles. La recherche est très active dans ce domaine et l'apparition de nouveaux périphériques haptiques devrait se réaliser au cours des prochaines années. Pour l'instant, il y a principalement les gants tactiles et les manettes avec retour de force.

Modélisation géométrique des objets

L'intégration d'un monde réel dans un système de réalité virtuelle nécessite la représentation géométrique des objets. Chacun des objets est positionné et orienté selon le référentiel d'un objet parent ou un référentiel absolu. Cette possibilité permet de créer une hiérarchie d'objets La localisation des objets est habituellement représentée sous forme de matrice homogène.

Chacun des objets d'une scène est modélisé à l'aide de polygones. Pour augmenter le réalisme, des couleurs et des textures sont appliquées sur ces polygones. De plus pour effectuer la réflexion de la lumière sur les surfaces, les propriétés des matériaux sont spécifiées pour chacun des objets [Neider, 1994].

Pour des raisons de performance, les objets sont représentés avec plusieurs niveaux de détail [Coryphaeus Software inc, 1996a]. La proximité d'un usager par rapport à un objet permet de déterminer le niveau de détail à utiliser. Lorsque l'utilisateur est éloigné, il n'est pas nécessaire de représenter l'objet avec un grand nombre de polygones.

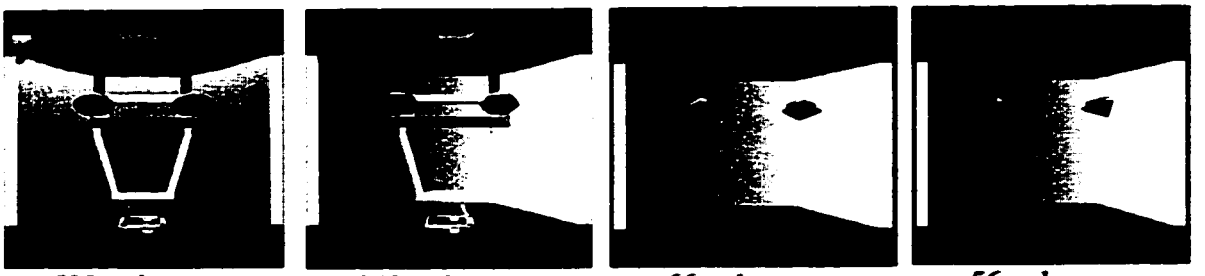

Figure 0-8 : Niveaux de détail d'un objet

Dans la même perspective, les scènes peuvent être divisées en régions. Si l'utilisateur se retrouve à l'intérieur d'une région particulière, les objets de cette région utilisent un niveau de détail élevé. Par contre pour ceux qui sont à l'extérieur de cette région, ils sont représentés avec un faible niveau de détail.

Modélisation de la physique des objets

Afin d'avoir un environnement vivant, il est nécessaire de modéliser les aspects physiques présents dans le monde réel. Parmi ces aspects, il y a notamment la cinématique et la dynamique des objets. À l'aide d'équations mathématiques, de formules empiriques et de formules probabilistes, il est possible de modéliser l'accélération d'un corps en chute libre, la déformation d'un corps suite à une collision ou même la combustion d'un élément chimique [Watt, 1992].

Pour éviter que l'utilisateur passe à travers les objets dans le monde virtuel, les systèmes utilisent des algorithmes de détection de collision. Des objets frontières sont associés aux différents objets de la scène. Ces objets frontières possèdent moins de polygones et permettent, à l'aide de concepts géométriques, de vérifier les collisions entre les objets d'une scène.

Des modèles d'illumination et la présence de sources de lumière permettent d'ajouter de l'éclairage à une scène. L'angle d'incidence de la source de lumière avec la surface, la texture et les propriétés du matériel de la surface permettent de déterminer la couleur en chacun des points du polygone éclairé. La difficulté des systèmes actuels est la génération des ombres. En effet, ce problème demande énormément de temps de calcul.

À l'intérieur d'une scène, les points de vue des usagers sont représentés par des caméras. Les caméras sont en fait des objets comme ceux décrits précédemment à l'exception qu'ils possèdent des caractéristiques supplémentaires. Les degrés du champ de vision et le type de projection permettent de générer l'image 2D telle qu'observée par la caméra [Silicon Graphics inc, 1994]. En tenant compte de la disparité visuelle d'un usager, c.-à-d. la distance entre ses deux yeux, il est possible de créer un modèle de vision qui procure un effet stéréoscopique 3D, similaire à la vision même de cet usager [Robinet, 1995]. En positionnant des objets caméras à la position de chaque œil, il est possible de générer les 2 images que l'usager obtiendrait en réalité. La perception de ces 2 images entraîne un traitement cérébral et permet à l'usager de percevoir en 3D.

Facteurs humains liés à la réalité virtuelle

L'utilisation de la réalité virtuelle a certains impacts sur la sécurité et la santé de l'utilisateur [Reagan, 1993]. En effet, une mauvaise calibration de la disparité visuelle peut causer des étourdissements et des malaises à l'utilisateur. Le temps de réaction du système à un mouvement de l'usager doit être inférieur à 100 ms et le taux de rafraîchissement d'images doit être supérieur à 20 Hz [Logan, 1995] pour éviter ces malaises. Lorsque ces contraintes ne sont pas respectées, l'usager peut être en mesure de constater la différence entre le mouvement et le rendu obtenu [Cyberedge Journal, 1993].

L'application de textures et un nombre élevé de polygones permettent d'augmenter le réalisme d'une scène. Pour avoir une bonne immersion, le système visuel humain nécessite des angles d'ouverture de 120° vertical par 180° horizontal avec 120° d'entrelacement entre les 2 yeux [Burdea, 1993]. L'entrelacement indique la portion

visuelle vue par les 2 yeux simultanément. Malgré ces spécifications, les casques virtuels ne permettent pas encore un tel champ de vision.

Applications de la réalité virtuelle

La technologie de la réalité virtuelle est utilisée dans plusieurs domaines. Elle se retrouve dans le domaine de la visualisation et de la conception, dans les applications de télérobotique et dans le domaine de l'entraînement [Cannon, 1997]. La réalité virtuelle permet à certains utilisateurs de se familiariser avec des environnements hostiles tout en étant exempt de dangers [Bliss, 1997]. Pour la manipulation du SSRMS, la réalité virtuelle permet aux astronautes de visualiser le comportement du bras robotique en réponse à leurs commandes et par le fait même de visualiser les structures de la SSI qui pourraient causer certains problèmes lors de leurs futures manœuvres [Allard, 1997].

Description du projet VOTE

En raison de l'environnement hostile de l'espace, l'ASC a développé un outil basé sur la réalité virtuelle. VOTE offre aux futurs téléopérateurs de se familiariser avec la SSI et les composantes du SEM. VOTE permet aux usagers de naviguer à l'intérieur d'un monde virtuel et de visualiser en 3 dimensions le comportement des composantes du SEM selon les commandes données sur le simulateur MOTS. Ce dernier modélise la dynamique et le comportement des composantes du SEM.

Le système VOTE sert à l'entraînement des astronautes et des contrôleurs de mission ainsi qu'au développement des procédures d'opérations du SEM. VOTE fournit également des outils virtuels. Ces outils aident les usagers à mieux percevoir certains

détails (distances, alignement). Ces outils facilitent aussi la construction d'un modèle mental 3D de la SSI et des composantes du SEM.

Contributions au projet VOTE

Voici les contributions majeures apportées à VOTE dans le cadre du projet de maîtrise :

- développement de nouveaux outils virtuels ;
- implémentation d'un système de communication qui permet la visualisation d'une simulation MOTS dans le système VOTE, en temps réel ;
- conception et implémentation d'un système de navigation 3D qui offre la possibilité de naviguer à l'aide de manettes ;
- développement d'une architecture logicielle qui permet de supporter plus d'un usager dans une session VOTE ;
- ajustement du système afin de supporter un modèle fidèle des caméras du SEM et de la navette spatiale.

Résumé du Mémoire

Ce mémoire présente les travaux réalisés au sein du système VOTE. Il présente les composantes du SEM, les opérations réalisées avec ses composantes et le simulateur du SEM. Il décrit par la suite les objectifs, les modules et les fonctionnalités de VOTE. Il poursuit par la présentation de la conception de certains modules. Finalement, le mémoire présente les résultats obtenus durant des tests de performance, les commentaires des astronautes et les avenues de recherche au niveau du système VOTE.

CHAPITRE 1 – SYSTÈME D'ENTRETIEN MOBILE

Ce chapitre présente de façon générale la station spatiale internationale et décrit les composantes du SEM. Le chapitre se termine par la description du simulateur MOTS.

1.1 Station spatiale internationale

1.1.1 Description

Le premier objectif de la station spatiale internationale est de permettre aux compagnies, universités et gouvernements d'exécuter des expériences en état d'apesanteur [NASA, 1998c]. Une fois construite, la SSI servira de :

- banc de test pour l'exploration de l'être humain et de nouvelles technologies ;
- laboratoire mondial de recherche ;
- plate-forme commerciale pour le développement et la recherche spatiale.

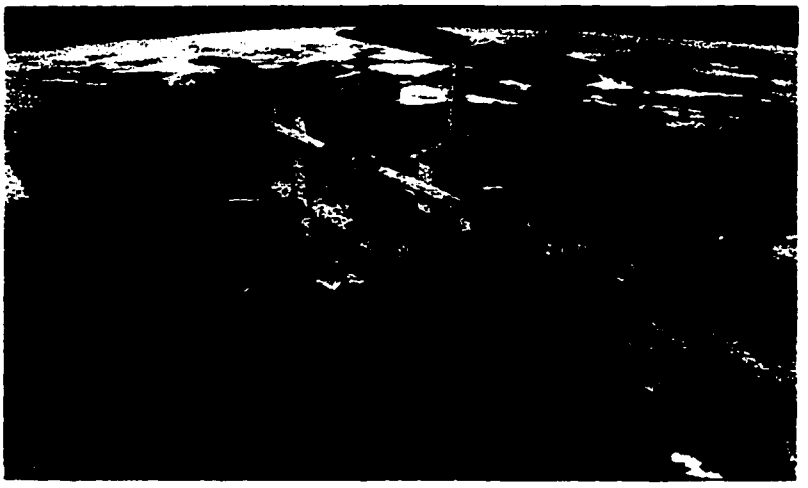

Figure 1-1 : Configuration finale de la SSI

Au niveau des partenaires, 16 pays participent à l'assemblage de la SSI. Chacun de ces partenaires contribue en apportant des ressources technologiques, humaines et financières. La contribution du Canada est le SEM.

Près de 47 vols spatiaux, prévus entre novembre 1998 et janvier 2004, permettront le transport de plus de 100 composantes différentes nécessaires à la construction complète de la station [NASA, 1998a]. Une fois terminée, la station possédera une envergure maximale de 100 m et une superficie totale équivalente à la moitié d'un terrain de football. Sa masse dépassera 450 000 kg. Elle aura une période de 90 minutes, temps pour effectuer un tour complet autour de la terre, et sera à une altitude moyenne de 350 km avec 51.5 degrés d'inclinaison. Dans sa configuration finale, il sera possible de l'observer à l'œil nu de la terre.

1.1.2 Assemblage

Un total de 33 lancements de navette spatiale, 4 fusées Proton russes et 10 fusées Soyuz est nécessaire pour le transport des composantes et le ravitaillement.

La Figure 1-2 présente la séquence d'assemblage révisée le 31 mai 1998 [NASA, 1998b]. Une occupation permanente débutera avec l'arrivée d'un module Soyuz en juillet 1999. À partir de cette mission 2R, les tâches de construction et d'exploitation de la SSI se réaliseront conjointement.

Ce n'est qu'en décembre 1999, avec la mission 6A, qu'il sera possible d'utiliser le SSRMS pour la manipulation de charges. Cette mission consiste au déploiement du SSRMS par l'astronaute canadien Chris Hadfield. Par la suite, le transport et l'installation du MBS sur le MT sont prévus pour août 2000. Cette mission permettra le déplacement du SSRMS tout le long du rail principal de la SSI.

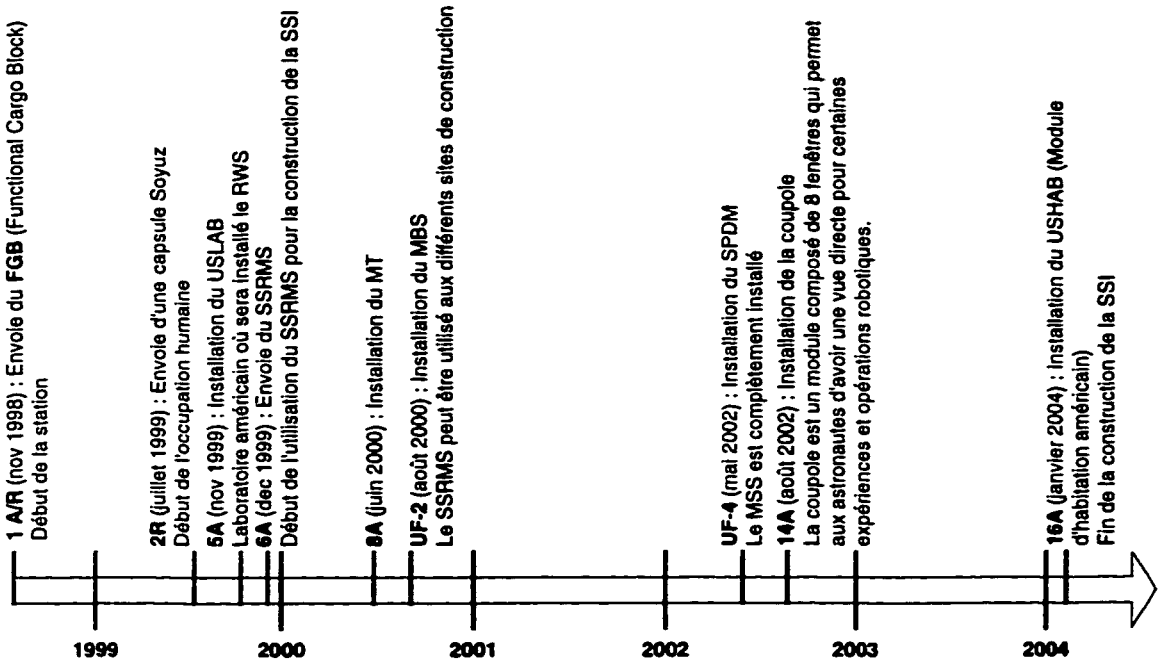

Figure 1-2 : Séquence d'assemblage de la SSI

1.1.3 Difficultés envisagées

Contrairement à l'environnement sur terre, l'espace est plutôt hostile. Tout d'abord le cycle circadien est désorienté par les 16 levés de soleil et les 16 couchés de soleil produits à chaque journée terrestre. Dans un environnement exempt d'air, la lumière ambiante est pratiquement inexistante. Pour qu'un objet soit éclairé, il est nécessaire que ses faces soient orientées directement avec le soleil ou autres sources de lumière.

Dans l'espace, les mouvements ne sont pas amortis par la friction de l'air. C'est pourquoi des mouvements brusques peuvent induire des oscillations importantes dans les différentes composantes de la SSI comme les panneaux solaires. Une oscillation de forte amplitude peut causer des dommages importants à ces composantes.

Les astronautes doivent également tenir compte de l'inertie. En effet, l'arrêt d'une masse en déplacement ne se réalise pas instantanément. La dynamique du corps doit être considérée par l'astronaute qui manipulera le SSRMS pour éviter tout dommage.

1.2 Système d'entretien mobile

Tel que mentionné précédemment, le Canada contribue au développement de la SSI en fournissant le SEM. Sa participation consiste à la construction, l'entraînement, la planification des opérations et la maintenance liés au SEM. Le SEM est composé des systèmes suivants [Greenberg, 1998] :

- SSRMS : Bras robotique d'une longueur maximale de 17 m, possédant 7 degrés de liberté. Le bras est en mesure de manipuler des charges allant jusqu'à 116 000 kg;
- SPDM : Main robotique composée de 15 degrés de liberté servant à accomplir des tâches précises et minutieuses comme le remplacement de modules endommagés. Ce robot est aussi appelé main agile spécialisée;
- MBS : Base mobile à laquelle le SSRMS peut se raccorder. Cette base se déplace sur le MT (développé par les Américains) et permet le transport du SSRMS et du SPDM sur des sites éloignés d'assemblage et de maintenance

sur la SSI. Sur la Figure 1-1, ce rail correspond à la structure qui soutient les panneaux solaires de chaque côté de la SSI.

- AVU (*Artificial Vision Unit*) : Système de vision artificielle utilisant la technologie de la réalité augmentée afin d'assister les astronautes lors de la manipulation de charge avec le SSRMS et le SPDM;
- RWS : Console d'opération robotique pour la commande et le contrôle des composantes du SEM.

1.2.1 SSRMS

Description physique du SSRMS

Le SSRMS est un bras robotique avec une base réversible ayant une masse de 1500 kg. Il est conçu de façon modulaire afin de permettre un remplacement rapide des pièces défectueuses en orbite.

Tel qu'illustré dans la Figure 1-3, le bras possède deux organes terminaux. Ces organes terminaux sont tous deux attachés à 3 articulations. Ces 3 articulations permettent une orientation selon h, p, r. Afin de relier les 2 membrures principales, une articulation supplémentaire est utilisée afin d'ajouter un septième degré de liberté au bras. Ce 7e degré permet plusieurs configurations possibles du SSRMS pour une position et une orientation donnée de l'organe terminal libre.

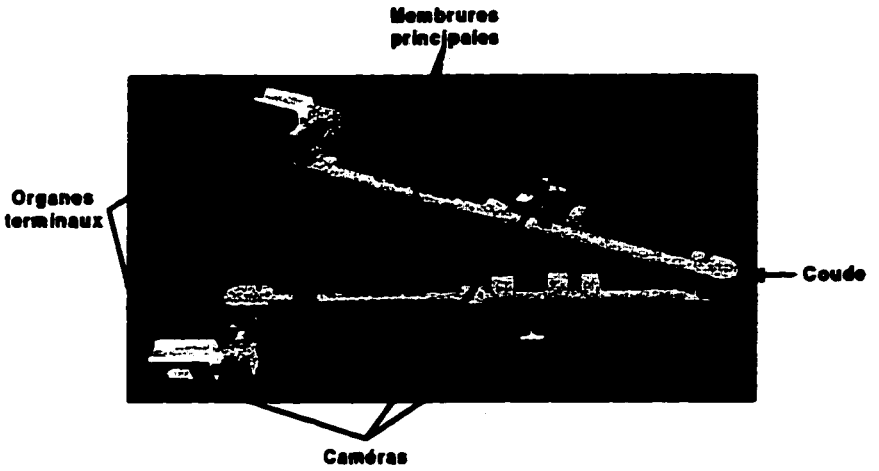

Figure 1-3 : Architecture physique du SSRMS

Description physique des points d'attache

Les points d'attache sont des composantes mécaniques qui permettent aux organes terminaux du SSRMS de se connecter sur la SSI, le MBS ou toute autre charge. En plus de fournir cette interface mécanique, certains points d'attache, nommés PDGF (*Power Data Grapple Fixture*) ont la particularité de fournir de l'énergie de même que des signaux vidéos, de commande et de contrôle au SSRMS [Allard, 1997].

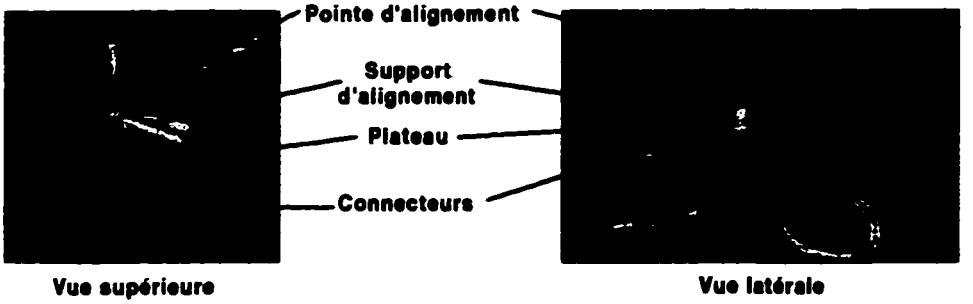

Figure 1-4 : Description physique d'un point d'attache

Pédipulation

Grâce à l'anatomie particulière du SSRMS, il lui est possible de changer de base lors d'une opération. En effet, lorsque l'organe terminal A est raccordé à un PDGF, le téléopérateur peut raccorder l'organe terminal B sur un PDGF libre, suivre une procédure d'inversion de base et modifier la base effective. Ainsi, le téléopérateur peut déplacer le SSRMS vers un site de mission en parcourant une série de points d'attache.

La Figure 1-5 présente les 3 étapes principales réalisées lors d'une pédipulation. L'image de gauche présente la base B qui s'approche du USLAB-PDGF. L'image du centre montre les 2 organes terminaux raccordés à aux points d'attache. Après une procédure de changement de base, la base A se libère tel que montré dans l'image de droite et devient désormais l'organe terminal libre.

Figure 1-5 : Étapes de la pédipulation

Caméras

Contrairement à la manipulation du bras canadien de la navette spatiale, le SRMS (*Shuttle Remote Manipulator System*), il n'est pas toujours possible pour l'astronaute d'avoir une vue directe sur le SSRMS. C'est pourquoi il est nécessaire d'incorporer des caméras pour donner le rendu visuel. Des commandes permettent de modifier le facteur d'agrandissement, l'iris, l'angle d'ouverture et l'orientation de chacune des caméras. En plus des caméras localisées à différents endroits sur la SSI et la navette spatiale, le SSRMS est équipé de 4 caméras. Il y en a 2 sur les organes terminaux et 2 sur les

membrures principales. Les caméras des organes terminaux sont surtout utilisées pour les procédures d'attache. Pour éviter les erreurs d'alignement avec les points d'attache, il n'est pas possible de modifier l'orientation de ces 2 caméras.

Modes d'opérations du SSRMS

La manipulation du SSRMS requiert des modes d'opération manuels, automatiques préprogrammés et automatiques commandés par le téléopérateur [Agence spatiale canadienne, 1998]. Selon le mode sélectionné, les contrôleurs du SSRMS réalisent la cinématique directe ou la cinématique inverse.

Tableau 1-1 : Modes de contrôle du SSRMS

Mode	Cinématique	Description
SJRM	directe	Modification de la valeur d'une articulation spécifique. Ce mode est utilisé pour sortir d'une singularité ou lors de malfonctions.
MAM	inverse	Manipulation de l'organe terminal selon le référentiel de commande sélectionné. Il s'agit du mode manuel le plus utilisé car il permet au téléopérateur d'effectuer la première approche rapidement. Cependant, l'utilisation de ce mode ne permet pas au téléopérateur de prévoir le comportement des articulations lors de la cinématique inverse en raison du 7e degré de liberté. Le téléopérateur doit donc porter une attention particulière aux singularités et aux risques de collision.
APPC	inverse	Ce mode est utilisé lorsque le coude du SSRMS est près d'une collision ou lorsque la configuration du SSRMS est près d'une singularité. Grâce au 7e degré de liberté, ce mode permet de modifier la configuration du bras tout en conservant la position et l'orientation de l'organe terminal.
OCJM	directe	Ce mode permet au téléopérateur d'entrer un ensemble de valeurs pour les 7 articulations du SSRMS. Le système utilise alors ces valeurs de destination pour modifier la valeur de chacune des articulations simultanément. Ce mode permet d'exécuter des manœuvres préprogrammées.
PJAM	directe	Ce mode permet l'exécution de plusieurs OCJM successivement. Pour ce faire, le mode nécessite plusieurs valeurs de destinations intermédiaires. Pour chacune de ces valeurs intermédiaires (valeurs des 7 articulations), le SSRMS exécute un OCJM.
OCPM	inverse	Ce mode automatique permet au téléopérateur de spécifier la position et l'orientation de l'organe terminal à atteindre dans le référentiel d'affichage courant. Le système exécutera la cinématique inverse qui donnera la configuration désirée. Cependant, ce mode n'est pas à l'abri des collisions et des singularités. Le téléopérateur doit en tout temps contrôler le SSRMS.
PPAM	inverse	Il s'agit d'un mode automatique qui permet au téléopérateur d'exécuter une séquence de OCPM. Ce mode permet de réaliser des manœuvres complexes qui sont validées au sol par le département des opérations.

Référentiels de commande et d'affichage

Afin de commander l'organe terminal libre, un référentiel de commande est associé à ce dernier. Ce référentiel indique la correspondance entre les manettes de commande et

l'organe terminal. Si le téléopérateur est dans le mode MAM (*Manual Augmented Mode*), alors la cinématique inverse est réalisée et l'organe terminal se déplace selon le référentiel de commande sélectionné [Tabarah, 1998a].

Les référentiels de commande se divisent en 2 catégories : les référentiels internes et les référentiels externes. Les référentiels internes sont des référentiels qui sont attachés à l'organe terminal. Il s'agit de référentiels fixes qui sont directement liés avec la position et l'orientation de l'organe terminal. Dans le cas des référentiels externes, ils sont fixes par rapport à la SSI. Ils ne sont pas liés à l'organe terminal.

Afin de contrôler la position et l'orientation de l'organe terminal libre, le téléopérateur doit spécifier un référentiel d'affichage. Dans l'environnement de la SSI, il existe plusieurs référentiels d'affichage localisés aux différents PDGF et à des points spécifiques de la station. Lorsque le téléopérateur désire effectuer un attachement avec un PDGF, il sélectionne premièrement le référentiel d'affichage associé à ce PDGF. Ensuite, en contrôlant la position et l'orientation, il tente de déplacer l'organe terminal vers le PDGF en amenant ainsi les coordonnées à (0,0,0) pour la position et (0, 0, 0) pour l'orientation.

La Figure 1-6 présente le comportement de l'organe terminal avec l'utilisation d'un référentiel de commande interne. Les coordonnées de l'organe terminal sont exprimées dans le référentiel du LDA-FRGF (point d'attache à atteindre) et le référentiel ISSACS (*ISS (SSI) Analysis Coordinate System*). Les images de gauche présentent respectivement la vue de caméra de l'organe terminal et une vue arbitraire avant déplacement. Les images de droite présentent ces mêmes vues après le déplacement. Une déflexion selon y de la manette translationnelle montre qu'il y a un déplacement vers la droite de l'organe terminal. Selon le référentiel du LDA-FRGF, la figure illustre

une variation selon l'axe des z, tandis que selon ISSACS, la variation est exprimée selon l'axe des x.

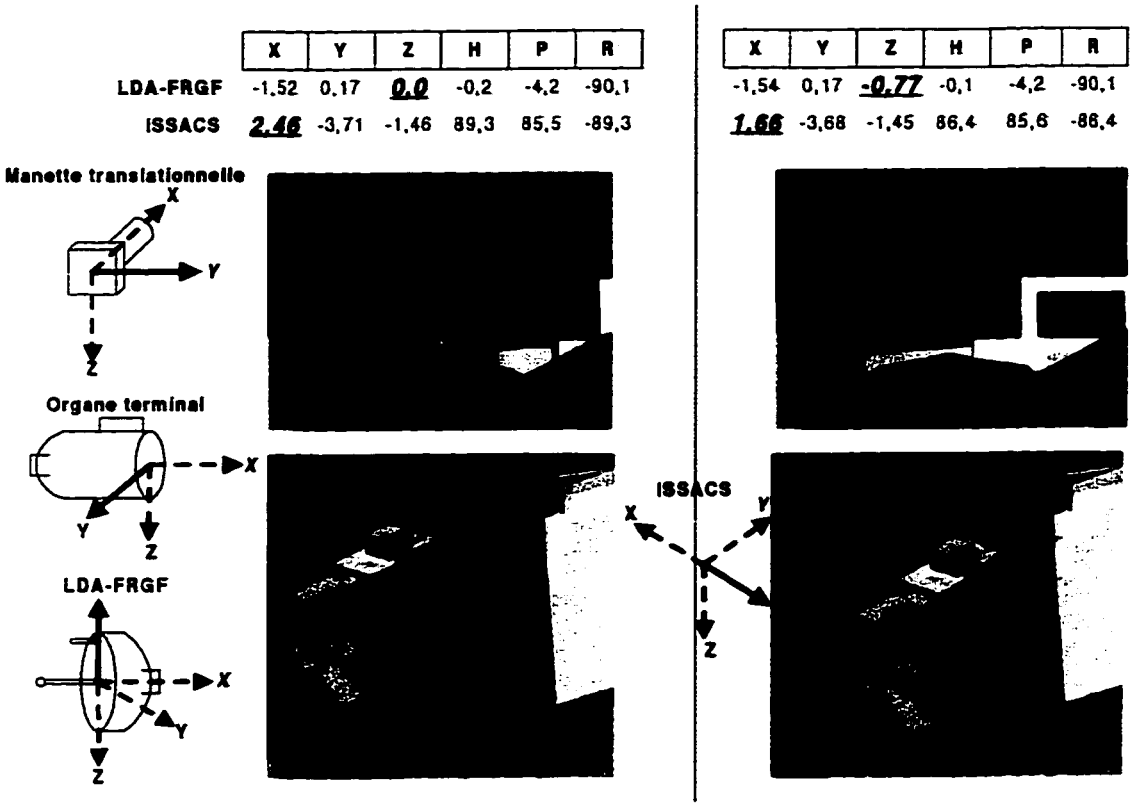

Figure 1-6 : Commande avec référentiel interne

Avec l'utilisation d'un référentiel de commande externe, la même commande sur la manette translationnelle provoque un déplacement de l'organe terminal différent (Figure 1-7). Maintenant la déflexion en y de la manette translationnelle occasionne un déplacement vers le LDA-FRGF. Selon le référentiel d'affichage du LDA-FRGF, les données illustrent une variation selon l'axe des x, tandis que selon ISSACS, la variation est exprimée selon l'axe des y.

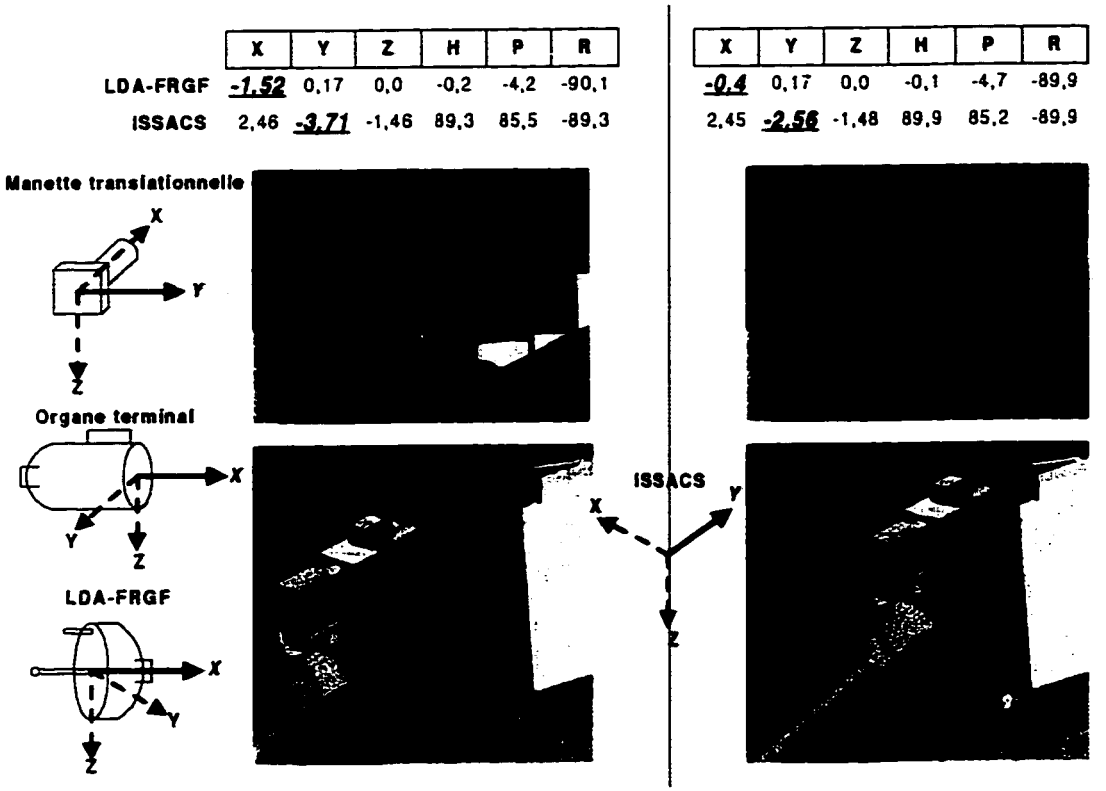

Figure 1-7 : Commande avec référentiel externe

Dans le cas des référentiels de commande externes, la correspondance entre la commande et le déplacement est plus complexe. Le téléopérateur doit connaître à tout moment, les coordonnées de l'organe terminal pour déterminer cette correspondance.

1.2.2 Console d'opération robotique

Le RWS est la console qui permet au téléopérateur de commander et de contrôler les différentes composantes du SEM. Le RWS est constitué de modules matériels et logiciels. Du côté matériel, on retrouve un panneau de commande, un ordinateur portatif, des écrans de contrôle et des manettes de commande (Figure 1-8).

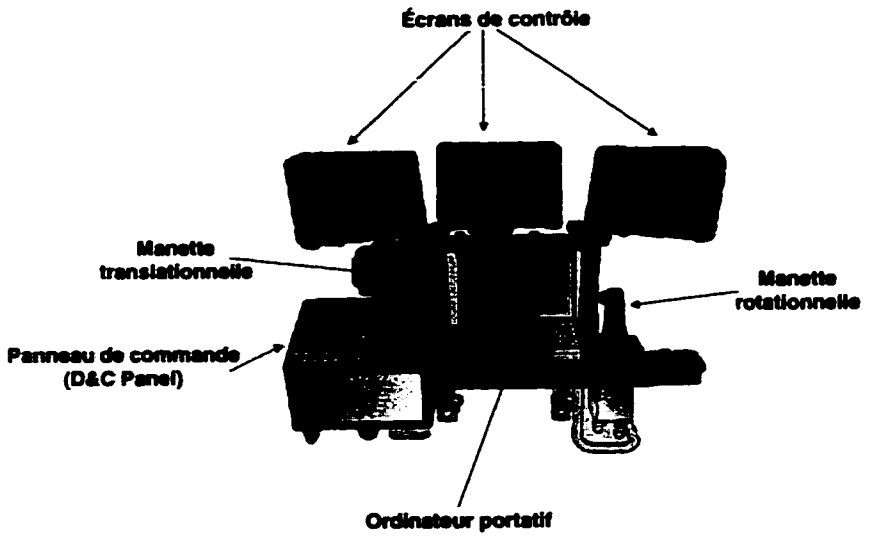

Figure 1-8 : Console d'opération robotique

Panneau de commande

Le panneau de commande permet au téléopérateur de réaliser les tâches suivantes :

- sélectionner, commander et contrôler les caméras actives (orientation, effet de loupe, iris, ouverture des lentilles, éclairage) ;
- activer les procédures d'auto-séquence ;
- sélectionner l'articulation active pour le mode SJRM (***Single Joint Rate Mode***) ;
- activer les procédures d'arrêt d'urgence.

Plusieurs caméras sont localisées sur la SSI et sur les modules du SEM. Chacune d'entre elles possède un numéro d'identification unique. Pour commander et contrôler une caméra spécifique, le téléopérateur doit préalablement sélectionner la caméra sur le panneau de commande en entrant son numéro d'identification.

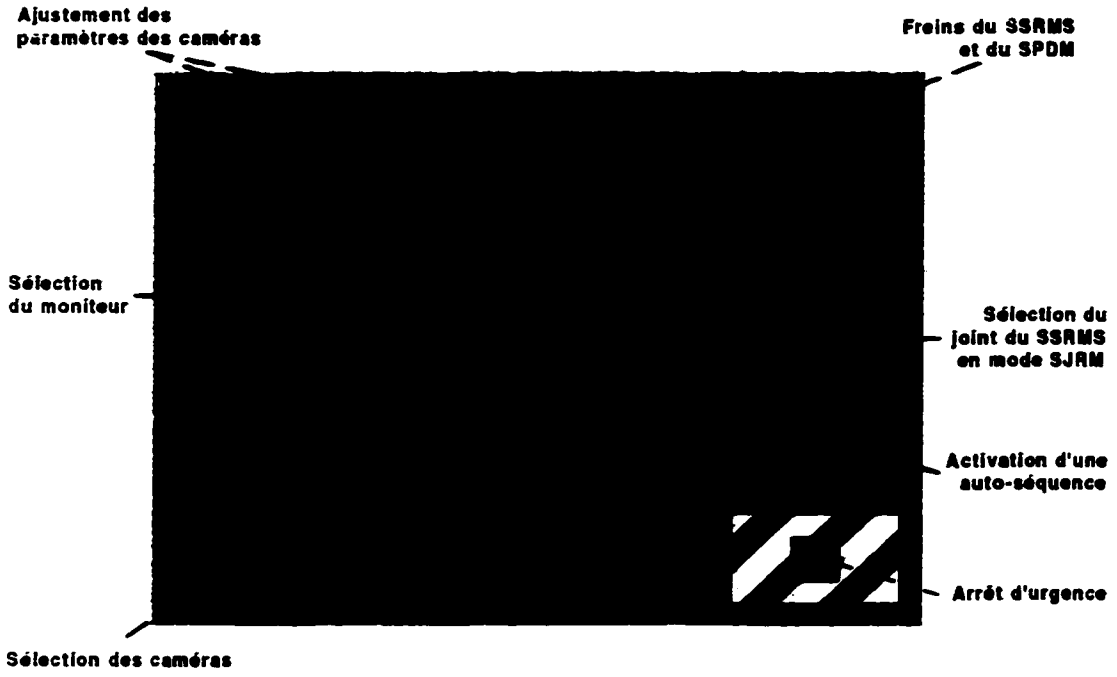

Figure 1-9 : Panneau de commande du SEM

Ordinateur portatif

Afin de compléter le panneau de commande, le RWS utilise un ordinateur portatif pour l'exécution d'une interface graphique. Cette seconde interface permet au téléopérateur de commander et de contrôler :

- l'alimentation électrique des caméras, des lumières et des modules mécaniques et électroniques du SEM ;
- la base attachée et l'organe terminal ;
- les valeurs pour les modes d'auto-séquence ;
- le référentiel de commande et le référentiel d'affichage ;
- le mode d'opération du SSRMS.

Écrans de contrôle

Afin de visualiser le monde extérieur, le RWS offre les vues de 3 caméras sélectionnées par le téléopérateur sur des écrans à cristaux liquides LCD (*Liquid Crystal Display*). Ces 3 vues 2D permettent au téléopérateur de se fabriquer un modèle mental 3D de la posture du SSRMS et ainsi éviter des collisions du SSRMS avec les modules de la SSI. Il est également possible pour le téléopérateur d'afficher des informations supplémentaires sur ces écrans de contrôle :

- coordonnées de l'organe terminal d'après le référentiel d'affichage sélectionné ;
- attributs des caméras sélectionnées ;
- cible graphique qui sert de repère pour les procédures d'attache ;
- valeur de chacun des joints ;
- vitesse du RDR de l'organe terminal libre ;
- valeur des forces et des moments appliqués.

Manettes de commande

Le RWS incorpore deux manettes de commande ayant chacune 3 degrés de liberté. La première manette est la manette translationnelle et la seconde la manette rotationnelle. Elles ont toutes deux des rôles différents et elles sont utilisées dans les modes d'opération manuels (Tableau 1-2).

Tableau 1-2 : Modes d'utilisation des manettes de commande

Manette	Mode	Description
Translationnelle	MAM	Modifie la position du référentiel de résolution.
	SJRM	Indique le sens de rotation de l'articulation sélectionnée à partir du panneau de contrôle.
Rotationnelle	MAM	Modifie l'orientation du référentiel de résolution.
	APPC	Indique le sens de rotation du coude.

1.3 Simulateur du SEM

Le simulateur MOTS fournit un environnement en temps réel modélisant la SSI et les différents modules du SEM. L'objectif du simulateur est de développer des procédures d'opérations sur terre et d'entraîner les astronautes à la manipulation du SEM.

MOTS est un système logiciel utilisant la réalité augmentée afin de modéliser l'environnement réel du SEM. C'est pourquoi MOTS possède une réplique fidèle du RWS qui permet à l'utilisateur d'opérer comme dans la réalité.

Pour l'évaluation des performances des étudiants et pour le développement de procédures, il y une console opérateur et une console instructeur. Ces consoles sont composées de plusieurs moniteurs. Elles permettent aux instructeurs et aux ingénieurs de commander et de contrôler les sessions de simulation. Ils peuvent ainsi visualiser la configuration du SEM avec des vues supplémentaires, enregistrer les manœuvres réalisées sur le simulateur et charger des scénarios d'entraînement. Tout comme le RWS, ces consoles comprennent des manettes de commande qui permettent aux utilisateurs de commander et de contrôler les modules du SEM à partir de celles-ci.

Ces consoles permettent également aux instructeurs et aux ingénieurs d'accéder à des outils de contrôle et à un système expert. Les outils de visualisation de données permettent, par exemple, de visualiser graphiquement les oscillations de l'organe terminal selon les 6 axes (position et orientation). Comme indiqué précédemment, les oscillations doivent être évitées pour ne pas endommager les modules du SEM.

1.3.1 Architecture logicielle

MOTS est un système multi-processus communiquant entre eux à l'aide de la CDB (*Common Data Base*), une mémoire partagée centralisée. Cette mémoire contient l'information nécessaire pour le contrôle et la commande du RWS, la modélisation géométrique de l'environnement de la SSI et du SEM, l'information sur la modélisation physique et dynamique du système et l'information utilisée par les modules du simulateur. La Figure 1-10 présente les différents modules qui interviennent dans le simulateur MOTS [CAE Electronics inc, 1996].

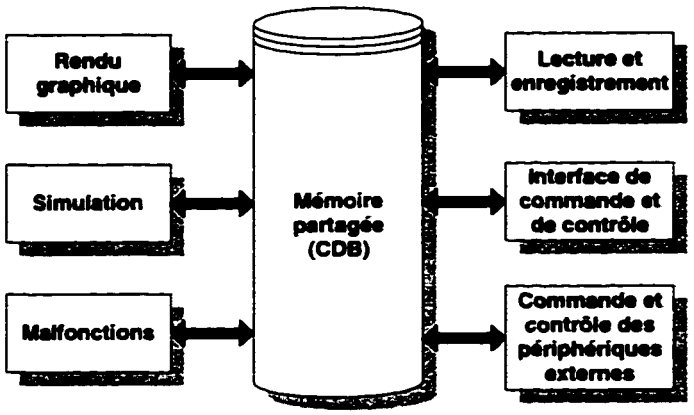

Figure 1-10 : Architecture logicielle du simulateur MOTS

Le module simulation permet de modéliser le comportement dynamique des composantes du SEM. À partir des commandes de l'opérateur, ce module actualise l'état des composantes du SEM. Le module de rendu graphique permet de visualiser les points de vue des caméras sélectionnées et les points de vue arbitraires pour les consoles instructeur et opérateur. Le module de lecture et de sauvegarde sert à l'enregistrement et à l'exécution de sessions de simulation. L'interface de contrôle et l'interface aux périphériques externes servent à la communication entre les composantes du RWS et le simulateur. Finalement, le module de malfonctions permet à l'instructeur de générer des

malfonctions lors d'une session d'entraînement. Par exemple, l'instructeur peut enclencher virtuellement le bris d'un actuateur d'une articulation particulière localisée sur le SSRMS

1.3.2 Utilisation du simulateur pour l'entraînement

Depuis avril 1998, des astronautes affectés à des missions pour l'assemblage de la SSI sont entraînés à l'ASC. Cet entraînement basé sur la performance des étudiants débute avec un cours multimédia dont l'objectif est la compréhension des concepts robotiques de base et une introduction aux différents aspects reliés aux composantes du SEM [Agence spatiale canadienne, 1998].

Par la suite, chacune des notions, allant des modes d'opération du SSRMS aux malfonctions, est approfondie dans un cours théorique enseigné par des instructeurs de l'ASC. Afin de mettre en pratique les notions vues dans ces cours, des scénarios d'entraînement doivent être exécutés sur le simulateur MOTS. Des scénarios contrôlés par l'instructeur permettent aux étudiants d'obtenir des conseils de la part de l'instructeur concernant les opérations à effectuer. Généralement, il s'agit d'introductions à de nouvelles fonctionnalités. Dans les scénarios non contrôlés, l'étudiant est seul et doit résoudre les problèmes qui surviennent en cours de simulation. Dans ce cas, il s'agit d'une vérification de la bonne compréhension des fonctionnalités apprises et de la réaction de l'astronaute aux situations. Dans les deux cas, l'instructeur peut enregistrer une session et discuter par la suite avec l'astronaute des étapes de l'opération qu'il a réalisée.

Pour le moment, l'entraînement MRO (*MSS (SEM) Robotics Operator*) consiste à introduire l'astronaute aux concepts de base pour la manipulation du SSRMS. Voici les notions présentées au cours de cette introduction :

- référentiels de commande et d'affichage utilisés avec le SEM et la SSI ;
- contrôle des caméras ;
- modes d'opération du SSRMS ;
- opération du SSRMS en absence de charge ;
- procédure de capture d'un point d'attache.

CHAPITRE 2 – DESCRIPTION DU SYSTÈME VOTE

Ce second chapitre présente le système de réalité virtuelle VOTE. Tout d'abord, il présente les objectifs et les buts de ce système. Ensuite, il décrit chacun des modules qui interviennent dans le système. Enfin, il présente les outils virtuels développés pour augmenter l'immersion, l'interactivité et l'imagination de l'usager dans le système de réalité virtuelle.

2.1 Objectifs du système VOTE

Comme mentionné dans le chapitre précédent, MOTS offre la possibilité de se familiariser avec les composantes du SEM. L'usager peut visualiser le comportement de ces composantes et les commander comme dans la réalité. La difficulté d'utilisation du SEM est l'absence de vues arbitraires. En effet, le SEM ne fournit pas de caméra localisée dans le vide offrant une vue arbitraire. Le téléopérateur est donc restreint à 3 vues 2D non orthogonales. Le téléopérateur peut avoir une vue restreinte en raison de la manipulation d'une charge qui obstrue la vue ou même des conditions d'éclairage si mauvaises qu'il lui est impossible de distinguer clairement les structures à éviter.

Pour éviter les collisions du SSRMS avec les structures de la SSI ou même de la charge manipulée avec tout autre module, le téléopérateur doit posséder un bon modèle mental 3D de la posture actuelle des composantes du SEM dans l'environnement de la SSI. À partir des données fournies sur les écrans de contrôle et les interfaces graphiques, le téléopérateur doit être capable de prévoir tout risque de danger. Le comportement pro-actif demande une capacité de modélisation très grande de la part de ces individus.

VOTE est un système de réalité virtuelle qui a comme objectif d'aider les astronautes à développer cet environnement 3D. En effet, ce système permet l'immersion d'un individu dans l'environnement de la SSI et du SEM. VOTE permet à un utilisateur de naviguer autour de la SSI et ainsi de changer de point de vue comme s'il y était réellement. La présence d'outils virtuels offre des renseignements supplémentaires et permet d'assimiler certains aspects de cet environnement [Cannon, 1997]. Une connexion en temps réel avec le simulateur MOTS permet à l'usager de visualiser une simulation MOTS à l'intérieur même de l'environnement virtuel de VOTE. Pour permettre plus d'interaction, VOTE supporte plus d'un usager simultanément.

Ce système de réalité virtuelle est d'abord un outil d'entraînement pour les astronautes affectés aux missions de la construction de la station spatiale [Miner, 1995]. Il sert également d'outil pour la validation et le développement de procédures pour le département des opérations.

2.2 Description du système VOTE

VOTE est un système logiciel et matériel contenant plusieurs modules ayant chacun un rôle spécifique. La Figure 2-1 montre l'interaction entre les différents modules qui interviennent dans VOTE.

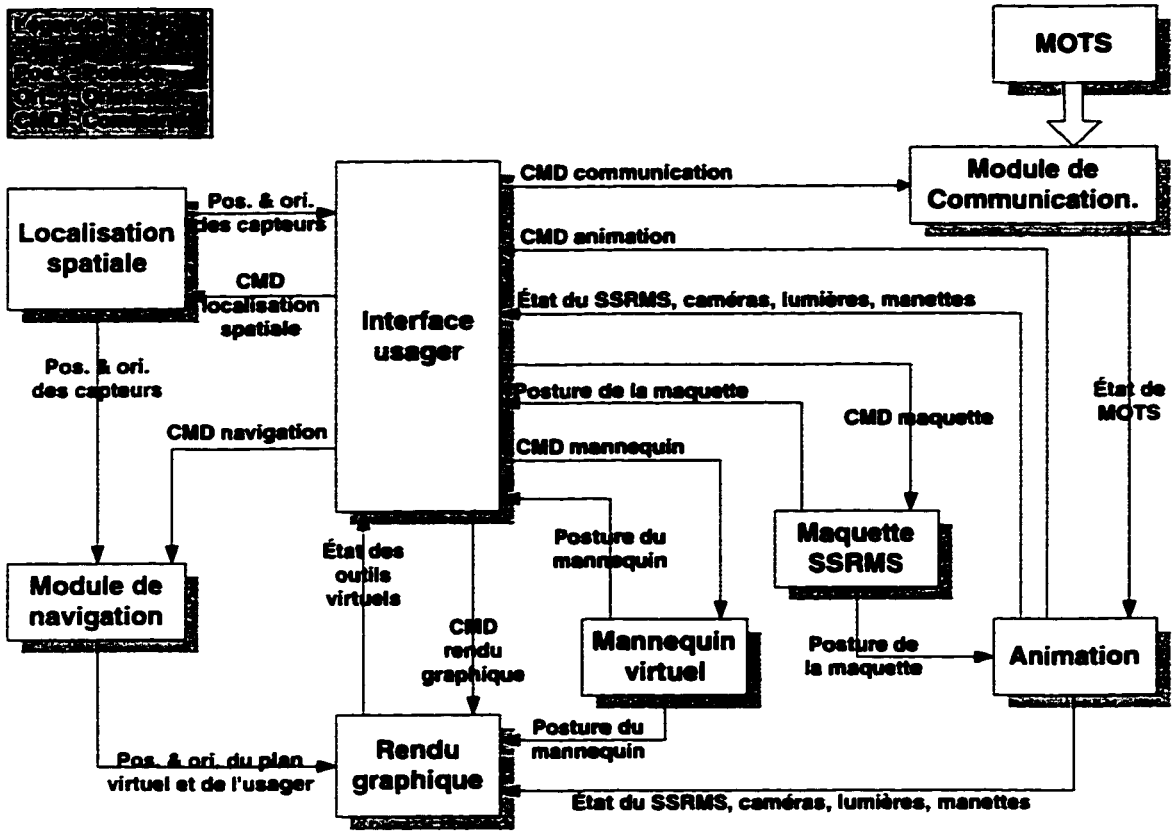

Figure 2-1 : Modules du système VOTE

2.2.1 Interface usager

L'interface usager est un module logiciel qui permet de contrôler une session VOTE. Elle permet de commander les autres modules, les périphériques et les outils virtuels. L'interface usager illustre aussi l'état du système VOTE en temps réel.

2.2.2 Localisation spatiale

Ce module permet de déterminer la position et l'orientation des usagers dans le monde réel. Des capteurs localisés à des positions stratégiques permettent au système de

déterminer la posture de l'usager. Ces données sont nécessaires pour générer la vue correspondante selon la position et l'orientation du point de vue de l'usager.

2.2.3 Rendu graphique

Ce module génère le rendu visuel. VOTE utilise des casques de réalité virtuelle composés de 2 écrans CRT (*Cathode Ray Tube*). Ces 2 écrans permettent de projeter deux images, correspondantes aux champs de vision de chacun des yeux, simultanément. Ceci permet l'obtention d'un effet stéréoscopique et augmente la perception 3D de la scène observée par l'usager. Le rendu graphique permet également la génération des outils virtuels.

2.2.4 Animation

Ce module s'occupe de l'animation des composantes du SEM dans le monde virtuel. Il permet d'actualiser en temps réel l'état de chacun des liens du SSRMS, les coordonnées des référentiels de commande et d'affichage, l'état des caméras actives et inactives et l'état des manettes de commande. VOTE permet de réaliser des animations en ligne et hors ligne. Les animations en ligne permettent un lien en temps réel avec le simulateur MOTS. À mesure que le téléopérateur réalise des manœuvres, l'usager visualise le comportement des composantes du SEM. Ce module permet aussi l'exécution d'une animation préalablement enregistrée. Dans le mode hors ligne, VOTE est indépendant de MOTS et le libère ainsi pour d'autres activités. Le module d'animation ne modélise pas la dynamique. L'objectif de VOTE n'était pas de dupliquer le travail déjà réalisé par MOTS, mais plutôt de lui être complémentaire.

2.2.5 Communication

Le module de communication permet la communication de VOTE avec une session MOTS. Ce module permet d'obtenir l'état du simulateur et rend possible une animation en ligne. De plus, ce module permet de contrôler l'état des manettes de commande qui peuvent servir de périphériques de navigation lors d'une session VOTE.

2.2.6 Navigation

VOTE offre à l'usager 3 modes de navigation. D'abord, l'usager peut se déplacer sur un plan 2D. Dans ce cas, il peut modifier sa position dans le monde virtuel et peut changer la direction de son champ de vision en changeant l'orientation de sa tête. Il existe 2 problèmes avec ce mode : la limitation de variation de l'altitude (hauteur) et l'impossibilité de modifier l'orientation du plan 2D.

Pour résoudre ces problèmes, l'usager a la possibilité d'utiliser les manettes de commande comme mode de navigation. La manette translationnelle lui permet de modifier la position tandis que la manette rotationnelle lui permet de modifier l'orientation du plan 2D. Ce mode permet à l'usager d'inverser son référentiel haut-bas et de tirer profit de l'environnement 3D. Le module de navigation offre la possibilité d'utiliser les 2 modes simultanément.

Finalement, l'interface usager de VOTE offre la possibilité de localiser un individu à une position et une orientation dans l'environnement virtuel selon le référentiel absolu de la SSI. Ce moyen de localisation est utile lorsqu'un entraînement doit se réaliser à un endroit spécifique autour de la SSI.

2.2.7 Mannequin virtuel

Ce module permet à VOTE d'offrir une représentation graphique de l'usager dans le monde virtuel. D'après les valeurs des capteurs localisés sur l'usager, ce module calcule et génère la posture d'un astronaute dans le monde virtuel. Il est alors possible à l'usager de visualiser son propre corps. Cette information lui permettra de juger les distances entre les objets en utilisant son corps comme étalon. Dans le cas où plusieurs usagers utiliseraient VOTE simultanément, un usager pourrait visualiser la position et l'orientation des autres usagers. Ce module est présentement en développement.

2.2.8 Maquette du SSRMS

La maquette du SSRMS est une sonde articulée qui permet à l'usager de manipuler réellement une maquette du bras robotique et de visualiser sa posture dans le monde virtuel VOTE. Ce module est présentement en développement.

2.3 Outils virtuels

Afin d'augmenter le degré d'imagination de ses usagers, VOTE incorpore des outils virtuels qui permettent l'ajout d'information pertinente. Ces outils aident les usagers à mieux percevoir certains détails et facilitent la construction d'un modèle mental 3D de l'environnement du SEM et de la SSI. Chacun de ces outils possède des objectifs spécifiques d'apprentissage.

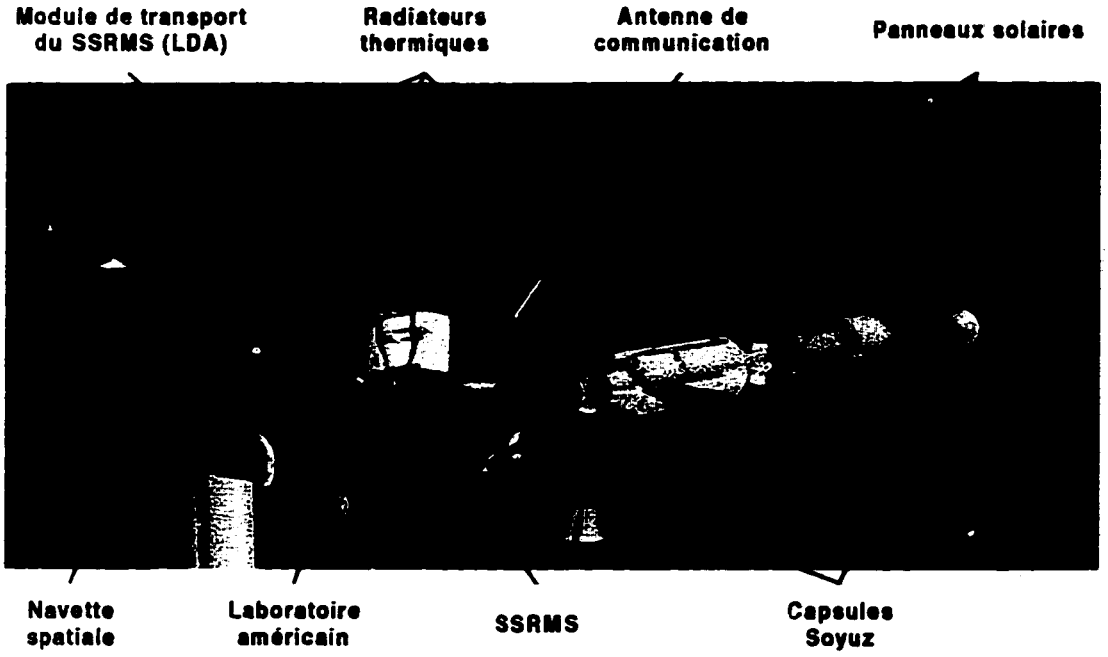

Figure 2-2 : Modélisation de la SSI et des composantes du SEM dans VOTE

2.3.1 SSRMS

Une représentation 3D de la SSI et du SSRMS permet à l'usager de visualiser les structures avec lesquelles il doit se familiariser (Figure 2-2). Cet outil lui permet en particulier d'observer l'architecture et les dimensions du bras robotique, la position des articulations, la position des caméras et l'apparence des organes terminaux.

2.3.2 Mannequin

Le mannequin virtuel est une représentation graphique 3D d'un usager dans le monde virtuel. Le mannequin offre un rendu graphique aux autres usagers du système.

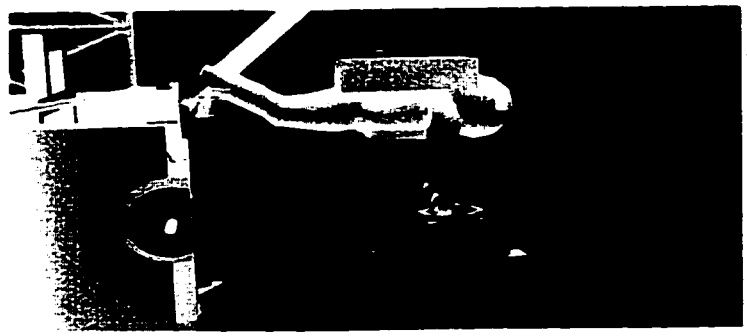

Figure 2-3 : Mannequin virtuel

La Figure 2-3 présente un astronaute situé près de la structure du LDA (*Launch Deployment Assembly*). Cette structure servira au transport et au déploiement du SSRMS sur la SSL

2.3.3 Plancher

Le module de navigation permet de marcher sur un plan 2D. Afin de visualiser ce plan, VOTE offre un plancher virtuel semi-transparent quadrillé.

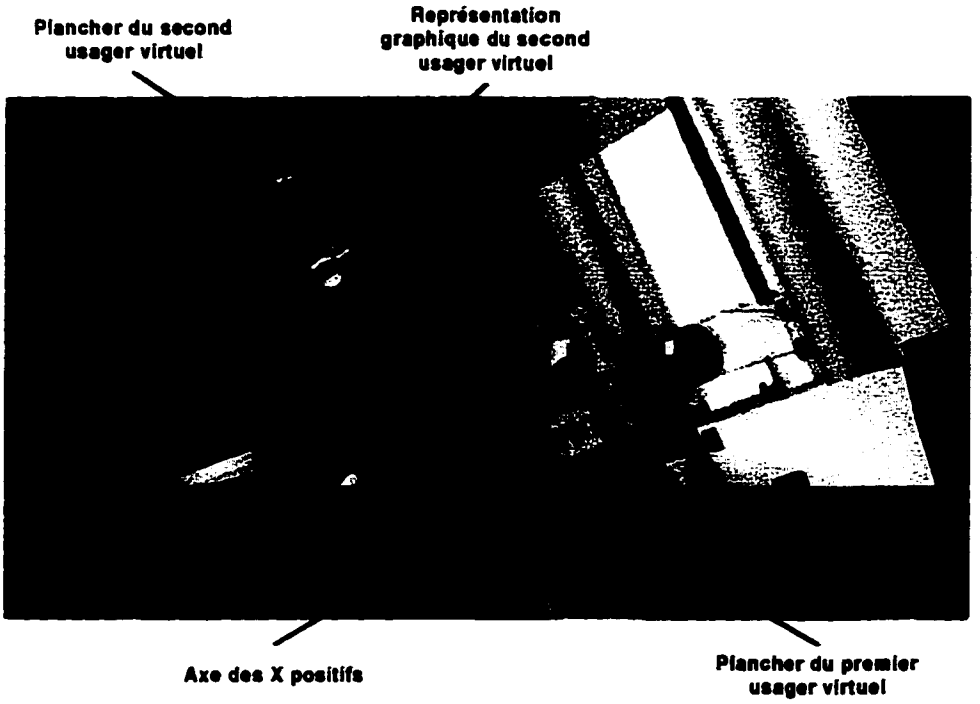

Figure 2-4 : Plancher virtuel

La dimension des carreaux (1m x 1m) fournit un repère pour l'évaluation des distances lors des déplacements des usagers. Le mode de navigation avec les manettes permet de modifier la position et l'orientation de ce plancher. De plus, chacun des usagers possède son propre plancher virtuel. Il est donc possible de visualiser le plancher virtuel des autres usagers en se déplaçant. La Figure 2-4 illustre 2 planchers virtuels et la représentation graphique du second usager. Les flèches servent de repères lors des déplacements.

2.3.4 Référentiel

Le référentiel fournit une représentation 3D des référentiels de commande et d'affichage utilisés sur la SSI. Ce référentiel peut être raccordé à des points d'attache ou à l'organe

terminal. La Figure 2-5 montre un référentiel interne (orthogonal à l'organe terminal) et un référentiel externe. Pour visualiser les 3 axes, VOTE utilise le code de couleur RVB (X=Rouge, Y=Vert, Z=Bleu).

Référentiel interne **Référentiel externe**

Figure 2-5 : Référentiel virtuel

2.3.5 Trajectoire linéaire

Cet outil offre une représentation 3D d'une trajectoire parcourue par PDR de l'organe terminal libre. Elle permet à l'usager de visualiser la linéarité et la précision de ses manœuvres. À l'aide d'une manœuvre en mode OCPM et de l'activation de cet outil virtuel, l'usager peut tenter d'exécuter à nouveau la manœuvre, mais cette fois-ci, en mode manuel. La Figure 2-6 présente la trajectoire linéaire utilisée afin de se déplacer du USLAB-FRGF (gauche) au RIGHT-AFT-TRUNION (droite).

Figure 2-6 : Trajectoire linéaire et de référentiels

2.3.6 Trajectoire de référentiels

Afin de compléter la trajectoire linéaire, cet outil indique l'orientation de l'ADR de l'organe terminal à intervalle régulier le long d'une trajectoire (Figure 2-6). L'usager peut utiliser cet outil comme repère lors des manœuvres qui nécessitent un changement simultané de position et d'orientation.

2.3.7 Tunnel

Pour certaines manipulations, le PDR (***Point de résolution***) de l'organe terminal libre doit se situer à l'intérieur d'une enveloppe d'opération. Le tunnel virtuel est une représentation graphique 3D de cette enveloppe. La Figure 2-7 représente une manipulation exécutée par l'astronaute Daniel Bursh en mode SJRM. L'astronaute devait conserver le PDR de l'organe terminal libre dans une enveloppe de 0.5 m de rayon.

Figure 2-7 : Tunnel virtuel

2.3.8 Caméra

Le principal objectif de VOTE est de permettre au téléopérateur de se fabriquer un modèle mental 3D, à partir d'un environnement d'immersion, afin qu'il soit apte à décoder les vues des caméras obtenues sur les écrans de contrôle. Ces vues correspondent aux caméras de la SSI, du SEM et de la navette spatiale. Pour cette raison, VOTE fournit un modèle graphique de chacune de ces caméras. L'usager peut ainsi avoir une vision extérieure des caméras et prévoir la vue qu'elles sont susceptibles de fournir. Pour l'aider à développer un modèle précis, VOTE fournit le cône de vision basé sur des notions d'optiques, des caractéristiques et des attributs de la caméra. Lors de changement d'orientation d'une caméra, l'usager peut visualiser le comportement de celle-ci dans le monde virtuel et voir le déplacement du cône de vision.

Pour éviter à l'usager d'enlever son casque pour ainsi visualiser la vue d'une caméra sur l'écran de contrôle, VOTE permet également l'affichage de cette même vue dans le casque. La Figure 2-8 présente la caméra 24 du SSRMS avec son cône de vision et sa vue associée.

Figure 2-8 : Modèle graphique, cône de vision et vue 2D d'une caméra

2.3.9 Cône de lumière

Lorsqu'il y a une ligne directe entre une caméra et une source de lumière, il y un phénomène d'éblouissement. Le téléopérateur doit être apte à prévoir ces situations en tenant compte de la ligne directe des sources de lumière actives. VOTE fournit le cône de lumière pour indiquer l'orientation d'une source de lumière. Avec cet outil, l'usager peut localiser la position, l'orientation et le déplacement du cône source pour ainsi éviter la ligne directe entre la source de lumière et la caméra.

Figure 2-9 : Cône de lumière

2.3.10 Règle

Afin de posséder un bon modèle mental 3D, le téléopérateur doit maîtriser la notion de distance. Dans un système sans mesure étalon, l'évaluation de la distance entre deux objets est très difficile. Pour faciliter cette tâche, VOTE offre la règle virtuelle. Cet outil est en fait une représentation 3D d'une règle composée de traits étalons à intervalle de 50 cm. VOTE permet aussi d'afficher la mesure précise de la distance mesurée. Pour l'instant, la sélection des points d'attache de la règle est réalisée à l'aide de l'interface usager. Ces points peuvent être mobiles ou fixes. La Figure 2-10 présente la règle virtuelle attachée entre le LDA-PDGF (fixe) et l'organe terminal (mobile).

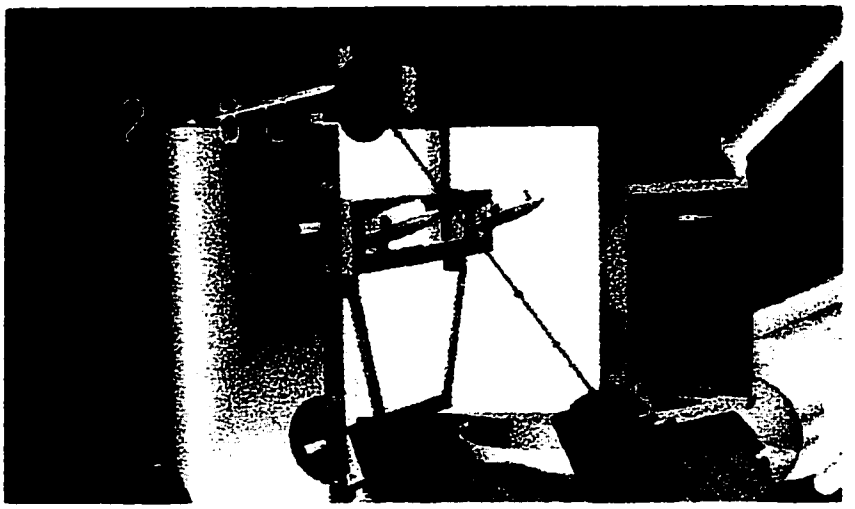

Figure 2-10 : Règle virtuelle

En plus de servir d'outil pour la mesure des distances, la règle virtuelle permet de visualiser l'alignement. En effet, lors des procédures d'approche d'un point d'attache, l'organe terminal doit être aligné avec ce dernier.

2.4 Entraînement avec VOTE

Durant les exercices pratiques, VOTE est utilisé pour aider les astronautes à assimiler la matière vue durant les leçons théoriques [Agence Spatiale Canadienne, 1998]. Par exemple, le référentiel leur permet de visualiser la correspondance entre le référentiel de commande et l'organe terminal. La règle virtuelle permet de déterminer l'alignement avec les points d'attache lors des procédures de capture. Les caméras et leurs vues correspondantes permettent aux astronautes d'effectuer la correspondance entre les vues non orthogonales et la vue arbitraire.

VOTE est également utilisé pour l'évaluation de la performance des astronautes. La trajectoire linéaire et de référentiels permet aux instructeurs de constater si l'astronaute suit adéquatement une trajectoire (position et orientation) imposée. Le tunnel virtuel permet de vérifier si une manœuvre sort de l'enveloppe d'opération disponible.

CHAPITRE 3 – IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME VOTE

Ce chapitre présente l'architecture matérielle, l'architecture logicielle et la conception du système VOTE. Il traite de l'implémentation des modules, des outils virtuels et de la description technique des périphériques utilisés.

3.1 Configuration matérielle

Afin de réaliser l'ensemble des fonctionnalités décrites dans le chapitre précédent, VOTE nécessite plusieurs périphériques. La Figure 3-1 présente les périphériques utilisés dans le système [Allard, 1997].

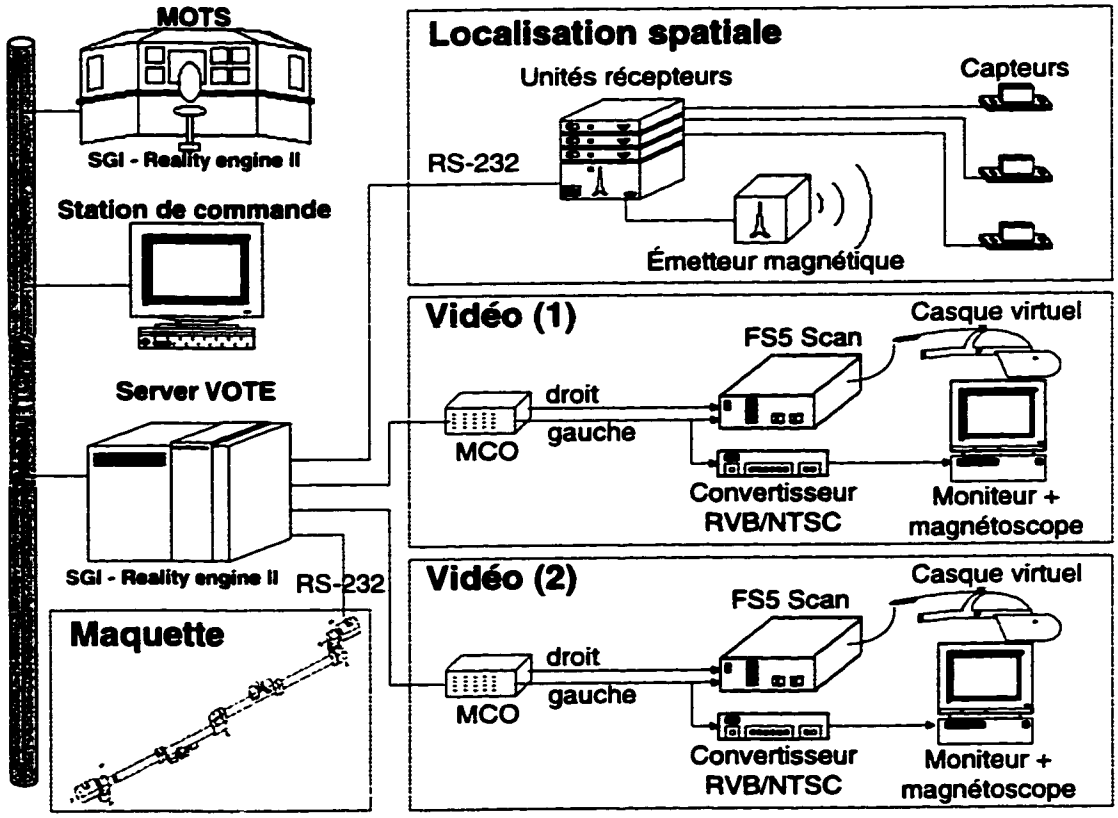

Figure 3-1 : Architecture matérielle de VOTE

3.1.1 Serveur VOTE

Cet ordinateur constitue le moteur du système. Il gère les périphériques, réalise les transformations graphiques, génère le rendu graphique, exécute l'interface graphique et s'occupe de la communication avec le simulateur MOTS. Il s'agit d'un système SGI Reality Engine composé de 8 processeurs R4400 (4-250 MHz, 4-200 MHz), 2 pipelines graphiques reality engine II, 2 démultiplexeurs vidéo (MCO) et de plusieurs sorties RS-232.

L'architecture SGI, optimisée pour la synthèse d'image en temps réel, profite de l'effet de parallélisme des pipelines graphiques pour accélérer l'exécution d'une session impliquant un fort taux d'appels systèmes graphiques 3D. Ces pipelines sont divisés en 3 étapes : application, élimination des parties cachées et rendu. La section 3.2.3 montre comment une simulation tire profit de ces pipelines.

L'architecture de cet ordinateur permet la division de la mémoire d'écran en sous-sections. Il est possible de générer plusieurs scènes ayant chacune une sous-section associée. Cette fonctionnalité permet de générer les 2 images nécessaires pour réaliser l'effet stéréoscopique. Dans le cas où il devrait y avoir plusieurs usagers simultanément, il serait possible de diviser l'écran en 4 sous-sections (2 pour chaque usager). Des connecteurs RVB permettent la propagation des signaux vidéos aux casques virtuels et aux moniteurs. Le démultiplexeur permet d'associer à chacune de ces sorties une portion d'écran et de configurer la résolution même de cette portion. Chaque pipeline est associé à un démultiplexeur.

Les sorties RS-232 permettent la communication avec le système de localisation spatiale et serviront de moyen de communication pour les périphériques qui seront implantés dans le futur.

3.1.2 Station de commande VOTE

Lors d'une session de réalité virtuelle, il n'est pas possible d'utiliser le terminal du serveur VOTE comme console étant donné la configuration particulière des démultiplexeurs vidéos. Il est nécessaire d'utiliser un autre terminal. La station de commande VOTE permet aux instructeurs de contrôler une session VOTE. Le serveur VOTE exécute l'interface graphique mais la redirige vers cette station de commande.

3.1.3 Système de localisation spatiale

VOTE utilise le système FOB (***Flock of Bird***) développé par Ascension comme système de localisation spatiale [Ascension technology corporation, 1996]. Ce système est composé d'un émetteur magnétique, d'une unité de contrôle maître, d'unités de contrôle esclaves et de capteurs.

L'émetteur transmet des signaux magnétiques pour déterminer la position et l'orientation des capteurs. Les unités de contrôle esclaves permettent la lecture des valeurs retournées par ces capteurs. Un lien de communication FBB (***Fast Bird Bus***), développé par Ascension, permet la communication entre les unités de contrôle esclaves et l'unité de contrôle maître. L'unité maître comprend un nombre de commandes qui permettent de contrôler l'ensemble du système. Ces commandes permettent l'activation

de l'émetteur, la spécification du format des valeurs des capteurs (position-orientation, matrice homogène, quaternion) et la configuration des communications avec les systèmes extérieurs.

Pour la communication externe, les unités de contrôle sont chacune munies de sortie RS-232. Il est possible d'utiliser l'ensemble de ces sorties pour communiquer avec le serveur VOTE. Pour l'instant VOTE n'utilise qu'un seul lien avec l'unité de contrôle maître pour réaliser la lecture des capteurs.

3.1.4 Périphériques vidéos

VOTE comprend 2 casques virtuels FS5, développés par Virtual Research inc [Virtual Research inc, 1995]. Chacun de ces casques est connecté à un module de traitement de signal FScan 5i. Ce module permet d'ajuster le gain et l'intensité des signaux vidéos liés à chacune des 2 écrans CRT.

Pour permettre aux instructeurs de visualiser le champ de vision des usagers, VOTE utilise 2 moniteurs SONY. Chacun de ces moniteurs reçoit un signal NTSC [*National Television System Committee*] correspondant à l'œil gauche de l'usager. Pour réaliser la conversion des signaux, VOTE utilise 2 convertisseurs analogiques RVB/NTSC. Des magnétoscopes permettent aussi d'enregistrer des séances de réalité virtuelle sur bande vidéo.

3.1.5 Serveur MOTS

MOTS est un système SGI Reality Engine composé de 12 processeurs R4400 200Mhz, 2 pipelines graphiques reality engine II, 2 démultiplexeurs vidéos et de 14 ports séries RS-232. Le serveur VOTE communique avec le serveur MOTS à l'aide d'un lien ethernet. Ce lien permet à un usager de visualiser une session en temps réel réalisée sur le simulateur.

3.2 Architecture logicielle

VOTE est entièrement écrit dans le langage C suivant la norme ANSI-C (*American National Standards Institute*). Le serveur VOTE utilise comme système d'exploitation IRIX 6.5 [Silicon Graphics inc, 1994b]. Pour profiter du nombre de processeurs, chacun des modules de VOTE a été développé indépendamment sous forme de processus autonome. Pour la communication entre les processus, VOTE utilise une mémoire partagée [Galvin, 1994]. Ce moyen de communication est la méthode suggérée pour les applications en temps réel [Burns, 1997]. La Figure 3-2 présente la communication entre les différents modules de VOTE. Certains modules possèdent un accès en lecture seulement et d'autres ont à la fois un accès en lecture et en écriture. Lors de l'initialisation du système, VOTE alloue statiquement un processeur pour chacun des processus.

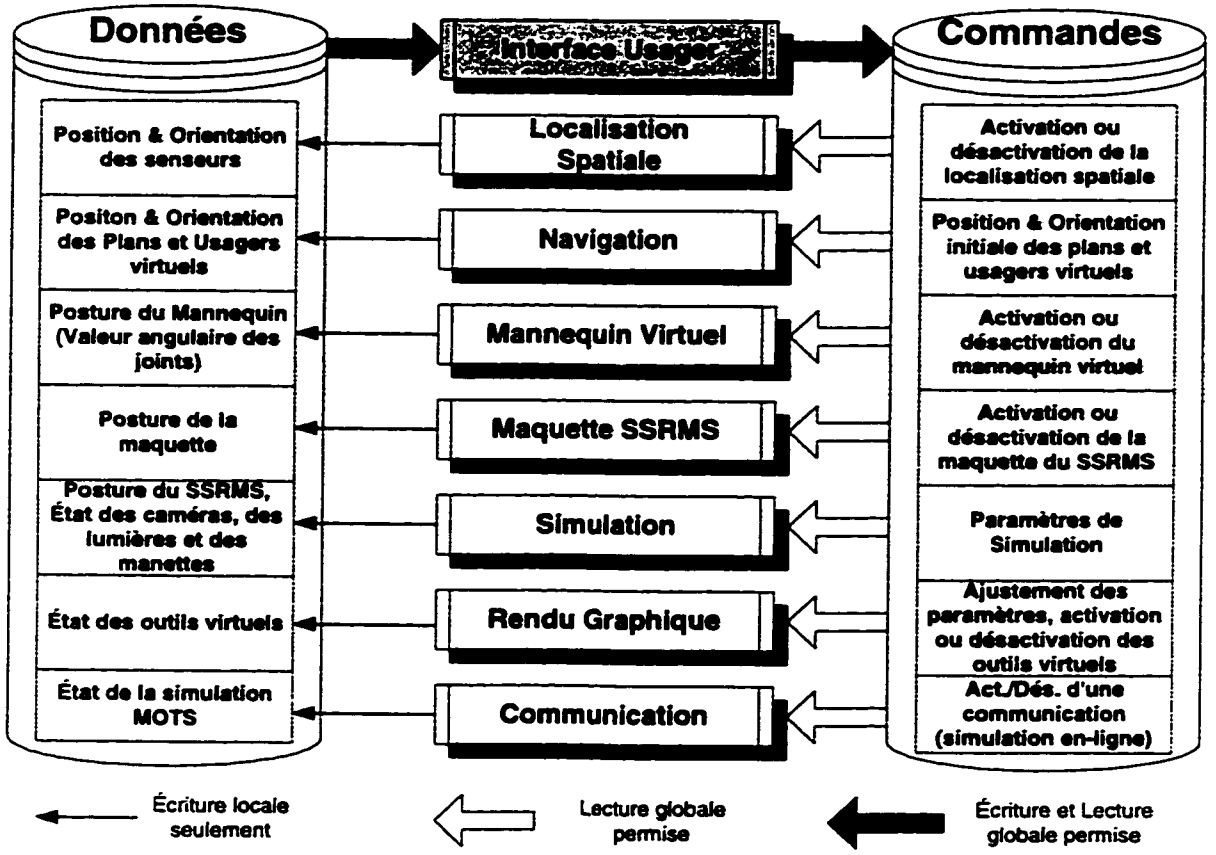

Figure 3-2 : Architecture inter-processus de VOTE

3.2.1 Description des mémoires partagées

L'information qui est communiquée entre plus d'un processus est sauvegardée dans la mémoire partagée de VOTE. Tel que montré dans la Figure 3-2, cette mémoire se divise en 2 parties : la mémoire de commandes et la mémoire de données.

Mémoire de commandes

L'interface usager est le seul processus ayant un accès en écriture à cette section de la mémoire. Cette section sert à commander les autres processus et à ajuster leurs paramètres. Chacun des processus possède une sous-section de la mémoire de commandes qui lui est propre. Ces sous-sections sont accédées par le processus propriétaire et l'interface usager.

Mémoire de données

En plus d'être associé à une section de la mémoire de commandes, chacun des processus possède une section de données. Cette section de mémoire permet la sauvegarde des résultats calculés par les différents processus. Par exemple, la longueur de la règle virtuelle calculée à partir de ses extrémités. Cette mémoire permet également de sauvegarder l'état des processus. Si l'état du processus est différent de celui désiré, c.-à-d. l'état sauvegardé dans la mémoire de commandes, alors des drapeaux de commande indique au processus qu'il doit exécuter une partie de son code. Ainsi, VOTE évite d'exécuter inutilement du code et allège le système.

Pour permettre à un processus d'accéder à la mémoire de données d'un autre processus, VOTE utilise la notion de pointeur. La Figure 3-3 présente la configuration de la mémoire de commandes pour fixer la règle virtuelle entre l'organe terminal et un point fixe. À chacune des extrémités, un pointeur est utilisé pour référencer la zone mémoire contenant cette information.

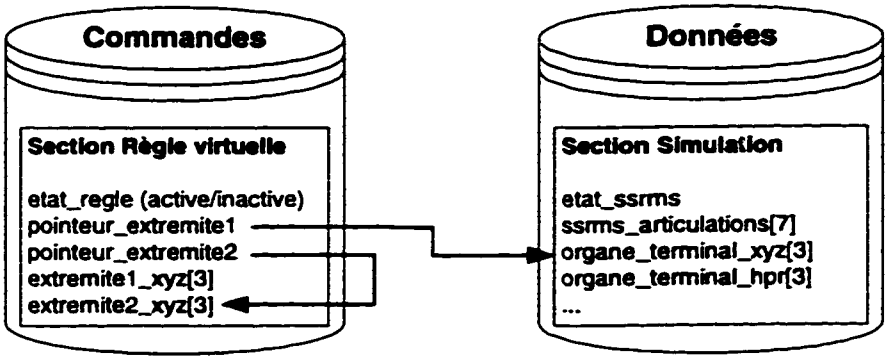

Figure 3-3 : Utilisation des pointeurs dans VOTE

L'approche généraliste utilisée avec la notion de pointeur simplifie les algorithmes de chacun des modules. Le souci n'est pas de savoir comment l'information a été obtenue mais plutôt où elle est située.

3.2.2 Interface usager

L'interface usager permet de configurer les paramètres des processus et des outils virtuels. Il est seul ayant un accès en écriture dans la mémoire de commandes.

L'interface usager a été développée à l'aide de XMotif 2.0. Il s'agit d'une librairie standard écrite en C permettant la création de fenêtres, de boutons, de boîte d'édition de texte etc. Cette librairie utilise l'approche événementielle. Lorsqu'une action est exécutée dans l'interface graphique, une fonction est appelée.

3.2.3 Module de rendu graphique

Librairies graphiques

Pour le rendu graphique, VOTE utilise la librairie Easyscene [Coryphaeus Software inc, 1996a]. Cette librairie permet la création d'applications graphiques 3D temps réel et fonctionne à partir d'une base de données graphique. Une série de fonctions C permet de modifier le contenu de cette base de données et permet ainsi de commander la dynamique de l'application graphique.

Easyscene possède également un interpréteur de script qui permet d'initialiser une scène graphique à partir d'un fichier de format Easyscene (*.set). Une fois chargée, il est possible de modifier la scène en appelant les fonctions C de l'API (*Application Programming Interface*) Easyscene.

Architecture temps réel

La librairie Easyscene tire profit du pipeline graphique en divisant la charge en 3 principales étapes.

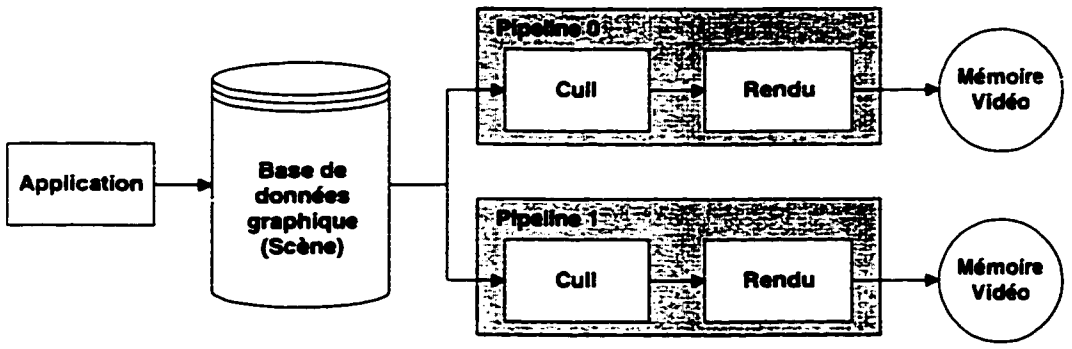

Figure 3-4 : Cycle de rendu graphique à 2 pipelines

- Application : Cette étape comprend la modélisation dynamique des objets, la lecture des périphériques, la mise à jour de la base de données graphique et la communication avec les périphériques et les serveurs externes.
- Élimination des parties cachées : Cette étape effectue un tri des objets de la base de données graphique en conservant sélectionnant ceux qui sont susceptibles d'être visible. L'élimination des parties cachée détermine également le niveau de détail à utiliser et génère une liste d'affichage pour l'étape du rendu.
- Rendu :Cette étape consiste à traverser la liste d'affichage créée dans l'étape d'élimination des parties cachée et de générer les images désirées.

Une fois divisée, il est possible d'assigner un processeur à chacune de ces étapes. Cette tâche d'assignation est statique et doit être réalisée à l'initialisation même du système. La Figure 3-5 montre comment le pipeline graphique et une architecture à plusieurs processeurs permettent d'améliorer la performance d'une simulation VOTE.

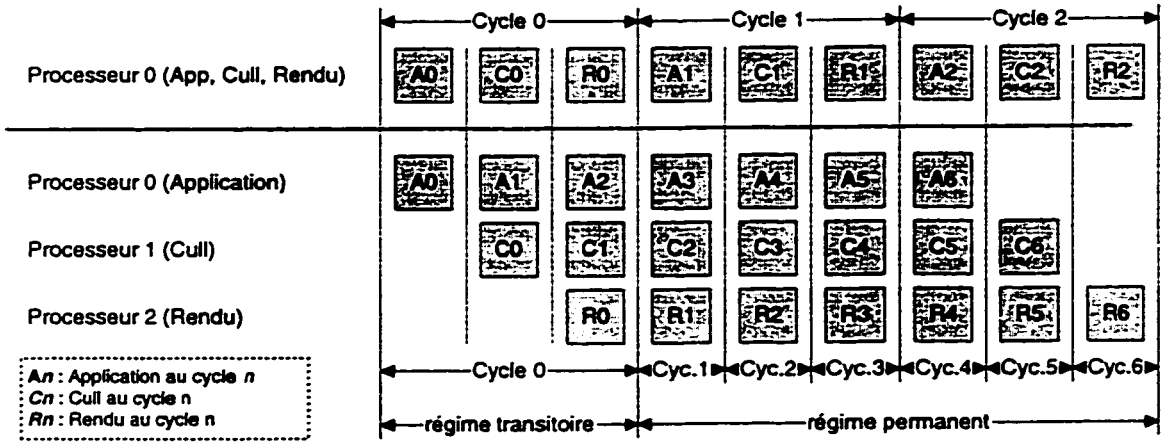

Figure 3-5 : Exécution séquentielle versus exécution en pipeline

Pour créer la géométrie, les niveaux de détail et les modèles d'illumination des objets, VOTE utilise l'éditeur graphique 3D Designer's Workbench [Coryphaeus Software inc, 1996b]. Une fois l'objet créé, Easyscene permet d'accéder et de manipuler cet objet à l'aide de fonctions C ou d'un fichier script Easyscene. Voici la liste des opérations les plus utilisées :

- charger un objet dans la base de données graphique ;
- spécifier la position et l'orientation d'un objet ;
- créer une hiérarchie d'objet avec des liens parent-enfant ;
- rendre visible ou invisible un objet ;
- créer une copie d'un objet existant dans la base de données graphique ;
- enlever un objet de la base de données graphique.

L'ensemble de ces opérations se réalise au cours de l'étape application et permet de modifier l'état de la base de données graphique.

Modèle de vision

Comme le montre la Figure 3-4, il est possible de générer 2 images en parallèle lorsque le système possède 2 pipelines graphiques. Pour VOTE, cette fonctionnalité a une grande importance. En effet, VOTE doit générer 2 images pour chacun des usagers. Pour générer ces vues, Easyscene utilise les canaux visuels. Le canal est basé sur une vision en perspective et possède les attributs suivants :

- pipeline graphique associé ;
- portion utilisée du pipeline pour le canal ;
- attributs du parallélépipède de vision ou FOV (*Field Of View*) (angle vertical, angle horizontal, plan de découpage minimal, plan de découpage maximal) ;
- objet parent auquel la caméra est attachée ;
- position et orientation de la caméra dans le référentiel du parent.

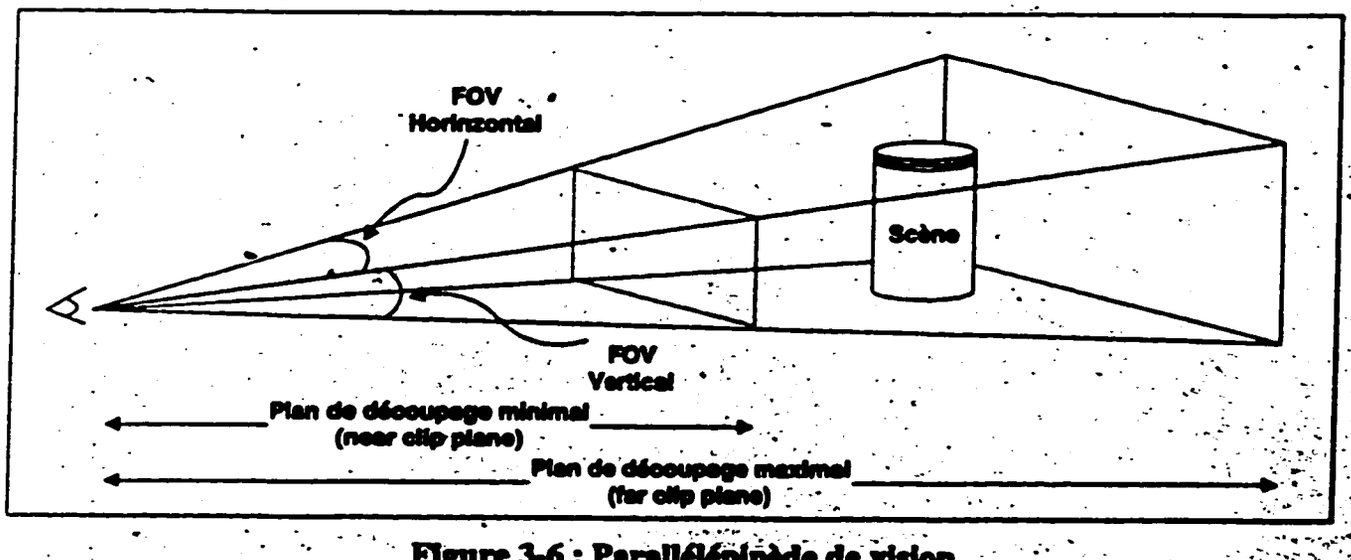

Figure 3-6 : Parallélépipède de vision

3.2.4 Module de localisation spatiale et de navigation

Afin d'actualiser la position et l'orientation des usagers, VOTE nécessite le module de localisation spatiale et de navigation. Comme présenté dans la Figure 3-2, il s'agit de 2 processus indépendants qui communiquent entre eux à l'aide de la mémoire partagée de VOTE.

Le module de localisation retourne la position et l'orientation des capteurs connectés au FOB et sauvegarde ces informations dans la mémoire de données. Un protocole de communication sériel est utilisé pour contrôler le système de localisation spatiale à partir du serveur VOTE. Ces données brutes, provenant des capteurs, sont transformées afin d'obtenir une position et une orientation relative au plan de déplacement.

À l'aide des manettes de commande ou de l'interface usager, VOTE permet de modifier la position et l'orientation du plan virtuel auquel l'usager est attaché. En raison de la hiérarchie entre ces référentiels, la position et l'orientation absolue de l'usager sont modifiées par le déplacement du plan virtuel. La Figure 3-7 et le Tableau 3-1 présente les référentiels utilisés pour la localisation spatiale et la navigation.

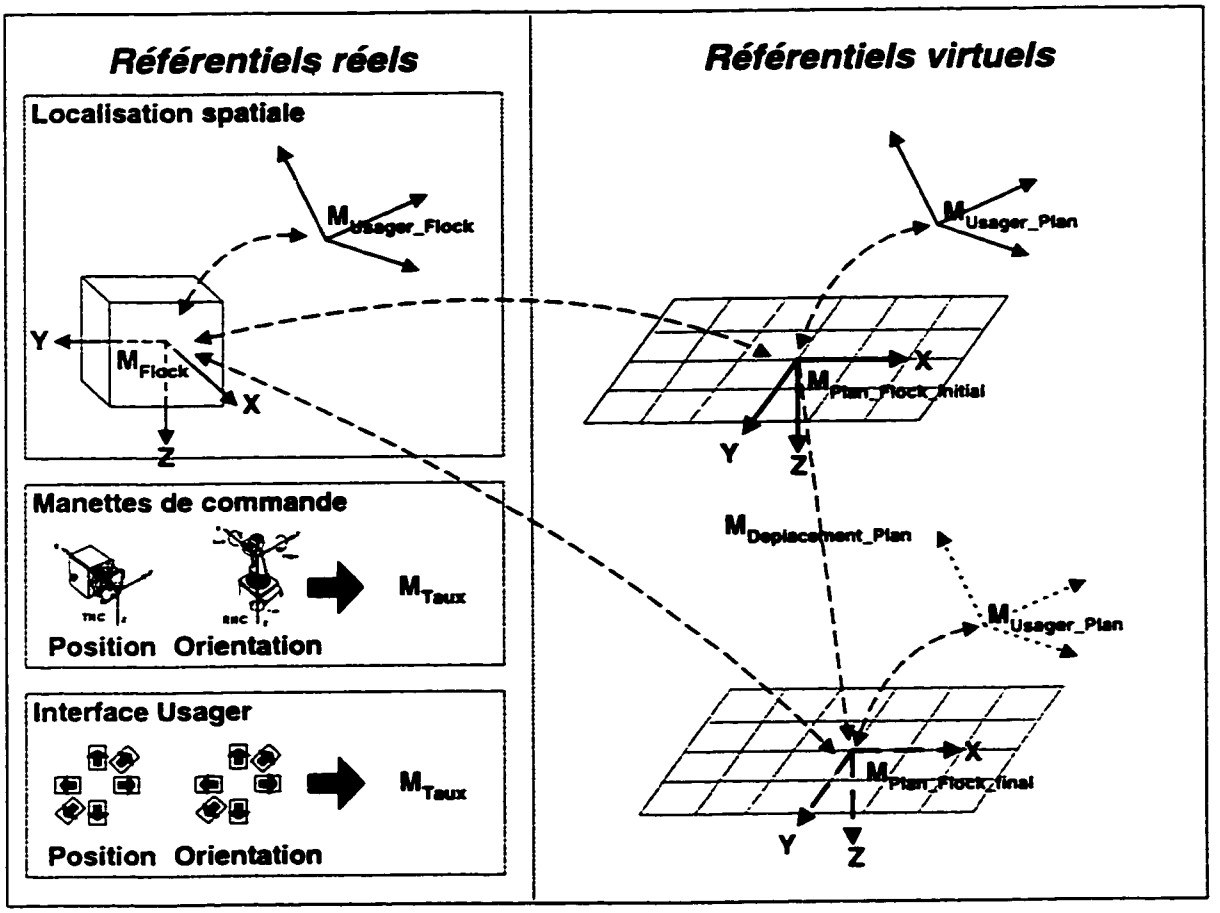

Figure 3-7 : Hiérarchie entre les référentiels de navigation de VOTE

Tableau 3-1 : Référentiels utilisés pour la navigation dans VOTE

Référentiel	Description
M_{Flock}	Référentiel physique du système de localisation spatiale. Les valeurs brutes des capteurs sont retournées selon ce référentiel.
M_{Usager_Flock}	Référentiel du capteur de position et d'orientation d'un usager.
M_{Taux}	Référentiel de la déflexion en position et orientation des manettes de commande ou du système de navigation de l'interface usager.
$M_{Pondération}$	Matrice qui pondère M_{Taux} avec des facteurs de pondération pour la variation de position et d'orientation.
$M_{Plan_Flock_Initial}$	Référentiel représentant le plan virtuel avant déplacement.
$M_{Plan_Flock_Final}$	Référentiel représentant le plan virtuel après déplacement.
$M_{Déplacement_Plan}$	Représente la variation de position et d'orientation du plan virtuel. $M_{Déplacement_Plan} = f(M_{taux}, M_{Pondération})$
M_{Usager_Plan}	Référentiel de l'usager selon son plan virtuel parent.

Attachement du plan de navigation à un point d'attache

Pour permettre plus de flexibilité, le référentiel du plan de navigation peut être associé à un point d'attache. Cette fonctionnalité permet à un usager de se positionner sur la caméra A du SSRMS et de se déplacer dans le même plan que cette caméra. Si le SSRMS effectue une manœuvre, alors l'usager peut observer le déplacement du plan de navigation auquel il est attaché et du même fait, sa position et son orientation absolues.

3.2.5 Module de communication

Étant donné l'existence de plusieurs simulateurs MOTS, VOTE doit pouvoir de se connecter à l'un ou l'autre de ces simulateurs selon la situation. Pour réaliser la communication entre VOTE et MOTS, VOTE utilise les sockets de communication de Unix [Stevens, 1993]. Le processus de communication a pour objectif de lire l'état de certains champs de la CDB de MOTS et de mettre à jour la mémoire partagée de VOTE.

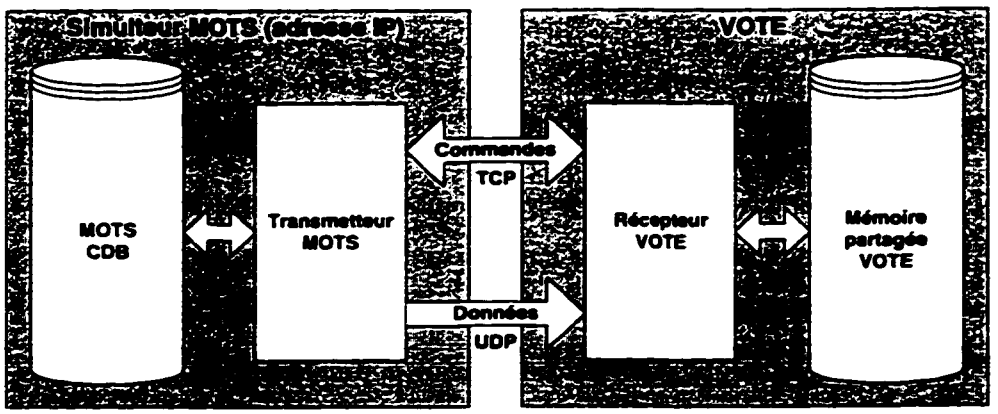

Figure 3-8 : Protocole de communication VOTE-MOTS

Pour le transfert des données, VOTE utilise le protocole UDP (*User Datagram Protocol*). Ce protocole, exempt de contrôle sur la transmission des paquets, permet un transfert rapide des paquets mais n'assure pas qu'ils atteindront leurs destinations.

Pour assurer le transfert des commandes, VOTE utilise le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*). Contrairement au socket de type UDP, ce socket est bidirectionnel. Les commandes transmises permettent de contrôler le transmetteur MOTS et de lui spécifier des paramètres de communication telles que la vitesse de transfert, la version du paquet à transférer et le niveau de vérification en ligne.

CHAPITRE 4 – RÉSULTATS, ANALYSES ET TRAVAUX FUTURS

Lors de l'utilisation de VOTE, des usagers ont noté des sautillements répétitifs, avec le SSRMS, lors d'animation en ligne et hors ligne. En effet, une observation attentive permet de constater un mouvement discontinu lors des déplacements du SSRMS. Pour expliquer ce phénomène, des tests ont été réalisés sur les modules ayant un impact sur l'animation du SSRMS. Les usagers ont également constaté une erreur de l'orientation de leurs champs de vision, dans le monde virtuel, lorsqu'ils se trouvaient éloignés de l'émetteur magnétique. Une analyse des données retournées par les capteurs a été réalisée afin d'expliquer cette erreur d'orientation.

Ce chapitre présente les tests temporels réalisés sur le module d'animation en mode en ligne et hors ligne et sur les modules de communication. Ces tests illustrent les distributions des temps et des périodes d'exécution de chacun de ces modules. Ensuite, le chapitre présente l'analyse de la limitation du système de localisation spatiale. Il enchaîne par des améliorations à apporter au système VOTE afin de rencontrer les requis essentiels et quelques requis fonctionnels. Le chapitre se termine avec les impressions, les suggestions et les commentaires des astronautes donnés durant leurs entraînements.

4.1 Résultats temporels d'une animation

Lors d'animations en ligne et hors ligne, il est possible de constater des discontinuités durant les déplacements du SSRMS. En effet, l'usager peut noter des sautillements

répétitifs du SSRMS lorsque celui-ci se déplace. Pour être en mesure de réduire et même d'éliminer ces discontinuités, des tests temporels ont été réalisés.

4.1.1 Méthodologie de test

Une analyse rapide a permis de déterminer les modules ayant un impact sur les discontinuités. Lors d'animation hors ligne, seul le module d'animation a un effet sur la fluidité des déplacements. Dans le mode en ligne, le module d'animation et les modules de communication, c.-à-d. le transmetteur MOTS et le récepteur VOTE, peuvent avoir un effet sur la performance de l'animation.

Pour obtenir les distributions temporelles, de chacun des modules, des mesures de temps ont été réalisées au début et à la fin de chaque cycle d'exécution des modules. Les données cumulées ont permis de déterminer la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart-type du temps d'exécution et l'écart-type de la période d'exécution. Le temps d'exécution correspond au temps nécessaire pour exécuter un cycle de l'algorithme. La période d'exécution définit à quelle fréquence le module est exécuté.

En raison du comportement préemptif du système d'exploitation pour l'exécution des processus, le temps d'exécution comprend le temps d'exécution efficace et inefficace. Le temps d'exécution efficace correspond au temps minimal pour exécuter un cycle sans préemption. Tandis que le temps d'exécution inefficace correspond au temps pour lequel le processus a été réquisitionné par un autre processus et qu'il doit attendre son affectation à un processeur pour poursuivre son exécution efficace.

4.1.2 Animation hors ligne

Dans ce mode d'animation, le module effectue des accès disques pour lire le fichier d'animation. Durant l'exécution du test, 2826 échantillons ont été pris sur une période de 28,4 s. Les graphes de la Figure 4-1 et le Tableau 4-1, présentent un temps d'exécution moyen de 3,99 ms et un écart-type élevé de 6,03 ms. Cet écart-type a un impact direct sur la stabilité des périodes d'exécution du module. La fréquence d'exécution moyenne est de 99,5 Hz et possède également un écart-type élevé de 7,43 ms.

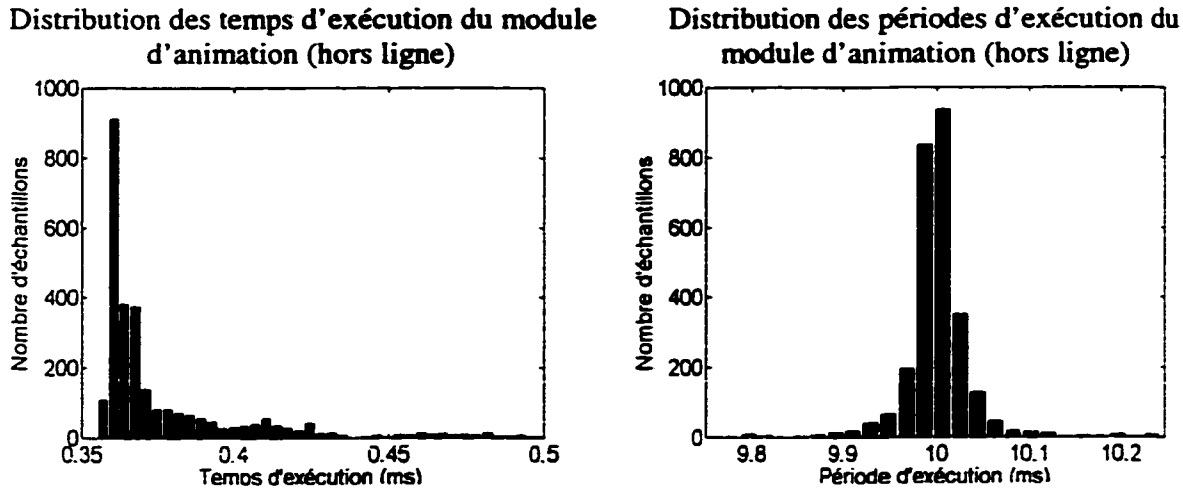

Figure 4-1 : Distribution temporelle du module d'animation (hors ligne)

Tableau 4-1 : Temps et périodes d'exécution du module d'animation (hors ligne)

	Temps d'exécution (ms)	Période d'exécution (ms)
Moyen	3,99	10,05
Minimum	3,57	9,53
Maximum	24,37	37,59
Écart-type	6,03	7,43

Au cours d'une session, ce phénomène se traduit par une instabilité lors de l'exécution d'un fichier d'animation préalablement sauvegardée. Malgré une fréquence d'exécution élevée, quelques cycles d'exécution nécessitent beaucoup plus de temps pour s'exécuter entièrement et causent cette discontinuité.

4.1.3 Animation en ligne

Pour le mode en ligne, le module d'animation effectue seulement des accès en mémoire. Ce mode a été testé sur une période de 12,76 s à l'aide de 1275 échantillons. Les résultats de la Figure 4-2 et du Tableau 4-2 présentent un temps d'exécution moyen de 3,11 ms et une période d'exécution moyenne de 10,01 ms. Ces données sont inférieures à celles obtenues dans le mode hors ligne. Les écarts-type des temps et des périodes d'exécutions sont également inférieurs à ceux obtenus dans le mode hors ligne.

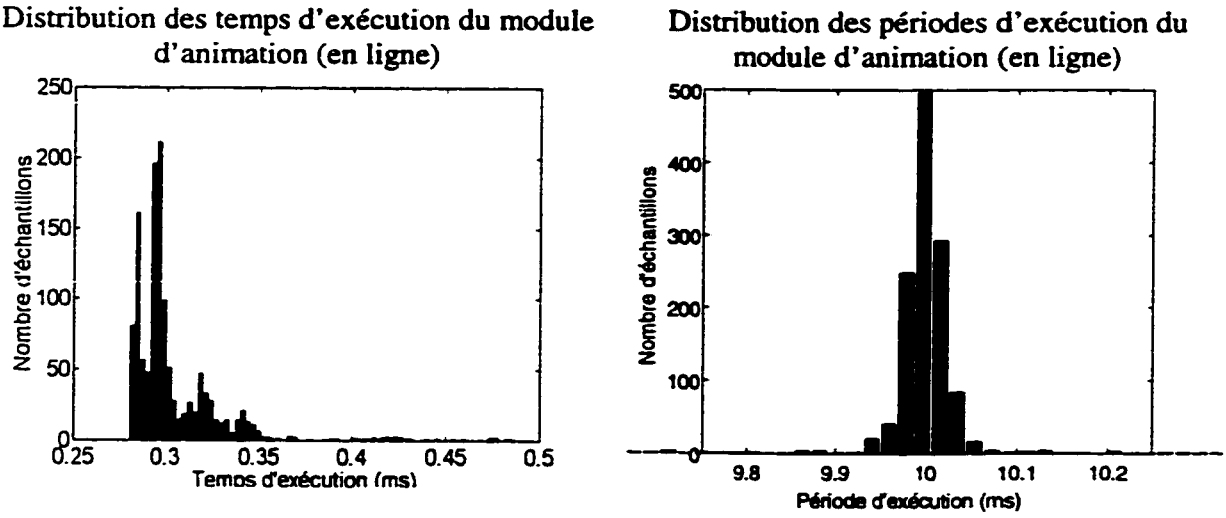

Figure 4-2 : Distribution temporelle du module d'animation (en ligne)

Tableau 4-2 : Temps et périodes d'exécution du module d'animation (en ligne)

	Temps d'exécution (ms)	Période d'exécution (ms)
Moyen	3,11	10,01
Minimum	2,81	9,54
Maximum	7,25	17,02
Écart-type	2,03	2,68

Ces résultats montrent un lien direct entre l'instabilité de la fréquence d'exécution du module d'animation en mode hors ligne et les accès disques. Pour diminuer les discontinuités de déplacement en mode hors ligne, il est nécessaire de réduire les accès disques. Pour ce faire, le module d'animation pourrait charger complètement le fichier d'animation en mémoire dès le démarrage de la simulation. Une fois chargée, le module d'animation exécuterait des accès en mémoire seulement.

4.1.4 Transmetteur MOTS

Le transmetteur MOTS a été évalué avec 1543 échantillons sur une période totale de 33,2 s. Tel que montré dans le Tableau 4-3, le temps d'exécution moyen est de 17.12 ms et la période d'exécution moyenne est de 63,7 Hz.

Tableau 4-3 : Temps et périodes d'exécution du transmetteur MOTS

	Temps d'exécution (ms)	Période d'exécution (ms)
Moyen	17.12	17.28
Minimum	0.35	0.43
Maximum	135.21	135.42
Écart-type	14.87	14.94

Les données présentent également des écarts-type élevés. L'utilisation de sockets et du protocole de communication UDP explique la différence entre la fréquence minimale et maximale. De plus, le simulateur MOTS est un système qui nécessite énormément de

ressources du processeur. Sur ce système le transmetteur MOTS possède une priorité petite en comparaison des autres processus.

4.1.5 Récepteur VOTE

Dans le cas du récepteur VOTE, les tests ont permis d'obtenir 6138 échantillons sur une période totale de 104 s. Les distributions temporelles de la Figure 4-3 montrent très peu d'échantillons localisés aux crêtes principales (10 ms). En effet, les temps et les périodes d'exécution sont distribués sur l'ensemble de la plage de temps.

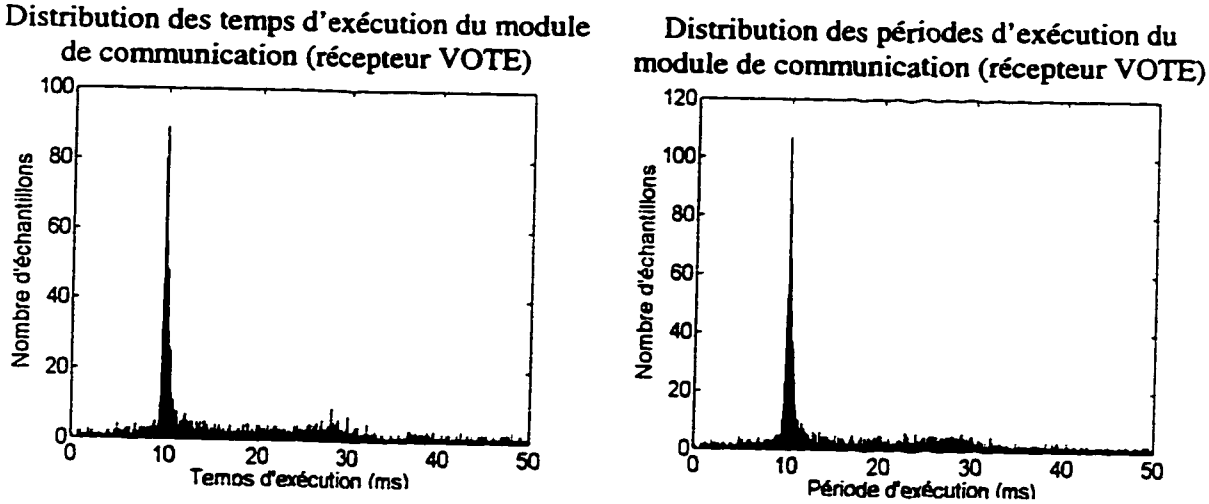

Figure 4-3 : Distribution temporelle du module de communication (récepteur VOTE)

Tableau 4-4 : Temps et périodes d'exécution du module de réception VOTE

	Temps d'exécution (ms)	Période d'exécution (ms)
Moyen	16,67	16,75
Minimum	1,34	1,59
Maximum	118,04	118,11
Écart-type	12,04	12,04

La dépendance envers le transmetteur MOTS explique la similitude des résultats avec ce dernier. Les résultats du Tableau 4-4 montrent un écart-type élevé, ce qui peut causer certains problèmes au moment même de l'animation du SSRMS. L'utilisation d'un réseau ethernet, commun à plusieurs systèmes, ne garantit pas la stabilité désirée. Pour régler ce problème, il serait nécessaire d'utiliser un lien dédié entre le simulateur MOTS et le système VOTE.

4.2 Analyse de la distorsion du système de localisation spatiale

Des expériences réalisées avec VOTE ont démontré que la localisation spatiale retournait des résultats corrects pour des distances émetteur-capteur inférieures à 6 mètres. Dans le but d'augmenter la zone disponible pour une séance de réalité virtuelle, l'équipe a tenté de dépasser les limites de spécifications du FOB.

Lorsque la distance entre l'émetteur magnétique et un capteur est supérieure à 6 mètres, la déformation du champ magnétique entraîne une dégradation de position et d'orientation [Burdea, 1994]. Cette erreur croît de façon exponentielle avec la distance et est causée par la présence d'objets ferromagnétiques et par la faible puissance du champ magnétique à la limite de sa portée. (Figure 4-4). Un objet ferromagnétique

entraîne une distorsion du champ magnétique et altère la précision fournie par les capteurs.

Pour la localisation dans VOTE, le problème se situe plutôt au niveau de la puissance du champ magnétique. Pour corriger cette distorsion à la limite du champ magnétique, il est possible d'utiliser un filtre logiciel. Le filtre est obtenu à l'aide de l'inverse de cette distorsion. Pour modéliser cette distorsion, la localisation spatiale nécessite un calibrage. Pour ce faire, des mesures doivent être prises à intervalles réguliers. Ces mesures correspondent à des mesures de position et d'orientation des capteurs et devront être comparées avec les valeurs idéales de position et d'orientation. L'erreur en chacun de ces points de mesure permet de déterminer la fonction exponentielle qui modélise cette erreur.

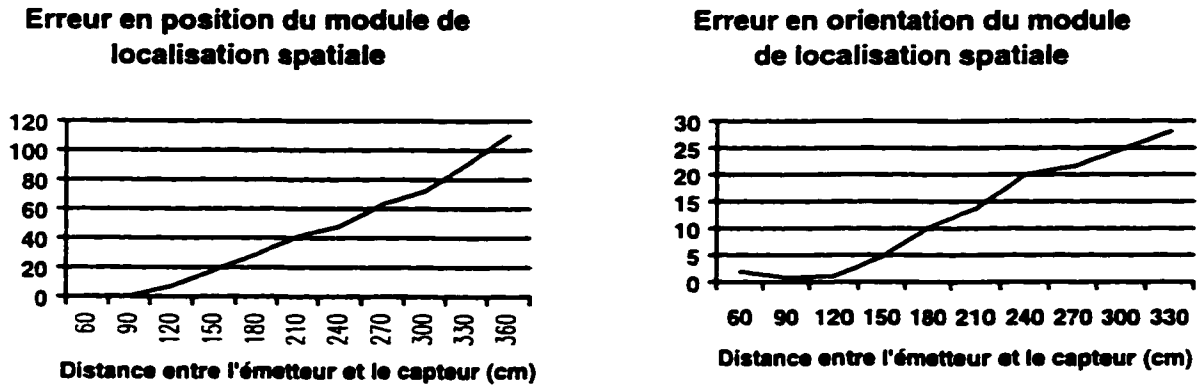

Figure 4-4 : Erreur en position et en orientation de la localisation spatiale

Une fois ces calculs réalisés, un modèle du filtre est implémenté dans le système de localisation et réalise un ajustement de chaque lecture des capteurs. Jusqu'à présent, aucun filtre n'a permis de calibrer en tout point la distorsion du champ magnétique. Peut-être s'agit-il d'un problème de couplage entre les degrés de liberté des capteurs.

D'autres expériences et algorithmes de tests devront être réalisés afin de mieux comprendre ce phénomène.

4.3 Travaux futurs

Afin d'augmenter la performance de VOTE et l'efficacité de son utilisation, plusieurs améliorations devront être intégrées au système. Ces améliorations sont divisées en 2 catégories : les améliorations essentielles et les améliorations fonctionnelles. La première catégorie représente les requis qui devront être rencontrés pour le développement à venir jusqu'à la phase de livraison de VOTE. En réalité, il s'agit des modifications ou des ajouts nécessaires pour respecter les requis minimum. La seconde catégorie représente les modifications ou les ajouts qui amélioreront VOTE. Il s'agit d'implémentations non essentielles qui augmenteront toutefois la performance de VOTE.

4.3.1 Améliorations essentielles

Configurations de la SSI

VOTE doit être en mesure de supporter plusieurs configurations de la SSI. En effet, lors de l'entraînement et la validation des opérations, les missions devront être réalisées dans les mêmes conditions que les vraies missions. Pour l'instant, la seule configuration accessible, sans modifications majeures, est la configuration 6A, c.-à-d. celle du déploiement du SSRMS (section 1.1.2). Pour résoudre ce problème, un système de contrôle de version peut être appliqué sur l'ensemble des modèles graphiques qui représentent les différentes configurations de la SSI. À l'aide de l'interface usager, l'opérateur pourrait sélectionner une configuration tandis que VOTE actualiserait les

modèles graphiques dynamiquement. Dans la même perspective, l'ajout et le retrait dynamique de modules non utilisés, durant une session VOTE, permettraient d'alléger le système et d'augmenter la performance.

Intégration du SPDM

Au cours des prochains mois, le SPDM devra être intégré dans le simulateur MOTS. Afin que VOTE puisse supporter ce nouveau robot, plusieurs modifications devront être apportées au système. Tout d'abord, il y a l'ajout des modèles graphiques dans la base de données graphiques de VOTE. Comme pour le SSRMS, une hiérarchie devra être implantée pour permettre la manipulation des objets graphiques qui représentent le SPDM. La structure des paquets de communication devra être également modifiée afin d'incorporer les données du SPDM, telles que les valeurs des articulations, l'état du robot et l'état des caméras du SPDM.

Support de la pédipulation

Le pédipulation doit être supportée par VOTE. Étant donné que le SSRMS n'est pas tout à fait symétrique, la hiérarchie complète du SSRMS doit être reconstruite, en temps réel, lorsqu'un changement de base interviendra lors d'une session MOTS. Pour éviter de lire à nouveau les modèles graphiques sur le disque, Easyscene permet de construire une hiérarchie d'objets graphiques à partir des objets chargés dans la base de données graphique. Cette façon permettrait un changement rapide de la hiérarchie et aurait un impact négligeable sur la fréquence d'exécution au moment de la pédipulation.

4.3.2 Améliorations fonctionnelles

Lors de l'entraînement des astronautes, certaines idées et concepts d'outils virtuels ont été mentionnés pour augmenter l'immersion, l'interactivité et l'imagination dans le système VOTE.

Sélection dynamique

Actuellement, VOTE offre seulement une liste prédéfinie de points d'attache pour l'utilisation de la règle virtuelle. Pour permettre plus de flexibilité, il serait possible d'augmenter l'interaction de l'usager avec le monde virtuel en lui permettant de déterminer lui-même ses points d'attache avec ses mains. À l'aide des capteurs localisés sur chacune de ses mains et d'un algorithme de détection de collision, il serait possible de déterminer les endroits pointés par les mains de l'usager. L'un des principaux objectifs de VOTE est l'assimilation des distances. C'est pourquoi, cet ajout aurait un impact positif sur l'entraînement et l'apprentissage des astronautes.

Augmenter la parallaxe de mouvement

Malgré le fait que VOTE utilise la stéréoscopie pour offrir une perception 3D de l'environnement virtuel, il est difficile de juger la distance relative entre 2 objets, lorsqu'on se situe à plus de 30 mètres d'eux. Pour améliorer la perception 3D, il est essentiel d'augmenter la parallaxe de mouvement [Davies, 1997]. En pratique, la parallaxe de mouvement s'explique par l'impression que les objets éloignés se déplacent plus lentement que les objets rapprochés lorsque notre champ de vision est déplacé de côté. L'absence d'image de fond (vide), empêche l'appréciation de la parallaxe de mouvement.

L'ajout d'objets graphiques comme des étoiles, planètes et galaxies, permettrait d'augmenter l'immersion de l'usager dans le monde virtuel de la SSI. Cependant, des précautions doivent être prises. L'ajout de la Terre dans le monde virtuel de VOTE a eu un impact considérable sur la performance du rendu graphique.

Augmentation de l'interaction et de l'autonomie

Un problème majeur persiste lors de l'utilisation du système VOTE. En effet, il n'est pas possible pour l'usager d'activer et de désactiver, lui-même, les outils virtuels offerts dans VOTE. De plus, il ne lui est pas possible de connaître en tout moment l'état des outils virtuels. Pour réaliser ces tâches, l'usager nécessite l'intervention d'un opérateur qui doit effectuer ces opérations à l'aide de l'interface usager.

Pour régler ce problème, il serait intéressant de permettre une utilisation autonome de VOTE. Une solution serait l'utilisation d'un menu 3D accessible via le casque virtuel et les capteurs localisés sur les mains. Par des mouvements gestuels, l'usager pourrait appuyer sur des boutons virtuels. Ces boutons correspondraient aux différentes options d'un menu. Malgré qu'il s'agisse d'une solution intéressante, l'implémentation de cette fonctionnalité semble complexe et les résultats sont difficiles à prévoir.

Une autre solution est l'implémentation d'un module à commandes vocales. À l'aide d'un vocabulaire prédéterminé, l'usager pourrait transmettre ses commandes à l'aide de sa voix [Verbex, 1990]. Les mots captés, par un microphone, seraient analysés par un module de traitement pour déterminer la commande VOTE à réaliser. Cette solution semble complexe, mais elle a déjà été utilisée dans différents projets et semble s'avérer une solution efficace.

4.4 Commentaires des astronautes

Le premier cours donné à l'ASC consistait principalement à familiariser les astronautes avec le nouveau bras robotique canadien. Contrairement au SRMS, le SSRMS possède 7 degrés de liberté et offre donc plusieurs possibilités pour le calcul de la cinématique inverse. En effet, il peut exister plusieurs configurations pour une position et orientation donnée de l'organe terminal libre. Durant ce cours, les astronautes devaient également prendre conscience de l'absence d'un point de vue arbitraire avec le SEM. En effet, les seules vues disponibles sont celles offertes par les caméras localisées sur la SSI et les composantes du SEM. Dès les premières leçons, les astronautes ont compris les difficultés inhérentes à la manipulation du bras et la nécessité d'avoir un bon modèle mental 3D de l'environnement dans lequel ils devront opérer.

Jusqu'à présent, près d'une quinzaine d'astronautes ont utilisé VOTE pour la validation du premier cours et pour l'entraînement. Depuis avril 1998, VOTE a été utilisé par les membres des 2 premiers équipages qui auront à manipuler le SSRMS. Selon eux, VOTE augmente considérablement la perception des distances et facilite la construction de ce modèle mental 3D. La possibilité de visualiser en temps réel une simulation réalisée sur le simulateur MOTS est un élément qu'ils considèrent très utile. Ils ont apprécié la possibilité de naviguer à l'aide des manettes et de modifier leur point de vue dans le monde virtuel.

L'astronaute russe Yuri Usachev a trouvé profitable l'utilisation de la maquette de

virtuel et de la trajectoire linéaire pour évaluer les déplacements de l'organe terminal pendant une simulation en mode SJRM.

Malgré ces points positifs, certaines améliorations ont été données par ces principaux usagers. L'astronaute Claude Nicolier a suggéré la possibilité de visualiser dans le casque virtuel le mode d'opération des manettes. Cette fonctionnalité permettrait de connaître en tout temps le mode courant des manettes de commande. Lors des opérations complexes, dans lesquelles l'astronaute devra changer de point de vue fréquemment, il serait préférable que l'astronaute puisse commander lui-même le mode des manettes à l'aide d'un bouton ou d'une commande vocale. Comme mentionné précédemment, l'augmentation de l'autonomie avec un système à commandes vocales permettrait à l'astronaute de sélectionner le mode qu'il désire.

Lors des séances d'entraînement, l'astronaute Dan Bursh a indiqué la difficulté de percevoir l'écart entre la trajectoire réalisée par l'opérateur (position de l'organe terminal) et la trajectoire idéale imposée. L'utilisation du tunnel virtuel présente l'enveloppe maximale de travail, mais n'indique pas le degré de proximité entre les 2 trajectoires.

Pour l'instant, les trajectoires sont tracées à l'aide d'une seule couleur. Une sélection dynamique de la couleur permettrait d'indiquer le degré de proximité de la trajectoire réelle avec la trajectoire idéale. Par exemple plus l'écart est petit, plus la couleur de la ligne (trajectoire) deviendrait bleue. Plus l'écart est grand, plus la couleur de la trajectoire deviendrait rouge.

CHAPITRE 5 - CONCLUSION

5.1 Résumé

Ce mémoire a d'abord présenté les principaux aspects de la télérobotique. L'introduction a énoncé les difficultés reliées à la télérobotique. Ensuite, elle a introduit la technologie de la réalité virtuelle. Il était principalement question de la définition, des composantes, de la modélisation et des facteurs humains qui interviennent dans les systèmes de réalité virtuelle.

Afin de bien comprendre le contexte du projet de recherche, une description du SEM a été exposée. Cette portion du mémoire a présenté le programme de la SSI, les composantes du SEM, leurs fonctionnements et les difficultés inhérentes à leurs manipulations en orbite.

Le chapitre 2 a traité de la description même du projet VOTE. Comme indiqué précédemment, VOTE est un système de réalité virtuelle qui modélise la SSI et les composantes du SEM. Ce système sert d'outil aux activités, d'entraînement et de développement des opérations, liées aux composantes du SEM. Ce chapitre a présenté également une description des modules, des outils virtuels et des objectifs de VOTE dans le programme de la SSI.

l'intérieur de ce chapitre. Pour la partie logicielle, la conception des modules a été présentée.

Finalement, le chapitre 4 a présenté les résultats obtenus aux cours des expériences réalisées sur le système VOTE. Particulièrement, le chapitre a montré les raisons qui expliquent une instabilité lors d'une animation hors ligne et en ligne du SSRMS. De plus une analyse du module de localisation spatiale a été exposée. Cette section a exposé les limitations physiques du FOB. Le chapitre a enchaîné par une liste d'améliorations essentielles et fonctionnelles à apporter au système VOTE dans le futur. Le chapitre s'est terminé, par les commentaires des astronautes donnés lors de leurs entraînements avec VOTE.

Afin de bien préparer les astronautes à leur futur environnement de travail, c.-à-d. celui de la SSI et du SEM, il était nécessaire de les mettre en contact avec ces nouveaux éléments avant leur mission. L'utilisation d'une maquette grandeur nature était une solution peu envisageable en raison des coûts extrêmement élevés que cela impliquerait. Comment préparer les astronautes pour une mission précise qui nécessite une configuration particulière de la station ? Pour cette raison, l'ASC a proposé un système de réalité virtuelle qui modélise la SSI et les composantes SEM. Cette solution moins coûteuse avait les avantages suivants :

- ne nécessite pas une grande superficie pour son utilisation (10m x 10m);
- permet la sélection d'une configuration de la SSI au niveau logiciel, donc peu coûteux;
- offre la possibilité de modifier le système rapidement lorsque de nouveaux modules s'ajoutent à la station spatiale;
- enlève la maintenance d'une maquette grandeur nature;

- permet des représentations n'ayant pas d'équivalent réel, les outils virtuels.

En plus de fournir cet environnement 3D, VOTE incorpore des outils virtuels. Ces outils ajoutent de l'information supplémentaire au monde virtuel et permettent d'accélérer le processus d'apprentissage des notions nécessaires à la manipulation des composantes du SEM. En plus d'aider l'astronaute au cours de son entraînement, VOTE permet aux ingénieurs de valider les procédures d'opération du SEM avec la réalité virtuelle.

5.2 Contributions au projet VOTE

Le projet de recherche a permis la visualisation temps réel d'une simulation réalisée sur MOTS. Cette fonctionnalité a eu un impact majeur sur le système VOTE. Avant cette implémentation, il n'était pas possible de visualiser directement le SSRMS dans VOTE lorsqu'une opération était réalisée sur MOTS. À ce moment, il était nécessaire de générer un fichier de données sur MOTS et de le charger dans VOTE avec le module d'animation. Ce traitement hors ligne engendrait beaucoup de restrictions pour les leçons. Maintenant, l'astronaute peut exécuter une manœuvre sur MOTS et porter le casque de réalité virtuelle en même temps.

La deuxième contribution majeure au projet VOTE est la possibilité de supporter plus d'un usager à la fois. Désormais, 2 astronautes peuvent être entraînés simultanément dans le monde virtuel. Pour l'instant, cette nouveauté est très peu exploitée. Les instructeurs devront élaborer des leçons où 2 astronautes interagiront entre eux.

Le module de navigation a été également développé. Ce module permet aux usagers de naviguer sur de grande distance autour de la SSI sans nécessiter l'intervention d'un

opérateur VOTE. Cette fonctionnalité a ajouté de l'autonomie à la navigation et les astronautes l'apprécie. Le problème actuel est que les manettes sont utilisées à la fois pour la navigation et pour l'opération même du SEM. Pour changer le mode d'opération des manettes, l'usager nécessite un opérateur VOTE. Dans le cas où il y a des changements de mode fréquents, la perte d'autonomie entraîne un désintéressement à cette fonctionnalité.

Pour permettre la visualisation des vues 2D générées par les différentes caméras actives du SEM, de la SSI ou de la navette spatiale, des objets caméras ont été ajoutés à la hiérarchie du SEM, de la SSI et de la navette spatiale. La modification de VOTE a permis d'associer ces caméras à celles qui sont utilisées lors d'une session MOTS. Comme dans le cas précédent, l'usager requiert la présence d'un opérateur VOTE pour activer ou désactiver les vues 2D correspondantes aux caméras sélectionnées.

Finalement, de nouveaux outils virtuels ont été développés pour répondre aux besoins des leçons. Le mannequin virtuel présente le rendu graphique des usagers dans le monde virtuel. Le plancher virtuel indique la surface 2D sur laquelle l'usager peut se déplacer. En utilisant le mode navigation des manettes de commande, l'usager peut modifier la position et l'orientation de ce plan dans le monde virtuel. La trajectoire de référentiels permet aux usagers de visualiser la position et l'orientation de l'organe terminal pour certains points de sa trajectoire. De plus, le tunnel virtuel permet de visualiser l'enveloppe d'opération disponible pour le déplacement de l'organe terminal. Finalement, les modèles graphiques des caméras et les cônes de lumières aident les usagers à visualiser l'orientation des caméras et à éviter la ligne directe entre une lumière et une caméra.

5.3 Avenir de VOTE

Au cours des prochains mois, près de 40 astronautes utiliseront VOTE. Avec la popularité et le succès du système, VOTE devra être en mesure de s'adapter aux nouveaux besoins imposés par le développement des nouvelles leçons. Avec l'ajout de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux outils virtuels, il est nécessaire d'évaluer leurs impacts sur la performance du système.

VOTE a démontré que la réalité virtuelle était un outil très utile pour la formation et l'entraînement des astronautes. Cependant, tel que mentionné par les astronautes, l'utilisation de la réalité virtuelle n'est pas une fin en soi. Elle ne doit pas être utilisée dans toutes les occasions.

L'efficacité du projet VOTE sera appréciée à sa pleine valeur qu'au moment où les astronautes exécuteront réellement des opérations avec les composantes du SEM. En effet, lorsque les astronautes effectueront leurs manœuvres, une partie de VOTE sera avec eux.

BIBLIOGRAPHIE

AGENCE SPATIALE CANADIENNE (1998), MSS Robotics Operator (MRO) Training, Agence spatiale canadienne.

ALLARD P. (1997), A Virtual Environment for Training Space Station Teleoperators, Mémoire de maîtrise, Université McGill, Canada.

ASCENSION TECHNOLOGY CORPORATION (1996), The Flock of Bird : Installation and Operation Guide, Ascension Technology Corporation.

BLISS, J. P., TIDWELL, P. D., GUEST, M. A., (1997). The Effectiveness of Virtual Reality for Administering Spatial Navigation Training to Firefighters. Presence : Teleoperators and Virtual Environment, vol. 6, no. 1, 73-86.

BURDEA G., COIFFET P. (1993), Virtual Reality Technology, John Wiley and Sons inc.

BURNS A., WELLINGS A. (1997), Real-Time Systems and Programming Languages, Addison-Wesley inc.

CAE ELECTRONICS LTD (1996), MOTS System Specifications Document (SDD), CAE Electronics Ltd.

CANNON D. J., THOMAS G. (1997), Virtual Tools for Supervisory and Collaborative Control of Robots, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 6. no. 1., 1-28.

CORYPHAEUS SOFTWARE INC (1996), Easyscene Real-time Visual System, Coryphaeus Software Inc.

CORYPHAEUS SOFTWARE INC (1996), Designer's Workbench 3.1 Reference, Coryphaeus Software Inc.

CRAIG J. J. (1989), Introduction to robotics : mechanics and control 2nd edition, Addison-Wesley inc.

CREAK A. (1997), Robotics and real-time control, Internet : http://www.cs.auckland.ac.nz/~alan/courses/r&rtc/r&rtpprs.htm.

CRITCHLOW A. J. (1985), Introduction to robotics, Macmillan Publishers.

CYBEREDGE JOURNAL (1993), What's Wrong With Your Head Mounted Display, Cyberedge journal. Internet : www.cyberedge.com/4a7d.html.

DAVIES E. R. (1997), Machine Vision : Theory Algorithms Practicalities 2nd edition, Academic Press.

DELP S. L., LOAN P., BASDOGAN C., ROSEN J. M. (1997), Surgical Simulation : An Emerging Technology for Training in Emergency Medecine, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 6. no. 2, 147-159.

DRASTIC D., MILGRAM P. (1998), Perceptual Issues in Augmented Reality, ETC Lab : Ergonomics in Teleoperation and Control Laboratory, département de mécanique, Université de Toronto, Canada.

FRANKLIN G. F., POWELL J. D., EMAMI-NAEINI A. (1994), Feedback control of dynamic systems 3rd edition, Addison-Wesley.

GALVIN S. (1994), Operating system concepts, Addison-Wesley.

GREENBERG E. P. (1998), Robotics Training for Space Station : Overcoming Limitations, IEEE Canadian Review, 12-15.

ISDALE J. (1993), What is Virtual Reality,

Internet : www.cms.dmu.ac.uk/~cph/VR/whatisvr.html.

KALAWSKY ROY S. (1993), Science of Virtual Reality and Virtual Environments, Addison-Wesley.

KRISHNA C. M., SHIN KANG G. (1997), Real-time systems, McGraw-Hill.

LOGAN A. (1995), Training Beyond Reality, Conférence CASI de 1995, Montréal.

MAUREL C. (1997), MIRAGE : Un outil de développement pour la réalité virtuelle sous X Windows, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

MCKENNA M., ZELTZER D. (1992), Three Dimensional Visual Display Systems for Virtual Environments, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 1. no. 4., 421-458.

MINER N. E., STANFIELD S. A. (1995), An Interactive Virtual Reality Simulation

MOORING B. W., ROTH Z. S., DRIELS M. R. (1991), Fundamentals of Manipulator Calibration, John Wiley and Sons inc.

NASA (1998), International Space Station Assembly : A Construction Site in Orbit, NASA Facts. NASA.

NASA (1998), International Space Station : Assembly Sequence revision D, NASA Facts. NASA.

NASA (1998), The International Space Station : Improving Life on Earth and in Space, NASA Research plan. NASA.

NEIDER J., DAVIS T., WOO M. (1994), OpenGL Programming Guide, Addison-Wesley.

REAGAN E. C. (1993), Some Side-effects of Immersion Virtual Reality, AGARD Meeting on "Virtual Interfaces : Research and Applications", Psychology Research Group, Ministry of Defence, United Kingdom.

ROBINET W., HOLLOWAY R. (1995), The Visual Display Transformation for Virtual Reality, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 4. no. 1., 1-23.

SCHILLING R. J. (1990), Fundamentals of Robotics analysis and control, Prentice-Hall inc.

SILICON GRAPHICS INC. (1994), IRIS Performer Programmer's Guide, Silicon Graphics inc.

SILICON GRAPHICS INC. (1994), IRIX System Programming Guide, Silicon Graphics inc.

STAMPE D., ROEHL B., EAGAN J. (1993), Virtual Reality Creations, The Waite Group inc.

STEVENS W. R. (1993), Advanced programming in the Unix environment, Addison-Wesley.

STURMAN D.J. ZELTZER D. (1993). A Survey of Glove-Based Input, IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 14, no. 1, 30-39.

STYTZ M. R., SOLTZ B. (1993), Providing Situation Awareness Assistance to Users of Large-Scale, Dynamic, Complex Virtual Environments, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 2. no. 4, 297-313.

TABARAH E. (1997), SSRMS Coordinate Frames - Definition and examples, MRO lesson plan, Agence spatiale canadienne.

TABARAH E. (1997), SSRMS Singularities - A Physical Interpretation, MRO lesson plan, Agence spatiale canadienne.

TAM E. K., MAUREL C. DESBIENS P., MARCEAU R.J., MALOWANY A.S., GRANGER L. (1997), A Low-Cost, PC-Oriented Virtual Environment for Operator Training Simulators, IEEE Transactions on Power Systems, IEEE PICA 1997, Mai 11-16, Columbus, Ohio, 358-364.

THALMANN N. M., THALMANN D. (1994), Artificial Life and Virtual Reality, John Wiley and Sons inc.

VALLINO M. (1997), Introduction to Augmented Reality, Thèse de doctorat, Université de Rochester, Rochester.

VERBEX VOICE SYSTEMS (1990), Grammar Development Manual, Verbex Voice Systems.

VEH A. O., MARCEAU R. J., MALOWANY A., DESBIENS P., DAIGLE A., GARANT E., GAUTHIER R. SHAIKH A. RIZZI J. C. (1996), Design and Operation of a Virtual Reality Operator-Training System, IEEE/PES Winter Meeting, janvier 21-25.

VIRTUAL RESEARCH SYSTEMS INC. (1995), FS5 User's Guide, Virtual Research Systems inc.

WALLER D., KNAPP D. (1998), The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 7. no. 2., 129-143.

WATT A., WATT M. (1992), Advanced Animation and Rendering Techniques : Theory and Practice, Addison-Wesley inc.

WITMER B. G., KLINE P. B. (1998), Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments, Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol 7. no. 2., 144-167.

ZAK H., DAS H. (1995), Towards A Training Methodology for Skilled Teleoperation, IEEE Transactions on Systems. Man. and Cybernetics, vol. 25, no. 2., 313-327.