

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene

Faculté D'Electronique et d'Informatique

Mémoire présenté
Pour l'obtention de diplôme de Magister
EN : ELECTRONIQUE

Spécialité : Contrôle de Processus et Robotique
par

Karima REBAI

SUJET

**APPLICATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA
REALISATION D'UN SYSTEME D'AIDE TECHNIQUE POUR
PERSONNES HANDICAPEES**

Soutenu le 17 Février 2005, devant le Jury composé de :

M ^r	M. ATTARI	Professeur à l'USTHB	Président
M ^r	R. OUIGUINI	Maître de Recherche au CDTA	Directeur de thèse
M ^r	R. TOUMI	Professeur à l'USTHB	Co-Directeur de thèse
M ^r	K. ACHOUR	Directeur de Recherche au CDTA	Examineur
M ^{me}	N. SAADIA	Maître de Conférences à l'USTHB	Examinatrice
M ^{me}	N. ACHOUR	Docteur à l'USTHB	Examinatrice

REMERCIEMENTS

Lorsqu'une thèse s'achève, un désir s'empare de nous afin de remercier chacune des personnes dont la contribution a permis à ce travail de voir le jour.

Je tiens avant tout à exprimer ma reconnaissance aux membres de mon jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et les conseils qu'ils m'ont prodigués. En particulier, je remercie :

- M. Mokhtar ATTARI, professeur à l'USTHB, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.
- M. Karim ACHOUR, Directeur de Recherche au CDTA, pour m'avoir accueilli au sein de la Division Robotique et productique (CDTA), et d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.
- Mesdames. Nadia SAADIA et Nouara ACHOUR, Maîtres de Conférences à l'USTHB, pour l'attention qu'elles ont portée à mon travail par la lecture de ce mémoire et témoignant ainsi leurs intérêts d'avoir accepté d'examiner ce mémoire dans les meilleurs délais.

Mes sincères remerciements vont à Messieurs Rachid OUIGUINI, Maître de Recherche à l'ASAL, et Redouane TOUMI, Professeur à l'USTHB, en tant que Directeur et Co-Directeur de thèse, pour leur ouverture d'esprit et leurs critiques constructives. Je suis heureuse de l'opportunité qui m'est donnée de vous témoigner ma reconnaissance pour cet encadrement tout au long de cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur M. BELHOCINE, responsable de l'équipe Robotique MEDicale (ROMED au CDTA), pour m'avoir permis d'effectuer ce travail au sein de son équipe et pour les libertés offertes et ses critiques constructives durant la lecture de ce rapport.

Un très grand merci va au principal assistant qui m'a suivi, M. Y. SELLAMI. Ses compétences, sa disponibilité et son engagement ont été un facteur important dans la réussite de ce projet. Je tiens également en estime tous les autres membres de l'équipe ROMED (S. SABOUNI et K. Kara), qui par leur personnalité et leur soutien, ont créé un climat de travail très agréable.

Je tiens aussi à remercier M^{me} Osmani, responsable de Bibliothèque au CDTA, pour sa gentillesse et ses services rendus.

Pour finir, j'envoie une pensée émue à tous les membres de ma famille, sans qui cette thèse n'aurait pas été, et à toutes les personnes proches qui ont été les synonymes de « donneur ».

APPLICATION DE LA REALITE VIRTUELLE POUR LA REALISATION D'UN SYSTEME D'AIDE TECHNIQUE POUR PERSONNES HANDICAPEES

Résumé

Ce travail a été consacré au développement d'un simulateur de conduite de fauteuil roulant électrique, dans le cadre de la réalisation des systèmes d'assistance de personnes handicapées moteurs. Cet objectif a nécessité tout d'abord l'élaboration des modèles géométrique et cinématique d'un fauteuil roulant électrique, l'émulation d'une interface homme machine de type switch scanning pour contrôler manuellement le fauteuil roulant virtuel, la modélisation de l'environnement virtuel qui englobe description des objets et l'interaction entre objets (détection de collisions) et enfin la modélisation d'un capteur ultrasonore pour la simulation.

Afin que l'handicapé utilise ce simulateur pour l'entraînement, des modes de visualisation et des scénarios d'entraînement ont été proposés.

Mots-clés : *robotique de réhabilitation, fauteuil roulant électrique, fauteuil roulant virtuel, réalité virtuelle, environnement virtuel, détection de collision, Switch scanning, capteur ultrasonore, système de perception.*

Abstract

This work dails with the development of a driving simulator of power wheelchair, within the framework of the realization of systems to assist disabled people. This objective required the elaboration of the geometrical and kinematic models of a wheelchair, the emulation of an human machine interface of type "switch scanning" to manually control the virtual wheelchair, the modelling of the virtual environment which contains description of objects and interaction between objects (collisions detection) and finally the modelling of sonar for simulation.

In order to help the disabled person uses this simulator for the training, visualization modes and scenarios of training were proposed.

Keywords : *Rrehabilitation robotics, power wheelchair, virtual wheelchair, virtual reality, virtual environment, collision detection, Switch scanning, sonar, system of perception.*

TABLE DES MATIERES

Introduction	1
1. Motivation	1
2. Objectifs	2
3. Organisation de la thèse.....	2
 Chapitre 1: Robotique et Réalité Virtuelle en Réhabilitation. Etat de l'art	4
1. Introduction	5
2. Robotique et handicap: Etat de l'art	5
2.1 Aide à la manipulation.....	5
2.2 Aide au déplacement : fauteuil roulant robotisé	7
2.1.1 Description des projets réalisés.....	8
2.1.2 Discussion	8
3. Réalité Virtuelle et Handicap	10
3.1 Bénéfices de RV pour la réhabilitation.....	10
3.2 Etat de l'art	12
4. Position du problème	14
4.1 Besoins des handicapés.....	14
4.2 Coopération Homme-Machine	15
4.3 Modes de Contrôle et Interfaces Homme-Machine	15
4.4 Simulation et Réalité Virtuelle	16
5. Simulateur à base de Réalité Virtuelle	16
6. Conclusion.....	17
 Chapitre 2 : Fauteuil roulant électrique. Modélisation Cinématique et Contrôle	18
1. Introduction	19
2. Cinématique et notion d'espace de configuration	19
2.1 Notion d'espace de configuration.....	19
2.2 L'Holonomie et la non-holonomie	20
2.3 Fauteuil roulant électrique en tant qu'un robot différentiel.....	21
3. Modèle Cinématique en Configuration (MCC).....	22
3.1 Différents types de roues	22
3.1.1 Roues conventionnelles et contrainte de roulement sans glissement.....	23
3.1.2 Roues suédoises	24
3.2 Plates-formes mobiles à roues	25
4. Modèle cinématique : cas d'un fauteuil roulant électrique.....	27
5. Interface Homme-Machine.....	29
5.1 Contrôle à base de Switch Scanning.....	30
5.2 Description de Barnsley Wheelchair Interface (BWI).....	31
6. Contrôle manuel d'un fauteuil roulant électrique.....	32
7. Conclusion.....	33
 Chapitre 3 : Réalité Virtuelle et Simulation.....	35
1. Introduction	36
2. Définition de La Réalité virtuelle	36
2.1. Objectifs de RV	37
2.2. Définition fonctionnelle.....	38
2.3. Définition technique	38

3. Historique de RV	39
4. Matériels utilisés en RV	39
4.1. Le casque de réalité virtuelle (HMD)	40
4.2. Les « data gloves »	41
4.3. Les combinaisons.....	41
4.4. Les technologies de retour de force	42
4.5. Générateur de son tridimensionnel	42
5. Réalité Projetée.....	43
6. Applications de la RV.....	44
6.1 Interactions avec un monde simulant la réalité :	45
6.2 Interactions avec un monde imaginaire ou symbolique	45
7. Environnement virtuel et simulation	46
7.1 Classification des environnements virtuels	47
7.2 Description de l'EV	47
7.2.1 Modélisation géométrique	48
7.2.2 Comportement des objets et Interface Homme Machine.....	51
7.3 Détection de Collision	52
7.3.1 Opérations de base de la détection de collision	53
7.3.2 Hiérarchie de détection de collision.....	57
7.3.3 Hiérarchie des volumes englobants : BboxTree	58
7.3.4 Construction de l'arbre BboxTree	59
7.3.5 La hiérarchie AABB (Aligned Axis Boundary Box).....	60
7.3.6 Test de Collision entre deux volumes englobants.....	61
7.3.7 Détection de Collision et récupération des données	62
8. Conclusion.....	62
Chapitre 4 : Simulation d'un Capteur Ultrasonore	64
1. Introduction	65
2. Capteur télémétrique à ultrason.....	65
3. Méthodes utilisées pour la simulation d'un capteur US	66
3.1 Recursive Ray Acoustic (RRA).....	67
3.2 Lancer de rayon « ray casting »	67
3.3 Prédiction des mesures US	68
3.4 Etude comparative	69
4. Capteur Virtuel en 2D: Prédiction des mesures US Améliorée.....	70
4.1 Représentation de l'environnement	70
4.2 Processus de détection	71
4.3 Objet détectable mais caché.....	72
4.3.1 Objet caché par une plane	73
4.3.2 Objet caché par un Cylindre	74
4.4 Résultats de simulation	75
5. Configuration d'un système de perception.....	76
5.1 Environnement de test	80
6. Conclusion.....	82
Chapitre 5 : Simulation de la Conduite d'un Fauteuil Roulant Virtuel dans des EVs	83
1. Introduction	84
2. Système graphique.....	84
2.1 Système d'exploitation	84
2.2 Langage de programmation	84

2.3 OpenGL	84
3. Mise en œuvre du simulateur à réalité virtuelle	85
3.1 Fauteuil Foulant Virtuel.....	86
3.2 Interaction entre l'utilisateur et l'environnement	88
3.3 Environnement virtuel et scénarios d'entraînement	90
3.3.1 Environnement ouvert.....	90
3.3.2 Environnement 3D	91
4. Conclusion.....	93
Conclusion	94
1. Travail réalisé	94
2. Apport et résultats.....	94
3. Perspectives	95

LISTE DE TABLEAUX

1.1 :	Comparaison entre robotique industrielle et robotique de réhabilitation	5
2.1 :	Paramètres géométrique d'un fauteuil roulant électrique	28
3.1 :	Comparaison entre Réalité Projeté et RV immersive.....	43
3.2 :	Classification des applications utilisant la RV	44
4.1 :	Comparaison entre trois méthodes de simulation des capteurs US.....	69
4.2 :	Configuration de Blossom	77
4.3 :	Configuration de Swami Jr	77
4.4 :	Configuration de Walky	78
4.5 :	Ceinture de capteurs proposée	79

TABLE DE FIGURES

1.1 :	Walky : bras manipulateur attaché à un robot mobile	6
1.2 :	Le bras Manus monté sur un fauteuil électrique	7
1.3 :	Architecture générale du projet SIAMO	9
1.4 :	Projet de Inman	12
1.5 :	Utilisation du simulateur par des handicapés et de professionnels	16
2.1 :	Posture d'un robot mobile à roues	20
2.2 :	Robot mobile à roues différentiel	21
2.3 :	Roues conventionnelles	23
2.4 :	Roue suédoise	24
2.5 :	Schéma d'un fauteuil roulant électrique	28
2.6 :	Interface à base de switch scanning, de Adaptive Switch Laboratories (ASL)	30
2.7 :	Canal de communication entre l'utilisateur et le FRV	31
2.8 :	Affichage de l'interface BWI	31
2.9 :	Configuration de BWI : Forward first, left-right-step	32
3.1 :	Le premier casque de réalité virtuelle	32
3.2 :	Schéma de principe d'un visiocasque à écrans LCD	40
3.3 :	Data gloves model 5	41
3.4 :	Un combinaison de Ascension Technology	41
3.5 :	Audition stéréo et virtuelle 3D	42
3.6 :	Classification des Environnements Virtuels	47
3.7 :	Exemples des modèles 3D	48
3.8 :	Ambiguïté du modèle fil de fer	49
3.9 :	Représentation surfacique d'un tétraèdre	49
3.10 :	Enumération spatiale	50
3.11 :	Exemple de CSG	51
3.12 :	Structure d'interaction Utilisateur- Application	52
3.13 :	Méthode de Marchal	54
3.14 :	Test d'intersection triangle/triangle	55
3.15 :	Exemple d'une représentation hiérarchique d'une lampe	58
3.16 :	Méthodes de construction bottom-up et top-down	60
3.17 :	Exemple d'une hiérarchie AABB d'une lampe	61
3.18 :	Détection de collision entre deux objets	62
4.1 :	Modèle typique de faisceau US	66
4.2 :	Différentes classes de modélisation d'un sonar	67
4.3 :	Principe de l'algorithme de Lancer de rayon	68
4.4 :	Représentation paramétriques des objets en 2D	70
4.5 :	Objet caché par : (a) une surface plane, (b) un cylindre	73
4.6 :	Résultats de simulation	75
4.7 :	Configuration de Blossom	77
4.8 :	Configuration de Swami Jr	78
4.9 :	Configuration de Walky	79
4.10 :	Ceinture de capteurs virtuels	80

INTRODUCTION

L'assistance technique aux personnes handicapées est un domaine complexe nécessitant en permanence et de manière soutenue des efforts de recherche, de transferts de technologie et de communication. La diversité du domaine implique une approche pluridisciplinaire sollicitant différents organismes de recherche, des industriels, des organismes sociaux et des utilisateurs. Actuellement une forte demande sociale s'exprime dans le sens d'une application des technologies mises au service de l'homme. La recherche technologique doit répondre aux attentes de ceux qui parmi la population peuvent tirer le plus grand bénéfice des aides techniques pour améliorer leur insertion sociale, économique, leur indépendance et leur bien être.

La Robotique de Réhabilitation est le domaine qui cherche à proposer aux handicapés des systèmes robotisés. En ce qui concerne les handicapés moteurs, ces systèmes offrent deux formes d'assistances : aide à la manipulation et aide au déplacement.

La simulation à base de Réalité Virtuelle regroupe un ensemble de technologies permettant de restituer un environnement tridimensionnel avec lequel l'utilisateur peut interagir en temps réel. Elle peut accélérer la convalescence tout en augmentant le degré de motivation de l'handicapé.

L'utilisation des méthodes et des techniques issues de la Réalité Virtuelle permet un interfaçage efficace entre la personne handicapée et l'environnement. Elle offre différentes fonctions d'assistance telles que l'assistance à la commande par Interface Virtuelle et l'assistance à la perception de l'environnement (capteur virtuel)

1. Motivation

De nos jours, la robotique de réhabilitation a fortement évolué car elle doit répondre aux besoins des handicapés. L'utilisation d'un tel système nécessite une phase d'apprentissage de l'handicapé. Donc, la question suivante se pose : comment concevoir un système d'entraînement efficace, capable d'assister une personne handicapée moteur (surtout lorsqu'il s'agit d'un enfant) à se déplacer d'une façon indépendante et en toute sécurité ?

La réponse se trouve dans les simulateurs graphiques interactifs basés sur la Réalité Virtuelle. Les facteurs motivants le développement de ce système sont:

- ✓ Le simulateur assure la sécurité de l'handicapé par la réduction de toute sorte de risques qu'il peut rencontrer pendant l'utilisation par exemple d'un fauteuil roulant réel, il permet aussi d'augmenter la sensation d'indépendance.
- ✓ La possibilité d'offrir de différents environnements de navigation permet d'éviter le besoin d'un espace large et son aménagement dans le monde réel.

- ✓ D'un point de vue économique, les simulateurs peuvent être utilisés à domicile, permettant ainsi le dépassement de certaines contraintes telles que le coût d'une formation dans un centre de réhabilitation. Le déplacement de l'handicapé peut s'avérer un énorme problème surtout s'il habite loin du centre.
- ✓ La psychologie de l'enfant plaide en faveur de l'enseignement par le jeu, car ce dernier permet d'améliorer sa concentration et ses capacités mémoire. Par conséquent, l'entraînement sous forme d'un jeu est très accessible et efficace pour les enfants handicapés.
- ✓ Aider l'enfant à éviter la grande difficulté et le temps perdu dans la mise en relation entre les tests d'entraînement et la vie réelle. La simulation d'une tâche elle-même dans un environnement virtuel permet à l'enfant de pratiquer et d'améliorer ses compétences.

2. Objectifs

L'objectif de ce projet est de développer un système de simulation pour fauteuil roulant électrique (FRE) utilisant les outils de Réalité Virtuelle. La conception de ce système poursuit plusieurs objectifs :

- ✓ Aide à l'apprentissage de la conduite d'un FRE pour des enfants sévèrement handicapés ;
- ✓ Aide à l'utilisation d'une interface homme-machine de type switch scanning ;
- ✓ Aide des spécialistes de réhabilitation dans l'assistance des handicapés et l'évaluation de leurs habiletés sensori-motrice par la proposition des différents programmes de formation ;
- ✓ Aide des architectes dans la conception de constructions accessibles à l'handicapé.

3. Organisation de la thèse

Ce mémoire est découpé en cinq chapitres :

Le chapitre 1 fait le tour d'horizon, dans sa première section, des projets du domaine de la Robotique de réhabilitation dédié aux handicapés moteurs. La présentation des projets développés dans le contexte de la conception des simulateurs à base de Réalité Virtuelle pour la réhabilitation fait le cœur de la deuxième section. A la fin de ce chapitre, les besoins des handicapés moteurs et l'utilité de notre simulateur d'entraînement seront passés en revue.

La modélisation cinématique du fauteuil roulant électrique et la description de l'Interface Homme-Machine (IHM) font l'objet du deuxième chapitre.

Le chapitre 3 présente la partie la plus importante dans notre travail. Il s'agit de l'utilisation de la Réalité Virtuelle en simulation, surtout en ce qui concerne la description des environnements virtuels (EVs) et la simulation de l'interaction entre objets. Ce chapitre inclut les algorithmes utilisés pour la description des objets et de détection de collision, ainsi que quelques résultats obtenus.

Le chapitre 4 est consacré au développement d'un capteur ultrasonore virtuel et à la simulation des différents systèmes de perception constitués de plusieurs capteurs.

Le chapitre 5 présente l'implémentation de notre simulateur et l'intégration des différents modèles.

Enfin, le dernier chapitre conclut ce document en résumant les principes de notre projet et en présentant quelques perspectives pour son extension.

CHAPITRE 1: ROBOTIQUE ET REALITE VIRTUELLE EN REHABILITATION. ETAT DE L'ART

1. Introduction
2. Robotique et l'handicap: Etat de l'art
 - 2.1 Aide à la manipulation
 - 2.2 Aide au déplacement : fauteuil roulant robotisé
3. Réalité Virtuelle et Handicapé
 - 3.1 Bénéfices de RV pour la réhabilitation
 - 3.2 Etat de l'art
4. Position du problème
 - 4.1 Besoins des handicapés
 - 4.2 Coopération Homme-Machine
 - 4.3 Modes de Contrôle et Interfaces Homme-machine
 - 4.4 Simulation et Réalité Virtuelle
5. Simulateur à base de Réalité Virtuelle
6. Conclusion

Résumé :

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art en Robotique de réhabilitation, plus particulièrement en ce qui concerne les handicapés moteurs. Au début nous exposons l'ensemble des formes d'aide apportées par la Robotique de Réhabilitation (aide à la manipulation et aide au déplacement). Puis, nous présentons différents projets développés dans le contexte de la conception des simulateurs à base de la réalité virtuelle pour la réhabilitation. Enfin, nous étudierons les besoins des handicapés moteurs. Pour terminer cette étude nous montrerons l'utilité de notre simulateur basé sur la RV, que ce soit pour les handicapés (entraînement) ou pour les professionnels. En conclusion nous montrerons les éléments nécessaires à la conception de ce simulateur.

1. Introduction

La robotique est largement utilisée dans le développement d'applications d'aide aux handicapés. Ce domaine particulier de la robotique est souvent appelé : *robotique de réhabilitation* ou *assistance robotisée*, en anglais "rehabilitation robotics or assistive robotics".

La réhabilitation ou encore réadaptation est une activité qui permet à un handicapé physique d'atteindre un niveau optimum de fonctionnement mental, physique, et/ou social [Bol 95]. Ainsi, l'objectif de la robotique de réhabilitation est d'offrir une aide aux handicapés physiques et aux gens physiquement faibles, comme par exemple les personnes âgées, afin de leur assurer une vie indépendante. Dans le tableau ci-dessous, nous faisons une comparaison entre les fonctionnalités des robots industriels et des robots de réhabilitation.

	Robotique de Réhabilitation	Robotique industrielle
Tâches	Tâches re-programmables	Tâches pré-programmables Tâches répétitives
Utilisateurs	Handicapés	Gens qualifiés (professionnels)
Espace de travail	Environnement de vie, social.	Espace industriel

Tab 1.1 : Comparaison entre robotique industrielle et robotique de réhabilitation

2. Robotique et l'handicap: Etat de l'art

On peut se demander pourquoi faire intervenir la robotique en réhabilitation et plus précisément en réadaptation des handicapés moteurs? En fait, elle ne sert pas à remplacer l'homme dans l'exécution des tâches répétitives, mais plutôt à l'aider à faire certaines manipulations et à se déplacer librement.

2.1 Aide à la manipulation

Des bras manipulateurs, équipés de différents types d'élément terminal, peuvent aider l'utilisateur à manger, manipuler des objets et à contrôler l'environnement ...etc.

Ce système peut être présenté en trois configurations selon le support du bras manipulateur :

- bras lié à une base fixe
- bras relié à un robot mobile
- bras monté sur un fauteuil roulant

Pour la première configuration, nous citons à titre d'exemple deux systèmes où le bras manipulateur est monté sur une base fixe :

Devar [Nev 98] est un bras de type PUMA260, conçu et construit au début des années 90 à Palo Alto VA Réhabilitation R&D Center en collaboration avec Spinal Control Injury Center au USA. Il sert à aider l'utilisateur à réaliser des tâches comme la préparation des

repas, le brossage des dents à l'aide d'une brosse à dent électrique, et des tâches de contrôle environnemental (éclairage, téléphone...).

RAID [Nev 98] a été développé par des entreprises et des universités de Grande-Bretagne, de France et de Suède. Ce système est constitué d'une station ayant la forme d'une étagère et d'un bras capable de ramener des livres de l'étagère à la demande de l'utilisateur. Il peut également tourner des pages, déplacer des disquettes et des CD ROMs. Le bras manipulateur est aussi capable de gérer des périphériques comme une imprimante, un scanner et une agrafeuse. Plusieurs versions ont suivi le premier RAID (1991-93) dans le but de rajouter d'autres fonctionnalités, nous citerons EPI-RAID, RAID1A et RAID2 (1993-96).

Concernant la deuxième configuration, le bras est relié à un véhicule autonome ou semi-autonome afin d'aider l'utilisateur à une manipulation à distance. L'application d'un tel système peut aller au-delà de la restauration de la fonction manipulation en permettant à la personne de se déplacer virtuellement [Col 00] dans son appartement grâce à une caméra mobile. A titre d'exemple, l'utilisateur envoie le robot pour « voir » quelle personne se trouve dans la pièce à côté, explorer un lieu inconnu ou encore chercher un objet.



Figure 1.1: Walky : bras manipulateur attaché à un robot mobile
[Nev 98]

WALKY [Nev 98] [Bol 95] est un robot mobile développé pour être utilisé par des handicapés dans des laboratoires (chimiques, médicaux et biologiques). Cela élargira la gamme des emplois destinée aux handicapés physiques dont les opportunités de carrière sont souvent limitées au travail de type bureau. A l'aide de ce robot manipulateur à base mobile (Figure 1.1), l'handicapé peut faire des examens microscopiques comme la détermination du groupage sanguin.

ARPH⁽¹⁾ [Col 02] [Hop 01] est un projet qui a commencé en 1994 en France. Il est composé d'une station de contrôle et d'un bras manipulateur "Manus" monté sur un robot mobile. L'objectif principal est la restauration de quelques fonctionnalités affectées de

¹ ARPH: Assistance Robotisée pour Personne Handicapée

l'handicapé. La conception de ce système fait appel à deux principaux domaines de recherche : la robotique, qui a pour but de donner le maximum d'autonomie à la base mobile, et la coopération homme-machine.

Un bras monté sur un fauteuil roulant, représente la troisième configuration, assure une assistance à une personne pendant son déplacement à n'importe quel endroit. Citons ici deux exemples :

Le projet MANUS [Nev 98] a été initialisé par *the Muscular Dystrophy Association of the Netherlands* dont le but est de développer un manipulateur monté sur un fauteuil roulant (Figure 1.2) avec une structure de contrôle modulaire assistée par ordinateur et adapté aux personnes sévèrement handicapées.

Dans le projet KARES [Son 99], la chaise roulante électrique est équipée d'un bras manipulateur à 6 degrés de liberté. Le contrôle du bras est basé sur l'information visuelle en provenance d'une caméra.



Figure 1.2: Le bras Manus monté sur un fauteuil roulant électrique
[Nev 98]

2.2 Aide au déplacement : fauteuil roulant robotisé

Les deux sociétés *American National Standards Institute* et *Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America* ont développé une série de fauteuils roulants électriques standard ANSI/RENSA qui regroupe une trentaine de modèles. Le problème d'assistance au déplacement ne réside donc pas dans leur conception mécanique [Yan 00], mais plutôt dans le développement de la partie intelligente (navigation sécurisée, communication entre l'utilisateur et son fauteuil, intégration de systèmes de perception pour aider l'handicapé ayant des problèmes de perception, implantation des différents moyens de contrôle : joystick, parole, switch, signal Electro-OculoGraphique EOG,... etc.).

2.1.1 Description des projets réalisés

NavChair [Lev 99] a été construit afin d'assurer une assistance à la navigation. Ce système inclut trois modes d'opération :

- Evitement d'obstacles en général
- Traverser une porte
- Suivi de mur automatique

NavChair contient un mécanisme pour la sélection automatique d'un mode de fonctionnement selon l'identification des objets et la localisation de la chaise [Sim 99].

Un groupe de chercheurs de ICS-FORTH⁽¹⁾ [Arg 02] a développé un prototype basé sur une chaise roulante électrique MEYRA, équipée, comme beaucoup d'autres projets, de capteurs ultrasonores et infra-rouge, de moteurs DC pour la locomotion de la chaise, et un joystick, mais elle contient en plus une caméra panoramique. Le contrôle, semi-automatique, est basé sur les comportements suivants :

- Mouvement au milieu d'un espace libre
- Suivi d'un but mobile
- Evitement des obstacles
- Marche selon une direction désirée

Le projet VAHM⁽²⁾ [Bou 96] présente un contrôle selon deux modes : manuel assisté et automatique. Dans le premier mode, le système est chargé de l'évitement des obstacles et le suivi de mur. Dans le second, le système génère une trajectoire planifiée et évite les obstacles non modélisés. Leur philosophie repose sur les deux principes suivants :

- La personne supervise le robot dans le mode automatique,
- Le robot supervise la personne dans le mode manuel assisté.

Néanmoins, cela peut mettre l'utilisateur dans des situations de danger.

Wheesly [Yan 00] aide l'utilisateur à la navigation sécurisée dans des environnements connus ou inconnus de manière semi-automatique. Le système prend en compte les caractéristiques des environnements d'intérieur et d'extérieur.

2.1.2 Discussion

Dans ce paragraphe, nous présentons une analyse des projets développés dans la robotique d'assistance au déplacement des handicapés moteurs. Nous discutons ainsi le niveau d'autonomie des systèmes proposés, les méthodes d'interaction et les interfaces homme-machine utilisées.

a. Niveaux d'autonomie

Lorsqu'une personne se déplace d'un endroit à un autre, elle construit (même d'une manière intuitive) des stratégies pour accomplir une mission. Une stratégie [Col 02] se traduit par une suite de modes de commande qui peuvent être automatiques, semi-automatiques ou manuels.

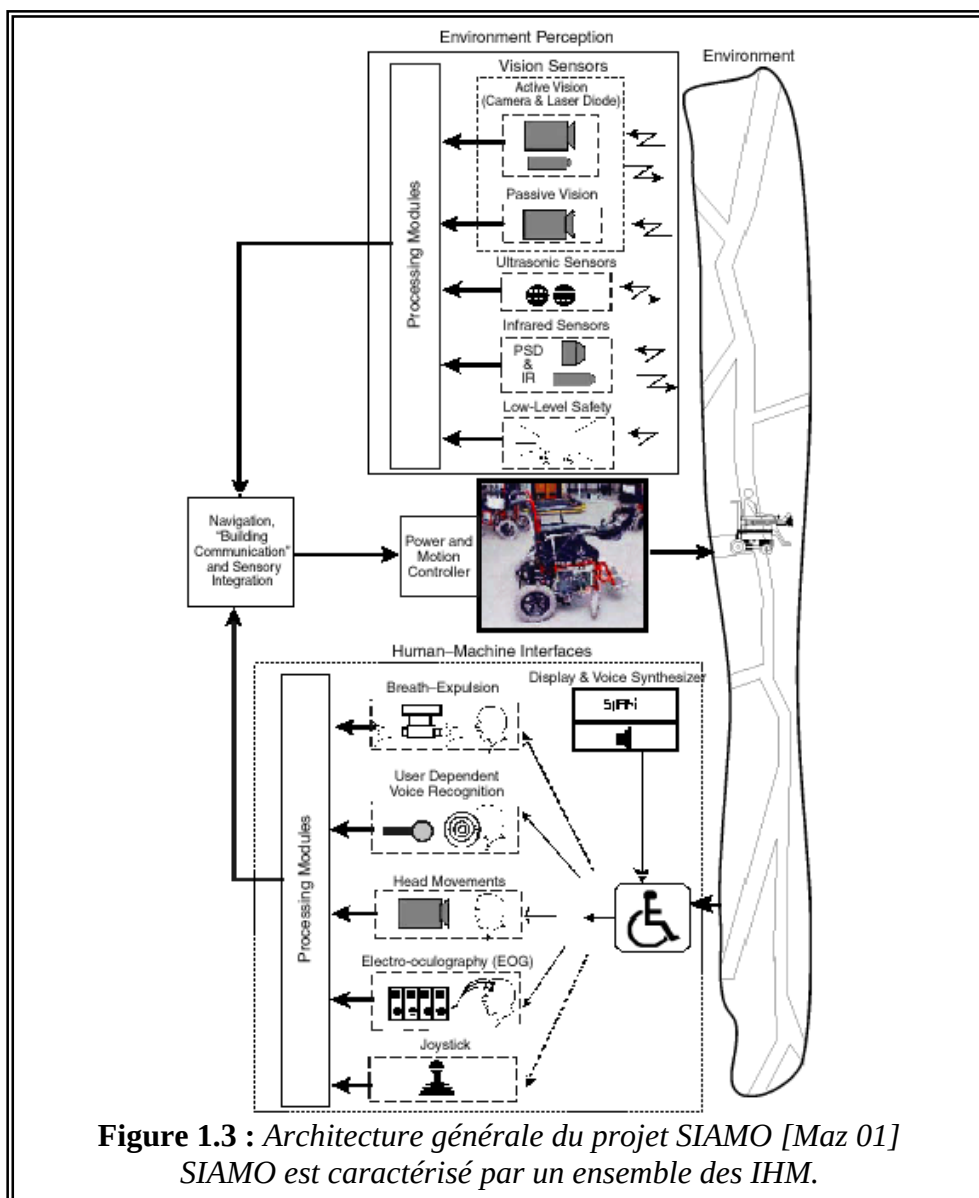
¹ ICS- FORTH: Institute of Computer Science, FOundation for Research and Technology –Hellas, Greece

² VAHM : Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs

Le projet développé dans [Yod 96] est constitué d'un ensemble de stratégies de contrôle pour donner une autonomie à la chaise roulante. Une fois le but fixé par l'utilisateur, la chaise se déplace de manière autonome jusqu'à atteindre la cible. Ce système est destiné aux gens incapables de planifier un chemin et aux handicapés moteurs passant la majorité de leur temps dans un environnement connu. D'autres travaux comme celui de Colle [Col 02] proposent trois modes de contrôle : manuel, semi-automatique et automatique.

Le mode automatique exige une connaissance de l'environnement et empêche généralement l'handicapé d'utiliser ses moyens de perception et de décision dans l'exécution du mouvement. L'utilisateur est d'ailleurs considéré comme n'importe quel objet transporté par un robot mobile. Pour ces raisons, ce mode est abandonné sauf pour des cas très particuliers et le mode semi-automatique, où le contrôle est partagé entre l'utilisateur et la machine, devient préférable [Yan 00].

b. Méthodes d'interaction et interface homme-machine



L'objectif principal dans la conception d'une Interface homme-machine IHM est de donner des capacités réelles aux handicapés sévères pour dépasser ses limites et avoir un peu d'indépendance dans le déplacement [Maz 01].

Dans la littérature, les *méthodes d'accès* (appelés aussi *dispositifs d'entrée*) [Yan 00] sont des dispositifs permettant aux gens de commander leurs fauteuils directement ou à travers un ordinateur portable.

Beaucoup de fauteuils roulants robotisés incluent seulement un Joystick de commande conventionnel [Sim 99] [Ase 03] [Lev 99] ou un Joystick à boutons comme dans le système TinMan [Mil 99]. Quelques projets de recherche ont proposé d'autres méthodes d'accès pour répondre aux besoins des handicapés incapables de manipuler des Joystick. Ces méthodes d'accès incluent la reconnaissance vocale [Maz 01] [Nev 98] [Sim 97], le suivi du mouvement des yeux (eye tracking by Electro-OculoGraphe (EOG)) [Maz 01], un simple commutateur (single switch scanning) [Yan 00] [Bou 96] et la poursuite de mouvement de la tête à base d'ultrasons (ultrasonic head control) [Maz 01], ainsi que la poursuite de mouvement de la tête utilisant une micro caméra CCD (face tracking) [Maz 01].

Dans le cas des personnes sévèrement handicapées, il est possible qu'un simple commutateur (Switch scanning) soit le seul moyen de contrôle disponible. L'activation et la désactivation de ce dispositif peuvent se faire manuellement, par détection de mouvement de la tête, ou même par respiration [Roa 02]. La conduite par un switch exige que les commandes soient différenciées temporellement utilisant un balayage d'*items* d'un menu [Roa 02]. Ce balayage montre alternativement des directions dans un menu. En activant le commutateur, l'action alors mise en évidence est choisie.

3. Réalité Virtuelle et Handicapé

Une étude détaillée de la Réalité Virtuelle (RV) sera présentée au chapitre 3. Mais avant de montrer son utilité en réhabilitation, il nous paraît utile de présenter la vision générale de cette technologie.

La réalité virtuelle peut être vue comme une combinaison de la simulation en temps réel et des interactions homme-machine à travers de multiples canaux sensori-moteurs⁽¹⁾ [Arn 03]. Dans cette section, nous présentons les bénéfices de la RV pour les services dédiés aux handicapés. Ensuite, nous donnerons un état de l'art des projets associés au sujet.

3.1 Bénéfices de RV pour la réhabilitation

Plusieurs applications basées sur la RV ont été développées pour :

- Minimiser l'effet de l'handicap;
- Améliorer la vie des handicapés, leur participation sociale et leur indépendance ;
- Fournir des moyens pour entraîner les handicapés et les motiver à utiliser leurs outils de réhabilitation et d'entraînement, surtout lorsqu'il s'agit des enfants.

¹ Les canaux sensori-moteurs regroupent les interfaces de perception et de contrôle. Plus de détail sera abordé au troisième chapitre.

RV pour minimiser les effets d'handicap

La RV peut être utilisée comme une technologie d'assistance [Com 98]. Elle permet aux handicapés moteurs de se déplacer et d'explorer des Environnements Virtuels (EVs) simulant des endroits réels, bien qu'ils soient incapables de les visiter dans la vie réelle (musé par exemple).

Avec la RV, Inman [Inm 97] a proposé d'utiliser des laboratoires virtuels de chimie, de biologie et de physique pour minimiser la grande difficulté que rencontrent les enfants au cours de leurs formations. Ces laboratoires sont dédiés aux handicapés qui ont des problèmes dans la mobilité de la partie supérieure de leurs corps.

La RV aide, les gens ayant des déficiences dans le système de perception, par la translation des informations que l'handicapé est incapable de percevoir (Son et parole pour un sourd, des gestes pour un non voyant ...) à des informations perçues par d'autres sens. Par exemple, il est possible de traduire les gestes en parole [Com 98].

Rôle de la RV dans l'entraînement

Beaucoup de travaux utilisant la RV en réhabilitation ont été dirigés vers la création des environnements de simulation pour permettre aux handicapés (et particulièrement aux enfants) d'entraîner, pratiquer et améliorer leurs habiletés [Nin 01] [Nin 00] [Nad 00] [Har 00] [Sim 97] [Inm 95].

En 1903, EL THORNDIKE [Sch 01] avait établi la théorie des Eléments Identiques « Identical Element Theory » pour un meilleur apprentissage. Selon cette théorie, il faut augmenter les similarités entre les tâches d'apprentissage et les tâches réelles. La RV a deux caractéristiques permettant d'appliquer cette théorie. Premièrement, elle offre la possibilité de créer des environnements individuels, ce qui facilite la simulation de la vie réelle de chaque personne. Deuxièmement, elle dispose des interfaces sensori-motrices, ce qui permet à l'utilisateur de recevoir des retours d'effort « feedback » comme des réponses à ses comportements au cours de l'entraînement dans un EV [Inm 97].

L'aspect de jouer avec la RV rend le processus d'entraînement facile et plein de motivation. Il permet aussi aux enfants handicapés d'oublier leurs handicaps.

RV pour accroître la participation sociale et l'amélioration de la vie

En plus de son utilisation pour simuler des environnements physiques, la RV a aussi un potentiel pour simuler des environnements sociaux.

Les avantages de l'utilisation de la RV en réhabilitation dans ce contexte sont :

- Fournir des opportunités pour le développement des habiletés sociales. Par exemple, des groupes travaillant sur un projet à travers un réseau d'ordinateurs ont besoin d'une collaboration pour compléter ce projet [Com 98].
- Offrir un moyen de communication. Par exemple, des enfants hospitalisés peuvent communiquer avec leurs familles à distance et jouer avec d'autres enfants de même situation d'une manière interactive.

L'indépendance d'un handicapé, qui est l'objectif principal du domaine de la réhabilitation, est améliorée par l'utilisation de la RV dans l'entraînement des différentes habiletés selon les

besoins de chaque personne. Plusieurs travaux se concentrent sur ce but, on cite le projet de Inman [Inm 95] concernant l'apprentissage de la traversée d'une route en toute sécurité.

3.2 Etat de l'art

Ojala [Oja 91] a développé un simulateur d'une chaise roulante intelligente utilisant l'infographie (Computer graphics). L'auteur n'a pas introduit la RV dans son système, mais il a mentionné les avantages majeurs du simulateur pour les ingénieurs de réhabilitation et les utilisateurs (handicapés).

Un des premiers projets utilisant la RV pour l'apprentissage de la conduite des fauteuils roulants électriques par des enfants handicapés est celui de l'équipe d'Inman d'*Oregon Research Institute, USA*. Inman et sa femme ont obtenu en Juillet 93 une subvention du *Département Américain d'Education* pour examiner la faisabilité d'utiliser la RV pour enseigner à cette population d'enfants comment faire fonctionner des fauteuils roulants. Les personnes concernées sont les enfants sévèrement handicapés ayant des dommages orthopédiques. Le but de ce projet [Inm 95] [Inm 97] est d'établir et d'évaluer des programmes de formation à base de la réalité virtuelle afin de les aider à apprendre comment utiliser des fauteuils roulants en toute sécurité (puisque'ils ne sont pas directement confrontés au cas réel).

Les roues arrière du fauteuil, utilisé pour l'entraînement, sont déposées sur des rouleaux pour leur permettre de tourner et empêcher efficacement le fauteuil de se déplacer réellement. Pour que les roues arrière droite et gauche puissent tourner indépendamment, chacune est placée sur un rouleau [Inm 95].

Une fois le fauteuil de simulation prêt (Figure 1.4), le conducteur équipé d'un visiocasque HMD⁽¹⁾ commence à établir les programmes de formation.

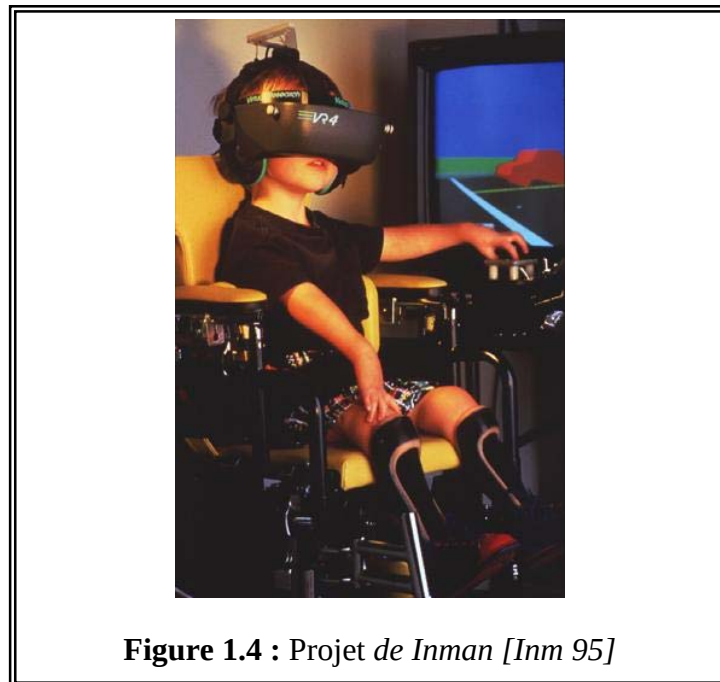


Figure 1.4 : Projet de Inman [Inm 95]

L'entraînement se fait dans trois Environnements virtuels (EVs) de complexité progressive. Le premier et le deuxième environnement sont conçus pour promouvoir l'exploration

⁽¹⁾ HMD: (Head Mounted Display) casque de RV (chapitre 3).

indépendante, la découverte et l'amélioration des capacités de mémorisation visuelle. Le troisième scénario fournit un environnement plus structuré, il s'agit d'une route avec véhicules pour améliorer les compétences nécessaires au passage d'une route en toute sécurité.

Un autre projet développé au Japon [Che 96] utilise la RV dans un système d'expérimentation d'une chaise roulante utilisé par des personnes ordinaires. L'objectif est de permettre aux concepteurs des fauteuils roulants électriques et aux architectes de mieux comprendre les besoins et les problèmes des handicapés et donc de les aider en essayant de bien répondre à leurs exigences.

Ce système d'expérimentation est constitué d'une chaise roulante électrique maintenue immobile dans le monde réel. Des rouleaux sont employés en tant que support de la chaise, de telle sorte que ses roues motrices tournent librement. Le système est équipé aussi d'un HMD pour la visualisation et, comme éléments d'action : d'un data-glove⁽¹⁾ et d'un joystick. La rotation des roues et le mouvement de la tête sont détectés respectivement par des codeurs incrémentaux et un capteur magnétique (Magnetism sensa).

Desbonnet et al. [Des 98] ont proposé un système d'entraînement non immersif basé sur la réalité virtuelle pour des enfants handicapés (Virtual Reality Training System - VRTS). L'objectif principal de VRTS est de motiver l'enfant à utiliser une chaise roulante électrique et d'assurer sa sécurité pendant la phase d'entraînement.

La mise à jour de la position et de l'orientation de l'utilisateur dans le monde virtuel n'est pas basée sur des mesures de mouvements par des codeurs comme dans [Che 96] [Inm 95], par contre elle est basée sur l'utilisation d'une interface permettant de lire directement les commandes émises par le joystick.

VRTS utilise une simple fenêtre 'Window on World', il permet à son utilisateur de voir son environnement virtuel à travers un moniteur standard. L'utilisation de cette approche, Window on World, est justifiée par l'évitement des effets négatifs de l'utilisation de l'HMD, elle permet aussi de développer un système à un degré important de réalisme d'un côté, et à moins de complexité d'un autre côté.

Les auteurs de [Des 98] ont conclu que VRTS a des limites en tant qu'outil d'entraînement, et ce à cause de la grande différence entre la chaise virtuelle utilisée en simulation et les chaises réelles. La faible puissance du calculateur utilisé (200MHz Pentium Pro processor) exige une modélisation abstraite de la chaise et des différents objets de l'environnement.

Le Projet VI [Sim 97] d'*Ohio Stated University's Rehabilitation* est adressé à trois catégories de personnes : les architectes, les handicapés et les spécialistes de la réhabilitation.

Pour les architectes, VI permet de prévisualiser des plans tridimensionnels en vue d'améliorer l'accessibilité des immeubles par des handicapés moteurs, surtout pour les structures publiques. VI fournit aux handicapés un outil d'adaptation et de formation. Il permet aussi aux professionnels des services médicaux de déterminer le meilleur programme pour un patient particulier.

Ce système est constitué d'un fauteuil roulant électrique commandé par un joystick, d'une station graphique CRIMSON VGXT et d'un casque HMD pour la visualisation. Deux modes

⁽¹⁾ data-glove : gant de données (chapitre 3).

de fonctionnement primaires, du point de vue joystick, sont utilisés : mode passif et mode actif. Dans le premier mode, le joystick empêche le conducteur d'aller vers des obstacles. Dans le mode actif, le joystick exerce un retour de force qui guide l'utilisateur vers le secteur le moins encombré. L'intégration de ces deux modes n'est pas justifiée et apparaît même inutile pour l'entraînement à la conduite et pour la conception des plans par des architectes.

Le système de simulation conçu par *Harrison* [Har 00] et amélioré dans [Gra 03] s'appuie sur la RV et sur un fauteuil roulant électrique comme plate-forme de simulation. L'objectif est de fournir un outil pour les architectes, les concepteurs et les utilisateurs leur permettant d'aborder la question du déplacement des fauteuils dans différents immeubles.

L'inconvénient de cette étude est l'absence d'un module pour la *détection de collision* (entre le fauteuil virtuel et l'EV) nécessaire pour éviter la pénétration du fauteuil dans d'autres objets virtuels, ce qui n'est pas réaliste. L'étude de *Harrison* est basée sur une démarche issue de la psychologie expérimentale afin d'établir une évaluation qualitative (questionnaires) et quantitative (évaluation du simulateur par les participants) de l'apprentissage.

Le simulateur du dernier projet actuellement en développement à *l'université de Metz en France* [Nin 01] [Nin 00] [Nad 00] se compose d'une plate-forme à base fixe comme la plupart d'autres projets où le fauteuil est immobile dans le monde réel où les roues tournent librement.

La simulation se base sur l'estimation de la position et de l'orientation du fauteuil dans la scène virtuelle en exploitant les données des codeurs incrémentaux situés sur les roues du fauteuil réel, comme dans [Che 96] et [Inm 95]. L'environnement virtuel est visualisé par l'intermédiaire d'un casque et/ou par une projection sur écran.

La simulation de l'évolution du fauteuil dans un environnement virtuel nécessite la modélisation à la fois de la géométrie et de la cinématique de ce fauteuil. Une modélisation monodimensionnelle des capteurs ultrasonores a été faite pour simuler le processus de perception utilisé par le fauteuil roulant électrique intelligent.

4. Position du problème

Avant de définir notre problématique, nous examinerons les besoins des handicapés moteurs, puis nous mentionnerons les points qui vont être traités dans ce mémoire.

4.1 Besoins des handicapés

Dans le domaine de l'assistance robotisée à la mobilité des handicapés moteurs, il ne suffit pas, comme dans l'industrie, de résoudre un problème de fonctionnement du système robotique, mais il faut prendre aussi en considération l'avis de l'handicapé et l'assurance de sa sécurité.

La recherche et l'industrie de ce domaine ne se concentrent pas sur des systèmes entièrement autonomes, mais plutôt sur des fauteuils roulants prétendus *semi-autonomes*. Ces robots sont capables d'effectuer tous seuls certaines tâches, mais ils doivent compter sur l'opérateur humain et sur ses compétences dans la sélection de ces tâches. Par conséquent, le système d'aide doit être basé sur **la coopération homme-machine**. Ainsi, un fauteuil roulant intelligent est un système fortement interactif, il est conjointement contrôlé par l'opérateur

humain et le logiciel du robot. C'est pourquoi la conception d'une interface homme-machine est un problème-clé [Lan 01] dans le développement d'un fauteuil roulant intelligent.

La robotique de réhabilitation exige certaines mesures de sécurité et s'intéresse aux **Interfaces Homme-Machine** (IHM) [Bol 95] pour les personnes ayant des problèmes physiques et qui n'acceptent que des systèmes simples et faciles à utiliser.

L'apprentissage de la conduite des fauteuils roulants par des handicapés moteurs est un point très important surtout pour les enfants, de même leur évaluation en toute sécurité est exigée. D'ailleurs, les enfants handicapés, dès leur naissance, ont besoin d'une motivation et d'une aide à apprendre à utiliser leurs chaises roulantes et interagir avec leur environnement[Des 98]. Un **simulateur à base de RV** peut répondre à ces besoins.

4.2 Coopération Homme-Machine

La coopération Homme-Machine joue un rôle similaire à celui d'un couple cheval-cavalier [Hop 01]. Le cheval marche et exécute des tâches difficiles pour le cavalier, et le cavalier impose ses décisions et intervient à n'importe quel moment. Le fauteuil robotisé doit compenser seulement l'incapacité et les limites de son utilisateur sans effectuer entièrement la tâche [Hop 01]. L'introduction de la coopération Homme-Machine sert à pallier les limites du système d'assistance en se basant sur le principe que l'homme et la machine possèdent chacun des capacités de perception, de décision et d'action. L'utilité majeure de cette coopération est le fait que l'handicapé est impliqué dans l'exécution de la tâche en cours. La mise en place de la coopération [Col 02] est un problème difficile à résoudre, il est encore à l'heure actuelle traitée au cas par cas selon l'état et le degré d'handicap.

4.3 Modes de Contrôle et Interfaces Homme-machine

Il y a trois modes principaux de contrôle du déplacement d'un fauteuil roulant électrique intelligent : automatique, manuel (et parfois on parle d'un mode manuel assisté) et semi-automatique appelé aussi mode partagé.

Dans le mode automatique, la personne signale la destination sur un plan 2D montré sur un écran [Oth 00] [Hop 01]. Le robot atteint automatiquement cette destination par l'établissement de deux niveaux de contrôle : planification de trajectoire, suivi de trajectoire avec activation permanente d'un système d'évitement d'obstacles. L'intervention humaine dans ce mode est très réduite.

Dans le mode manuel, la personne conduit son fauteuil manuellement via un joystick, switch ou n'importe quel dispositif de contrôle.

Le mode semi-automatique permet l'intervention de l'utilisateur de temps à autre par la sélection d'une primitive comportementale [Hop 01], par exemple : suivi d'un mur, effectuer un demi-tour, marche au milieu d'un espace libre...

La sélection d'un mode ou d'un comportement est souvent à la charge de l'utilisateur [Hop 01] [Col 02], elle est parfois automatisée et basée sur la reconnaissance de l'environnement, comme dans le projet NavChair [Lev 99] [Sim 99].

Nous avons adopté dans ce travail le mode manuel plus une assistance à la perception. Nous proposons l'utilisation d'une émulation d'un switch comme interface homme-machine, pour permettre à l'handicapé de se familiariser avec ce genre d'interface et de participer dans

son déplacement à l'aide d'une interface graphique. Un de nos buts est d'offrir à un handicapé la possibilité de contrôler sa chaise robotisée d'une façon manuelle assistée et semi-automatique. Ces modes exigent des informations sur l'environnement détectées par des capteurs ultrasonores par exemple. Puisque la modélisation des capteurs US n'était pas vraiment traitée avec la simulation des architectures de navigation en robotique mobile, nous nous sommes concentrés sur l'amélioration d'un modèle géométrique 2D des capteurs US avant d'aborder le contrôle semi-automatique.

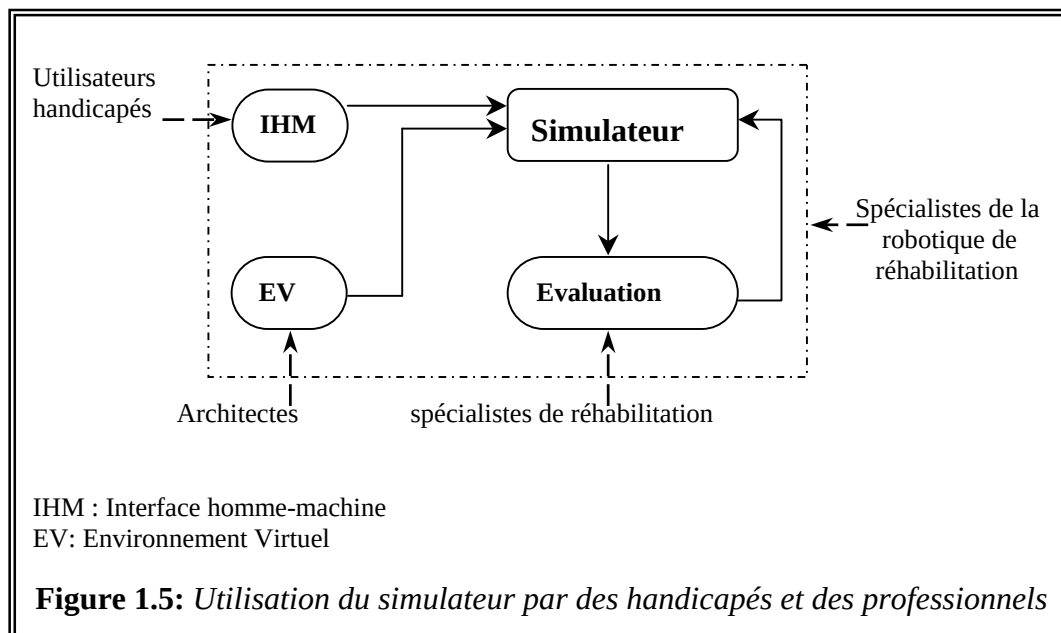
4.4 Simulation et Réalité Virtuelle

Pour cerner les problèmes réels de l'handicapé et orienter les projets de recherche de manière à mieux répondre à ses besoins, la personne handicapée doit être intégrée, lors des essais, dans le processus de conception [Nad 00] des systèmes d'assistance. Des essais sont aussi nécessaires pour l'entraînement à la conduite des fauteuils roulants électriques. Cependant, les essais dans des situations réelles nécessitent une préparation matérielle lourde et peuvent causer un danger aux handicapés ; de cela vient l'idée d'utiliser des outils de RV pour réaliser des tests en toute sécurité.

Un système de simulation d'un fauteuil roulant électrique traditionnel ou même intelligent est un bon support d'entraînement pour l'handicapé moteur. De ce fait, les tests effectués par l'handicapé permettent d'acquérir des réflexes sur un environnement virtuel, de lui assurer (ainsi qu'à son entourage) plus de sécurité [Des 98] dans la phase d'entraînement, et de réduire le taux d'incidents lors des essais sur site réel.

5. Simulateur à base de Réalité Virtuelle

Le simulateur à base de réalité virtuelle, que nous développons, est adressé à quatre catégories de personnes comme le montre la figure 1.5 :



- Aux handicapés moteurs et spécialement aux enfants handicapés dès leur naissance : le simulateur est alors un système d'entraînement à la conduite de fauteuil roulant électrique utilisant la technologie de réalité virtuelle.

- Aux spécialistes de robotique de réhabilitation : une base de simulation permet d'étudier et de valider des architectures de contrôle (pour avoir un fauteuil roulant semi-autonome ou autonome) et d'améliorer les marges de sécurité en proposant des systèmes de perception. De plus, elle offre une base d'étude et de développement des moyens d'accès et de contrôle (des IHM).
- Aux spécialistes de réhabilitation : le simulateur est un outil permettant l'évaluation des habiletés de contrôle, de perception, de mémorisation visuelle et de décision. Le spécialiste choisit le programme de formation convenable à l'handicapé, et ce selon son degré d'handicap, son âge, ses connaissances préalables acquises...etc.
- Aux architectes : ce simulateur à base de RV est un moyen pour étudier et valider des plans de constructions. Ces derniers sont soit des espaces publics, où la prise en compte de la situation des handicapés est importante, soit des modèles d'appartements et maisons à la demande des handicapés.

6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique de projets qui illustrent l'utilité de la robotique et de la réalité virtuelle dans l'assistance aux handicapés moteurs.

L'utilisation d'un simulateur pourrait être une solution adéquate pour aider les professionnels comme les handicapés (conception, contrôle, perception, aménagement d'environnements, entraînement...). La RV en tant que base de simulation permet de dépasser plusieurs limites des simulateurs classiques.

La réalisation de notre simulateur fait appel à différents types de modèles :

- modèles **géométrique et cinématique du fauteuil**,
- modèle de **capteur ultrasonore**,
- modèle d'**environnements**.

Comme l'opérateur humain va contrôler son fauteuil virtuel dans un environnement virtuel, une émulation d'une **interface homme-machine** est essentielle dans le développement de notre simulateur.

Le prochain chapitre traite la partie robotique de ce projet. Nous présentons une modélisation cinématique d'un fauteuil roulant électrique en tant que robot mobile à roues. Ensuite, une analyse générale des IHM utilisées pour la conduite des fauteuils roulants sera faite, suivie d'une description plus détaillée de l'interface que nous allons émuler dans notre projet.

CHAPITRE 2 : FAUTEUIL ROULANT ELECTRIQUE. MODELISATION CINEMATIQUE ET CONTROLE

1. Introduction
2. Cinématique et notion d'espace de configuration
 - 2.1 Notion d'espace de configuration
 - 2.2 L'Holonomie et la non-holonomie
 - 2.3 Fauteuil roulant électrique en tant qu'un robot différentiel
3. Modèle Cinématique en Configuration (MCC)
 - 3.1 Différents types de roues
 - 3.2 Plates-formes mobiles à roues
4. Modèle cinématique : cas d'un fauteuil roulant électrique
5. Interface Homme-Machine
 - 5.1 Contrôle à base de Switch Scanning
 - 5.2 Description de Barnsley Wheelchair Interface (BWI)
6. Contrôle manuel d'un fauteuil roulant électrique
7. Conclusion

Résumé :

Ce chapitre regroupe la modélisation de deux éléments utilisés dans la simulation de la conduite d'un fauteuil roulant électrique. La modélisation cinématique du fauteuil est déduite en appliquant le principe de l'espace de configurations. Le deuxième élément concerne l'Interface homme-machine, qui assure la communication entre l'utilisateur et son fauteuil roulant. Le contrôle se fait selon les compétences de l'handicapé à travers les différentes technologies. Parmi les interfaces disponibles, nous avons choisi une interface de type Switch Scanning (BWI), sachant qu'elle représente le moyen de contrôle manuel le plus utilisé par les personnes sévèrement handicapées.

1. Introduction

L'objectif de la robotique de réhabilitation est de compenser les limites des personnes handicapées. Les spécialistes de l'assistance robotisée s'adressent aux handicapés moteurs en leur proposant des moyens pour dépasser leurs problèmes de mobilité. Les chaises roulantes, les fauteuils roulants électriques classiques ou dotés de contrôle intelligent offrent aux handicapés un certain niveau de sécurité, d'indépendance et de confort.

L'utilisation d'un simulateur par un handicapé pendant la phase d'apprentissage au lieu d'un système réel permet d'améliorer :

- les compétences de l'handicapé : mémorisation, concentration, contrôle, perception, décision,...etc.
- l'indépendance ;
- la sécurité, puisqu'il se déplace dans un environnement de simulation.

Afin de simuler le déplacement d'un fauteuil roulant électrique (FRE), nous devons prendre en considération :

- *La rotation des roues et le déplacement du fauteuil.* Le FRE est un robot mobile différentiel où les deux roues arrières motrices tournent indépendamment à faibles vitesses. Pour cela, un modèle cinématique sera utilisé.
- *L'interaction entre l'utilisateur et le fauteuil roulant simulé, nommé Fauteuil Roulant Virtuel (FRV).* Cette interaction se fait par émulation de l'Interface homme-machine IHM de type Switch Scanning.
- *L'interaction entre le FRV et l'environnement de simulation (Environnement Virtuel EV),* qui englobe deux fonctionnalités:
 - o La détection de collision. Le simulateur doit éviter et empêcher toute situation de collision entre les objets de l'EV et le FRV. Cette forme d'interaction est étudiée et développée dans le chapitre 3.
 - o La simulation du processus de détection des obstacles par des capteurs ultrasoniques. Nous présenterons dans le chapitre 4 le développement d'un modèle géométrique de ce type de capteur.

2. Cinématique et notion d'espace de configuration

2.1 Notion d'espace de configuration

Ce concept est utilisé pour la première fois en robotique en 1977 par **Udupa** [Has 94]. Considérant un robot R évoluant dans un espace de travail W (Figure 2.1), on appelle *configuration de R* un ensemble de paramètres indépendants caractérisant une situation du robot R dans W . *L'espace des configurations de R* est l'espace de toutes les configurations possibles de R .

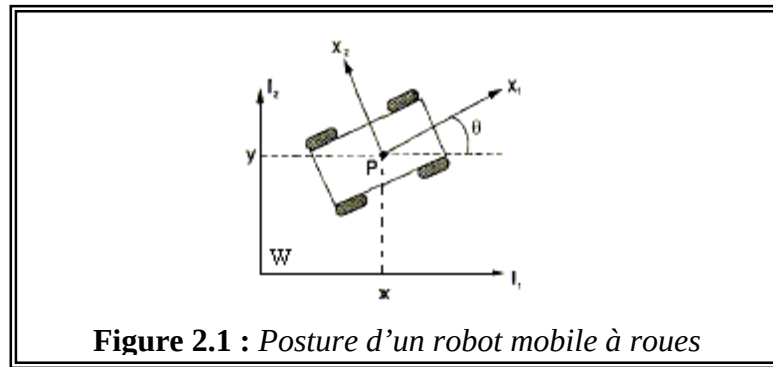
On définit une *configuration* q de R par les *coordonnées de configuration* ou *posture* de la

plate-forme mobile $\xi(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix}$, les *coordonnées angulaires* ($\beta_c(t)$ pour les roues centrées

orientables et $\beta_d(t)$ pour les roues décentrées orientables si elles existent), et les *coordonnées de rotation* $\varphi(t)$ de toutes les roues.

Sachant que x et y sont les coordonnées d'un point de référence du robot, qui est souvent le centre de gravité ou le point médian de l'axe des roues arrières, et θ l'orientation de R (i.e. l'angle entre l'axe des x du repère associé à W et l'axe principal du robot) comme montré dans la figure 2.1.

L'espace des configurations est fortement lié à l'holonomie ou la non-holonomie d'un robot mobile.



2.2 L'Holonomie et la non-holonomie

Avant de décrire ce genre de contrainte cinématique, nous devons définir ce qu'est une contrainte cinématique. Un mobile est dit soumis à une contrainte cinématique [Moa 95] si son mouvement est contraint par une liaison G , i.e. une équation exprimée au premier ordre en fonction du temps t , des paramètres de configurations q et éventuellement de leurs dérivées par rapport à t .

On distingue plusieurs situations selon la forme de G :

- Si G est une liaison différentiable, de dérivée non nulle, et de la forme $G(q,t) = 0$ (G ne dépend pas de $\dot{q}$), il est possible de substituer un des paramètres q_k par un terme dépendant de t et du reste des paramètres de q . G décrit alors un espace de dimension $n-1$, où n est la dimension de l'espace de configuration, et permet ainsi de réduire l'espace des configurations admissibles de R [Moa 95].

- Si G est une liaison d'inégalité, l'espace des configurations admissibles est limité à un sous-ensemble de l'espace de configuration de R sans toutefois diminuer sa dimension.

- Si G dépend de $\dot{q}$ et t , sous les mêmes hypothèses de différentiabilité, il est possible de ramener G sous la forme $G'(q, t) = 0$, si G est intégrable. On aura alors les mêmes remarques concernant l'espace des configurations admissibles.

Enfin, en présence de m liaisons d'égalité holonomes indépendantes, l'espace des configurations est réduit à une variété de dimension $n-m$.

– Si G est de la forme $G(q, \dot{q}, t) = 0$ et non intégrable, aucun élément q_k de q n'est substituable [Moa 95]. G est dite une contrainte non-holonyme, elle restreint l'espace des vitesses admissibles de R en gardant l'espace des configurations invariant. Enfin, on appelle un robot non-holonyme tout système mécanique soumis à une ou plusieurs contraintes non-holonomes.

Un système non holonome est caractérisé par un degré de liberté (*ddl*) inférieur à la dimension de son vecteur d'état. En pratique, la présence de liaisons non holonomes dans un mécanisme se traduit par le fait que, pour une configuration donnée du mécanisme, il existe certaines trajectoires pour lesquelles le mécanisme ne pourra pas se déplacer de façon élémentaire, car celles-ci ne correspondent pas nécessairement à des trajectoires réalisables par le robot.

Dans le cas d'un robot mobile à roues, les contraintes de *roulement sans glissement* sur le sol des roues (paragraphe 3.1.1) résultent des contraintes de non holonomie

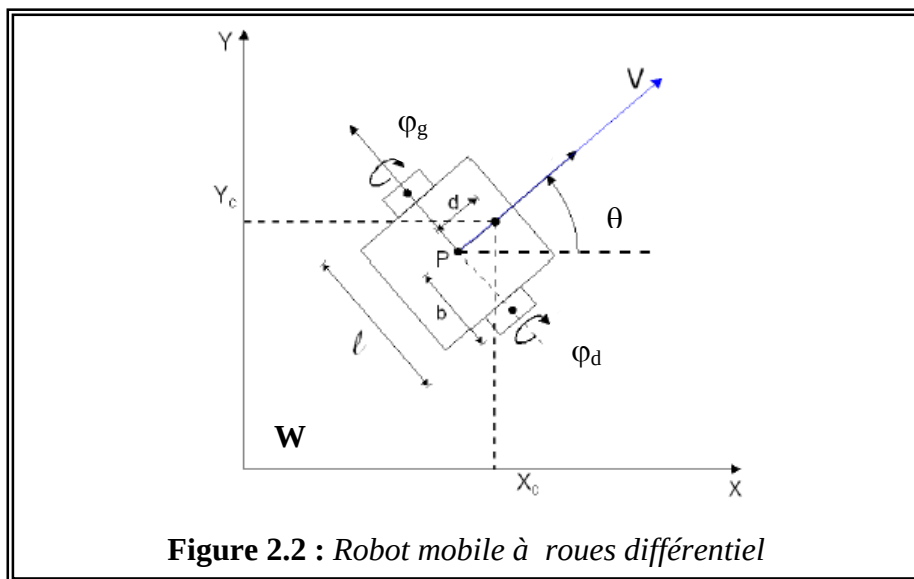
2.3 Fauteuil roulant électrique en tant qu'un robot différentiel

Le fauteuil roulant électrique, que nous allons simuler, est une plate-forme mobile montée sur deux roues fixes motrices en arrière et deux roues folles stabilisatrices à l'avant. Le fauteuil est un robot de type différentiel, chacune des roues motrices est commandée par un moteur indépendant de l'autre (Figure 2.2).

Comme hypothèses simplificatrices, on considère que durant le déplacement du robot le plan de chaque roue reste vertical et que la roue tourne autour de son axe horizontal dont l'orientation par rapport à la plate-forme peut être fixe ou variable. On suppose aussi que le contact entre la roue et la surface de déplacement est réduit à un seul point du plan.

La configuration du système est donnée par :

$$q = [x, y, \theta, \varphi_d, \varphi_g] \quad (2.1)$$



Avec :

x, y, θ : coordonnées du point de référence;

φ_d, φ_g : angles de rotation des roues fixes droite et gauche ;
 d : distance entre le point de référence et le point milieu de l'axe des roues motrices;
 r : le rayon de roue et $l=2*b$ la distance entre les deux roues;

Le système a deux degrés de liberté. En choisissant les deux vitesses des roues comme entrées de commande, le vecteur des vitesses est donné par:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_d \\ \dot{\varphi}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cb \cos(\theta) & cb \cos(\theta) \\ cb \sin(\theta) & cb \sin(\theta) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_d \\ \dot{\varphi}_g \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

avec $c = \frac{r}{2b}$ et $d = 0$ (voire la figure 2.2)

Cette modélisation est suffisante pour la simulation d'un fauteuil roulant électrique. Cependant, comme notre but est de rapprocher le fauteuil roulant virtuel du fauteuil roulant réel, il serait intéressant de calculer aussi les états de toutes les roues (orientation et rotation) qu'elles soient motrices ou folles. Pour établir un modèle cinématique complet (état de chaque roue et configuration de la plate-forme mobile), nous reprenons dans la section suivante une grande partie de la Modélisation Cinématique en Configuration (MCC) des plates-formes mobiles présentée dans [Cam 96][Bay 01], puis nous l'appliquons sur notre FRE.

3. Modèle Cinématique en Configuration (MCC)

La modélisation cinématique en configuration est une modélisation généralisée utilisée pour n'importe quelle structure à roues.

La position d'un robot mobile à roues est spécifiée par les coordonnées d'un point de référence arbitraire P comme le montre la figure 2.1. Généralement ce point correspond au centre de gravité de la plate-forme mobile :

$$\xi_p(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix}$$

La modélisation MCC se base sur les contraintes et les caractéristiques de chaque roue selon son type.

3.1 Différents types de roues

On distingue deux classes de roues : les roues *conventionnelles* et les roues *suédoises* (swedish wheels) [Cam 96]. Avant de décrire les caractéristiques de chaque type de roues, on suppose que le contact est ponctuel entre la roue et le sol.

Une roue conventionnelle est soumise à une *contrainte de roulement sans glissement*. Cela conduit à dire que:

La vitesse du point de contact est nulle et par conséquent les composantes de cette vitesse selon les plans parallèle et orthogonal au plan de la roue sont nulles.

Par contre, une seule composante de vitesse du point de contact est nulle dans le cas d'une roue suédoise. La direction de cette composante nulle n'est pas dans le plan de la roue [Bay 01].

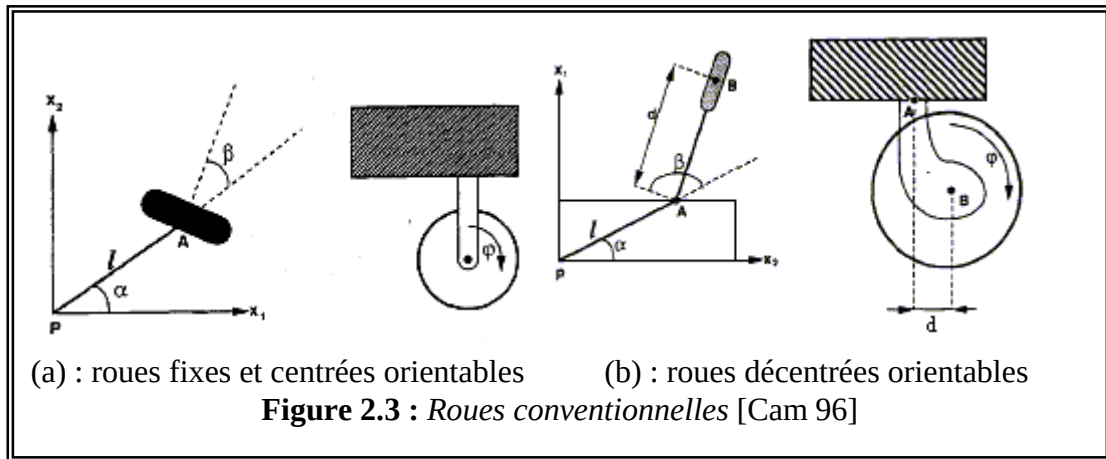
3.1.1 Roues conventionnelles et contrainte de roulement sans glissement (r.s.g)

On peut classer les roues conventionnelles selon l'axe d'orientation d'une roue :

- Les *roues fixes* dont l'axe de rotation, de direction constante, passe par le centre de la roue.
- Les *roues centrées orientables*, dont l'axe d'orientation passe par le centre de la roue.
- Les *roues décentrées orientables*, souvent appelées *roues folles* (Castor wheels), pour lesquelles l'axe d'orientation ne passe pas par le centre de la roue.

Dans cette section, la contrainte de roulement sans glissement présentée dans le paragraphe précédent sera détaillée selon chaque type de roue :

- **Roues fixes** : le centre de la roue, nommé **A**, est un point fixe (Figure 2.3a).



La position de **A** dans la base $\{\vec{x}_1, \vec{x}_2\}$ en coordonnées polaires est donnée par le rayon $PA=l$ et l'angle α . L'angle que fait l'axe de la roue avec PA , nommé β , est constant. La rotation de la roue autour de son axe est $\varphi(t)$ et le rayon de cette roue est r .

La position d'une roue fixe est caractérisée par quatre constantes (α , β , l et r) et une variable $\varphi(t)$ qui est fonction du temps.

Comme nous l'avons mentionné au paragraphe précédent, une roue fixe est soumise à une contrainte de roulement sans glissement. Cette contrainte conduit à décrire les relations montrant la nullité de la vitesse du point de contact comme suit :

Composante de vitesse sur le plan de la roue :

$$[-\sin(\alpha + \beta) \quad \cos(\alpha + \beta) \quad l \cdot \cos(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + r\dot{\varphi} = 0 \quad (2.3)$$

Composante de vitesse sur le plan vertical perpendiculaire au plan de la roue :

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad l \cdot \sin(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = 0 \quad (2.4)$$

Avec $R(\theta)$ la matrice de rotation :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Roues centrées orientables** : la description de ce type de roue est la même que celle d'une roue fixe (Figure 2.3a), seulement β dans ce cas est une fonction du temps. La position d'une roue centrée orientable est alors donnée par trois constants (α , l et r) et deux variables en fonction du temps $\beta(t)$ et $\varphi(t)$. Les contraintes sont :

$$[-\sin(\alpha + \beta) \quad \cos(\alpha + \beta) \quad l \cdot \cos(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + r \cdot \dot{\varphi} = 0 \quad (2.5)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad l \cdot \sin(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = 0 \quad (2.6)$$

- **Roues décentrées orientables (castor wheels)**: ces roues tournent selon un axe vertical qui ne passe pas par le centre de la roue (Figure 2.2b). La configuration nécessite donc plus de paramètres.

Le centre d'une roue décentrée orientable (Figure 2.2b) est **B**, la roue est attachée à la plate-forme par un arc rigide **AB**. La distance entre les deux axes verticaux qui passent par les points **A** et **B** est d . Le point **A** est défini par les coordonnées polaires l et α .

La position d'une roue décentrée orientable est donnée par quatre constantes (α , l , r , d) et deux variables en fonction du temps $\beta(t)$ et $\varphi(t)$. Les contraintes sont déduites par :

$$[-\sin(\alpha + \beta) \quad \cos(\alpha + \beta) \quad l \cdot \cos(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + r \cdot \dot{\varphi} = 0 \quad (2.8)$$

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad d + l \cdot \sin(\beta)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + d \cdot \dot{\beta} = 0 \quad (2.9)$$

3.1.2 Roues suédoises

La position de ce genre de roues est définie par quatre constantes similaires à celles des roues conventionnelles (α , β , l et r) [Cam 96] et par un paramètre supplémentaire qui est l'angle γ . Ce dernier détermine la direction de la composante nulle de la vitesse au point de contact par rapport au plan de la roue, comme illustré à la figure 2.4. Dans ce cas, on a une seule contrainte :

$$[-\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad \cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad l \cdot \cos(\beta + \gamma)] \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + r \cdot \cos(\gamma) \cdot \dot{\varphi} = 0 \quad (2.10)$$

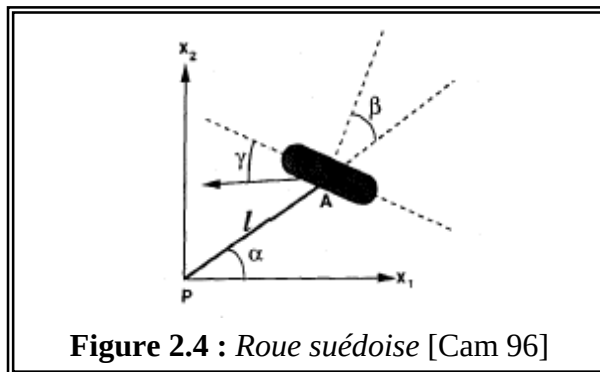


Figure 2.4 : Roue suédoise [Cam 96]

3.2 Plates-formes mobiles à roues

En général, un robot mobile est équipé de N roues, avec $N = N_f + N_c + N_d + N_s$

N_f désigne le nombre de roues fixes, N_c le nombre de roues centrées orientables, N_d le nombre de roues décentrées orientables et N_s le nombre de roues suédoises.

La configuration du robot q_p est donnée par les vecteurs :

- $\xi_p(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix}$: coordonnées de configuration ou posture de la plate-forme mobile
- $\beta_c(t)$ et $\beta_d(t)$: coordonnées angulaires pour les roues centrées orientables et pour les roues décentrées orientables, respectivement.
- $\varphi(t) = [\varphi_f(t) \quad \varphi_c(t) \quad \varphi_d(t) \quad \varphi_s(t)]^T$: coordonnées de rotation de toutes les roues.

Le nombre total des coordonnées de configuration du robot est donc $N_f + 2 \cdot N_c + 2 \cdot N_d + N_s + 3$.

Les contraintes sont données par :

$$J_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + J_2 \cdot \dot{\varphi} = 0 \quad (2.11)$$

$$C_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + C_2 \cdot \dot{\beta}_d = 0 \quad (2.12)$$

avec :

$$a) \quad J_1(\beta_c, \beta_d) = \begin{pmatrix} J_{1f} \\ J_{1c}(\beta_c) \\ J_{1d}(\beta_d) \\ J_{1s} \end{pmatrix}$$

J_{1f} , J_{1c} , J_{1d} et J_{1s} sont des matrices $(N_f \times 3)$, $(N_c \times 3)$, $(N_d \times 3)$ et $(N_s \times 3)$ décrivant les contraintes (2.4), (2.6), (2.8) et (2.10).

J_{1f} et J_{1s} sont constants, par contre J_{1c} et J_{1d} sont fonction de $\beta_c(t)$ et $\beta_d(t)$.

J_2 est une matrice constante $(N \times N)$ dont les éléments de la diagonale représentent les rayons des roues.

$$b) \quad C_1(\beta_c, \beta_d) = \begin{pmatrix} C_{1f} \\ C_{1c}(\beta_c) \\ C_{1d}(\beta_d) \end{pmatrix}, \quad C_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{2d} \end{pmatrix}$$

C_{1f} , C_{1c} et C_{1d} sont des matrices de dimensions $(N_f \times 3)$, $(N_c \times 3)$ et $(N_d \times 3)$ respectivement, dont les lignes sont déduites à partir des contraintes (2.5), (2.7) et (2.9).

C_{1f} est constante, par contre C_{1c} et C_{1d} sont des variables de $\beta_c(t)$ et $\beta_d(t)$.

C_{2d} est une matrice diagonale dont les éléments sont égaux à d , la distance entre le centre d'une roue décentrée orientable et l'axe vertical passant par le point de rotation de cette roue par rapport à la plate-forme (figure 2.3).

Dans un premier temps on se propose de présenter la notion de *commande de mobilité* de la plate-forme mobile et d'obtenir le modèle reliant la dérivée de la configuration de la plate-forme à cette commande. Pour cela, Scindons (2.12) en deux parties :

$$C_1^*(\beta_c) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = 0 \quad (2.13)$$

$$C_{1d}(\beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + C_{2d} \cdot \dot{\beta}_d = 0 \quad (2.14)$$

où $C_1^*(\beta_c) = \begin{bmatrix} C_{1f}^T & C_{1c}^T(\beta_c) \end{bmatrix}^T$

On remarque, en examinant (2.13), que $R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p$ doit appartenir au noyau de $C_1^*(\beta_c)$ [Cam 96]. Soit $\sum(\beta_c)$ une matrice de dimension $3 \cdot \delta_{mp}$, dont les colonnes forment une base de ce noyau, avec :

$$\delta_{mp} = \dim(\text{noyau}(C_1^*(\beta_c))) = 3 - \text{rang}(C_1^*(\beta_c)) \quad (0 \leq \delta_{mp} \leq 3)$$

δ_{mp} est appelé *degré de mobilité* (degree of Mobility) de la plate-forme [Bay 01].

On déduit qu'il existe un vecteur η_p de dimension δ_{mp} , tel que:

$$R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = \sum(\beta_c) \cdot \eta_p$$

donc $\dot{\xi}_p = R^T(\theta) \cdot \sum(\beta_c) \cdot \eta_p \quad (2.15)$

η_p est appelé *commande de mobilité* de la plate-forme mobile [Bay 01]. Le système d'équations (2.15) constitue le modèle cinématique en position de la plate-forme mobile, car il relie la dérivée des coordonnées de configuration, ou posture, de la plate-forme à la commande de mobilité de cette dernière.

Dans un second temps on se propose de définir les *commandes de dirigeabilité et de manœuvrabilité* de la plate-forme [Bay 01]. Pour cela, scindons (2.13) en deux parties :

$$C_{1f} \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = 0$$

$$C_{1c}(\beta_c) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p = 0$$

et posons

$$\delta_{sp} = \text{rang}(C_{1c}(\beta_c)) = N_c$$

δ_{sp} est appelé *degré de dirigeabilité* (degree of Steerability) [Cam 96]. Le *degré de manœuvrabilité* de la plate-forme est δ_{Mp} donné par :

$$\delta_{Mp} = \delta_{mp} + \delta_{sp}$$

Supposons que l'orientation des roues centrées soit commandée en vitesse par ζ_p (de dimension $N_c = \delta_{sp}$) appelé *commande de dirigeabilité* de la plate-forme mobile.

On définit $u_p = \begin{bmatrix} \eta_p \\ \zeta_p \end{bmatrix}$ de dimension δ_{Mp} comme étant la commande de manœuvrabilité de la plate-forme mobile [Bay 01]. On obtient :

$$\dot{\beta}_c = \zeta_p \quad (2.16)$$

$$\dot{z}_p = B_p(\theta, \beta_c) \cdot u_p \quad (2.17)$$

avec $z_p = \begin{bmatrix} \xi_p \\ \beta_c \end{bmatrix}$ et $B_p(\theta, \beta_c) = \begin{bmatrix} R^T(\theta) \cdot \Sigma(\beta_c) & 0 \\ 0 & I_{Nc} \end{bmatrix}$

Rappelons que la configuration du robot mobile est:

$$q_p = \begin{bmatrix} \varphi \\ z_p \\ \beta_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi \\ \xi_p \\ \beta_c \\ \beta_d \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

D'après (2.11) et (2.12) on déduit :

$$\dot{\varphi} = -J_2^{-1} \cdot J_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p \quad (2.19)$$

$$\dot{\beta}_d = C_2^{-1} \cdot C_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p \quad (2.20)$$

En regroupant (2.16), (2.17), (2.18), (2.19) et (2.20), on obtient :

$$\dot{q}_p = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\xi}_p \\ \dot{\beta}_c \\ \dot{\beta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_2^{-1} \cdot J_1(\beta_c, \beta_d) \Sigma(\beta_c) & 0 \\ R^T(\theta) \cdot \Sigma(\beta_c) & 0 \\ 0 & I_{Nc} \\ -C_2^{-1} \cdot C_1(\beta_c, \beta_d) \Sigma(\beta_c) & 0 \end{bmatrix} \cdot u_p \quad (2.21)$$

qui prend la forme générique suivante :

$$\dot{q}_p = S_p(\theta, \beta_c, \beta_d) \cdot u_p \quad (2.22)$$

Ceci constitue le modèle cinématique en configuration d'un robot mobile à roues.

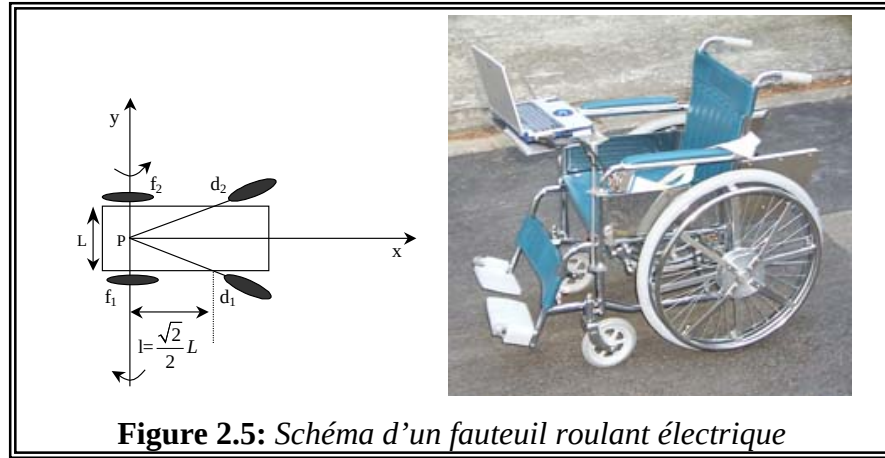
Remarques :

- Lorsque $N_c = 0$, la commande de mobilité suffit pour déterminer ses vitesses généralisées et donc pour déterminer la commande du point de vue cinématique.
- Lorsque $N_c \neq 0$, la détermination des vitesses généralisées dépend de η_p , mais aussi de l'action sur les roues centrées orientables. Par conséquent, la commande cinématique nécessite la synthèse de la commande de mobilité et de dirigeabilité [Bay 01].

4. Modèle cinématique : cas d'un fauteuil roulant électrique

Un fauteuil roulant électrique est un robot mobile à roues. Il est équipé de deux roues fixes en arrière et de deux roues folles décentrées orientables sur le devant, comme le montre la figure 2.5. Les roues sont numérotées comme suit :

- f_1 : roue arrière droite (fixe) ;
 f_2 : roue arrière gauche (fixe) ;
 d_1 : roue avant droite (décentrée orientable) ;
 d_2 : roue avant gauche (décentrée orientable) ;



Les valeurs des paramètres géométriques des roues sont résumées dans le tableau Tab 2.1.

Roues	α	β	φ	l	r	d
f_1	$-\pi/2$	0	φ_1	$\frac{L}{2}$	r_1	-
f_2	$\pi/2$	0	φ_2	$\frac{L}{2}$	r_1	-
d_1	$-\pi/4$	β_{d1}	φ_3	$\sqrt{2} \cdot \frac{L}{2}$	r_2	d
d_2	$\pi/4$	β_{d2}	φ_4	$\sqrt{2} \cdot \frac{L}{2}$	r_2	d

Tab 2.1: paramètres géométriques d'un fauteuil roulant électrique

Le calcul du modèle cinématique complet est décrit dans l'annexe A. Nous ne montrons ici que le résultat de l'application de la modélisation en configuration dans le cas d'un fauteuil roulant électrique. Notons que la différence entre les deux schémas (Figure 2.2 et Figure 2.5) réside dans le choix du sens positif de rotation des roues fixes.

$$\dot{q}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) \\ -\frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) \\ -\frac{r_1}{2} \cos(\theta) & \frac{r_1}{2} \cos(\theta) \\ -\frac{r_1}{2} \sin(\theta) & \frac{r_1}{2} \sin(\theta) \\ -\frac{r_1}{L} & -\frac{r_1}{L} \\ \frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1})\right) & -\frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1})\right) \\ \frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d2})\right) & -\frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1})\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

5. Interface Homme-Machine

L'interface homme-machine est indispensable pour assurer la communication entre l'handicapé moteur et son fauteuil roulant. Ce dernier peut être conduit par une variété de méthodes d'accès (appelés aussi outils de contrôle) [Yan 00]. La commande se fait soit par un accès direct au fauteuil soit à travers un calculateur.

Le Joystick est l'interface de premier choix dans la plupart des projets [Sim 99] [Aser 03]. Un ou plusieurs boutons sont souvent ajoutés au Joystick comme le montre le système TinMan [Mil 99].

Un système d'assistance doit être adapté pour qu'il puisse être utilisé par différentes catégories d'handicapés. Pour construire des systèmes utilisables par des personnes incapables d'utiliser le joystick, certains projets de recherche ont investi dans la proposition d'autres outils de contrôle, citons par exemple le contrôle par reconnaissance de la parole [Maz 01] [Sim 97], par suivi de mouvement de l'œil [Maz 01], par suivi de mouvement de la tête à l'aide d'un traqueur ou d'une caméra [Maz 01], et par un switch (single switch scanning) permettant la sélection d'une action désirée à travers un menu [Bou 96] [Yan 00].

L'utilisation d'un simulateur d'un FRE se fait via des IHM. Rappelons les avantages d'un tel simulateur à base de RV :

- Accélérer l'apprentissage de la navigation par un fauteuil roulant électrique [Com 98].
- Assurer une sécurité pendant la phase d'entraînement [Com 98][Des 98] et augmenter la sensation d'indépendance.
- Améliorer la motivation par l'introduction des aspects de jeu dans le processus d'apprentissage surtout pour l'enfant handicapé [Mar 01] [Des 98].
- Aider l'enfant à éviter la grande difficulté et le temps perdu dans la mise en relation entre les tests d'entraînement et la vie réelle. La simulation d'une tâche elle-même dans un EV permet en plus à l'enfant de pratiquer et d'améliorer ses compétences.

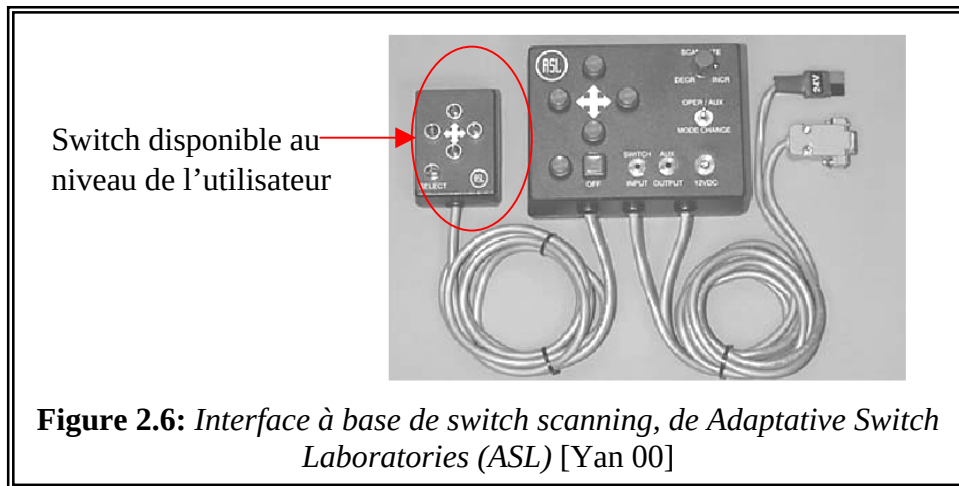
La plupart des chercheurs ont utilisé un joystick pour le contrôle d'un simulateur à base de RV [Nin 01] [Inm 97] [Har 00] [Des 98] [Sim 97]. Seulement *Roast et al.* [Roa 02] ont investi dans la conception d'une interface virtuelle (Virtual Wheelchair Interface) par l'émulation de BWI (Barnsley Wheelchair Interface). Cette dernière est une IHM constituée d'un seul commutateur permettant la sélection de l'action désirée pendant le balayage de toutes les tâches possibles.

Un des avantages majeurs du soft utilisé pour le balayage du menu est qu'il peut être généralisé pour que la sélection soit faite par d'autres moyens de contrôle tels que le suivi de l'œil [Yan 00] ou de la tête.

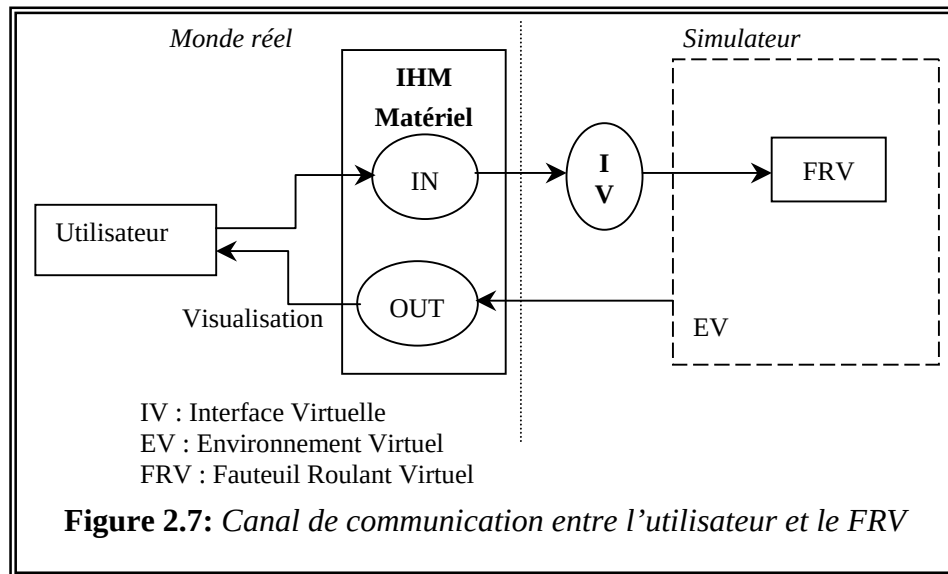
Le but de ce travail est de concevoir un système d'entraînement des enfants sévèrement handicapés. Pour cela, nous allons émuler une interface de type Switch scanning soit une BWI.

5.1 Contrôle à base de Switch Scanning

Le menu utilisé dans l'IHM de type « Switch Scanning » classique est constitué de quatre items, chacun correspondant à une direction (Figure 2.6). La tâche de l'utilisateur est de regarder le défilement du menu et de sélectionner l'action désirée en activant un switch. La procédure du balayage (scanning) consiste à défiler ces directions en séquence : devant, droite, gauche et arrière [Yan 98]. Le choix d'une direction à suivre et de l'arrêt du scan se fait par l'appui et le relâchement du switch respectivement. Lorsque l'handicapé relâche le switch, le balayage recommence à partir du « devant ». Notons que pendant le balayage, chaque direction est activée pendant deux secondes [Yan 98].



Yanco et al. [Yan 98] [Yan 00] ont proposé une interface graphique émulant ce switch, et permettant de contrôler une chaise roulante électrique par un PC. Leur objectif n'est pas l'aide à l'entraînement, mais plutôt la conception d'un support de développement d'un système robotisé aidant à la conduite manuelle.

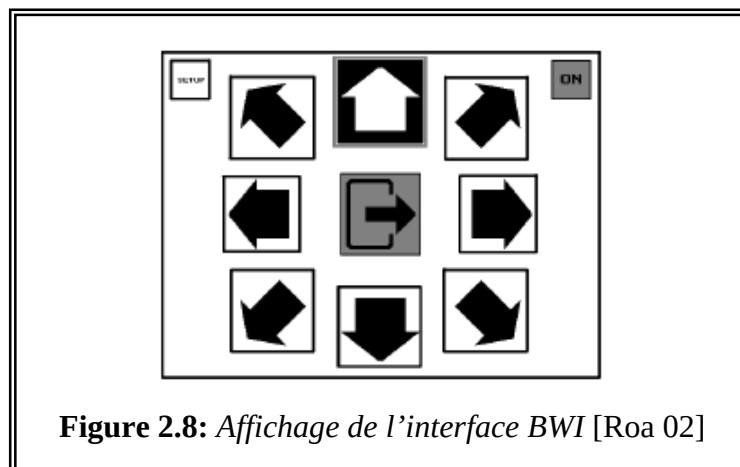


Au sein de ce projet, l'IHM utilisée est une émulation de l'interface BWI (Barnsley Wheelchair Interface). La figure 2.7 montre l'architecture de notre système d'entraînement et la position de l'IHM. Le simulateur est constitué d'un Fauteuil Roulant Virtuel (FRV), d'une interface virtuelle (IV) et d'environnements virtuels (EV).

Le paragraphe suivant présente la description de tous les éléments et les options introduits dans BWI.

5.2 Description de Barnsley Wheelchair Interface (BWI)

C'est une interface exécutée sur un PC, connecté à un fauteuil roulant électrique. Lorsque la direction désirée est indiquée et que l'handicapé appuie sur le switch, le FRE suit la direction choisie. Lâcher le switch conduit à arrêter le mouvement et à recommencer le balayage des actions.



L'icône centrale « Exit » permet de quitter l'application. « Setup » donne l'accès à une fenêtre d'options permettant la reconfiguration de BWI (Figure 2.8).

L'avantage majeur de BWI est qu'il est développé par des spécialistes de réhabilitation. Cette interface offre la possibilité de configurer et reconfigurer la méthode de balayage, ce qui aide

les spécialistes à mieux évaluer les compétences de l'handicapé et permet aux utilisateurs de changer la configuration à volonté.

L'ordre suivi pour continuer le scan après le relâchement du switch peut être fait par le redémarrage de la séquence, en activant « devant », ou par la poursuite du balayage en activant le prochain item de la séquence :

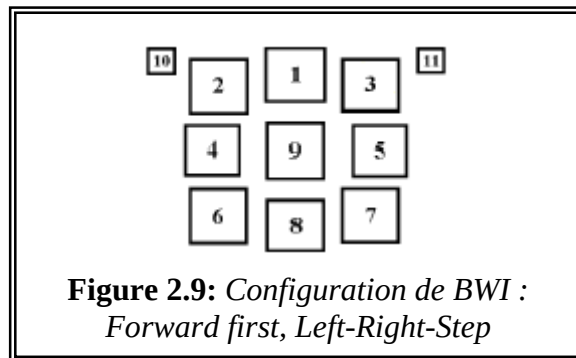
Forward Bias : ramène la sélection immédiatement au « devant » après l'activation de n'importe quelle direction.

Non Forward : continuer la séquence par la sélection de l'item suivant.

Selon la configuration du mode de scan, l'activation des icônes commence par « devant » et suit une des séquences :

Highly Systematic : soit dans la direction des aiguilles d'une montre ou dans la direction inverse.

Forward first, Left-Right-Step : allant de « devant » vers « arrière », en basculant entre gauche et droite. La séquence Forward first, Left-Right-Step est : {devant, devant gauche, devant droite, gauche, droite, arrière gauche, arrière droite, arrière} (Figure 2.9).

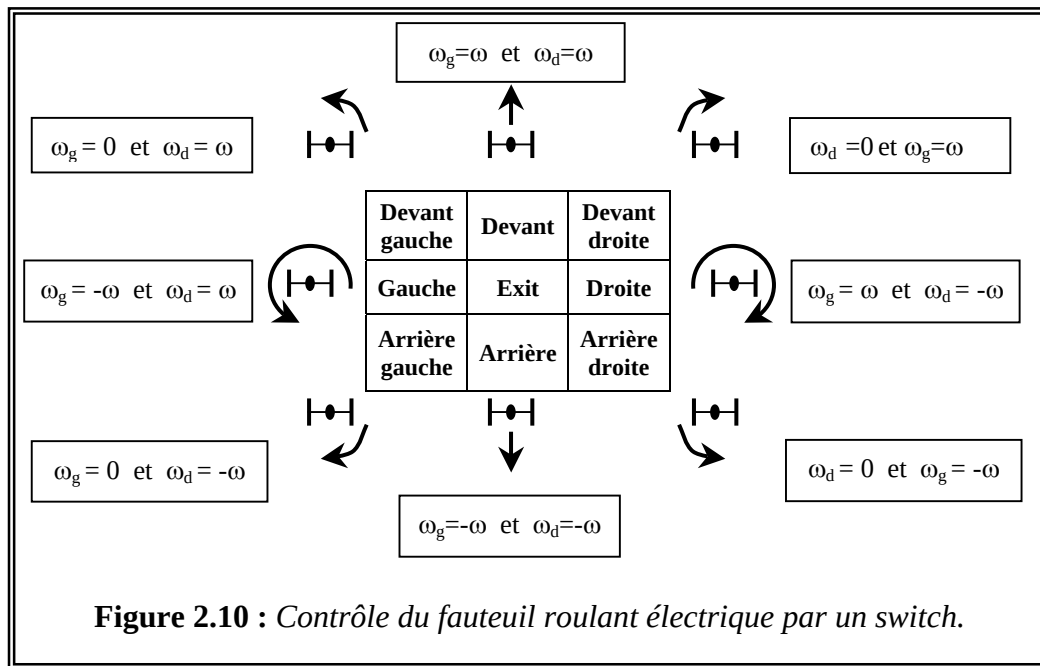


Le choix de l'ordre de la séquence peut être prédit par l'utilisateur et modifié à volonté.

Le contrôle par un switch est difficile surtout pour les enfants. Par conséquent, une étape d'entraînement est nécessaire avant de l'utiliser pour se déplacer dans un environnement réel encombré. De plus, la proposition d'une assistance robotisée au contrôle manuel permet d'améliorer la mobilité de l'handicapé, et d'assurer la sécurité de tout le système [Yan 98].

6. Contrôle manuel d'un fauteuil roulant électrique

A la lumière de tout ce qui a été écrit sur la modélisation cinématique du fauteuil roulant électrique, la commande se fait en vitesse par le contrôle des rotations des deux moteurs.



L'interface BWI, décrite auparavant, est utilisée pour le contrôle manuel. La figure 2.10 illustre l'action générée suite à la sélection de n'importe quel item du menu, que ce soit dans le monde réel ou virtuel.

Lorsque l'icône « devant » ou « arrière » est activée et que l'utilisateur presse son switch, les deux roues tournent avec la même vitesse et dans la même direction ($\omega_g = \omega_d$), ce qui conduit à une translation. Si l'icône « droite » ou « gauche » est sélectionnée, les deux roues tournent avec la même vitesse mais selon des directions opposées ($\omega_g = -\omega_d$), ce qui conduit à une rotation du fauteuil autour de l'axe qui passe par le milieu des deux roues arrières. Dans les autres situations $|\omega_g| \neq |\omega_d|$, le fauteuil roulant effectue simultanément une rotation et une translation.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude d'un fauteuil roulant électrique en tant que robot mobile différentiel à roues. La première partie concerne la modélisation cinématique du fauteuil roulant.

Pour avoir un bon entraînement et gagner la confiance de l'utilisateur au simulateur à base de réalité virtuelle, une représentation du fauteuil roulant proche du réel est nécessaire. A cet effet, nous avons repris l'étude de Campion [Cam 96] pour établir un modèle cinématique en configuration du FRE, tout en tenant compte des états des différentes roues, ce qui est souvent négligé dans les études des robots mobiles.

La deuxième partie de ce chapitre concerne le contrôle du FRE de manière manuelle à travers différents moyens d'accès selon les capacités des handicapés. Nous nous sommes intéressés à l'étude d'une interface basée sur le Switch scanning.

Ce genre d'outils est souvent considéré comme le meilleur moyen de contrôle pour les personnes sévèrement handicapées, cependant leur utilisation est un peu difficile surtout pour les enfants et les personnes âgées. Afin de dépasser ce point d'ombre, nous avons créé une Interface Virtuelle par émulation d'un Switch scanning utilisée dans l'entraînement des handicapés dans un monde virtuel. Le prochain chapitre traitera les éléments de base de la réalité virtuelle ainsi que de la création et de la gestion de l'environnement virtuel.

CHAPITRE 3 : REALITE VIRTUELLE ET SIMULATION

1. Introduction
2. Définition de La Réalité virtuelle
 - 2.1. Objectifs de RV
 - 2.2. Définition fonctionnelle
 - 2.3. Définition technique
3. Historique de RV
4. Matériels utilisés en RV
 - 4.1. Le casque de réalité virtuel (HMD)
 - 4.2. Les « data gloves »
 - 4.3. Les combinaisons
 - 4.4. Les technologies de retour de force
 - 4.5. Générateur de son tridimensionnel
5. Réalité Projetée
6. Applications de la RV
 - 6.1 Interactions avec un monde simulant la réalité :
 - 6.2 Interactions avec un monde imaginaire ou symbolique
7. Environnement virtuel et simulation
 - 7.1 Classification des environnements virtuels
 - 7.2 Description de l'EV
 - 7.3 Détection de Collision
8. Conclusion

Résumé :

Dans ce chapitre, nous présentons une description et les éléments de base de la technologie de la Réalité Virtuelle. Puis nous abordons la partie la plus importante de notre travail, qui est la description des Environnements Virtuels et la simulation de leur évolution. L'implémentation d'un module de détection de collision est nécessaire dans le développement d'un simulateur de mouvement (un simulateur d'un fauteuil roulant électrique dans notre cas). Le chapitre contient les principaux algorithmes, ainsi que quelques résultats obtenus.

1. Introduction

De nos jours, la robotique de réhabilitation a fortement évolué en répondant aux besoins croissants des handicapés en général et des handicapés moteurs en particulier. Se posent donc les questions suivantes :

- Comment développer des systèmes d'assistance en introduisant le contrôle partagé entre le robot et son utilisateur ?
- Comment concevoir un système efficace d'entraînement capable d'aider les handicapés à se mouvoir d'une façon libre et indépendante ?
- Comment répondre aux besoins des spécialistes de la réhabilitation, surtout en ce qui concerne l'évaluation des compétences des handicapés ?

La réponse se trouve certainement dans la Réalité Virtuelle et principalement dans les simulateurs à base de cette technologie. Ils permettent aux handicapés, et surtout aux enfants, de pratiquer et de répéter l'exécution des différentes tâches nécessaires à leur indépendance.

Le simulateur à base de RV que nous allons développer regroupe trois éléments principaux :

- Fauteuil Roulant Virtuel (FRV) ;
- Environnements Virtuels (EVs) ;
- Interface Virtuelle (IV) ;

La modélisation et la création de ces entités fait l'objet de ce chapitre. Une description des concepts de base concernant la RV en tant que nouvelle technologie (définition, matériels, application...) nous semble nécessaire avant d'aborder les aspects software utilisés dans notre simulateur.

La description de la géométrie et de l'interaction entre des objets virtuels nous conduit à choisir un algorithme de Détection de Collision qui est un problème très important en simulation.

2. Définition de La Réalité virtuelle

Le terme "Réalité virtuelle" vient de l'expression anglaise "Virtual Reality" introduite aux États-Unis dans les années 80 par Jaron Lanier [Fus 02].

On trouve dans la littérature des définitions qui englobent la finalité de la réalité virtuelle, ses fonctions, ses applications et les techniques sur lesquelles elle repose. Certains vont jusqu'à définir la réalité virtuelle par l'image réductrice qui a été véhiculée dans les médias : une personne équipée d'un Visiocasque⁽¹⁾ avec différents moyens de commandes pour interagir (gant de données, manette, volant, etc.) et reliées à un ordinateur. On ne définit pas l'informatique par son matériel : clavier, écran, souris; ni en parlant de ses fonctions : calculs, raisonnement logique, mémorisation; ni par ses types d'applications.

Nous avons choisi la définition de Arnaldi [Arn 02] de IRISA- France:

¹ Visiocasque : traduction de « Head mounted display »

"La réalité virtuelle est un ensemble de techniques permettant de reproduire le plus fidèlement possible, par calcul temps réel, le comportement d'entités 3D en interaction entre elles et avec le monde réel composé entre autres d'un ou de plusieurs utilisateurs exploitant de multiples canaux sensoriels"

2.1. Objectifs de RV

L'objectif de la réalité virtuelle selon [Fus 02] est *de permettre à une ou à plusieurs personnes des activités sensori-motrices et donc mentales dans un monde artificiel, qui est soit **imaginaire**, soit une **simulation de certains aspects du monde réel**.*

Dans le premier cas, **monde imaginaire**, la virtualité peut être exploitée soit pour créer un monde irréel (art, sciences fictions,...), soit pour représenter des concepts ou des entités symboliques, associés au monde réel simulé. Ceux-ci permettent à l'utilisateur de se faire une meilleure représentation mentale de son environnement.

Par exemple :

1. Nous pouvons ajouter dans le monde virtuel des informations schématiques pour l'utilisateur, lui permettant de mieux saisir la structure d'un mécanisme ou la planification d'une tâche à accomplir.
2. Nous pouvons représenter la potentialité d'un danger par le simple changement de couleur d'objets, virant au rouge.

Il ne faut donc pas parler du **degré de réalisme**, ce terme laissant supposer qu'au mieux le virtuel est identique au réel. Cependant, il est préférable de parler du domaine de transposition entre les mondes réel et virtuel, qui est l'intersection de deux ensembles :

1. L'ensemble de phénomènes réels.
2. L'ensemble de phénomènes représentés virtuellement.

Tandis que beaucoup d'efforts sont concentrés sur des technologies pour augmenter le sens du réalisme dans des environnements virtuels, beaucoup d'applications ont du succès bien qu'elles utilisent des techniques abstraites.

Dans le deuxième cas, **une simulation de certains aspects du monde réel**, ceux-ci sont à déterminer lors de la conception de l'application. L'idée naïve de vouloir voir, si possible, le comportement du monde virtuel entièrement identique à celui du monde réel est absurde. Si on veut créer une réalité "virtuelle", c'est bien dans le but de modifier des aspects de la "vraie" réalité. Par exemple :

1. On souhaite former du personnel dans un environnement virtuel pour leur éviter des risques réels.
2. On souhaite étudier un futur produit, un prototype virtuel, qui n'est donc pas encore matérialisé.

Il ne faut pas penser que c'est seulement à cause de difficultés techniques que la simulation virtuelle est différente de la réalité. Mais réciproquement, si une simulation ne représente que certains phénomènes physiques réels, la réalité virtuelle permet de simuler différemment ces phénomènes :

- Des phénomènes physiques, invisibles par les sens humains (radioactivité, infrarouges, champ magnétique, ...etc.), peuvent être représentés virtuellement.
- La représentation visuelle des objets peut être plus compréhensible si ceux-ci sont affichés en fil de fer à une échelle plus grande que nature.

2.2. Définition fonctionnelle

La définition de Piaget 95 [Fus 02] présentée lors du congrès de Montpellier en 1995 sur la RV consiste à dire:

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

2.3. Définition technique

Les techniques de la réalité virtuelle sont fondées sur **l'interaction en temps réel** avec un **monde virtuel**, à l'aide **d'interfaces comportementales** permettant **l'immersion "pseudo-naturelle"** de(s) l'utilisateur(s) dans cet environnement.

1. **L'interaction en temps réel** est obtenue si l'utilisateur ne perçoit pas de décalage temporel entre son action sur l'environnement virtuel et la réponse sensorielle de ce dernier.
2. Une des deux problématiques majeures de la RV est la modélisation du **monde virtuel**, la seconde étant celle de l'interfaçage entre l'être humain et ce monde virtuel.
3. La RV implique l'exploitation des interfaces matérielles, que Fush les appelle **interfaces comportementales** [Fus 02]. Elles sont composées d'interfaces sensorielles et d'interfaces motrices. Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme sur le monde virtuel. Le nombre et le choix de ces interfaces dépendent de l'objectif poursuivi par l'application.
4. L'utilisateur doit être en **immersion pseudo-naturelle** le plus efficacement possible dans le monde virtuel. Néanmoins l'immersion ne peut être naturelle car nous avons appris à agir naturellement dans un monde réel et non virtuel.

Ces quatre conditions sont rarement réalisables parfaitement par rapport à l'application envisagée, c'est plutôt un objectif à atteindre. Par contre, elles doivent être en partie réalisées [Fus 02], même modestement, pour parler d'un système basé sur les techniques de réalité virtuelle.

3. Historique de RV

La Réalité virtuelle est plus ancienne qu'on ne le pense généralement. En 1966 [Zac 00] Ivan Sutherland du MIT⁽¹⁾ a construit un HMD (Head Mounted display) qui a été connecté à un ordinateur.

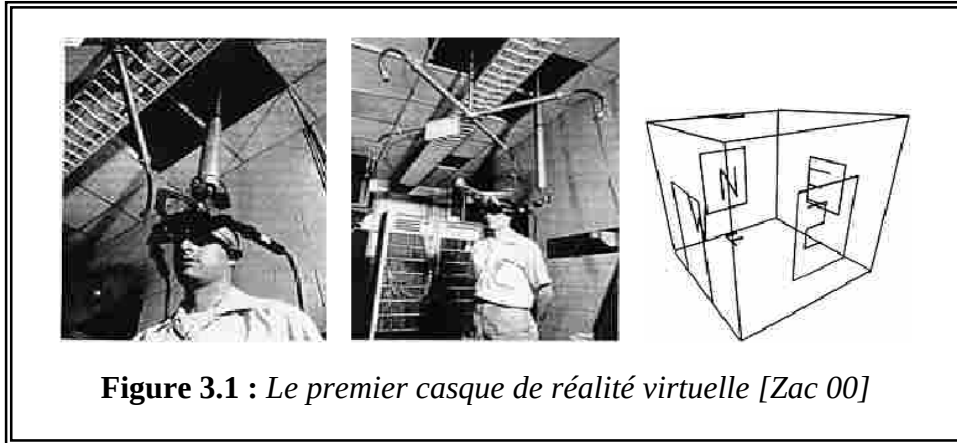


Figure 3.1 : Le premier casque de réalité virtuelle [Zac 00]

Cet HMD est connu sous le nom "the sword of Damocles : l'épée de Damoclès"⁽²⁾ [Koo 94]. Cela est dû au fait que le système est accroché à des barres fixées au plafond. Ces barres ont été utilisées pour suivre la trace du mouvement de la tête et soutenir l'énorme poids de l'HMD. L'HMD comporte un petit tube cathodique pour montrer des images monoscopiques. Par la suite, il a été amélioré par un affichage des images stéréoscopiques, constituées chacune de 3000 lignes avec un défilement de 30 frames par seconde. De plus, il est muni d'un grand "traqueur" (mécanisme à ultrasons) pour capter les mouvements de la tête. En utilisant des gyroscopes sur l'HMD, le visiocasque devient plus stable et moins lourd.

En 1982, une nouvelle interface comportementale apparaît : le gant de données (data gloves) [Fus 02]. Ce dispositif mesure les déplacements des doigts et de la main de l'opérateur, lui permettant ainsi de communiquer avec l'ordinateur. En réalité, c'est avec l'apparition des data-gloves que le terme "Virtual Reality" a été introduit [Zac 00]. Par la suite, la gamme des dispositifs a été élargie en développant d'autres outils matériels. Au début des années 90, le grand public prend connaissance des premiers développements de la réalité virtuelle grâce aux médias.

4. Matériels utilisés en RV

Nous représentons dans cette section quelques interfaces comportementales IHM (Interface Homme Machine) de nature matérielle. Notons que les dispositifs dédiés à des applications à base de RV se décomposent en deux catégories : sensorielle et motrice, et qu'un seul

¹ MIT : Massachusetts Institute of Technology, USA

² **Damoclès** : familier du tyran de Syracuse, Denys l'Ancien (IV^e s. av. J. -C.). Pour lui faire comprendre combien le bonheur des rois est fragile, Denys, au cours d'un banquet, fit suspendre au-dessus de la tête de Damoclès une lourde épée, attachée à un crin de cheval. [Bibliorom]

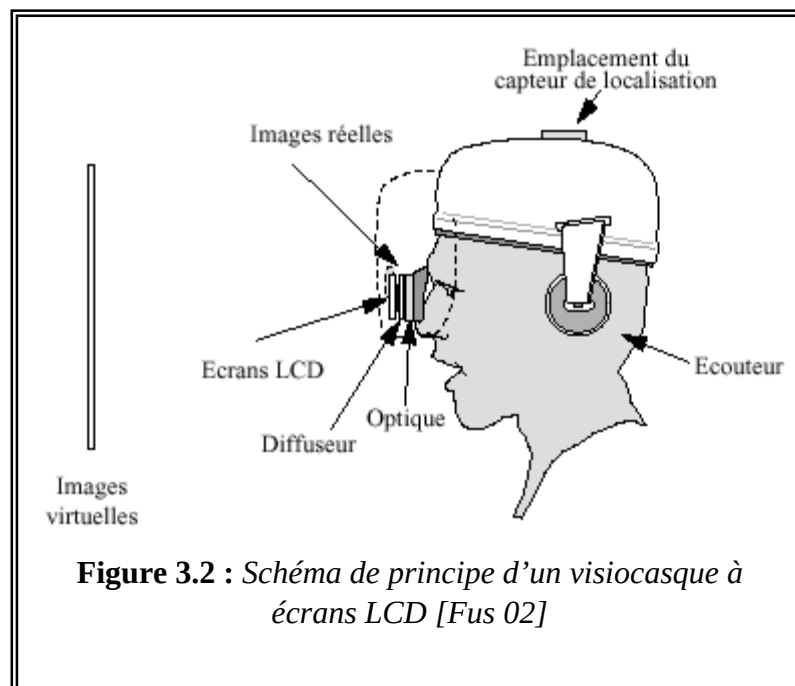
dispositif peut avoir les deux fonctions. Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons certains outils matériels pour déduire leur utilité et leur fonctionnement.

4.1. Le casque de réalité virtuel (HMD)

Le casque de vision a deux fonctions : il permet l'immersion et la navigabilité dans le monde virtuel. Le premier objectif est atteint par la disposition d'écrans situés très près des yeux, munis d'optiques spéciales afin d'éviter la fatigue visuelle et d'agrandir l'image pour qu'elle remplisse la plus grande partie du champ de vision de l'utilisateur, ce qui donne l'impression d'être à l'intérieur de la scène reconstituée en images de synthèse. La fabrication de casques exige des qualités de poids, d'ergonomie (aisance de porter le casque), de design, et surtout d'optique (résolution des images, stéréoscopie, ...). De plus, ces dispositifs sont généralement reliés au ordinateur par un fil, ce qui restreint la liberté de mouvement de l'utilisateur.

La seconde fonction du visiocasque, « *la navigabilité* », est assurée grâce à un dispositif de capteurs permettant de traquer les mouvements de la tête de l'utilisateur. Les capteurs sont utilisés pour détecter l'orientation et la vitesse de ces mouvements. L'analyse de ces données permet de déterminer l'image à afficher. Cette dernière occupe la totalité de l'angle de vision dont nous disposons. De plus, la position de la tête de l'utilisateur étant transmise en temps réel au système, cette technique garantit l'immersion et la navigation dans le monde virtuel puisqu'elle donne l'impression de diriger l'image par le regard. Ce casque peut être muni d'un dispositif sonore générant des sons en 3 dimensions.

Les écrans d'un visiocasque peuvent être à tube cathodique CRT (Cathode Ray Tube) ou à cristaux liquides (Liquid Crystal Display) LCD (Figure 3.2).



4.2. Les « data gloves »

Un « data glove » ou encore gant de capture, dispose de nombreux capteurs, reliés par de la fibre optique, qui permet au système de "voir" les mouvements de la main de l'utilisateur. Celui-ci voit de même sa main en image de synthèse, celle-ci reproduisant les mouvements de l'original. Le "data glove" permet aussi de commander la machine. Il est donc possible de désigner des objets, d'exécuter des programmes, exactement comme avec le pointeur d'une souris.

Le gant peut aussi servir à se mouvoir. Ainsi, il est possible de se diriger en montrant du doigt la direction à suivre.



Figure 3.3 : data gloves model 5

Produit par Greenleaf Medical Systems / VPL Research, Utilise des fibres optiques montées sur un gant léger et élastique en Lycra

4.3. Les combinaisons

Elles fonctionnent selon le même principe que les "data gloves", toutefois, dans ce cas, les capteurs sont disposés sur tout le corps, ce qui permet à une personne d'entrer entièrement dans le monde virtuel.

Néanmoins, elles ont plusieurs inconvénients. En premier lieu, leur prix est encore prohibitif. De plus, le nombre de capteurs qu'elles contiennent est encore limité, ce qui limite la précision de la modélisation du corps de l'utilisateur.



Récepteur portable

Figure 3.4 : Une combinaison de Ascension Technology
(La personne porte le récepteur portable)

4.4. Les technologies de retour de force

Les technologies de retour de force (ou "force feedback") permettent de stimuler le 3^{ème} sens (après la vue et l'ouïe), le toucher. On peut ainsi rencontrer une résistance, lors de certaines actions.

Ces technologies sont encore peu intégrées dans les "data gloves" et autres combinaisons, mais elles existent tout de même au travers d'accessoires dédiés. Ceux-ci peuvent être d'une haute précision, comme les dispositifs utilisés en chirurgie, ou bien à bas prix et accessibles au plus grand nombre. On trouve ainsi sur le marché du jeu plusieurs fabricants qui proposent des périphériques à retour de force, comme Microsoft avec ses joysticks et volants.

On peut d'ailleurs remarquer d'une part l'apparition récente de cette technologie sur le marché grand public et d'autre part la baisse de prix de ces produits, qui conduisent à penser que dans quelques années de nombreux périphériques d'entrée seront à retour de force.

Cette technologie est de toute manière essentielle à l'impression de réalisme et apporte un plus indéniable à l'immersion de l'utilisateur dans l'univers virtuel.

4.5. Générateur de son tridimensionnel

Le son est un élément important du réalisme. On peut penser, par exemple, au bruit des pas. Pour pouvoir être correctement "rendu" ⁽¹⁾, le son doit être synthétisé en même temps que son événement générateur. Par exemple, un pas en avant doit déclencher instantanément le bruit correspondant. Le son doit de plus être placé au bon endroit dans l'espace.

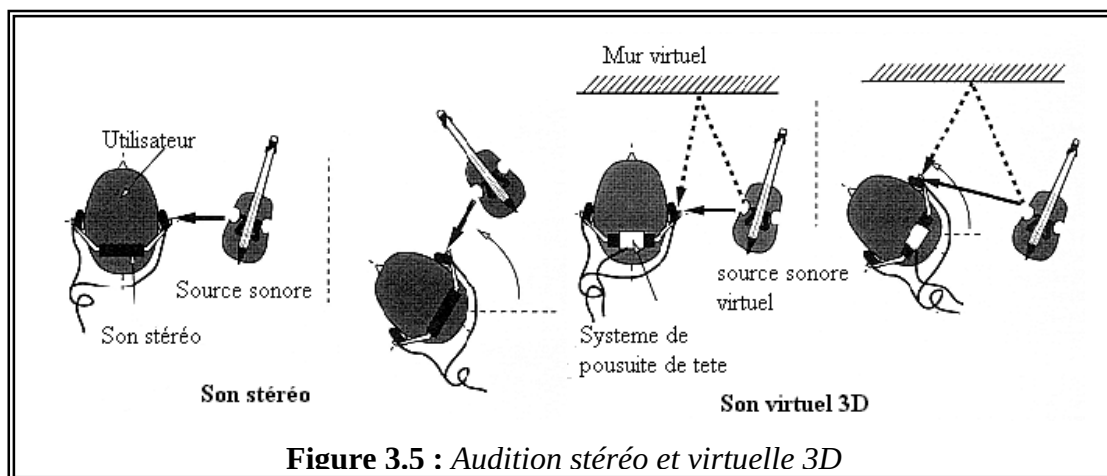


Figure 3.5 : Audition stéréo et virtuelle 3D

La simulation de l'acoustique dans un environnement ouvert ou fermé (acoustique d'une chambre par exemple) est un véritable problème. Certaines applications considèrent une stéréoscopie 2D, où l'utilisateur perçoit le même son quelque soit sa position et son orientation. D'autres considèrent l'audition 3D (Figure 3.5) où le son perçu par l'opérateur dépend de ses mouvements. La prise en compte des objets virtuels dans le calcul du son virtuel permet à l'utilisateur de distinguer la source du son et d'entendre les différents échos.

¹ Le rendu est le processus de calcul des détails du son avant de les générer.

5. Réalité Projetée

Dans la Réalité Projetée (Projection-based VR [Zac 00]), l'individu n'est pas encombré par des HMD, écouteurs, data-gloves, ou d'autres dispositifs, mais il agit seulement avec l'image projetée. Cette technique a été développée par Myron Krueger et utilisée dans son **videoplace**. Les individus pourraient agir réciproquement avec l'environnement (avec des objets telle qu'une "créature imaginaire") ou entre eux. Notons que le degré de réalisme est inférieur à celui des techniques de réalité virtuelle avec HMD.

Il est important de signaler la différence entre la *Réalité Projetée* et la *Réalité Virtuelle Projective*. Le concept de la réalité virtuelle projective [Khe 02] est basé sur une représentation complète de l'opérateur humain au sein de l'environnement virtuel. Il est donc clair que l'IHM, dans ce cas, joue un rôle important dans l'immersion de l'opérateur [Khe 02].

Une comparaison entre la RV utilisant un HMD et la Réalité projetée est présentée dans Tab 3.2 :

Type	Avantages	Inconvénients
RV immersive	➤ Meilleure immersion ➤ Presque aucune violation stéréoscopique ➤ Prise en compte des mouvements de l'utilisateur ➤ Possibilité de percevoir l'EV (application vers l'utilisateur)	➤ Une basse résolution ➤ Grande altération à cause de la faible distance entre l'œil et le système optique
Réalité Projetée (RP)	➤ Grande résolution ➤ Champ de vision large ➤ Un degré important de présence, car l'utilisateur n'est pas complètement immergé dans le monde virtuel (il peut voir son entourage réel) ➤ Simple à utiliser et à partager entre plusieurs utilisateurs (via Internet...)[Zac 00]	➤ Possibilité de violation stéréoscopique ➤ Demande d'un grand espace, surtout si la projection se fait sur plusieurs murs (support de projection)

Tab 3.1 : Comparaison entre Réalité Projetée et RV immersive.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, le degré de réalisme et d'immersion dépend des exigences de l'application. Au sein de ce projet, nous avons choisi la réalité projetée pour les raisons suivantes :

- La RP permet de développer un système ayant un degré de réalisme plus important d'un côté (résolution élevée, ...), moins complexe et moins cher d'un autre côté.

- Un des objectifs des projets de réhabilitation comme le nôtre, est d'améliorer l'indépendance des gens handicapés et spécialement des enfants pendant la phase d'entraînement. Pour cela nous avons choisi la RP car l'utilisation d'un visiocasque et son réglage exige l'intervention d'une autre personne.
- L'HMD est caractérisé par un angle de vue réduit, ce qui va limiter la résolution de l'environnement visualisé. Par conséquent, cela empêche l'handicapé d'améliorer ses capacités sensorielles afin d'éviter un risque quelconque.

6. Applications de la RV

On peut considérer que tous les domaines de la vie courante peuvent et pourront un jour utiliser la RV. Le tableau Tab3.2 montre la classification de Heslsel et Doherty présentée dans [Oth 00]. Avant de mentionner les applications de la RV, nous signalons les capacités de l'image de synthèse dans le traitement des différents problèmes. Premièrement, l'image libérée des contraintes de temps et d'espace permet de visualiser l'infiniment petit et l'infiniment grand, quelle que soit la durée du phénomène, de la nanoseconde jusqu'au milliard d'années. Elle permet non seulement de l'expliquer mais également de faire apparaître les failles des modèles existants et de tenter d'y porter une solution.

Domaine	Nombre d'application
Simulation	73
Visualisation	67
Education	66
Apprentissage	65
Divertissement	65
Art graphique	65
Armement	52
Aérospatial	50
Téléprésence	50
Médecine	49
Architecture	46
Audio-visuel	41
Télérobotique	39
Communication	31

Tab 3.2 : Classification des applications utilisant la RV [Oth 00]

Les applications de la RV se trouvent être à un rythme qui ne peut que s'accélérer : simulation de tremblements de terre, simulation des climats actuels ou préhistoriques, simulation des effets de réchauffement de la planète...etc.

L'analyse et la modélisation des phénomènes, de même que la synthèse des images, sont désormais indissociables.

L'image est également un outil de découverte, elle permet de visualiser le concret tel que les entités invisibles à l'œil, un champ magnétique par exemple. Elle peut aussi faire surgir des formes imprécises qui, bien que présentes dans une équation, ne pouvaient être compréhensibles.

Se basant sur la définition technique de la RV, l'environnement virtuel peut être, selon l'application, une **simulation réaliste** (proche du réel) ou un **monde imaginaire**. Nous pouvons donc classer les domaines d'application en considérant ces deux types d'environnements.

6.1 Interactions avec un monde simulant la réalité :

L'objectif de ces applications est d'offrir une simulation de certains aspects de la réalité pour mieux les comprendre.

Certes, le simulateur de vol [Arn 02] reste sans doute auprès du grand public l'application principale la plus commune des simulateurs basés sur la réalité virtuelle. Il est cependant essentiel de percevoir que le marché de la simulation offre des débouchés beaucoup plus vastes.

- **Activité virtuelle** : le lieu et le temps étant indifférents, l'utilisateur agit physiquement sur une scène virtuelle [Fus 02] pour ses loisirs ou pour une formation incluant un apprentissage physique. *Exemples : Jeux, sports et loisirs virtuels, formation virtuelle dans les secteurs suivants : médecine, chirurgie, rééducation, armée, industries aéronautique et spatiale, formation dans des universités...*
- **Transfert virtuel** : le temps étant indifférent, l'utilisateur est transporté dans un autre lieu ayant une scène simulant le réel pour son travail, ses loisirs, ses activités quotidiennes. *Exemples : Tourisme virtuel, étude dans un monde microscopique.*
- **Télé-association virtuelle** : l'association de plusieurs personnes dans un lieu virtuel permet à celles-ci de se rencontrer [Fus 02]. *Exemples : Jeux et sports d'équipes virtuels, téléconférence avec outils de réalité virtuelle, campus virtuel, cité virtuelle.*
- **Conception virtuelle** : La réalité virtuelle permet de concevoir et d'expérimenter de futurs produits, on parle donc d'un prototype virtuel. Elle ajoute une dimension supplémentaire par rapport à la CAO conventionnelle, il s'agit de tester et de faire évaluer un produit par le public avant de le fabriquer. *Exemples : Architecture virtuelle, conception de produits industriels...*
- **Aménagement virtuel** : même possibilité que pour la conception virtuelle, mais concernant l'aménagement d'espaces. *Exemples : Conception d'environnements urbains ou paysagistes, ergonomie d'un poste de travail, d'un atelier...*
- **Exposition virtuelle** : Il s'agit dans cette application de recréer et d'observer des objets qui n'existent plus. *Exemples : études de produits anciens ou d'œuvres d'art détruites.*
- **Événement virtuel** : en recréant d'anciens événements, on permet à l'utilisateur de mieux les appréhender [Fus 02]. *Exemples : études d'anciennes civilisations, visite d'anciens lieux, reconstitution virtuelle d'événements (enquêtes policières, catastrophes...).*

6.2 Interactions avec un monde imaginaire ou symbolique

L'objectif de ces applications est de proposer à l'utilisateur soit des mondes imaginaires à des fins ludiques ou artistiques, soit des mondes symboliques pour concrétiser des phénomènes et des concepts.

- **Navigation symbolique** : l'utilisateur peut se déplacer dans un réseau, un arbre ou un schéma graphique, représentant symboliquement des structures réelles [Fus 02].

Exemple : navigation dans un réseau de communication ou un circuit électronique.

- **Entités symboliques ajoutées à une simulation réaliste** : L'utilisateur navigue dans un monde simulé réaliste en examinant des entités symboliques ajoutées (couleur rouge pour représenter un danger, schémas, graphes pour planifier une tâche à accomplir...)
- **Science-fiction virtuelle** : l'utilisateur est projeté dans un monde irréel et futur.

Exemple : jeux virtuels

- **Passé imaginaire virtuel** : l'utilisateur est projeté dans un monde irréel, placé dans le passé.

Exemples : oeuvre virtuelle, jeux virtuels.

7. Environnement virtuel et simulation

La simulation par ordinateur est la discipline qui consiste à concevoir un modèle d'un système réel ou théorique et à exécuter l'évolution de ce modèle en fonction du temps sur un calculateur numérique. L'objectif primordial de n'importe quelle simulation est de prendre une décision correcte en analysant ces résultats.

Avant d'aborder la conception d'un simulateur à base de RV, nous devons répondre à la question suivante : **Quand et pourquoi devons-nous utiliser un simulateur au lieu d'un système réel ?**

Plusieurs facteurs sont considérés pour répondre à cette question. Citons par exemple la facilité de réalisation de la tâche, réduction du temps nécessaire pour l'établir, facilité de simuler les caractéristiques nécessaires du système réel (actionneurs, capteurs...), et les dangers que peut causer une tâche réelle. L'importance de ces facteurs dépend étroitement de l'application envisagée.

Le but poursuivi dans le projet qui nous concerne est d'entraîner des handicapés moteurs à utiliser leurs fauteuils roulants électriques. Les facteurs motivant le développement d'un simulateur sont :

- Le simulateur assure la sécurité de l'handicapé par la réduction de toutes sortes de risques qu'il peut rencontrer pendant l'utilisation d'un fauteuil roulant réel.
- Il est possible, en offrant différentes structures de l'environnement de navigation, d'éviter le besoin d'un espace large et son aménagement dans le monde réel.
- Un simulateur d'entraînement permet à l'handicapé de répéter différentes tâches et d'évaluer ses compétences.
- Une étude économique montre que les simulateurs peuvent être utilisés à domicile, permettant ainsi le dépassement de certaines contraintes telles que le coût d'une formation dans un centre de réhabilitation. Le déplacement de l'handicapé peut s'avérer un grand problème surtout s'il habite loin du centre.
- La psychologie de l'enfant plaide en faveur de l'enseignement par le jeu, car ce dernier permet d'améliorer sa concentration et ses capacités de mémorisation. Par conséquent,

l'entraînement sous forme d'un jeu est très accessible et efficace pour les enfants handicapés.

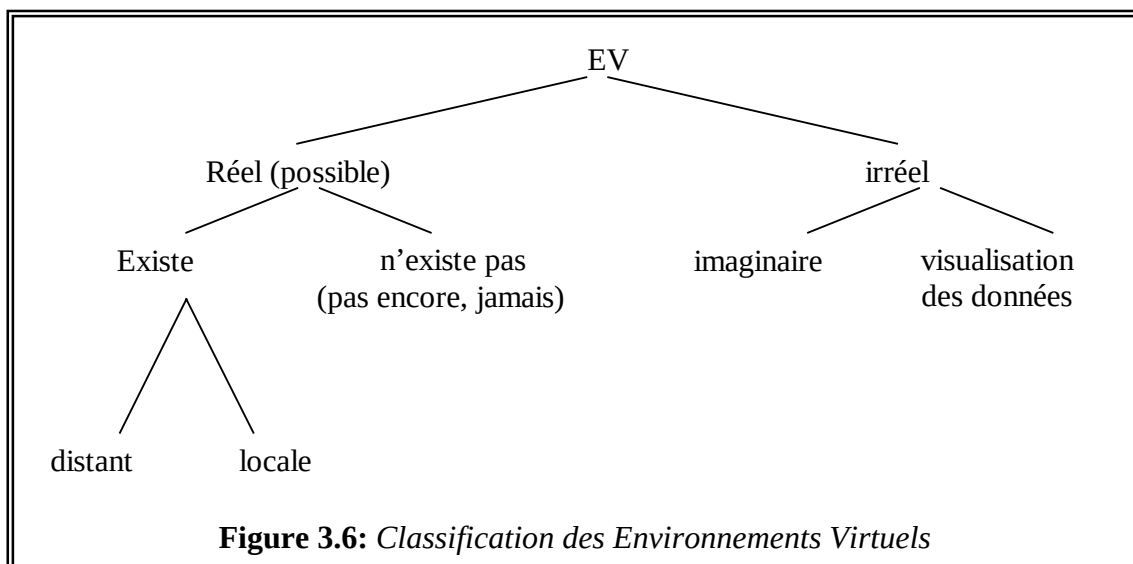
Avant de le simuler, l'environnement virtuel doit être décrit au préalable (le fauteuil virtuel est inclus dans le monde virtuel).

Nous présentons dans ce paragraphe la classification de l'EV, les méthodes utilisées pour la création de ce dernier, l'interaction entre les entités virtuelles constituant cet environnement, ainsi que l'interaction entre l'utilisateur et ces entités. Enfin, nous présentons la détection de collision qui est le point le plus important dans un simulateur à base de RV.

7.1 Classification des environnements virtuels

L'EV peut être classé selon plusieurs critères, à savoir (Figure 3.6) :

- s'il est réel ou imaginaire
- s'il existe déjà (une image d'un environnement réel), peut-être construit, ou s'il est impossible de le construire réellement.
- par l'accessibilité de l'environnement : distant ou local.



7.2 Description de l'EV

Dans cette partie nous allons décrire les méthodes de modélisation d'environnement virtuel. La description de celui-ci doit être spécifiée au moins par deux classes :

- Modélisation géométrique : c'est une représentation des objets virtuels constituant l'environnement.
- Modélisation de l'interaction :
 - i. entre les entités virtuelles (collision, éclairage, cinématique,...)
 - ii. entre l'utilisateur et l'EV soit par une navigation et exploration d'un monde virtuel, ou par la manipulation des objets virtuels.

7.2.1 Modélisation géométrique

La représentation d'objets du point de vue de leurs propriétés géométriques (et non pas fonctionnelles) est connue sous le terme *modélisation géométrique*. Il s'agit donc d'une partie de la modélisation d'un objet ne prenant pas en compte ses aspects physiques, excepté sa forme.

Dans une modélisation géométrique, les objets virtuels peuvent être :

- ★ Créés par un utilisateur humain à travers une interface graphique (GUI : Graphic User Interface) comme AutoCad, Blender et 3DStudioMax...
- ★ Spécifiés par une application logicielle via une interface de programmation (API : Application Programming Interface) comme Direct3D (sous Windows), Glide et OpenGL ⁽¹⁾. Il existe aussi des outils descriptifs comme SUN's Java3D et VRML97.

Il est évident que la modélisation d'un solide indéformable est différente de celle d'un fluide compressible. L'objet le plus simple est bien sûr le solide non déformable. Cet objet ne peut subir que des transformations rigides telles que la translation et la rotation. L'avantage principal d'utilisation d'objets solides est de n'avoir à calculer que leur position dans l'espace avant d'effectuer leur rendu.

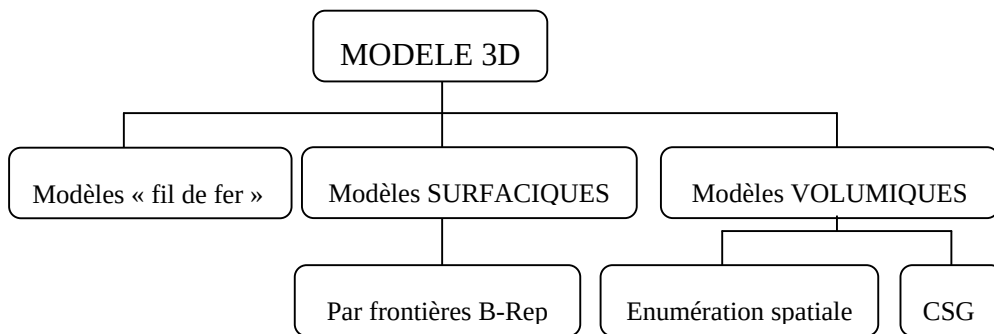


Figure 3.7 : Exemples des modèles 3D

Il existe trois techniques fondamentales pour modéliser géométriquement des objets en trois dimensions : représentation en fil de fer, surfacique et volumique (figure 3.7).

Dans notre application, l'environnement virtuel est constitué d'objets solides. Pour cela nous allons présenter uniquement les méthodes de modélisation géométrique de ce genre d'objets.

a. Modèle fil de fer

Le modèle " fil de fer" ("Wire Frame") retient de l'objet les coordonnées des **sommets** et les **arêtes** les joignant. La figure 3.8 montre les ambiguïtés qui peuvent découler de son utilisation : ne connaissant que les arêtes et les sommets, plusieurs interprétations d'un même modèle peuvent être faites. D'autre part, les calculs géométriques [Mal 99] (dimensions, volumes) sont difficiles, voire impossibles car les informations concernant les surfaces des

¹ Plusieurs bibliothèques sont développées à base d'OpenGL. Citons par exemple : Mesa, SGI's OpenInventor, SGI's Performer et SGI's OpenGL Optimizer.

objets sont inexistantes. Bien que rarement utilisée, cette méthode de modélisation a l'intérêt de permettre une création et une visualisation rapide de la scène, car elle permet une modification aisée des points et des arêtes. La place mémoire utilisée est très faible relativement aux autres modèles.

Le terme "fil de fer" est également utilisé lorsqu'une représentation volumique/surfacique fait apparaître des arêtes.

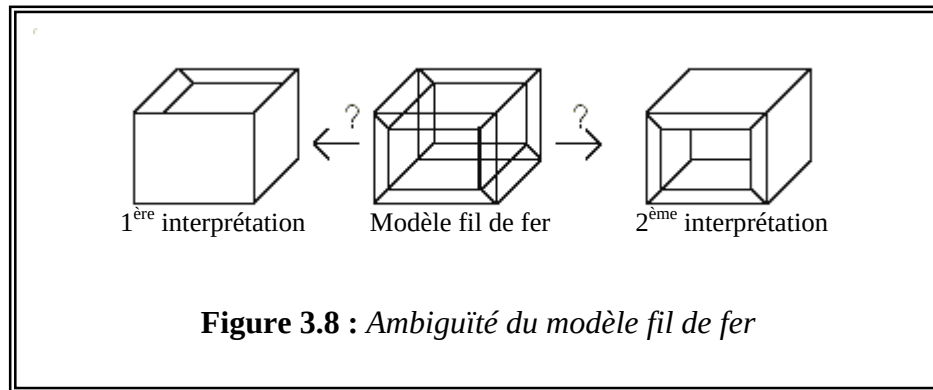


Figure 3.8 : Ambiguïté du modèle fil de fer

b. Modèle surfacique

Dans la modélisation surfacique, l'objet est représenté par ses bords. Cette représentation est dite représentation par frontières ou B-REP (Boundary REPresentation). Le principe de cette modélisation est de représenter les solides par leurs frontières en décrivant les faces, arêtes et sommets qui bordent ces solides. Le modèle le plus simple de représentation par frontières est le modèle polygonal, qui est constitué d'une liste de faces, chacune étant représentée par une liste ordonnée d'arêtes (l'ordre permet de définir l'orientation de chaque face).

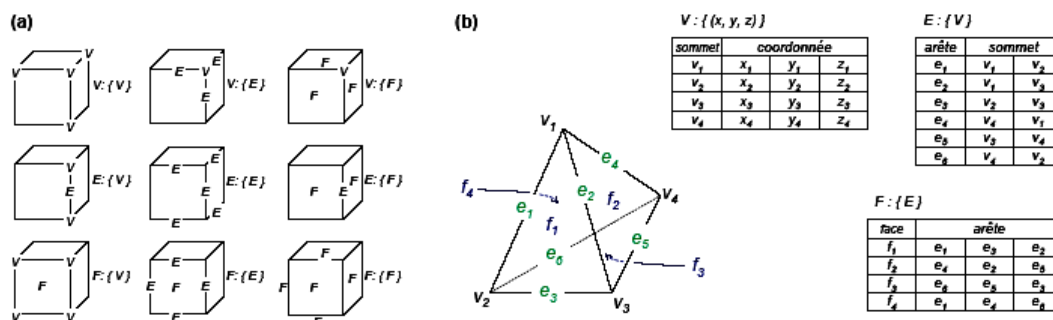


Figure 3.9 : Représentation surfacique d'un tétraèdre [Agb 02]

- (a) Relations topologiques entre faces, arêtes et sommets.
- (b) Tétraèdre avec le modèle fil de fer associé (table $E : \{V\}$) et le modèle polygonal associé (tables $E : \{V\}$ et $F : \{E\}$)

Dans le modèle polygonal, les faces triangulaires sont fréquemment utilisées pour représenter la frontière de l'objet [Agb 02] car, contrairement aux faces polygonales quelconques, elles offrent l'avantage d'être toujours planes.

Cette forme de représentation fournit deux types d'informations : géométrique (paramètres nécessaires pour décrire une face, un segment et un point) et topologique (l'adjacence et l'incidence des points, segments et des faces).

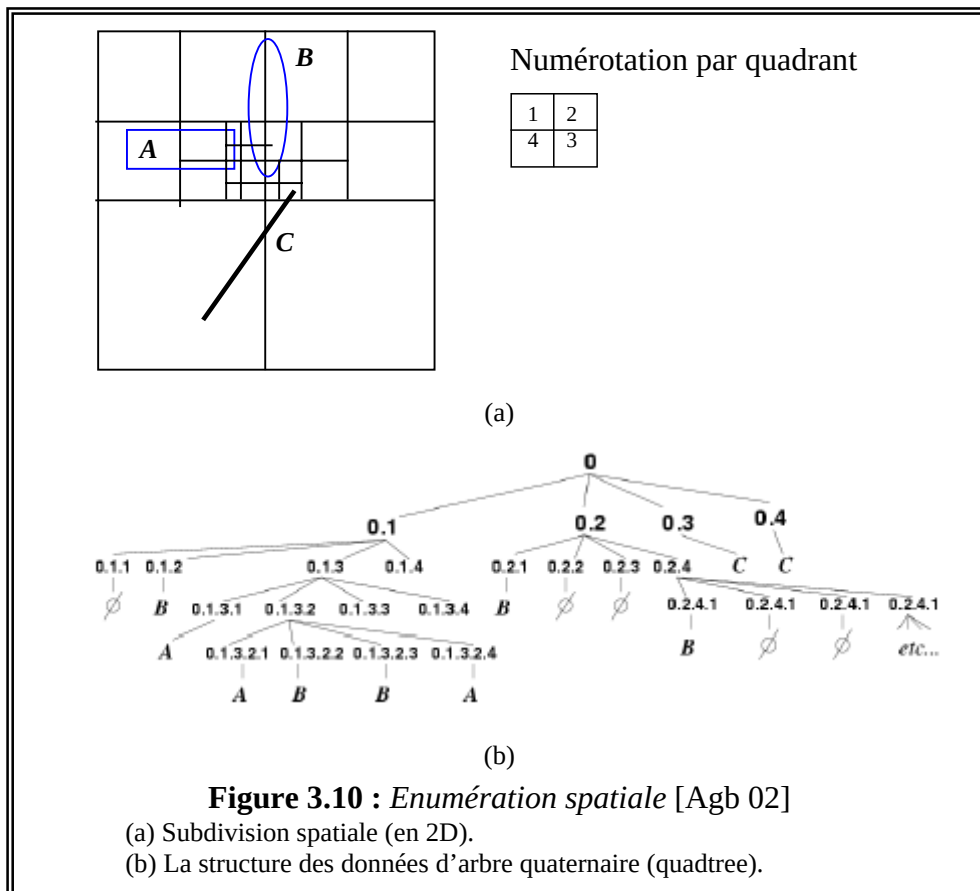
c. Modèle volumique

Dans ce type de modélisation, l'objet est défini par le volume qu'il occupe. On distingue deux types de modèles : l'énumération spatiale et la représentation C.S.G. (Constructive Solid Geometry).

c.1 Enumération spatiale

On désigne par ce terme toutes les représentations fondées sur une discrétisation de l'espace en éléments de volumes identiques ou non [Agb 02]. L'espace 3D est discrétisé de manière récursive en cubes élémentaires par exemple. Si un cube n'est pas homogène, il est découpé en huit cubes plus petits (*octree*) et ainsi de suite. On obtient une description arborescente dont les feuilles sont des cubes homogènes (*voxels*) comme le montre la figure 3.10.

L'inconvénient majeur de cette méthode [Mal 99] est la place mémoire importante occupée qui est proportionnelle à la finesse de la représentation (taille du voxel). En revanche, l'application de cette méthode à la modélisation d'environnement pour la navigation de robots mobiles est plus plausible.



c.2 Construction géométrique solide (CSG)

L'idée de base de cette méthode consiste à construire un objet complexe en combinant plusieurs formes élémentaires. Le modèle constructif du solide est donc décrit par un arbre de construction où les feuilles sont des solides de base [Lin 93][Zac 00] (parallélépipède, cylindres, cône, tore,...) et les nœuds sont des opérateurs booléens (opérateurs d'union, d'intersection et de différence, comme illustrés à la figure 3.11). Les opérateurs booléens regroupent aussi les transformations rigides (translation, rotation et mise à l'échelle).

Les opérations booléennes ne sont pas spécifiques aux modèles CSG puisqu'elles décrivent la manière dont les objets sont construits, indépendamment de leur représentation interne.

Il faut noter que le modèle par partitionnement spatial (énumération spatiale) est une structure de données permettant de décrire la forme finale des objets conçus, indépendamment des gestes constructifs, alors que dans les modèles CSG [Agb 02], les opérateurs booléens sont inclus directement dans la représentation.

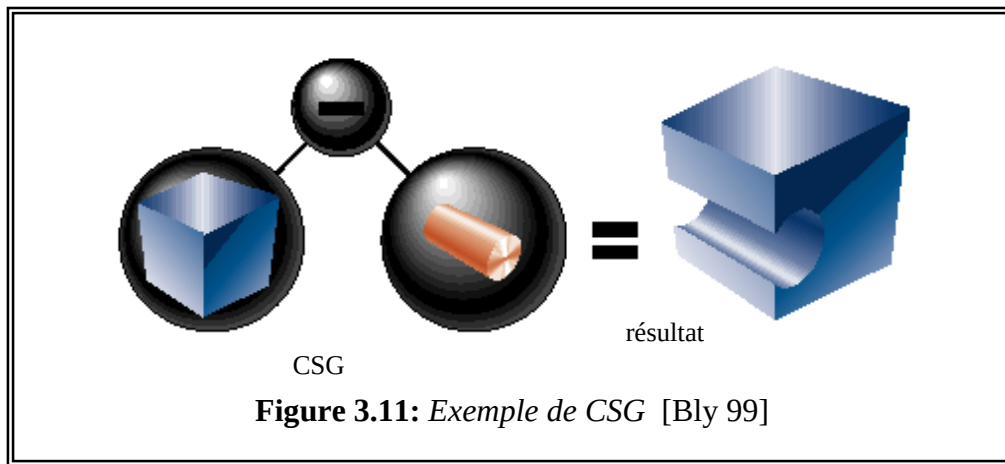


Figure 3.11: Exemple de CSG [Bly 99]

7.2.2 Comportement des objets et Interface Homme Machine

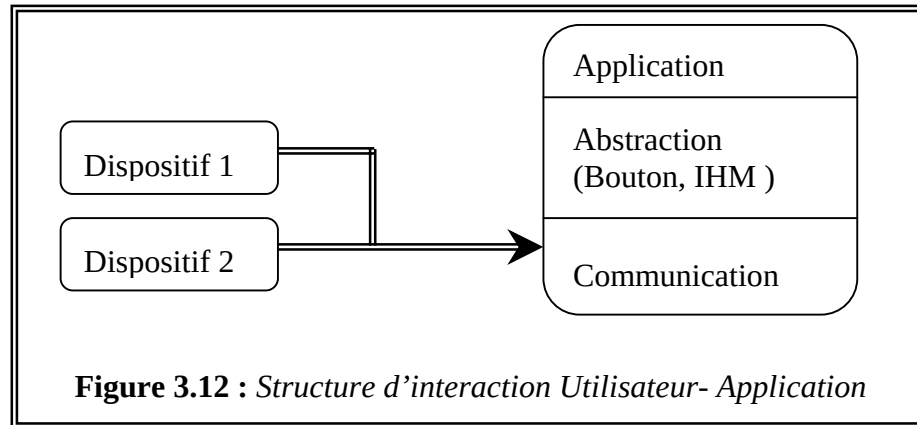
Comme chaque objet réel a des comportements, chaque objet virtuel est caractérisé par certains comportements selon l'application. Le regroupement de plusieurs objets implique la présence d'interactions avec la lumière (émission et réfraction de lumière, réflexion spéculaire, ...etc.), jusqu'aux interactions intramoléculaires dans une simulation chimique. La collision est un problème très important et affecte d'autres comportements et interactions entre objets.

Dans notre application, le seul objet dynamique est le fauteuil roulant, son mouvement est contrôlé par une Interface Virtuelle (IV). Nous avons établi un module de détection de collision entre les objets de l'environnement. Notons que notre traitement de collision s'appuie sur l'arrêt de mouvement du fauteuil en cas de collision avec un autre objet.

Un des objectifs de ce projet consiste à simuler le processus de détection des obstacles par un capteur ultrasonore, appelé capteur virtuel. Celui-ci dispose d'un ensemble des caractéristiques physiques décrivant le capteur réel. La création de ce capteur est basée sur un détecteur de collision et décrite en détail dans le chapitre 4.

L'interactivité est considérée comme une composante essentielle de la réalité virtuelle. Les utilisateurs doivent pouvoir influencer les événements qui ont lieu dans le monde virtuel, et non plus seulement les regarder. L'homme qui était spectateur en devient acteur.

L'interaction entre l'utilisateur et l'environnement peut être vue soit selon la *tâche* (sélection, création d'objets, saisie d'un texte, navigation...), soit par la *technique* utilisée. Cette technique a une relation directe avec le matériel, c'est en fait la création des outils virtuels. Par exemple, la création d'un bouton virtuel [Zac 00], Métaphore virtuelle [Khe 02] ou généralement une IHM, utilise des techniques comme la détection et le traitement des collisions et l'intersection rayon-objet (Figure 3.12).



Les tâches principales d'interaction sont :

La navigation : l'utilisateur doit pouvoir se déplacer dans l'EV généré par le système. Il doit être capable de se mouvoir librement et de regarder là où il veut. Cette liberté est devenue possible grâce aux techniques d'imagerie 3D, et améliorée par plusieurs dispositifs hardware qui rendent la navigation plus intuitive et réaliste.

La sélection : l'utilisateur souhaite pouvoir désigner les objets de l'EV et sélectionner ceux sur lesquels il désire exercer un traitement ou une manipulation.

La manipulation : concerne celle des objets sélectionnés.

Le contrôle de l'application : l'utilisateur a besoin d'émettre des commandes pour contrôler l'application.

Notre application implique l'implantation de deux de ces quatre tâches : la navigation pour permettre à l'handicapé d'explorer son environnement en utilisant un fauteuil roulant virtuel (à travers le positionnement d'une caméra virtuelle au niveau du fauteuil roulant, et par conséquent le déplacement de la caméra). La deuxième tâche consiste à contrôler manuellement le fauteuil roulant en simulant une IHM à base de switch utilisé dans certains fauteuils, il s'agit de BWI décrite dans le chapitre 2.

7.3 Détection de Collision

Dans le monde réel, les objets ont toujours certaines propriétés d'interaction entre eux, dont la principale est la solidité qui fait en sorte que deux parties d'objets différents ne peuvent pas se trouver à la même place au même moment.

Afin de tenir compte de cette solidité, il faut détecter les collisions entre les objets virtuels, et si c'est le cas, revenir à une position antérieure qui donne une réponse négative à ce test (absence de collision). Donc le but de la détection de collision (connue aussi sous les noms :

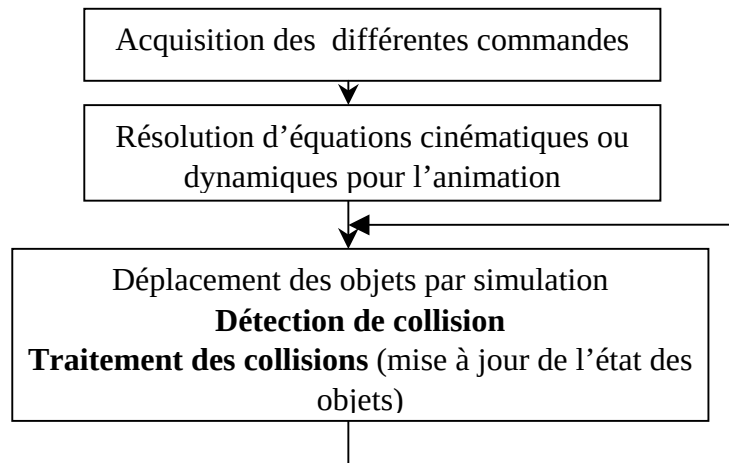
détection d'interférence ou *détermination de contact*) est de générer automatiquement le contact géométrique entre des objets.

Dans la gestion des collisions, il y a deux tâches à traiter : la détection et le traitement de collision.

- La détection de collision : c'est le test qui permet de savoir s'il y a une interférence entre deux objets. Il peut aussi donner l'information sur les polygones de chaque objet en collision et la distance entre les objets (négative ou nulle s'il y a collision, sinon positive).
- Le traitement des collisions : cette tâche dépend fortement de l'application et des caractéristiques physiques des objets. C'est la réaction des entités virtuelles en présence de contact. Le traitement se fait par exemple par le calcul des forces et la détermination des vitesses et des orientations des objets, ou par génération de son.

La gestion de collision est intégrée dans la boucle de simulation à RV de la façon suivante :

Détection de collision dans la boucle de simulation



7.3.1 Opérations de base de la détection de collision

L'opération de base dans la plupart des algorithmes de détection de collision est le test d'intersection Polygone/Polygone ou Segment/Polygone. Sachant que le hardware et les algorithmes de rendu et de détection de collision sont souvent basés sur une triangulation des polygones.

Le test d'intersection Polygone/Polygone est appliqué directement sur des triangles. Afin de réduire le problème rencontré dans le cas des polygones concaves, une phase de triangulation (Tessellation)⁽¹⁾ est nécessaire.

Nous avons implémenté deux fonctionnalités pour établir le test d'intersection Polygone/Polygone, la première utilise la réduction à un problème d'intersection Segment/ Polygone en se basant sur la méthode de Marchal, pour l'utiliser dans le cas où on a besoin uniquement de savoir s'il y a intersection ou non, et la deuxième utilise la méthode d'intersection Triangle/Triangle de Möller[Möl 97].

⁽¹⁾ La tessellation permet de construire des modèles polyhedriques par l'approximation des formes gauches à l'aide d'un ensemble de triangles [Khe 02].

a. Test d'intersection Polygone/ Polygone basé sur le test Segment/ Polygone

Le test d'intersection Polygone/Polygone peut être réduit à un test d'intersection Segment/Polygone par le test de l'intersection de chaque segment du premier polygone avec le deuxième polygone et vice versa [Zac 00].

On parle d'absence d'intersection entre deux polygones si aucun segment du premier polygone ne passe par le second et si aucun segment du deuxième polygone ne passe par le premier. Le test d'intersection Segment/Polygone se fait en deux étapes :

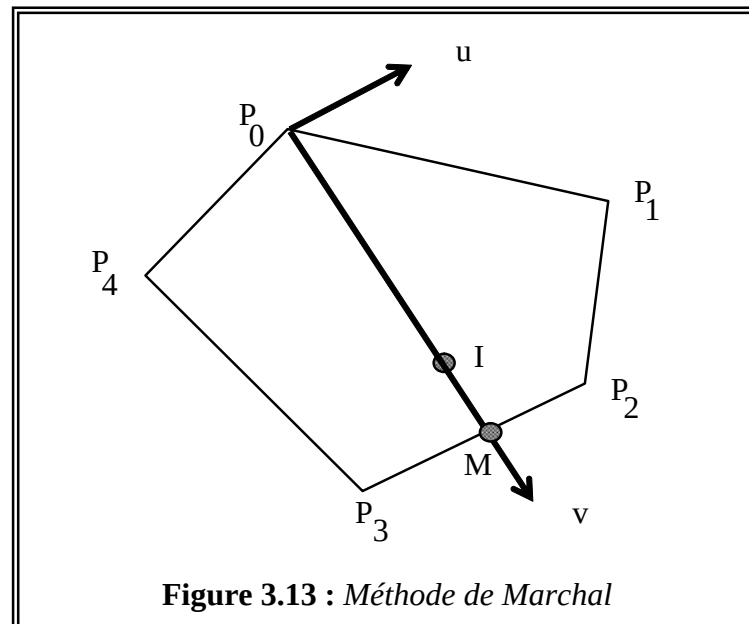
- tester l'intersection entre le segment et le plan portant le polygone
- vérifier si le point d'intersection est sis à l'intérieur du polygone ou non. Pour ce test nous avons utilisé la méthode de Marchal.

Méthode de Marchal

La figure 3.13 montre le principe de cette méthode, avec :

- I est le point d'intersection entre le segment et le plan.
- P_i (sommets du polygone) sont transformés dans un système de coordonnées bidimensionnel (u, v) dont le plan est le même que celle du polygone, avec le point P_0 comme origine.

Si un segment P_iP_{i+1} croise l'axe v en un point M (cela peut arriver quand les composantes u de P_i et P_{i+1} ont des signes différents) et si $P_0I < P_0M$ alors I est sis à l'intérieur du polygone, autrement il est à l'extérieur.



D'autre part, si aucun des segments ne coupe l'axe v , alors I se trouve à l'extérieur du polygone.

Cette méthode permet de tester l'intersection entre des polygones en général, pas forcément des triangles, à condition que ces polygones soient convexes.

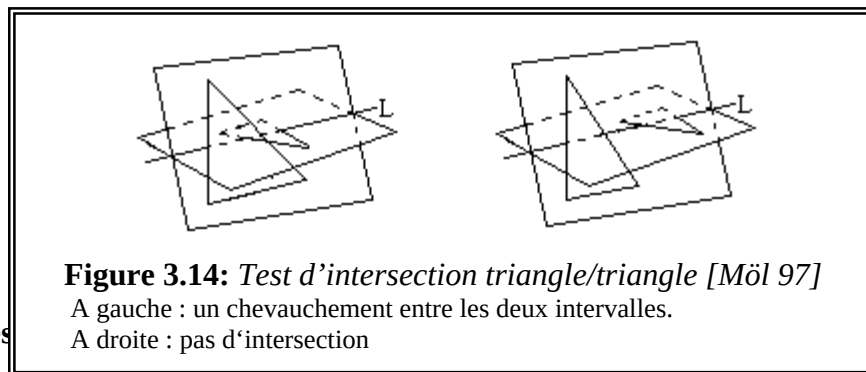
a. Test d'intersection Triangle/ Triangle

Dans notre travail, nous avons utilisé l'algorithme de [Möl 97] pour le calcul de l'intersection triangle/triangle. Cet algorithme consiste à déterminer l'intersection entre les deux plans, qui est une droite. Après une phase d'élimination qui permet de ne déterminer cette ligne que s'il y a une intersection entre le plan du premier polygone et le deuxième polygone, ainsi qu'une intersection entre le plan du deuxième polygone et le premier polygone (figure 3.14). La présence d'intersection entre les deux polygones dépend du chevauchement des deux intervalles, sachant qu'un intervalle est le segment qui détermine l'intersection entre un polygone et un plan.

Nous présentons l'algorithme de Möller [Möl 97], sachant que nous avons ajouté le traitement nécessaire pour le cas où les deux plans des deux triangles sont co-planaires.

Intersection Triangle/Triangle

1. calculer les équations des 2 plans.
2. si les 2 plans sont superposés ou très proches (les 2 plans sont parallèles et la distance entre ces plans est inférieure à un certain Epsilon)
 - tester l'intersection entre les segments des 2 triangles:
 - calculer la distance entre deux segments (utilisant l'idée décrite dans [Lin 93], que nous allons détailler par la suite)
 - Une fois que 2 segments se coupent → return "il y a intersection".
 - Sinon return "pas d'intersection".
3. déterminer la ligne d'intersection et la projeter sur l'arête la plus large (largest axis).
4. calculer les 2 intervalles pour les 2 triangles.
5. tester l'intersection entre les intervalles
 - si les 2 intervalles se coupent → return "il y a intersection".
 - Sinon return "pas d'intersection".



Remarques

- Un plan est définie par un vecteur (normale de plan) et par un point. La normale est calculée par le produit vectoriel de deux vecteurs limitant le triangle.

- L'intersection entre deux segments aura lieu si la distance entre ces derniers est nulle. Cette distance est calculée selon [Lin 93] par la procédure suivante :

Soit les deux segments : E_1 , limité par H_1 et T_1 , et E_2 , limité par H_2 et T_2 .

Les deux segments sont définis par les vecteurs :

$$\vec{e}_1 = H_1 - T_1$$

$$\vec{e}_2 = H_2 - T_2$$

Les points les plus proches P_1 et P_2 sont donnés par :

$$P_1 = H_1 + S (T_1 - H_1) = H_1 - S \vec{e}_1$$

$$P_2 = H_2 + U (T_2 - H_2) = H_2 - U \vec{e}_2$$

avec S et U : des valeurs scalaires entre 0 et 1 indiquant les positions relatives de P_1 et P_2 sur E_1 et E_2 .

Notons :

$$\vec{n} = P_1 - P_2$$

$|\vec{n}|$ est la distance la plus courte entre E_1 et E_2

$\vec{n}$ doit être perpendiculaire à $\vec{e}_1$ et $\vec{e}_2$ donc les produits scalaires :

$$\vec{n} \cdot \vec{e}_1 = (P_1 - P_2) \cdot \vec{e}_1 = 0$$

$$\vec{n} \cdot \vec{e}_2 = (P_1 - P_2) \cdot \vec{e}_2 = 0$$

Les expressions de S et U sont donc :

$$S = \frac{(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) [(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \cdot \vec{e}_2] - (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2) [(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \cdot \vec{e}_1]}{\det}$$

$$U = \frac{(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1) [(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \cdot \vec{e}_2] - (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) [(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \cdot \vec{e}_1]}{\det}$$

$$\det = ((\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2) * (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2)) - ((\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1) * (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2))$$

Si la distance $|\vec{n}|$ est nulle, on peut dire que les deux segments se croisent.

- Le test qui permet de savoir s'il y a une possibilité d'intersection entre deux triangles est :

Si le plan de poly1 coupe poly2 et le plan de poly2 coupe poly1

- Cette méthode nous donne l'information sur le segment d'intersection, à l'inverse de la première technique qui permet uniquement de savoir s'il y a intersection ou non.

7.3.2 Hiérarchie de détection de collision

Tous les algorithmes de détection de collision tendent à éviter autant que possible les tests d'intersection Polygone/Polygone. Pour cela, avant de tester l'intersection entre deux objets, un test de collision entre les *volumes englobants* est utilisé. Ces derniers subissent des divisions récursives permettant de construire, pour chaque objet, un arbre des volumes englobants (BboxTree Boundary box Tree). On aura, par conséquent, une hiérarchie de détection de collision.

Les avantages d'une représentation hiérarchique sont :

- Une situation de non-collision peut être détectée dans le premier niveau de la hiérarchie.
- L'exploration d'un sous arbre est nécessaire uniquement dans les parties où il y a une possibilité de collision.

Nous montrons maintenant un pseudo-code d'un algorithme de détection de collision basé sur les volumes englobants.

Algorithme de détection de collision basé sur une hiérarchie des volumes englobants

A = volume englobant de l'objet 1

B = volume englobant de l'objet 2

a[i], b[i] enfants de A et B respectivement,

traverser (A,B) : // c'est une procédure récursive

if ((A or B) is vide) → return

if (B is Feuille) → //les feuilles d'un arbre sont les polygones non
//décomposable (voir paragraphe 7.3.4)

if (A is Feuille)→

 utiliser les primitives de test entre polygones

 return

if (A is not Feuille)→

 pour tous les i:

 traiter(a[i],B) si collision → **traverser(a[i],B)**

if (B is not Feuille) →

 if (A is Feuille)→

 pour tous les i:

 traiter(A,b[i]) collision → **traverser(A,b[i])**

```

if (A is not Feuille)→
  pour tous les i:
    pour tous les j:
      traiter(a[i],b[j])collision → traverser(a[i],b[j])
  
```

La fonction «traiter(vol1,vol2)» est la fonction qui permet de savoir s'il y a intersection entre deux volumes englobants.

L'analyse de cet algorithme nous montre que la hiérarchie de détection de collision ne dépend pas de la façon utilisée pour la construction de l'arbre des volumes englobants.

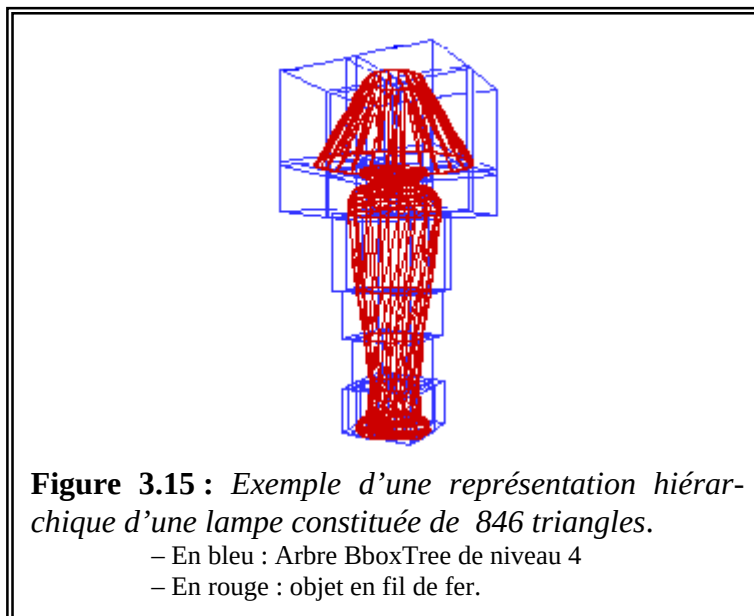
7.3.3 Hiérarchie des volumes englobants : BboxTree

La représentation par volume englobant est basée sur l'utilisation des sphères, des parallélépipèdes alignés sur les axes du repère global (Axis Aligned Boundary Boxes AABB), ou des parallélépipèdes avec orientation (Oriented Boundary Box OBB) [Got 96].

Le choix du volume englobant est limité par deux contraintes :

- Le volume englobant doit être serré sur l'objet [Got 96];
- Le test d'interférence (collision) entre deux volumes doit être rapide [Got 96] [Zac 00];

Ces deux conditions semblent contradictoires car si la hiérarchie de volumes est serrée sur l'objet, le nombre de volumes englobants sera important et par conséquent le test de collision sera lent. Si on veut améliorer la rapidité du test, on doit prendre un volume moins serré.



Il est clair qu'aucune représentation hiérarchique n'offre de meilleures performances pour toutes les formes géométriques. Par exemple, des représentations basées sur des sphères ou sur AABB (Axis Aligned Bounding boxes) sont très efficaces si elles sont utilisées pour

modéliser des objets éloignés [Got 96]. Néanmoins, elles ne donnent pas une bonne représentation d'un objet ayant une forte orientation ou étant curviligne.

Avec des volumes sphériques, on peut calculer l'arbre pendant une phase de prétraitement, et la mise à jour des coordonnées du centre de chaque sphère se fait à chaque pas de simulation. Par contre, la prise en compte des transformations géométriques (translation ou rotation) exige dans le cas des volumes parallélépipèdes une mise à jour de tout le volume englobant en calculant à nouveau des limites maximales et minimales des boxs.

La figure 3.15 montre un exemple de nos résultats concernant la construction d'un arbre AABB pour l'utiliser dans la détection de collision. L'objet de cette figure est une lampe constituée de 846 triangles présentée en fil de fer (rouge). Cette figure illustre un arbre de niveau 4 en bleu.

7.3.4 Construction de l'arbre BboxTree

Rappelons qu'une forme géométrique est définie par un ensemble de polygones. La construction d'un arbre BboxTree consiste à regrouper ces polygones dans une hiérarchie à base de volumes sphériques, parallélépipédiques...etc. Dans la littérature, on distingue trois méthodes à utiliser pour la construction d'un arbre des volumes englobants :

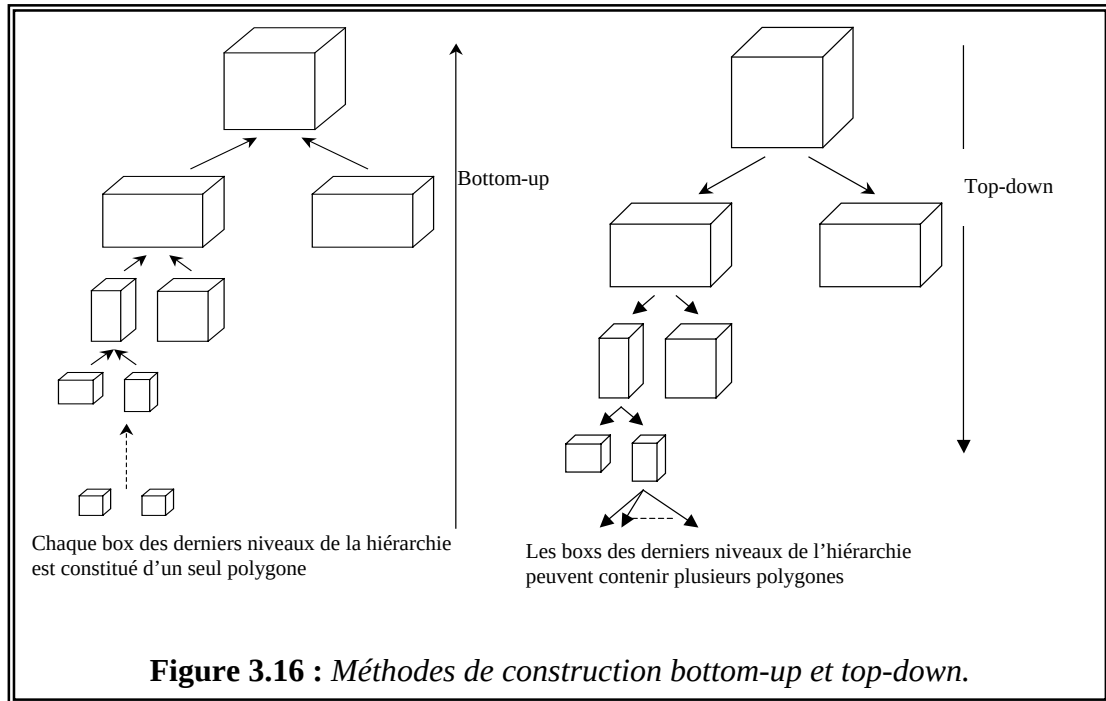
- ★ Méthode d'insertion [Zac 00],
- ★ Méthode de construction allant de la base vers le haut (Bottom-up) [Got 96] [Zac 00].
- ★ Méthode de construction allant du haut vers le bas (top-down) [Got 96] [Zac 00].

Dans la méthode d'insertion, la construction de l'arbre commence par un seul polygone et un arbre vide, puis chaque polygone est inséré au sommet de l'arbre, ensuite sa place finale dans l'arbre est déterminée en utilisant certains critères. La méthode Bottom-up se base sur l'approximation de chaque polygone par un volume englobant, chaque deux volumes englobants (ou plus) sont immergés dans un volume plus important et ainsi de suite jusqu'à la construction de tout l'arbre.

En-fin, la méthode top-down consiste à associer tous les polygones à la racine de l'arbre (root), puis à les diviser en deux sous-ensembles (ou plus) jusqu'à arriver à des polygones non décomposables. Ces derniers sont les feuilles de l'arbre.

Dans notre implémentation, nous avons utilisé une approche top-down dans le but d'éviter des niveaux inutiles dans la hiérarchie. En effet, les volumes englobants du dernier niveau dans la méthode top-down peuvent être constitués de plusieurs polygones contrairement à la méthode bottom-up.

La représentation des objets et la détection de collision sont effectués en utilisant une hiérarchie AABB.



7.3.5 La hiérarchie AABB (Aligned Axis Boundary Box)

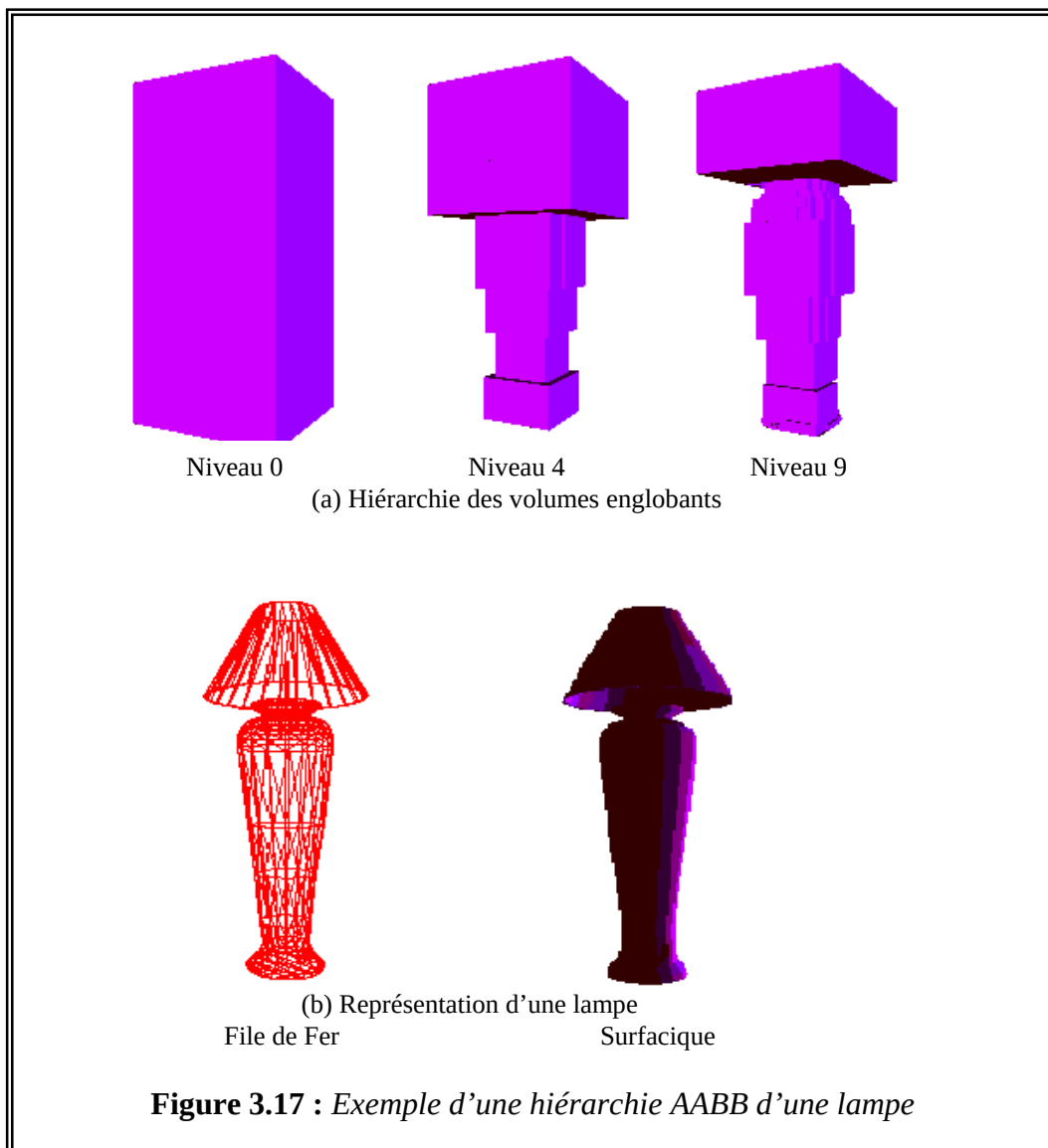
Dans cette représentation, l'objet est englobé par une boîte parallélépipède alignée sur les axes du repère (d'où le nom Aligned Axis Boundary Box).

Supposons que nous ayons un objet et que nous voulions construire un arbre AABB pour l'utiliser dans la détection de collision. Sachant qu'un objet est défini par un ensemble de polygones, la règle de subdivision consiste à diviser l'axe le plus long du parallélépipède par un plan perpendiculaire. Chaque polygone est accordé à un des côtés séparés par le plan selon la position du polygone. Ce plan de subdivision passe perpendiculairement à un des axes du volume par un point μ . Le point μ est le centre de tous les points. Par exemple, si les sommets du $i^{\text{ième}}$ triangle sont p^i , q^i et r^i on aura :

$$\mu = \frac{1}{3n} \sum_{i=0}^n (P^i + q^i + r^i)$$

avec n le nombre des triangles

Dans le cas où l'arête la plus longue ne peut pas être divisée, la seconde arête est utilisée, sinon la troisième. Si l'ensemble des polygones ne peut pas être partagé en deux sous-ensembles (arbres internes droit et gauche), il sera considéré indivisible (feuille de l'arbre).



7.3.6 Test de Collision entre deux volumes englobants

L'algorithme de détection de collision basé sur une hiérarchie des volumes englobants (paragraphe 7.3.2) utilise une fonction pour détecter l'intersection entre deux volumes englobants, c'est la fonction « `traiter(vol1, vol2)` ».

Dans le cas des volumes parallélépipédiques alignés sur les axes du repère global, chaque volume est défini par un point *Center* et un vecteur *Extent*, ce vecteur représente les dimensions de ce volume.

Le test d'intersection entre deux volumes A et B se fait de façon suivante :

intersect(Bbox A, BBox B)

si $\text{Abs}(\text{A.center}[\text{X}] - \text{B.center}[\text{X}]) \leq \text{A.extent}[\text{X}] + \text{B.extent}[\text{X}]$
 et $\text{Abs}(\text{A.center}[\text{Y}] - \text{B.center}[\text{Y}]) \leq \text{A.extent}[\text{Y}] + \text{B.extent}[\text{Y}]$
 et $\text{Abs}(\text{A.center}[\text{Z}] - \text{B.center}[\text{Z}]) \leq \text{A.extent}[\text{Z}] + \text{B.extent}[\text{Z}]$

```
return "il y a intersection"  
  
sinon return "pas d'intersection"
```

7.3.7 Détection de Collision et récupération des données

Dans un système de RV, le module de détection de collision est exploité par d'autres modules de haut niveau, comme la simulation de mouvement. Parfois dans certaines applications, on a besoin uniquement de savoir s'il y a collision ou non. Par contre d'autres applications exigent plus d'information sur les points de contact ou les facettes en collision correspondants aux couples d'objets.

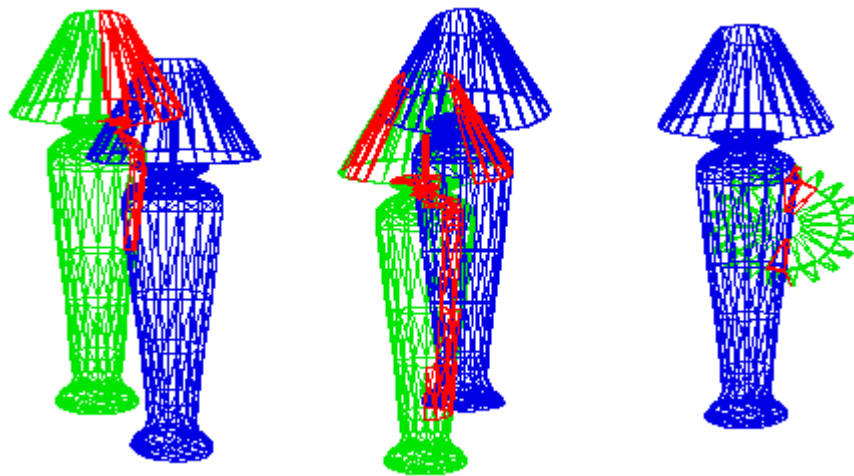


Figure 3.18 : *Détection de collision entre deux objets.*

(en vert : objet 1, en bleu : objet 2, en rouge : triangles de collision du premier objet)

La figure 3.18 montre trois exemples de couples d'objets en collision, notre module de détection de collision donne une des deux réponses : Simple réponse ou Smart réponse. Dans la première, seule l'information sur la présence de collision ou non est délivrée. Cependant, la deuxième donne les facettes, d'un des objets, en collision. Dans la figure 3.18, les triangles de l'objet vert en collision avec l'objet bleu sont présentés en rouge.

8. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un résumé regroupant les définitions, les interfaces comportementales, et les applications de la Réalité Virtuelle. L'utilisation de la Réalité Projetée dans notre simulateur est justifiée par le besoin d'un outil d'entraînement de la conduite d'un fauteuil roulant électrique efficace, moins cher et moins complexe (du point de vue de la possibilité de l'utiliser d'une manière indépendante).

Dans la seconde partie, nous avons abordé deux éléments nécessaires à la description d'un environnement virtuel. Il s'agit de la modélisation géométrique et des interactions entre les entités virtuelles d'une part et entre l'utilisateur et l'EV d'autre part. Ensuite, nous avons montré l'importance d'un module de détection de collision dans la boucle de simulation. Ce module est basé sur une description des objets (présentation par volume englobant dans notre

cas) et une hiérarchie de détection de collision. Ce module est soutenu par quelques exemples et résultats d'éclaircissement.

Le prochain chapitre sera dédié au développement d'un capteur ultrasonore virtuel, et à la simulation de systèmes de perception constitués de plusieurs capteurs.

CHAPITRE 4 : SIMULATION D'UN CAPTEUR ULTRASONORE

1. Introduction
2. Capteur télémétrique à ultrason
3. Méthodes utilisées pour la simulation d'un capteur US
 - 3.1 Recursive ray acoustic (RRA)
 - 3.2 Lancer de rayon « ray casting »
 - 3.3 Prédiction des mesures US
 - 3.4 Etude comparative
4. Capteur Virtuel en 2D: Prédiction des mesures US Améliorée
 - 4.1 Représentation de l'environnement
 - 4.2 Processus de détection
 - 4.3 Objet détectable mais caché
 - 4.4 Résultats de simulation
5. Configuration d'un système de perception
 - 5.1 Environnement de test
6. Conclusion

Résumé :

Le but de ce chapitre est de simuler le système de perception d'un robot mobile (un fauteuil roulant électrique) équipé de capteurs ultrasonores et évoluant dans un environnement inconnu. Pour cela, nous présentons au départ une vision générale de la télémétrie à ultrason, puis nous analysons quelques méthodes utilisées dans la simulation des capteurs ultrasonores. Par la suite, une description détaillée de la méthode choisie (basée sur la prédiction des mesures US), les limites de la méthode et les améliorations apportées ont été présentés. Nous terminons ce chapitre par une simulation de quelques configurations possibles des ceintures à ultrasons.

1. Introduction

Dans la phase de simulation, il est nécessaire d'introduire l'interaction entre le fauteuil et son environnement à travers la modélisation de son système de perception. Dans ce chapitre nous nous intéressons à la simulation des capteurs ultrasonores (US).

Les travaux déjà établis ont montré l'existence de deux approches : approche géométrique [Zuo 00] [Hog 94] et approche physique [Hol 98] [Bru 94]. La simulation d'un capteur à US est généralement décomposée en trois étapes : la première pour la modélisation de l'environnement, la seconde pour la propagation de l'onde acoustique dans un milieu donné et la dernière pour modéliser le capteur lui-même en tenant compte de ces caractéristiques.

Au cours de notre recherche bibliographique, nous n'avons rencontré qu'un seul système de simulation d'un fauteuil roulant électrique incluant un modèle de capteur ultrasonore. Les auteurs [Nin 01] qui ont travaillé sur ce simulateur ont implémenté un simple modèle unidimensionnel où l'onde ultrasonore est modélisée par un faisceau dont l'origine est le centre du capteur, et dont la direction est orthogonale au plan de la lame vibrante. Ils comptent étendre ce modèle en 2D, puis en 3D par la prise en considération des caractéristiques d'un capteur US réel (angle d'ouverture du cône, spectre de puissance dissipé à l'intérieur du cône, nature des objets, ...etc.).

Au sein de ce projet, nous proposons une amélioration d'un modèle géométrique bidimensionnel introduit par Bing-Ran Zuo [Zuo 00] pour avoir un capteur virtuel, puis nous testons quelques configurations de systèmes de perception constitués de plusieurs capteurs ultrasonores.

2. Capteur télémétrique à ultrason

Le capteur télémétrique à ultrason, appelé aussi *sonar* (SOund NAvigation Ranging), assure le calcul de la distance entre l'émetteur et un objet distant. La méthode de mesure consiste à exciter une céramique piézo-électrique à l'aide de quelques impulsions de fréquence égale à une fréquence ultrasonore. Connaissant la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans un milieu donné, la mesure du temps de vol de l'onde permet d'obtenir la distance de l'objet par rapport au capteur par la formule suivante :

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

Où d est la distance entre le capteur et l'obstacle rencontré, v la vitesse du son dans le milieu de propagation (340m/s dans l'air) et t le temps entre la transmission et la réception des impulsions US.

Les capteurs à ultrason les plus utilisés en robotique mobile, et dans les fauteuils roulants électriques intelligents, sont des capteurs de type Polaroid qui émettent une onde ultrasonore à 44KHz et peuvent mesurer des distances entre 30cm et 10m. Il est préférable de ne pas s'éloigner de cette fréquence d'émission [Nev 98] afin d'avoir le meilleur rendement possible. Ces fréquences transportent plus d'énergie que des fréquences plus basses, car plus la fréquence est grande, plus l'onde associée a de l'énergie, et par conséquent, plus l'onde va

loin. C'est pour cela que l'ultrason possède la particularité de rebondir un peu partout sans être trop atténuée. D'autre part, pour avoir des fréquences plus élevées, il faut dépasser certaines contraintes technologiques.

Un des principaux avantages de la télémétrie à ultrason réside du fait que la distance de l'objet détecté est directement disponible à la sortie du capteur. Aucune analyse compliquée de la lecture n'est donc requise. De plus, son faible coût et la simplicité de sa mise en oeuvre font en sorte qu'il est un des capteurs les plus populaires dans les applications de la robotique mobile. En revanche, les sonars ont quelques lacunes qui doivent être notées :

- ❖ Les faisceaux qu'engendre ce type d'émetteur ont une ouverture minimale assez importante de l'ordre de 30° (Beam = 30°), ce qui cause une incertitude significative quant à la position exacte de l'objet détecté.

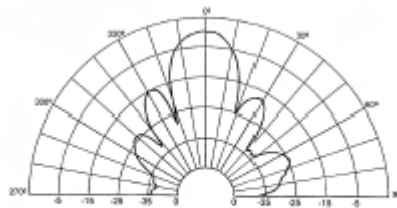


Figure 4.1 : Modèle typique de faisceau US

- ❖ La vitesse de propagation des ultrasons peut être influencée de façon sensible par une variation de température [Lau 00]. Par exemple, un écart de 30°C peut causer une erreur de 30 cm sur une mesure de 11 m et une erreur de 7.8 cm pour une distance de 3 m. Ainsi, les variations de température affectent les mesures proportionnellement à la distance. Comme la précision dans les lectures est moins critique pour les obstacles distants, l'influence de la température sur les distances perçues peut donc être négligée.
- ❖ La lecture des capteurs peut être influencée par le bruit environnant et par le signal émis par d'autres capteurs sur le même système.
- ❖ Finalement, les mesures peuvent quelques fois être faussées par la réflexion spéculaire. Ce type de réflexion survient lorsque l'angle d'incidence du faisceau tombe sous un certain angle critique par rapport à un mur ou un autre objet lisse. Dans ce cas, le faisceau ne sera pas réfléchi vers l'émetteur.

Dans notre simulation, nous avons pris en considération l'angle d'incidence limité par $\pm\text{Beam}/2$. En réalité cet angle varie autour de la valeur donnée par le constructeur suivant le matériau de l'objet rencontré.

3. Méthodes utilisées pour la simulation d'un capteur US

Dans la littérature, deux approches pour modéliser un capteur US sont distinguées :

- Une approche géométrique où les objets de l'environnement sont représentés géométriquement ;

- Une approche physique où les phénomènes physiques (énergie du faisceau, température, pression, bruit...) sont considérés dans la simulation du processus de détection.

Cependant, avant de présenter une vue générale sur les modèles disponibles, il nous semble important de mentionner l'étude de Etter [Hol 98] [Bru 94], qui consiste à organiser la modélisation du capteur sous forme d'une hiérarchie conceptuelle constituée de trois étages principaux (figure 4.2). Ces derniers représentent les modèles d'environnement avec tous les objets qui le constituent, un modèle pour les phénomènes physiques comme la réflexion, la diffusion et la propagation des ondes acoustiques, et enfin un modèle pour représenter les performances d'un capteur tels que les limites minimale et maximale de la distance détectée, l'angle de visibilité et la longueur d'onde.

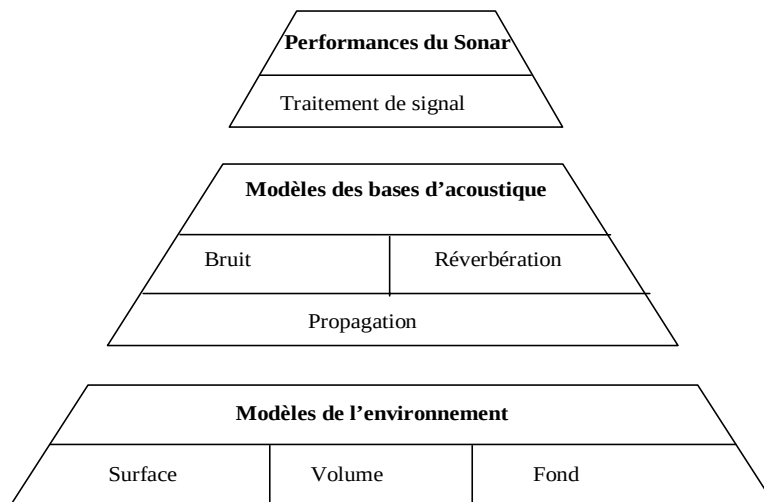


Figure 4.2 : Différentes classes de modélisation d'un sonar [Hol 98]

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques méthodes développées dans les deux approches, puis nous effectuons une comparaison entre elles afin d'en choisir une.

3.1 Recursive Ray Acoustic (RRA)

Les auteurs de [Hol 98] [Bru 94] ont traité le problème de la modélisation et la simulation des sonars pour un véhicule sous-marin virtuel, pour cela ils ont appliqué l'algorithme RRA. Le principe de cette méthode est de déduire des équations aux différences à partir des équations différentielles qui décrivent la propagation d'une onde acoustique, et d'utiliser d'autres modèles comme des entrées indépendantes tel que Sound Speed Profile (SSP). En plus de la position d'un objet détecté par le capteur, cet algorithme permet aussi de délivrer une information sur l'angle de propagation et le niveau de pression acoustique (sound pressure level). RRA est une approche physique plus générale dédiée surtout à la visualisation des informations générées par le sonar.

3.2 Lancer de rayon « ray casting »

C'est un algorithme très connu dans les techniques graphiques et la synthèse d'image, il a été développé depuis plus de vingt ans.

L'idée de base dans cette méthode (Figure 4.3) est de suivre le chemin d'un rayon commençant par le point de vue (récepteur) jusqu'au point d'émission avec la prise en compte de tous les paramètres qui entrent en jeu (caractéristique des objets, intensité et orientation du rayon lors de chaque contact avec les objets de la scène). Dans ce cas, les rayons non détectés par le récepteur ne seront pas considérés.

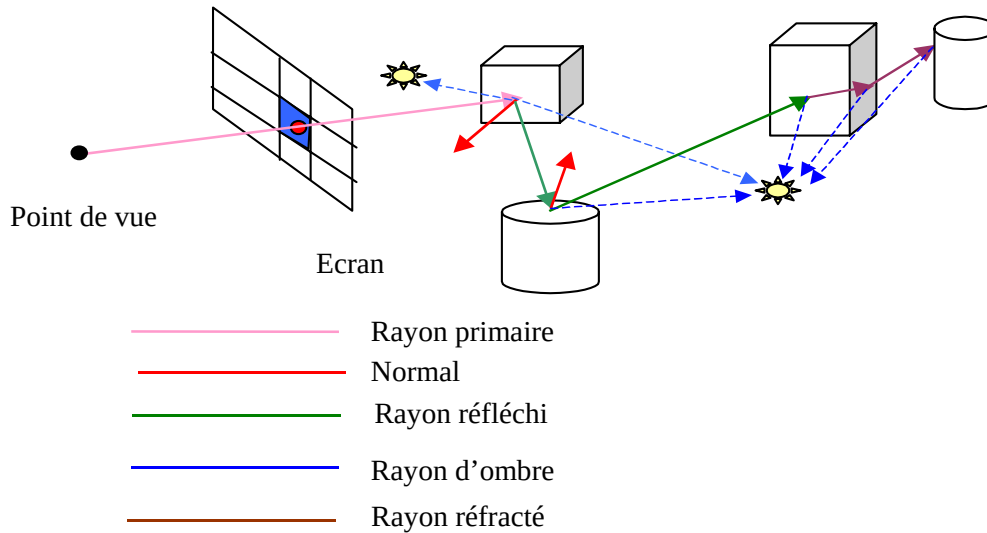


Figure 4.3: Principe de l'algorithme de Lancer de rayon

Le capteur US utilisé en robotique fonctionne en émetteur et récepteur. Dans [Fra 99], la distance détectée est simulée par la distance entre le capteur et le premier objet de l'environnement qui se trouve sur le parcours du rayon. Pour que la méthode répond au cas des réflexions spéculaires caractérisant les capteurs à US, l'angle d'incidence est utilisé pour tester la détection; lorsque cet angle est limité par $(-Beam/2, +Beam/2)$, l'obstacle est détecté.

Lancer de rayon pour la simulation d'un capteur US

```

 $d_{min}$  : seuil minimal,
 $d_{max}$  : seuil maximal,
 $d \in [d_{min} \ d_{max}]$  : distance détectée,
 $\alpha \in [-Beam/2 \ Beam/2]$  : angle d'incidence (entre le rayon
    et la normale au point de détection).
Si  $d \in [d_{min} \ d_{max}]$  et  $\alpha \in [-Beam/2 \ Beam/2]$ 
    Distance =  $d * (1+N)$  // N : bruit gaussien
sinon Distance =  $d_{max}$ 

```

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le coût d'exécution, car un robot mobile est équipé d'un système de perception (sous forme d'une ceinture de capteurs US). Chaque capteur émet une onde suivant un cône où son axe principale constitue la direction de propagation. Dans cette méthode, le cône est subdivisé en plusieurs rayons.

3.3 Prédiction des mesures US

Dans cette méthode l'environnement est bidimensionnel, constitué d'un ensemble d'objets, dont chacun est représenté selon son type (surface plane, cylindre, coin, bord). Une

représentation paramétrique d'un segment de droite est utilisée pour modéliser une surface plane, un cylindre est modélisé par un cercle, les coins et les bords sont représentés par des points.

La méthode de prédiction des mesures US consiste à trouver la normale d'une surface qui passe par le point décrivant la position du capteur, et à tester si l'angle entre cette normale et l'axe du capteur est limité par $-\text{Beam}/2$ et $+\text{Beam}/2$ [Oui 04] [Zuo 00] [Hog 94]. L'implémentation de cette méthode n'exige pas une discrétisation d'un cône comme dans les deux premières méthodes mais elle traite un seul rayon pour chaque objet. Le problème de cette méthode, telle qu'elle est présentée dans [Zuo 00], est qu'elle ne traite pas le cas où l'objet détecté est caché par un autre objet (l'objet qui cache l'autre n'étant pas détectable).

3.4 Etude comparative

Afin de pouvoir faire notre choix une, nous regroupons dans ce tableau les caractéristiques de ces trois méthodes :

Recursive Ray Acoustic	Lancer de rayon	Prédiction des mesures US
– Approche physique (prise en compte de pression, vitesse...). Les caractéristiques physiques sont des facteurs importants dans la propagation des ondes acoustiques surtout dans un milieu sous-marin. – Un cône US est décomposé en plusieurs rayons, chacun est décomposé en plusieurs pas. – Utilisé pour la visualisation des informations du sonar en simulation. – Pas de problème pour les objets cachés.	– Approche géométrique – Un cône US est décomposé en plusieurs rayons, ce qui conduit à un temps d'exécution important. – Utilisé pour la simulation d'un capteur US. – Pas de problèmes pour les objets cachés.	– Approche géométrique – Un cône US est traité une seule fois. – Utilisé pour la simulation d'un capteur US. – Possibilité de détection des objets cachés.

Tab 4.1 : Comparaison entre trois méthodes de simulation des capteurs US.

A la lumière de ce qui est résumé dans le tableau ci dessus, nous avons choisi la méthode de Prédiction des mesures US pour les raisons suivantes :

- Notre but est de simuler un capteur US dans un milieu terrestre, et adapté à la robotique mobile (particulièrement aux fauteuils roulants électriques), par conséquent nous n'avons pas besoin d'un modèle physique.

- La méthode de prédiction des mesures US n'exige pas une discrétisation du cône US. Elle est donc moins coûteuse de point de vue temps d'exécution.

Néanmoins, il faut résoudre le problème de détection des objets cachés par d'autres objets non détectables. La section suivante présente une description détaillée et l'amélioration que nous avons apporté pour dépasser les limites de la méthode.

4. Capteur Virtuel en 2D: Prédiction des mesures US Améliorée

Lorsqu'un fauteuil roulant électrique semi-automatique ou automatique se déplace dans un monde réel, il utilise ses capteurs US pour détecter les obstacles. S'agissant de l'environnement virtuel, la création d'un capteur virtuel est un point clé dans la simulation[Oui 04]. Le rôle de ce dernier réside dans la détection des objets dans le monde virtuel, pour cela la représentation de tous les objets qui le constituent est une phase très importante.

4.1 Représentation de l'environnement

On suppose que l'environnement est bidimensionnel. Il est représenté par N_o objets. Quatre types d'objets élémentaires sont distingués : surface plane, cylindre, coin et bord, chacun est paramétré par un vecteur (Figure 4.4).

- *Surface plane* : équivalente en 2D à un segment de droite définie par les deux points P_s et P_e ; avec $P_s = (P_{sx}, P_{sy})$ et $P_e = (P_{ex}, P_{ey})$.
- *Cylindre* : cercle en 2D, défini par le centre $P = (P_x, P_y)$ et le rayon P_r . P_r est supposé supérieur à la longueur d'onde pour avoir uniquement la **réflexion spéculaire**.
- *Bord et coin* : paramétré chacun par un point $P = (P_x, P_y)$, qui **diffuse** l'onde acoustique.

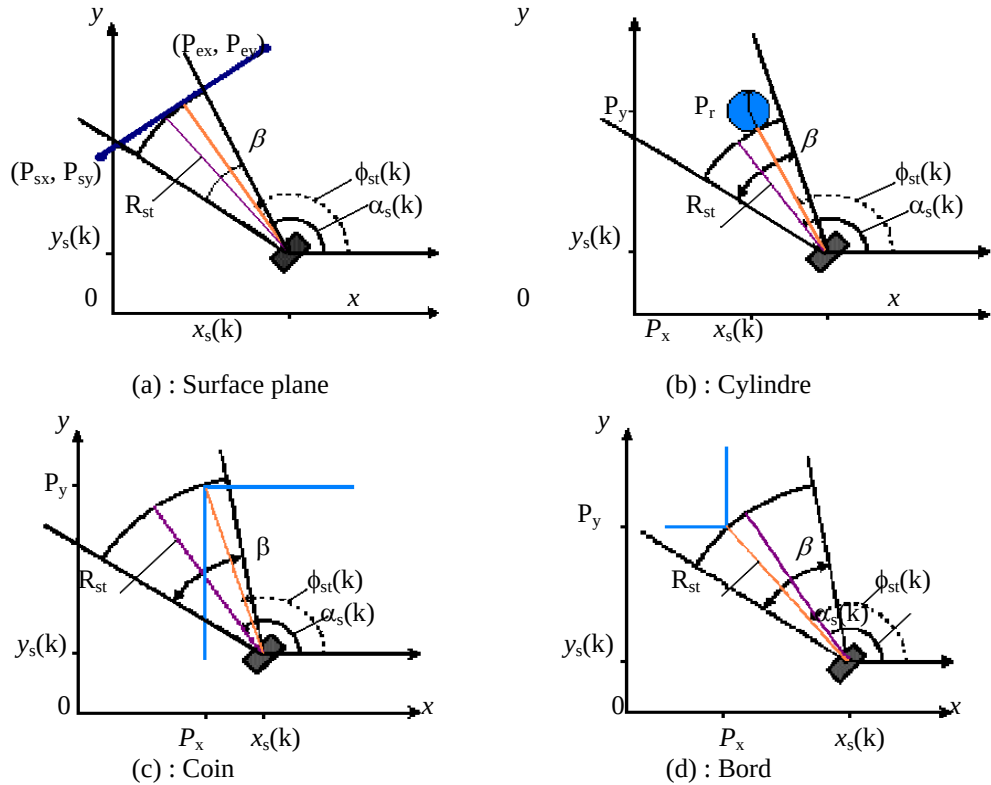


Figure 4.4 : Représentation paramétrique des objets en 2D

(a) surface plane spécifiée par un segment de droite, (b) cylindre spécifié par un cercle, (c) et (d) coin et bord représentés par des points.

4.2 Processus de détection

Supposons que le vecteur de position et d'orientation d'un capteur ultrasonore S dans le repère absolu à l'instant k est donné par :

$$A_s(k) = (X_s(k), Y_s(k), \alpha_s(k)) \quad (4.1)$$

On désigne par $R_{st}(k)$ et $\phi_{st}(k)$ la distance retournée par le capteur et l'angle entre la normale de l'objet élémentaire et l'axe (ox) du repère (Figure 4.4).

➤ En premier temps, on considère une cible plane (Figure 4.4a) dont l'angle ϕ_{st} prend une des deux valeurs ϕ_1 et ϕ_2 limitée par ϕ_s et ϕ_e :

$$\phi_{st} = \begin{cases} \phi_1, & \text{if } \phi_1 \in [\min(\phi_s, \phi_e), \max(\phi_s, \phi_e)] \\ \phi_2, & \text{if } \phi_2 \in [\min(\phi_s, \phi_e), \max(\phi_s, \phi_e)] \end{cases} \quad (4.2)$$

avec

$$\phi_1 = \text{atan2}(p_{sx} - p_{ex}, p_{ey} - p_{sy}) \quad (4.3)$$

$$\phi_2 = \text{atan2}(p_{ex} - p_{sx}, p_{sy} - p_{ey}) \quad (4.4)$$

$$\phi_s = \text{atan2}(p_{sy} - y_s, p_{sx} - x_s) \quad (4.5)$$

$$\phi_e = \text{atan2}(p_{sy} - y_s, p_{ex} - x_s) \quad (4.6)$$

Pour calculer la distance R_{st} on utilise les équations paramétriques décrivant la cible :

$$\begin{cases} x = (1-t) \cdot p_{sx} + t \cdot p_{ex} \\ y = (1-t) \cdot p_{sy} + t \cdot p_{ey} \end{cases} \quad (4.7)$$

Avec t : un paramètre qui définit la normale du segment passant par le capteur. Cette normale est définie par l'équation géométrique suivante :

$$\begin{cases} x = x_s(k) + r \cdot \cos(\phi_{st}) \\ y = y_s(k) + r \cdot \sin(\phi_{st}) \end{cases} \quad (4.8)$$

r : longueur du rayon perpendiculaire au segment de la droite.

La résolution du système d'équations (4.7) et (4.8) nous permet de déduire les valeurs de t et de r :

$$\begin{cases} t = \frac{(x_s(k) - p_{sx}) \cdot \sin(\phi_{st}) - (y_s(k) - p_{sy}) \cdot \cos(\phi_{st})}{(p_{ex} - p_{sx}) \cdot \sin(\phi_{st}) - (p_{ey} - p_{sy}) \cdot \cos(\phi_{st})} \\ r = \sqrt{[t \cdot (p_{ex} - p_{sx}) + (p_{sx} - x_s(k))]^2 + [t \cdot (p_{ey} - p_{sy}) + (p_{sy} - y_s(k))]^2} \end{cases} \quad (4.9)$$

Si $t \in [0,1]$, la distance détectée était :

$$R_{st} = \sqrt{\left[t \cdot (p_{ex} - p_{sx}) + (p_{sx} - x_s(k)) \right]^2 + \left[t \cdot (p_{ey} - p_{sy}) + (p_{sy} - y_s(k)) \right]^2} \quad (4.10)$$

➤ Pour les coins et les bords (Figure 4.4c et d), R_{st} et ϕ_{st} sont directement calculés par les équations suivantes :

$$R_{st}(k) = \sqrt{\left[p_{sx} - x_s(k) \right]^2 + \left[p_{sy} - y_s(k) \right]^2} \quad (4.11)$$

$$\phi_{st}(k) = \text{atan2}(p_y - y_s(k), p_x - x_s(k)) \quad (4.12)$$

➤ De même pour le cas des cylindres (Figure 4.4b) :

$$R_{st}(k) = \sqrt{\left[p_{sx} - x_s(k) \right]^2 + \left[p_{sy} - y_s(k) \right]^2} - p_R \quad (4.13)$$

$$\phi_{st}(k) = \text{atan2}(p_y - y_s(k), p_x - x_s(k)) \quad (4.14)$$

Il est important de noter qu'avant de calculer la distance R_{st} , on effectue deux tests : le premier permet de savoir si l'objet est recouvert (au moins partiellement) par le champ du capteur, et le second de confirmer en utilisant le critère sur l'angle ϕ_{st} suivant :

$$\phi_{st}(k) - \frac{\beta}{2} \leq \alpha_s(k) \leq \phi_{st}(k) + \frac{\beta}{2} \quad (4.15)$$

β : représente l'angle de visibilité (Beam). Sa valeur moyenne est donnée par le constructeur du capteur.

Le modèle géométrique est donné par les équations (4.2), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) et (4.14). Donc pour une position et une orientation données, le capteur simulé retourne la distance minimale détectée vérifiant le critère (4.15) qui est un critère très important. Dans le cas où il n'y aurait plus d'objets vérifiant ce critère, le capteur retournera son rang maximal.

4.3 Objet détectable mais caché

Une surface plane est dite cachée si la ligne, qui a pour origine la position du capteur et pour direction la normale à la surface plane, rencontre un autre objet. Un arc est dit caché si la ligne perpendiculaire, qui a pour origine la position du capteur et pour extrémité le centre de l'arc, coupe un autre objet. De même un point est dit caché si la ligne, qui relie le capteur au point, coupe un autre objet (Figure 4.5).

Le problème de détection d'objets cachés apparaît lorsque la ligne perpendiculaire, allant de l'objet détecté au capteur, passe par un objet non détectable qui ne vérifie pas le critère (4.15) [Oui 04] (Figure 4.5). Pour dépasser cette limite, nous proposons d'ajouter un nouveau critère nous permettant de tester l'intersection entre le rayon représentant l'écho et les objets

visibles (cylindres et surfaces planes qui passent par le champ du capteur). L'algorithme de la méthode améliorée de prédiction des mesures US peut être résumé de la manière suivante :

Algorithme de prédiction des mesures US amélioré

1. Indexer les objets qui passent par le champ de visibilité du capteur.
2. Calculer R_{st} et ϕ_{st} de tous les objets qui peuvent être détectables selon le critère (4.15).
3. Prendre le R_{st} minimal.
4. Tester l'intersection entre le rayon, défini par la position du capteur et le vecteur $(\cos(\phi_{st}), \sin(\phi_{st}))$, et les objets indexés.
Si un objet est caché
→ L'objet sera considéré caché
→ Refaire les étapes 3 et 4
Sinon → la mesure est validée et un objet est détecté à une distance R_{st}

Un objet peut être caché par un segment de droite ou par un arc de cercle. Pour savoir si l'objet détectable est caché ou non, nous proposons ce critère :

Si la ligne perpendiculaire, allant de l'objet détectable au capteur, coupe un autre objet non détectable, et Si $d < R_{st}$, l'objet détectable est alors caché par un autre objet.

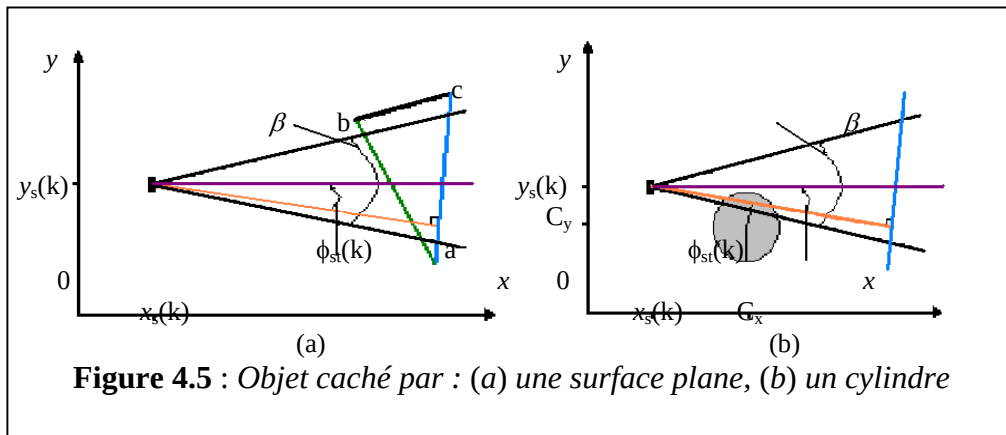
Avec :

R_{st} : la distance détectée avant l'application du nouveau critère

d : la distance entre le capteur et un autre objet visible non détectable.

4.3.1 Objet caché par une surface plane :

Pour calculer la distance d entre le capteur et la surface plane qui coupe le rayon reliant ce capteur et l'objet détecté (Figure 4.5 a), on utilise les équations paramétriques (4.7) et (4.8) qui décrivent la surface plane et le rayon respectivement. La distance d sera calculée par l'équation (4.10). Si cette distance est inférieure à la distance détectée, R_{st} sera égal à d_{max} .



4.3.2 Objet caché par un Cylindre :

Un cylindre cache un autre objet si la distance entre le rayon acoustique et le centre du cylindre d_0 est inférieure au rayon du cylindre, et si la distance d est inférieure à R_{st} (Figure 4.5b).

La droite, définie par la position du capteur US (X_s, Y_s) et le vecteur $(\cos(\phi_{st}), \sin(\phi_{st}))$, est représentée par l'équation :

$$\sin(\phi_{st}) \cdot x - \cos(\phi_{st}) \cdot y - \sin(\phi_{st}) \cdot X_s + \cos(\phi_{st}) \cdot Y_s = 0 \quad (4.16)$$

dont la forme générale est :

$$A \cdot x + B \cdot y + C = 0$$

Avec, $B = -\cos(\phi_{st})$ et $C = -\sin(\phi_{st}) \cdot X_s + \cos(\phi_{st}) \cdot Y_s$

La distance d_0 entre le centre du cylindre et le rayon acoustique (Figure 4.5b) est donnée par :

$$d_0 = \frac{|A \cdot C_x + B \cdot C_y + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4.17)$$

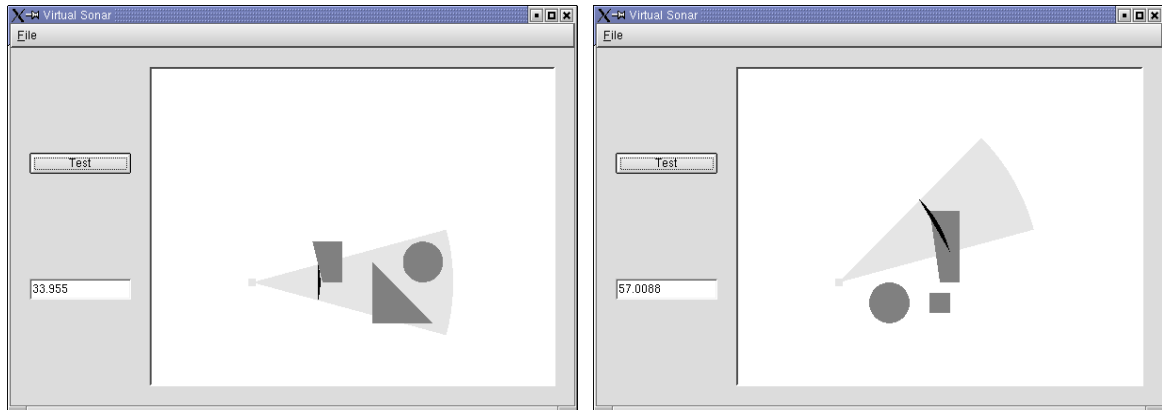
Avec (C_x, C_y) les coordonnées du centre du cylindre.

La distance d sera alors :

$$d^2 = \|\overline{SC}\|^2 - d_0^2 \quad (4.18)$$

4.4 Résultats de simulation

Nous présentons ici quelques exemples de simulation pour montrer que ce capteur simulé détecte les obstacles d'une façon très proche de celle d'un capteur réel. Il présente un ensemble d'avantages et d'inconvénients qui caractérisent le fonctionnement des capteurs ultrasonores.



(a)

(b)

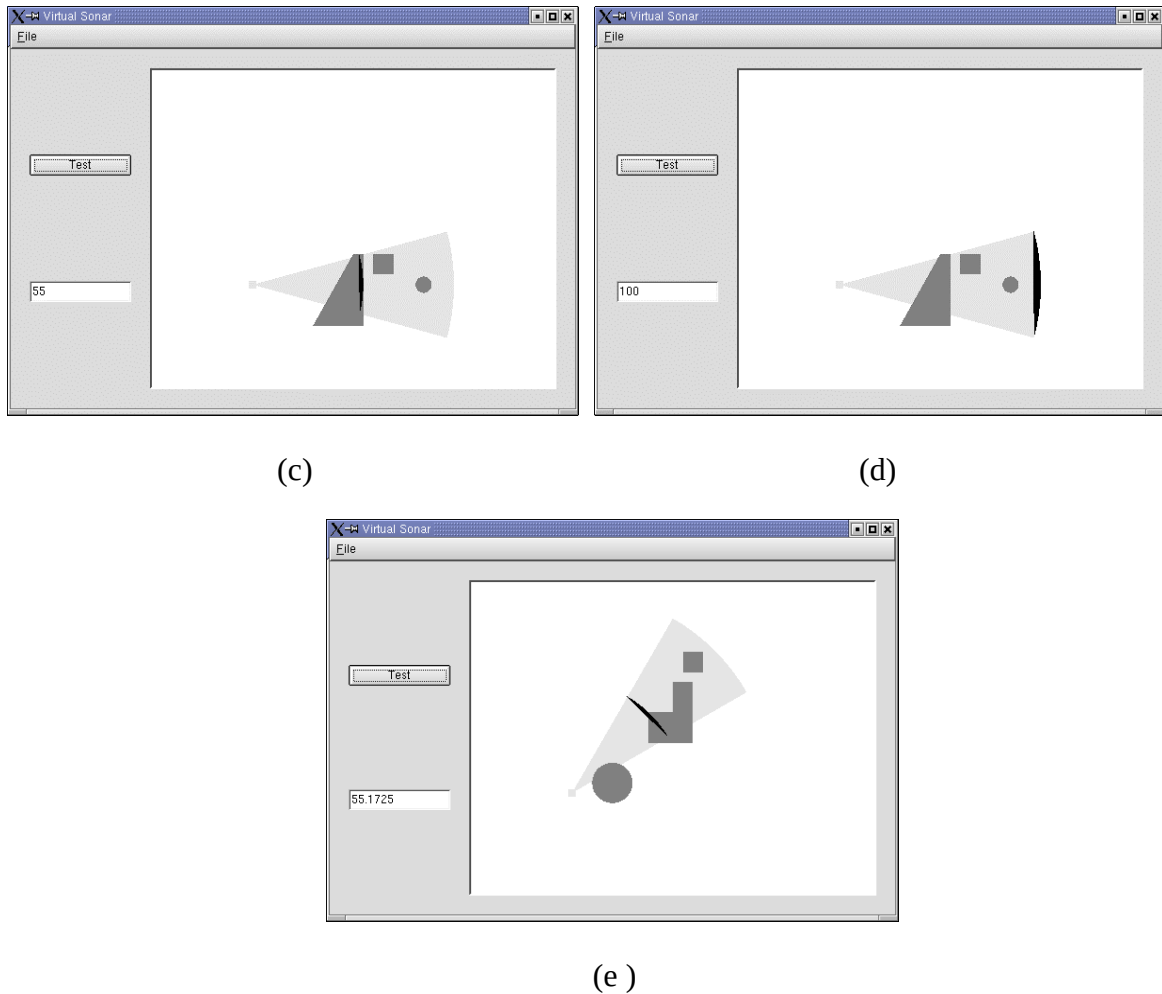


Figure 4.6 : Résultats de simulation

Au niveau de la simulation, le capteur a un rang maximal de 100 unités, une distance minimale détectable de 3 unités et un angle de visibilité de 30° . Les résultats de simulation illustrés dans la figure 4.6 sont obtenus pour des environnements typiques constitués de différents objets (polygone, cercle...). Le capteur est positionné à (0,0), avec une orientation de 0° (pour les cas a, c et d) et de 45° (pour les cas b et e).

L'arc noir montre les points qui ont une distance égale à la distance renvoyée par le capteur.

Dans la figure 4.6 (a et b), le capteur détecte les objets les plus proches : une surface plane inclinée (a) et un bord (b). La figure 4.6 (c) illustre bien le problème d'un objet caché détecté, qui est la limite principale de l'algorithme tel qu'il est présenté dans [Zuo 00]. La figure 4.6 (e et f) montre comment ce problème est résolu par l'application de notre méthode améliorée.

Un capteur virtuel : un élément de base dans la conception des systèmes de perception à ultrason. Pour cela, nous examinons dans la suite de ce chapitre quelques configurations, puis nous présentons leurs simulations dans un environnement typique.

Figure 4.6 : Exemples de simulation

5. Configuration d'un système de perception

Une ceinture constituée de plusieurs capteurs à US est très utilisée en robotique mobile, pour la génération des déplacements, la localisation du robot et la création des cartes d'environnement.

La conception d'un système de perception à base de capteurs US est un vrai problème. De même, la validation d'une telle structure nécessite plusieurs tests. Pour cela, la simulation de l'interaction entre la ceinture des capteurs US et l'environnement est une phase importante, car elle permet de modifier la structure en jouant sur les positions et les orientations des capteurs et même sur leur nombre.

Dans ce projet, nous nous intéressons à la simulation des systèmes de perception. Nous allons donc reconfigurer certaines ceintures développées pour le robot LabMate [Hog 94] [Nev 98] afin qu'elles soient convenables avec les dimensions du fauteuil roulant électrique. Nous présentons ici les configurations de Blossom, Swami Jr [Hog 94] et Walky [Nev 98], puis nous proposons une configuration basée sur la structure de Blossom dont le but est d'élargir la zone de sécurité (c.-à-d. augmenter le champ couvert par les cônes ultrasonores).

Remarque :

- Les configurations, développées sur LabMate, sont présentées dans l'annexe B.
- Les dimensions de notre fauteuil roulant utilisé en simulation sont 400mm × 800mm. Les positions des capteurs sont données dans le repère ayant comme origine le centre de la plateforme.

Configuration de Blossom [Hog 94]:

La ceinture est constituée de huit capteurs US distribués au devant du robot (tableau 4.2).

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)	θ
1	133	-205	- $\pi/2$
2	175	-197	- $\pi/3$
3	203	-177	- $\pi/6$
4	214	-150	0
5	214	150	0
6	203	177	$\pi/6$
7	175	197	$\pi/3$
8	133	205	$\pi/2$

Tab4.2 : Configuration de Blossom

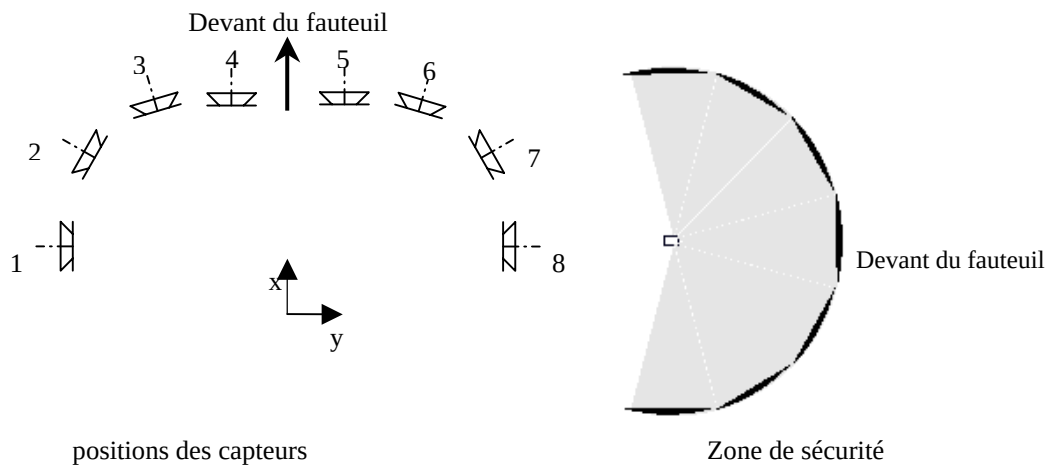


Figure 4.7 : Configuration de Blossom

Configuration de Swami Jr [Hog 94]:

La ceinture est constituée de huit capteurs US distribués au devant, et aux côtés droit et gauche du fauteuil.

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y(mm)	θ
1	208	-142	$-\pi/4$
2	368	-114	$-\pi/2$
3	400	-35	$-\pi/12$
4	400	35	$\pi/12$
5	368	114	$\pi/2$
6	208	142	$\pi/4$
7	-346	142	$\pi/2$
8	-346	-142	$-\pi/2$

Tab 4.3 : Configuration de Swami Jr

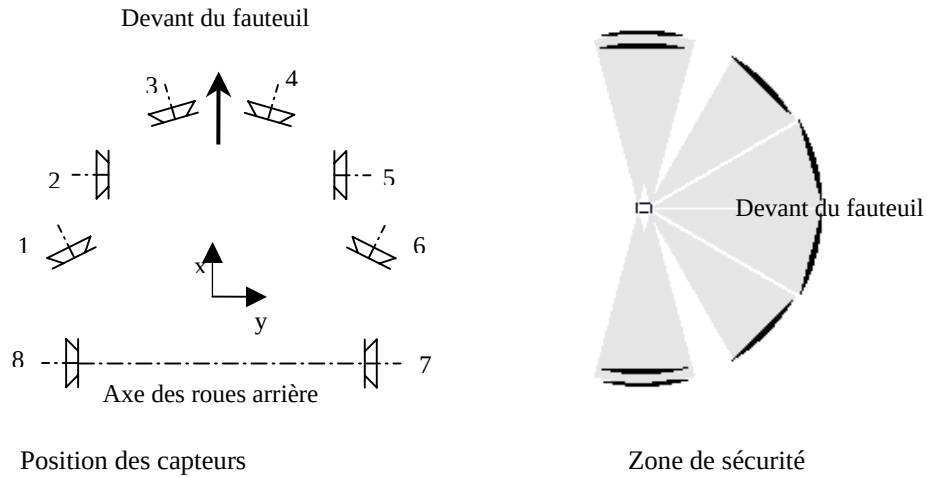


Figure 4.8 : Configuration de Swami Jr

Configuration de Walky [Nev 98]:

La ceinture est constituée de douze capteurs US distribués dans tous les côtés du robot comme le montre la figure 4.4.

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)	θ
1	133	-178	$-\pi/2$
2	242	-214	$-\pi/6$
3	277	-142	$-\pi/12$
4	293	-71	0
5	293	71	0
6	277	142	$\pi/12$
7	242	214	$\pi/6$
8	133	178	$\pi/2$
9	-133	178	$\pi/2$
10	-290	80	π
11	-290	-80	π
12	-133	-178	$-\pi/2$

Tab 4.4 : Configuration de Walky

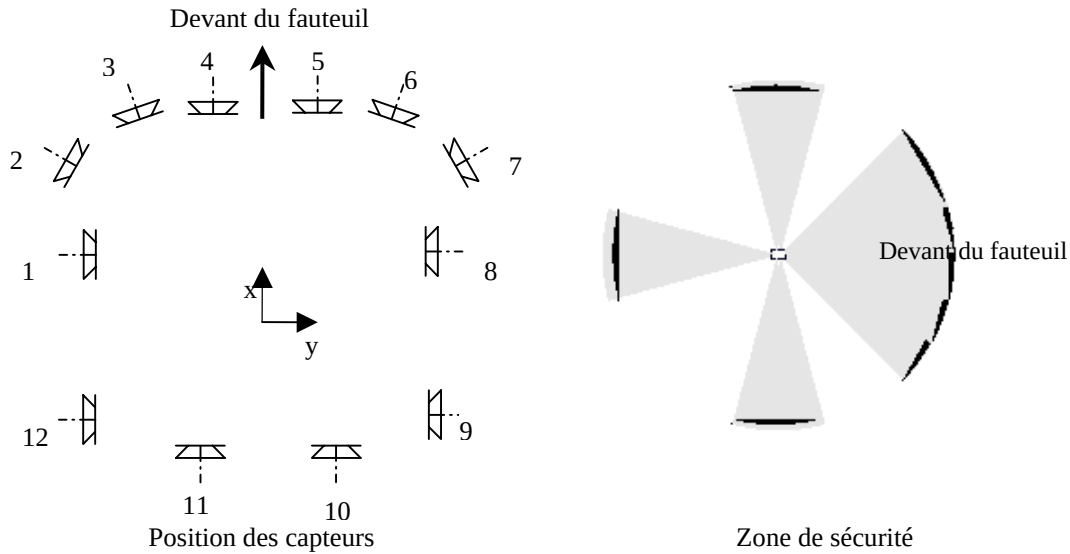


Figure 4.9 : Configuration de Walky

Ceinture de capteurs proposée :

La configuration que nous avons proposée est basée sur la ceinture de Blossom. Elle est constituée en plus de cinq capteurs pour élargir la zone de sécurité (figure 4.10).

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)	θ
1	133	-205	$-\pi/2$
2	175	-197	$-\pi/3$
3	203	-177	$-\pi/6$
4	214	-150	0
5	214	150	0
6	203	177	$\pi/6$
7	175	197	$\pi/3$
8	133	205	$\pi/2$
9	-175	197	$2\pi/3$
10	-203	177	$5\pi/6$
11	-214	0	π
12	-203	177	$-5\pi/6$
13	-175	-197	$-2\pi/3$

Tab 4.5 : Ceinture de capteurs proposée

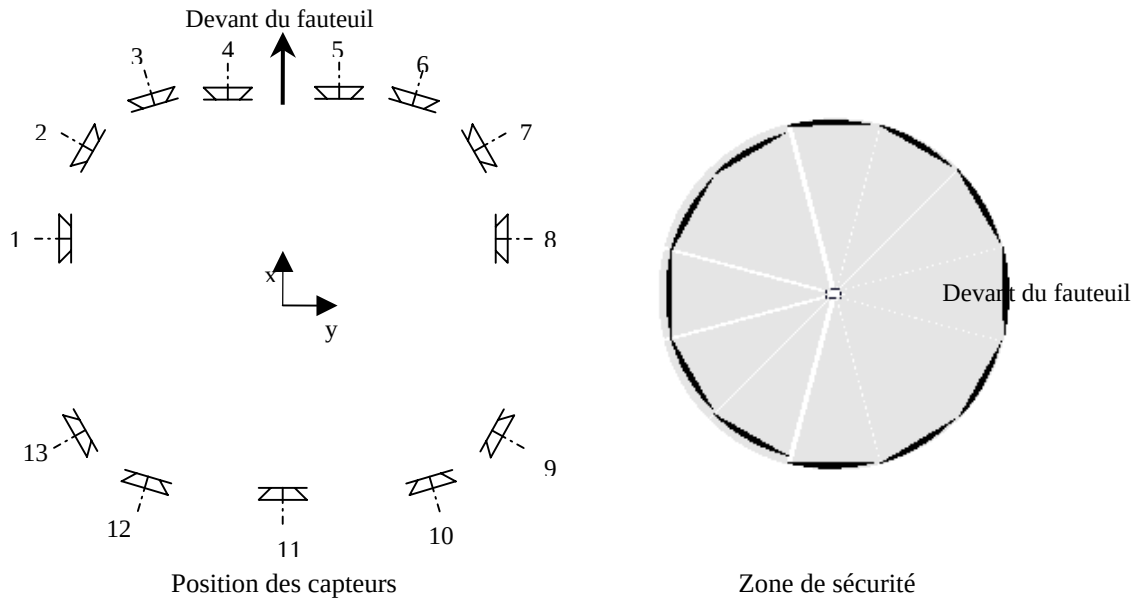


Figure 4.10 : Ceinture de capteurs virtuels

5.1 Environnement de test

Pour étudier les configurations des systèmes de perception, des tests de simulation seront établis dans différents environnements. La structure d'un environnement de simulation est conçue pour analyser la détection des obstacles selon la position et l'orientation des capteurs.

La figure 4.11 illustre deux environnements de test : le premier est un plan constitué d'un couloir et des chambres et le second un environnement constitué de quelques objets distribués.

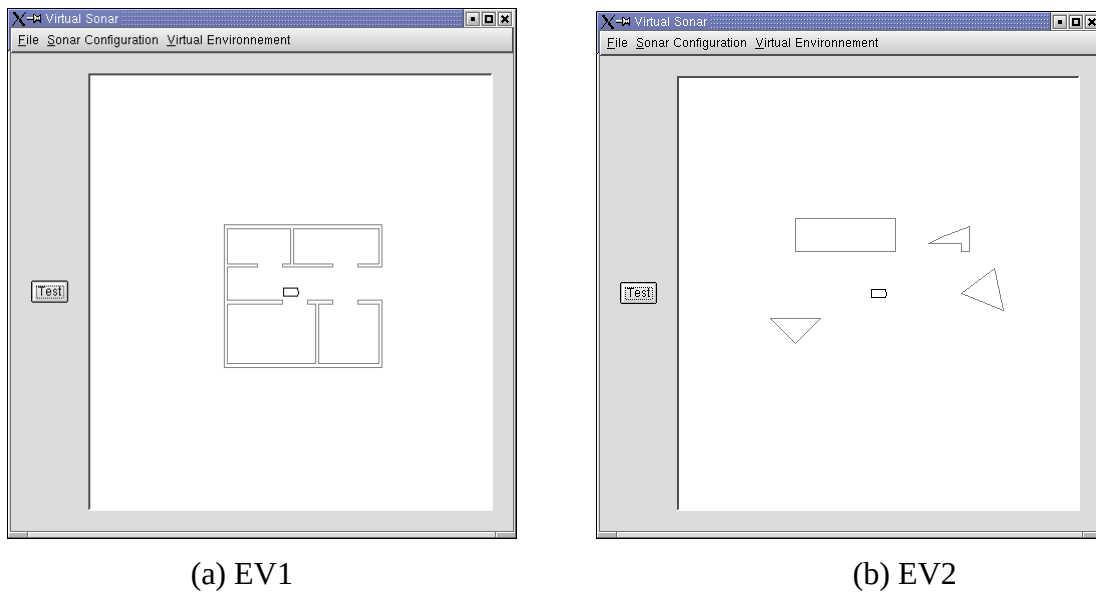
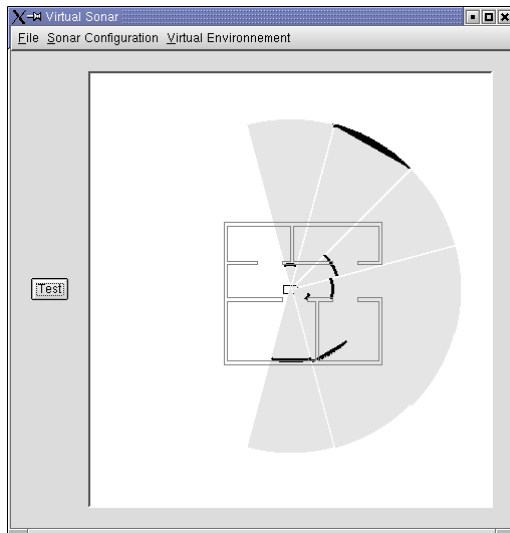
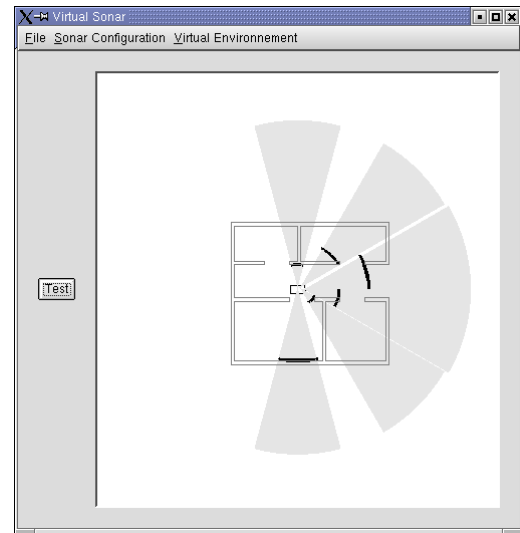


Figure 4.11 : Environnement de test

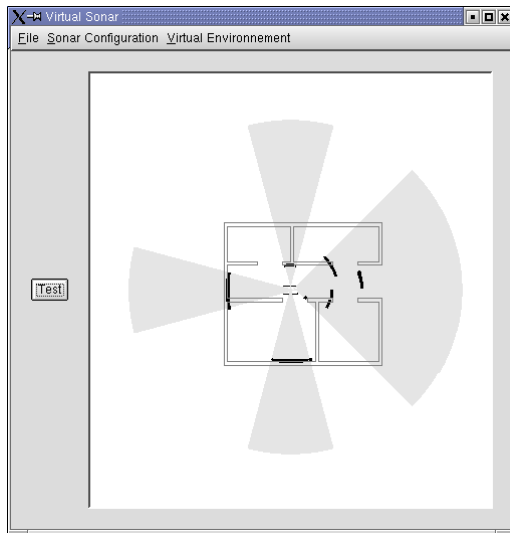
Discussion : nous présentons ici les résultats de simulation des différentes configurations des systèmes de perception dans ces environnements de test.



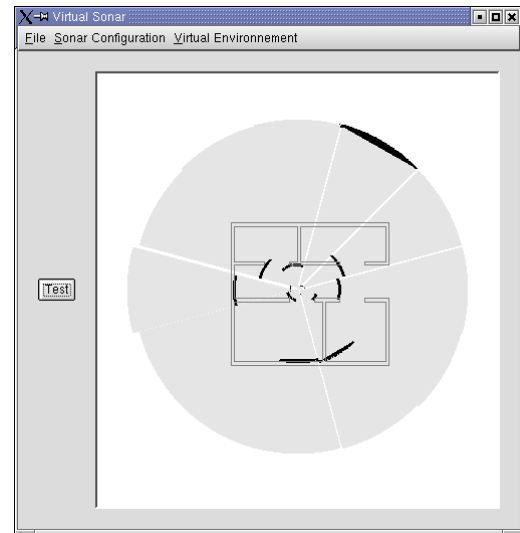
EV1 : Blossom



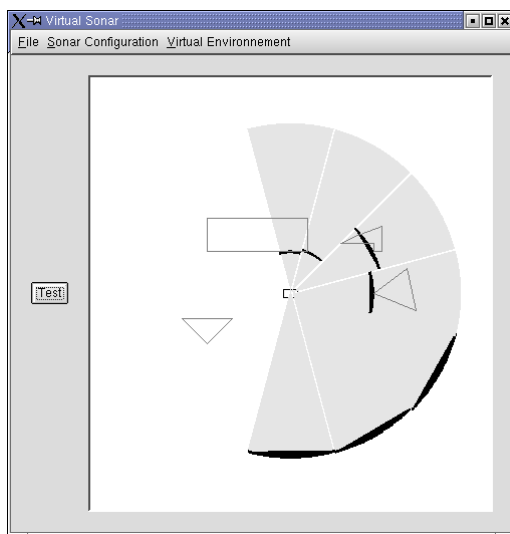
EV1 : Swami Jr



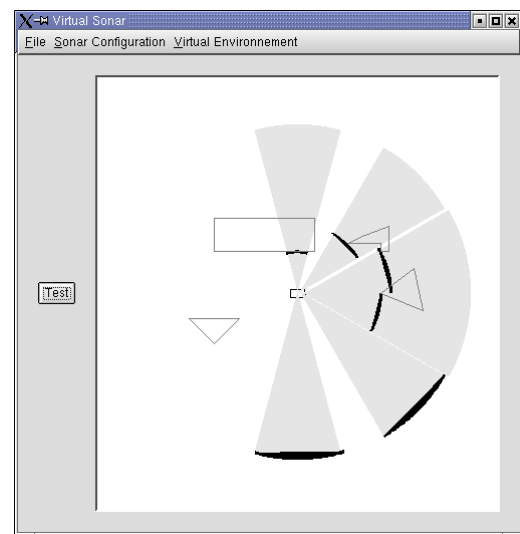
EV1 : Walky



EV1 : Ceinture de capteurs virtuels



EV2 : Blossom



EV2 : Swami Jr

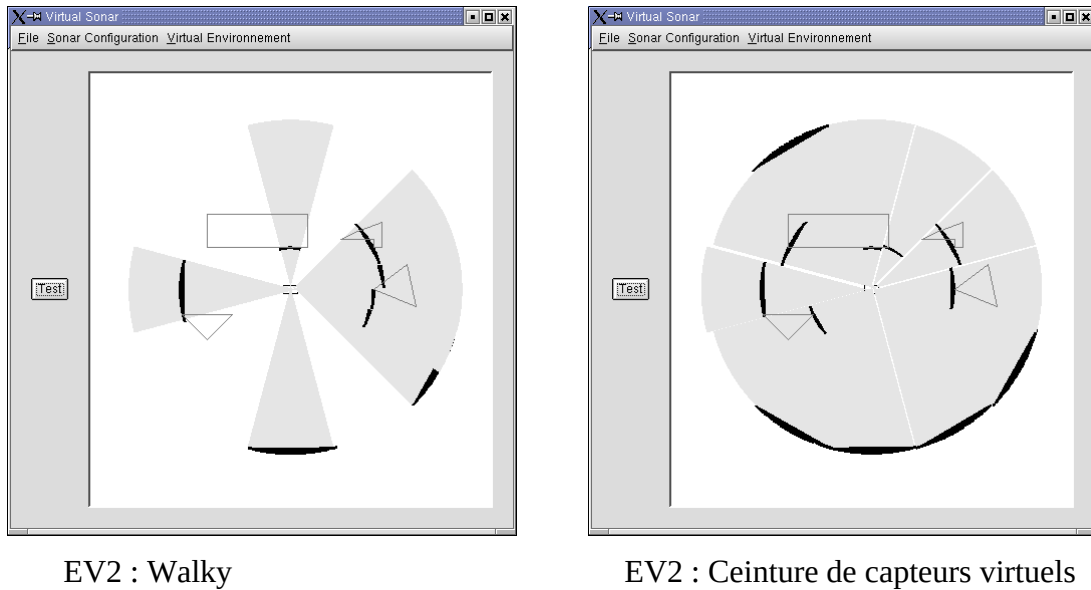


Figure 4.12 : *Simulation des différentes configurations dans des environnements de test.*

L'analyse de ces résultats de simulation montre le vrai conflit entre le nombre de capteurs et de ses orientations d'un côté et le champ couvert d'un autre côté.

Dans les ceintures Blossom et Swami Jr, le même nombre de capteurs est utilisé, cependant la première donne une zone sécurisée plus importante. Avec la ceinture de capteurs virtuels, le robot peut avoir plus d'informations que les autres structures, mais il faut aussi noter que la ceinture de Walky offre aussi au robot des données dans les directions les plus importantes (devant, arrière, droite et gauche).

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle géométrique pour la simulation d'un capteur ultrasonore en vue de son utilisation dans la conception des systèmes de perception pour un fauteuil roulant électrique. Ce modèle est une amélioration de la méthode de prédiction des mesures US proposée dans [Zuo 00]. L'introduction d'un nouveau critère permet de résoudre le problème de détection des objets cachés.

Le capteur virtuel ainsi développé est utilisé dans la simulation de différentes configurations des systèmes de perception à ultrason.

CHAPITRE 5 : SIMULATION DE LA CONDUITE D'UN FAUTEUIL ROULANT VIRTUEL DANS DES EVS

1. Introduction
2. Le Système graphique utilisé
 - 2.1 Système d'exploitation
 - 2.2 Langage de programmation
 - 2.3 OpenGL
3. Mise en œuvre du simulateur à réalité virtuelle
 - 3.1 Fauteuil Foulant Virtuel
 - 3.2 Interaction entre l'utilisateur et l'environnement
 - 3.3 Environnement virtuel et scénarios d'entraînement
4. Conclusion

Résumé :

Nous proposons ici des résultats concernant le fonctionnement du simulateur dans sa totalité.

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons la structure de notre application. La deuxième partie est consacrée à l'analyse de quelques résultats de l'interaction entre l'utilisateur et son fauteuil virtuel à travers l'Interface Virtuelle. La dernière section présente les scénarios d'entraînement et les environnements virtuels (EVs) que nous avons utilisé.

1. Introduction

L'outil de simulation numérique et la réalité virtuelle permettent de mettre un être humain dans des situations voisines de la vie réelle sans danger et augmentent sa motivation. Un simulateur de conduite destiné à l'entraînement des handicapés moteurs (surtout enfant) permet la réalisation des exercices réalistes de conduite de fauteuil roulant électrique, ainsi que l'utilisation d'un outil de contrôle.

Dans le premier chapitre, nous avons mentionné les différents modèles qui doivent être utilisés pour faire fonctionner ce simulateur. En suite, dans les trois autres chapitres (2, 3 et 4) l'étude et l'application de chaque modèle sont présentés. Ce chapitre sert à la combinaison entre ces modules et à la description de l'implémentation logicielle de notre simulateur. Ainsi un ensemble de tests sera présenté pour illustrer le fonctionnement du système dans sa totalité.

2. Le Système graphique utilisé

Le rôle du système graphique est de générer l'application (le simulateur) qui peut représenter d'une façon la plus réaliste possible des environnements réels et le fauteuil roulant électrique. Le système logiciel utilisé est développé sous Linux utilisant OpenGL.

2.1 Système d'exploitation

Le système d'exploitation que nous avons utilisé dans l'implémentation de notre simulateur est une version libre d'UNIX. Il s'agit de Linux Mandrake connu pour son confort d'utilisation, sa vitesse (en terme de temps de compilation, optimisation et exécution de programme) et sa stabilité.

2.2 Langage de programmation

Le simulateur a été développé sous C++ avec l'environnement de fenêtrage Qt 3.0. Ce qui nous permet de faire une programmation orientée objet utilisant des différentes classes.

2.3 OpenGL

OpenGL est une Application Programming Interface API professionnelle de graphisme 2D/3D développée initialement par Silicon Graphics (contrôlée de nos jours par un consortium industriel : ARB-OpenGL Architectural Review Board). Elle réalise une interface entre le matériel graphique installé sur la machine et l'application elle-même. Cela permet de faire abstraction du hardware, vu du côté du programmeur. Cette API est disponible sous divers systèmes d'exploitation tels que DOS, Windows, MacOS, Linux/UNIX ou OS/2.

La première version d'OpenGL est sortie en 1992 [Dav 99], Elle a été rapidement adoptée comme l'API graphique de premier choix pour les applications interactives 3D en temps réel.

OpenGL est une API basée sur des procédures plutôt qu'une interface descriptive. D'autres systèmes comme le VRML (Virtual Reality Modeling Language) sont descriptifs où on indique seulement qu'un objet spécifique doit être dessiné à une position donnée. L'inconvénient d'utiliser une API comme OpenGL est que dans l'application on doit spécifier toutes les opérations dans le détail et dans l'ordre correct pour obtenir le résultat souhaité. L'avantage de cette approche consiste en ce qu'elle permet une grande flexibilité dans le processus de génération de l'image.

La façon la plus simple de montrer la puissance de l'interface procédurale est de noter qu'une interface descriptive peut être construite sur le sommet d'une interface procédurale, mais non l'inverse.

Le kit de développement OpenGL est constitué généralement de deux ensembles : GL qui fournit les appels aux 120 fonctions OpenGL et Glu qui est une surcouche d'OpenGL fournissant des fonctions plus évoluées pour la gestion des caméras.

La prise en charge de l'interface OpenGL sous Linux est réalisée principalement par le serveur X, qui n'est rien d'autre que le programme fournissant les services graphiques aux autres applications sous Unix (Figure 5.1). Elle est implémentée par une extension de l'interface de programmation XWindow, que l'on nomme tout simplement GLX. Cependant, le serveur X ne peut pas tout faire à lui tout seul, car pour des raisons de performances, il lui faut accéder directement au matériel lors du rendu de scènes 3D. Il s'appuie donc pour cela sur un module du noyau, dont le but est de contrôler les accès aux ressources matérielles et de garantir ainsi la stabilité globale du système.

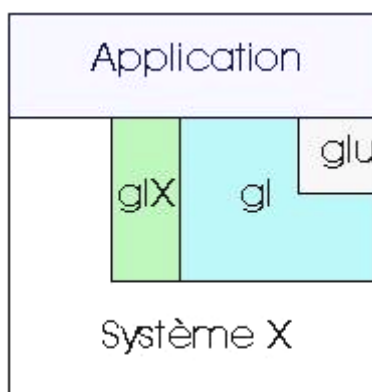


Figure 5.1: Structure d'OpenGL pour un système X Window

3. Mise en œuvre du simulateur à réalité virtuelle

L'objectif de ce projet est de réaliser un simulateur pour l'entraînement de la conduite d'un fauteuil roulant électrique utilisant la RV. Ce système a la structure suivante :

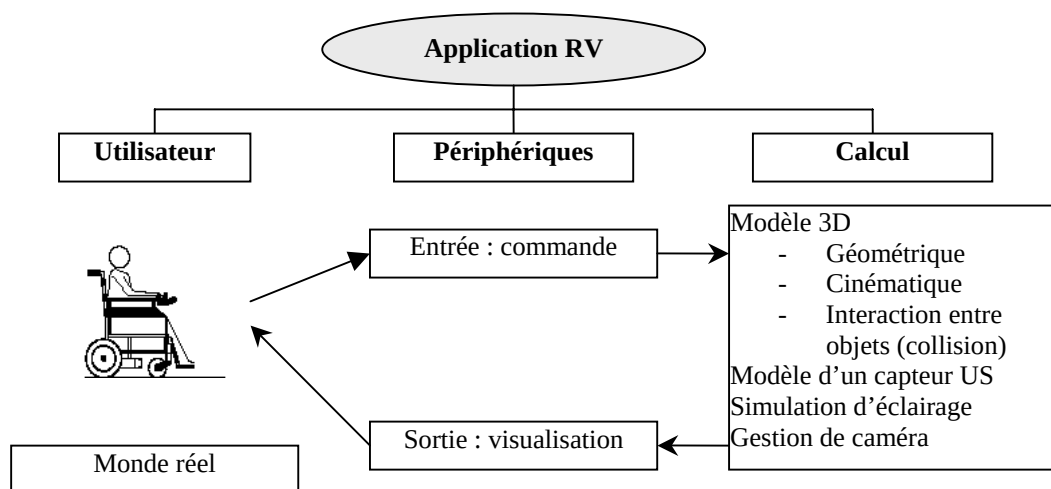


Figure 5.2 : Simulateur à base de Réalité virtuelle

Notre système est une application Orienté Objet constitué de plusieurs classes citons par exemple :

Modèle 3D : Point, Vector, Matrix, Transform, Bbox, BboxTree, Shape, Object,...etc

Detection de collision: CollDetector, Response.

Capteur ultrasonore: Sonar.

Interface virtuelle : Option, IHM.

En plus de ça, il y a des classes décrivant les interfaces graphiques, la gestion des évènements et l'affichage de la scène.

3.1 Fauteuil Foulant Virtuel

La modélisation géométrique 3D d'un fauteuil roulant électrique a été effectuée et illustrée dans la figure 5.3

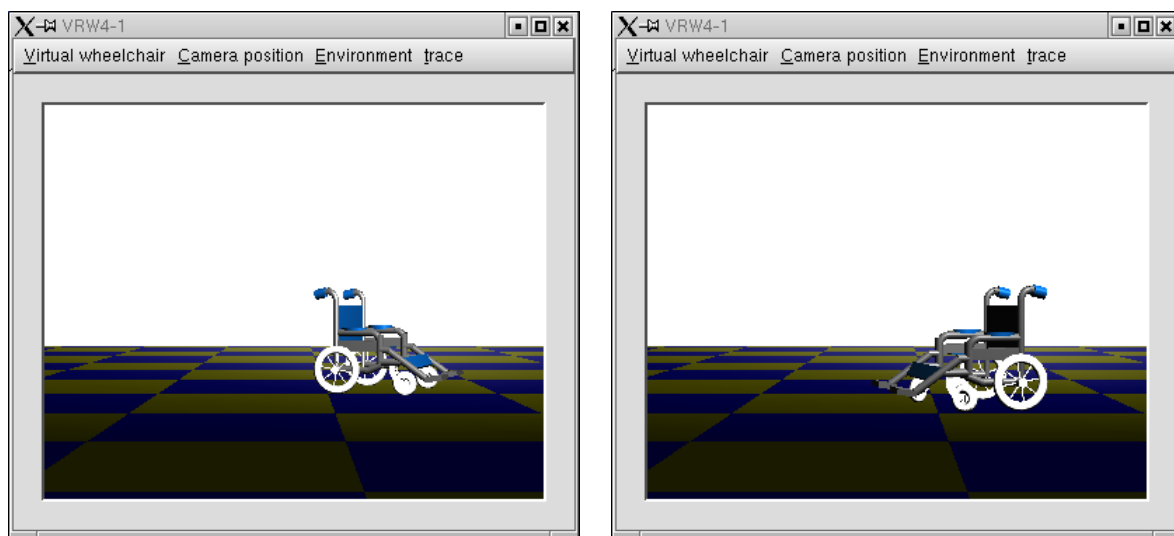
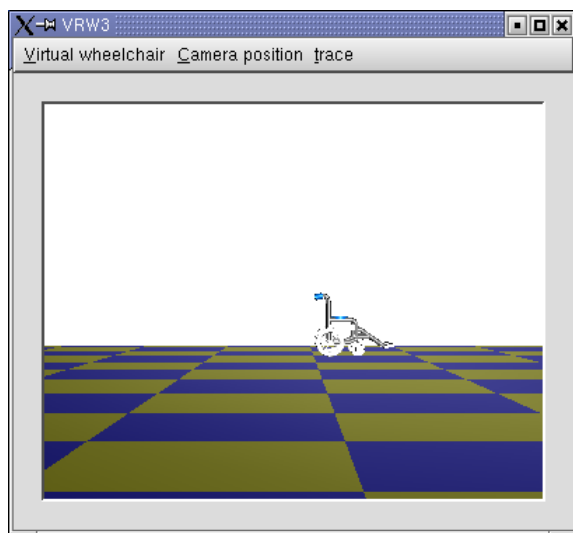


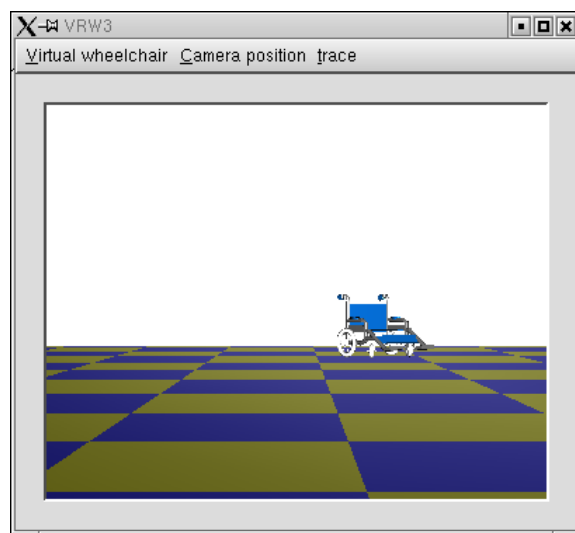
Figure 5.3 : Modélisation géométrique du FRV

Le FRE se déplace à faibles vitesses (3.2m/s pour la marche avant et 1m/s pour la marche en arrière) ce qui nous motive à utiliser un modèle cinématique en configuration pour la mise à jour de sa configuration.

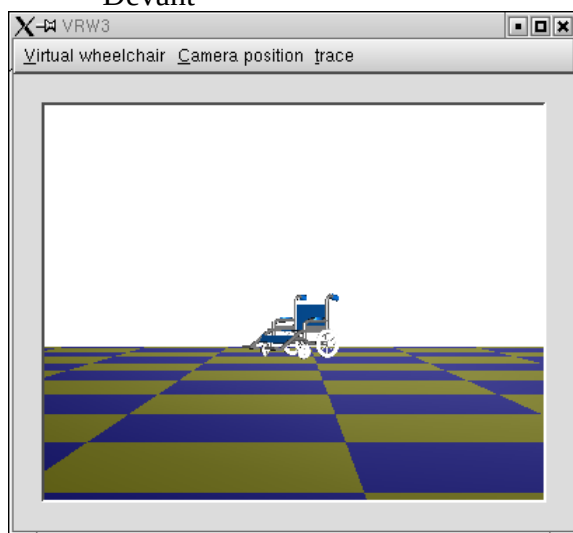
La particularité de ce modèle réside dans l'information fournie à l'effet de chaque commande. En plus de la situation du fauteuil (position et orientation), il donne aussi l'orientation des différentes roues. La figure 5.4 représente bien l'état des roues folles pour chaque action de commande.



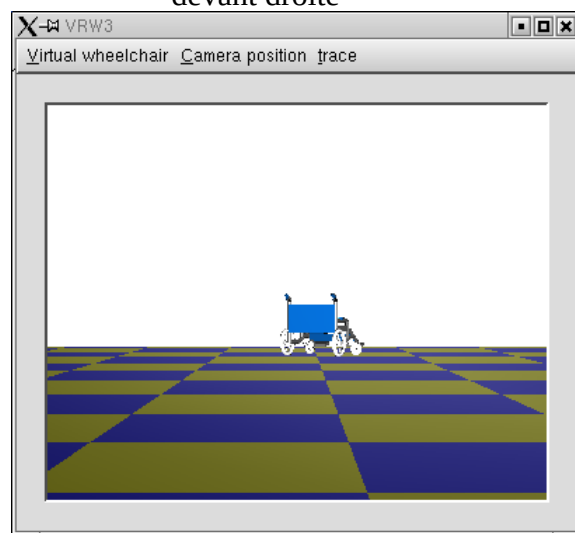
Devant



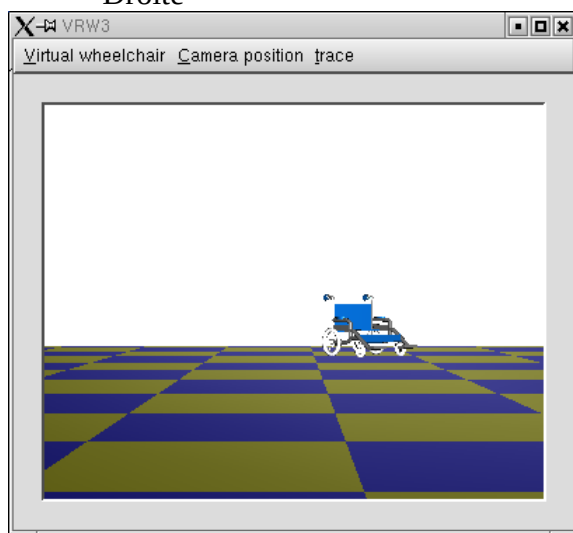
devant droite



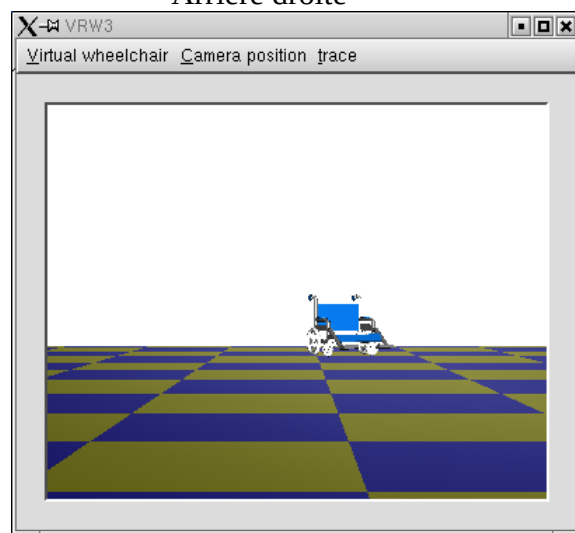
Droite



Arrière droite



Arrière



Arrière gauche

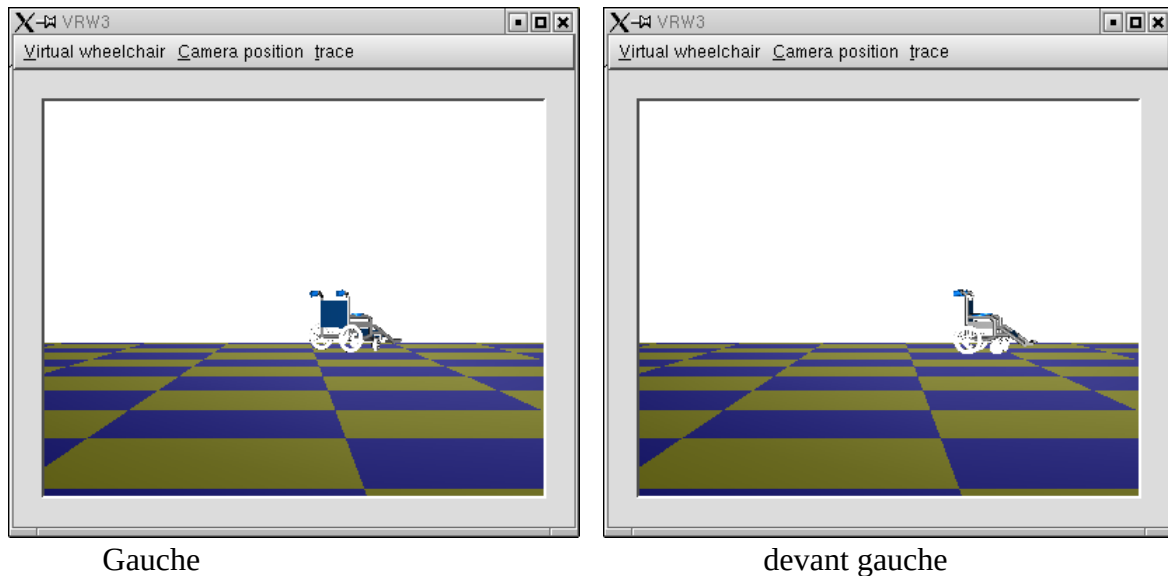


Figure 5.4 : Effets des différentes commandes sur l'orientation des roues folles

3.2 Interaction entre l'utilisateur et l'environnement

L'interaction entre l'utilisateur et l'environnement virtuel se fait en utilisant deux fonctionnalités:

La navigation : une caméra virtuelle est embarquée sur le fauteuil virtuel pour permettre à l'handicapé de se déplacer à l'intérieur de l'espace 3D.

Contrôle : l'handicapé conduit son FRV par l'envoi des commandes via une interface virtuelle.

Un des objectifs principaux de ce projet est d'offrir à un handicapé (surtout aux enfants) un outil d'entraînement à la conduite d'un fauteuil roulant électrique. D'une manière plus précise nous essayons de l'aider pour qu'il puisse à répondre aux questions suivantes :

comment pouvoir se déplacer en avant ou en arrière ?

comment faire tourner le fauteuil à droite ou à gauche ?

quand faut-il tourner sur place ? et comment faire tourner le fauteuil tout en se déplaçant ?

Une interface virtuelle résultant de l'émulation d'une interface homme machine de type switch scanning (BWI) est illustrée dans la figure 5.4. Le balayage des différents items se fait soit d'une façon systématique (dans le sens de direction d'aiguille d'une montre ou dans le sens inverse), soit selon Forward first, Left-Right-Step qui permet d'établir d'une manière optimale des manœuvres)

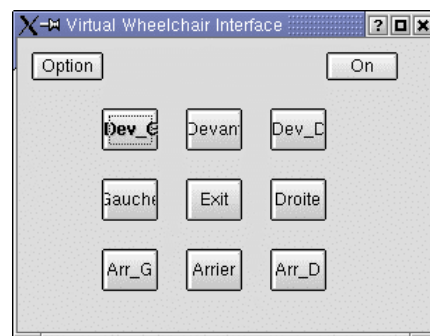
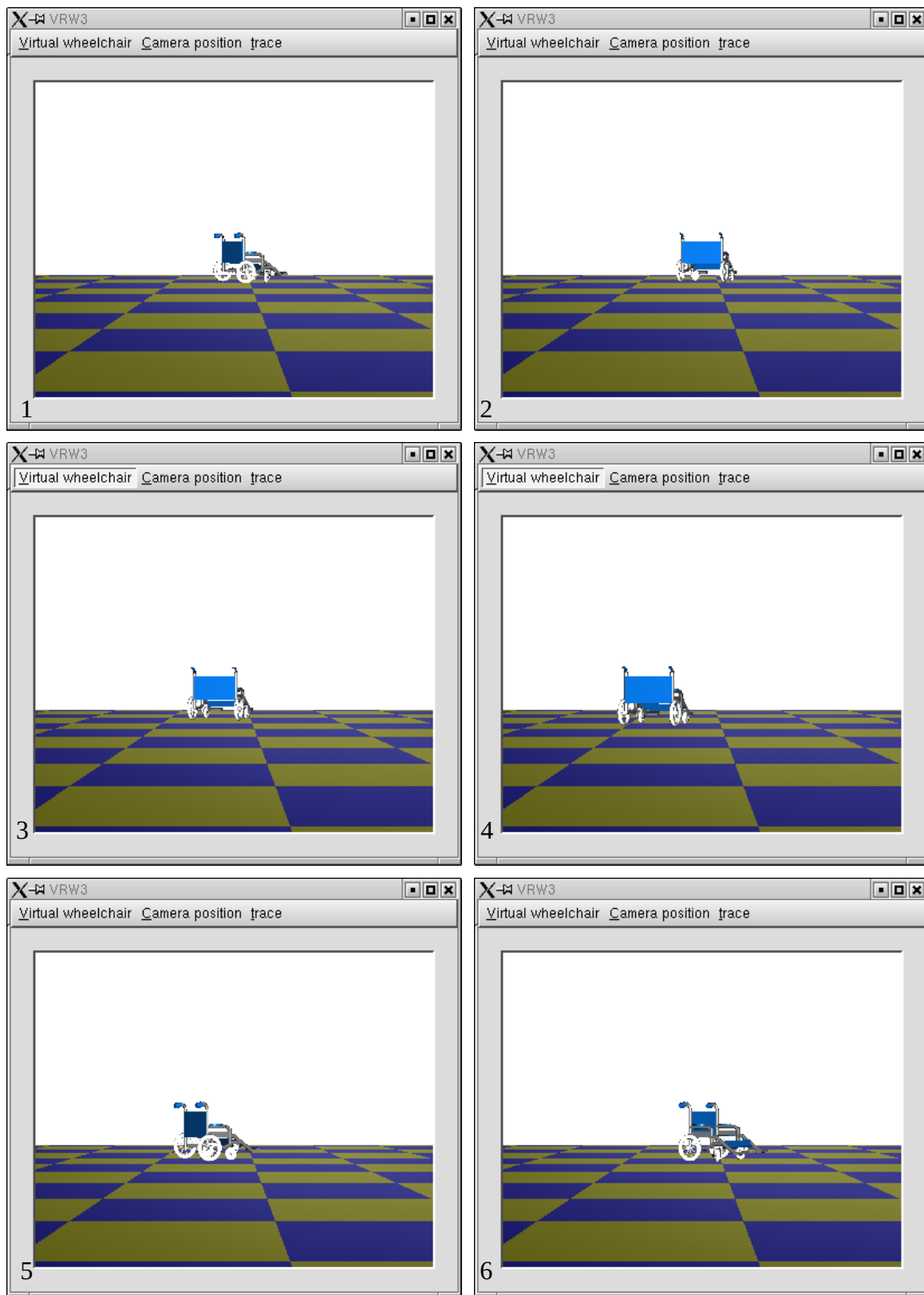


Figure 5.5 : Interface Virtuelle

La figure 5.6 montre un exemple de l'utilisation de l'interface. Les commandes appliquées sont: "Gauche ", "arrière" et "devant droite" successivement.



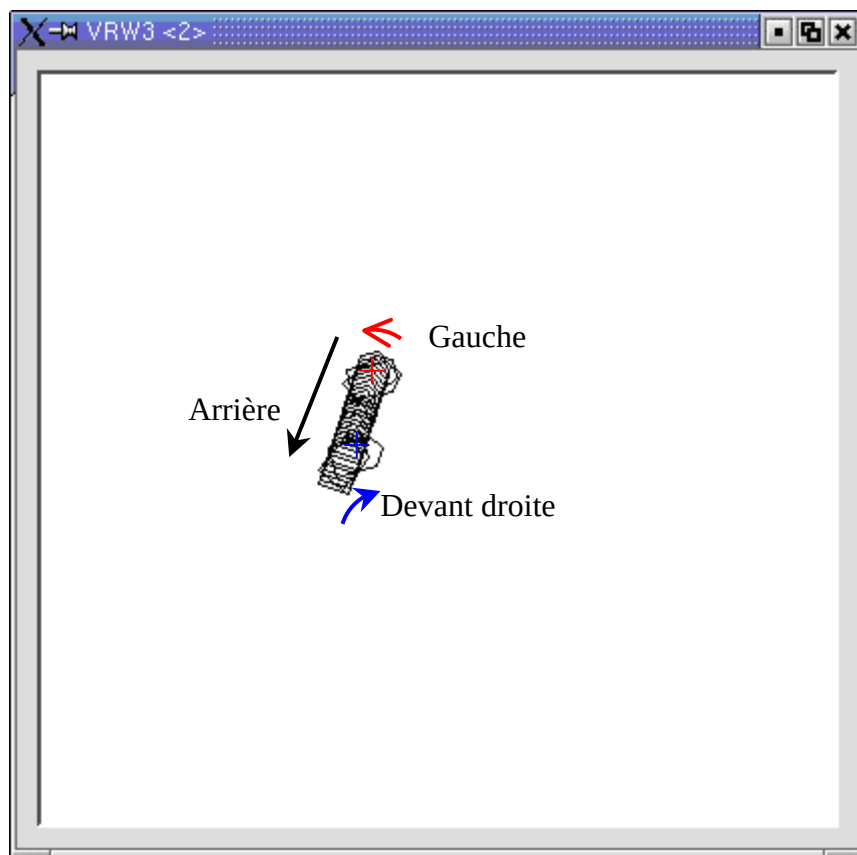


Figure 5.6 : Exemple d'utilisation de l'interface

Ces images illustrent bien l'effet d'une telle commande sur la plate-forme et les roues. La dernière image montre la trace de ce fauteuil et comment "tourner à gauche" se fait sur place et marche "devant droite" se fait avec déplacement.

L'apprentissage des habiletés sensori-motrices peut être fait efficacement et sans risque en naviguant dans des EVs.

3.3 Environnement virtuel et scénarios d'entraînement

Ces environnements d'apprentissage sont :

- illimités en terme de structures (possibilité d'offrir aux apprenants des différents environnements).
- sécurisés.
- rentables à cause de la permission de répéter les tests.

Selon la structure de l'environnement, l'handicapé apprend les tâches nécessaires dans le contrôle d'un fauteuil roulant électrique par un switch dans un environnement ouvert, puis il sera par la suite immergé dans un environnement plus compliqué pour pouvoir améliorer ses capacités de perception et décision.

3.3.1 Environnement ouvert

Cet environnement est un plan infini dans toutes les directions (Figure 5.7). Dans ce monde, l'enfant peut éprouver la joie de la mobilité indépendante sans crainte et sans contraintes. Il peut apprendre à utiliser son interface virtuelle (interface réelle émulée) et comment effectuer des manœuvres.

Dans un point de vue implémentation, la représentation d'un environnement ouvert infini est établie par:

- la création d'un environnement plan sans obstacles de taille finie;
- au cours des déplacements du FRV, un test est effectué sur sa position. En cas où il est très proches aux extrémités de l'environnement, il sera repositionné dans une position plus loin des limites (cela est appliqué seulement dans le mode de visualisation "Navigation").

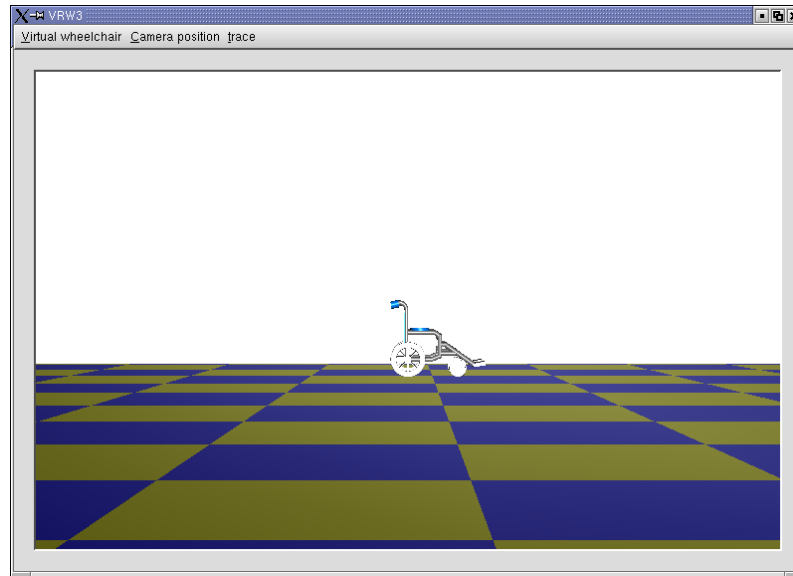


Figure 5.7 : *Environnement ouvert*

3.3.2 Environnement 3D

Le type d'environnements que nous avons simulé est construit à partir d'un plan d'appartement (celui utilisé pour la simulation des capteurs US dans le chapitre 4).

Dans cet environnement domestique, l'enfant ou l'handicapé moteur en général se met en général dans des situations nécessitant un processus d'entraînement. Citons par exemple :

- Arrêter avant d'être en collision avec un mur,
- Tourner à droite ou à gauche et traverser une porte,
- Aller tout droit dans un couloir ou à l'intérieur d'une pièce pour arriver à une position désirée.
- Trouver une solution lorsqu'on entre en collision avec un mur.

Le conducteur démarre d'un point fixe, ce qui l'aide à mémoriser éventuellement la configuration de l'EV. La position des obstacles (murs) est aussi fixe. Cela permet aux enfants d'améliorer leurs capacités de mémorisation visuelle. Ce type d'environnement est destiné à favoriser les sens de curiosité et de mobilité indépendante. Il permet aussi à l'handicapé d'apprendre l'utilisation de son fauteuil pour l'exploration des environnements réels.

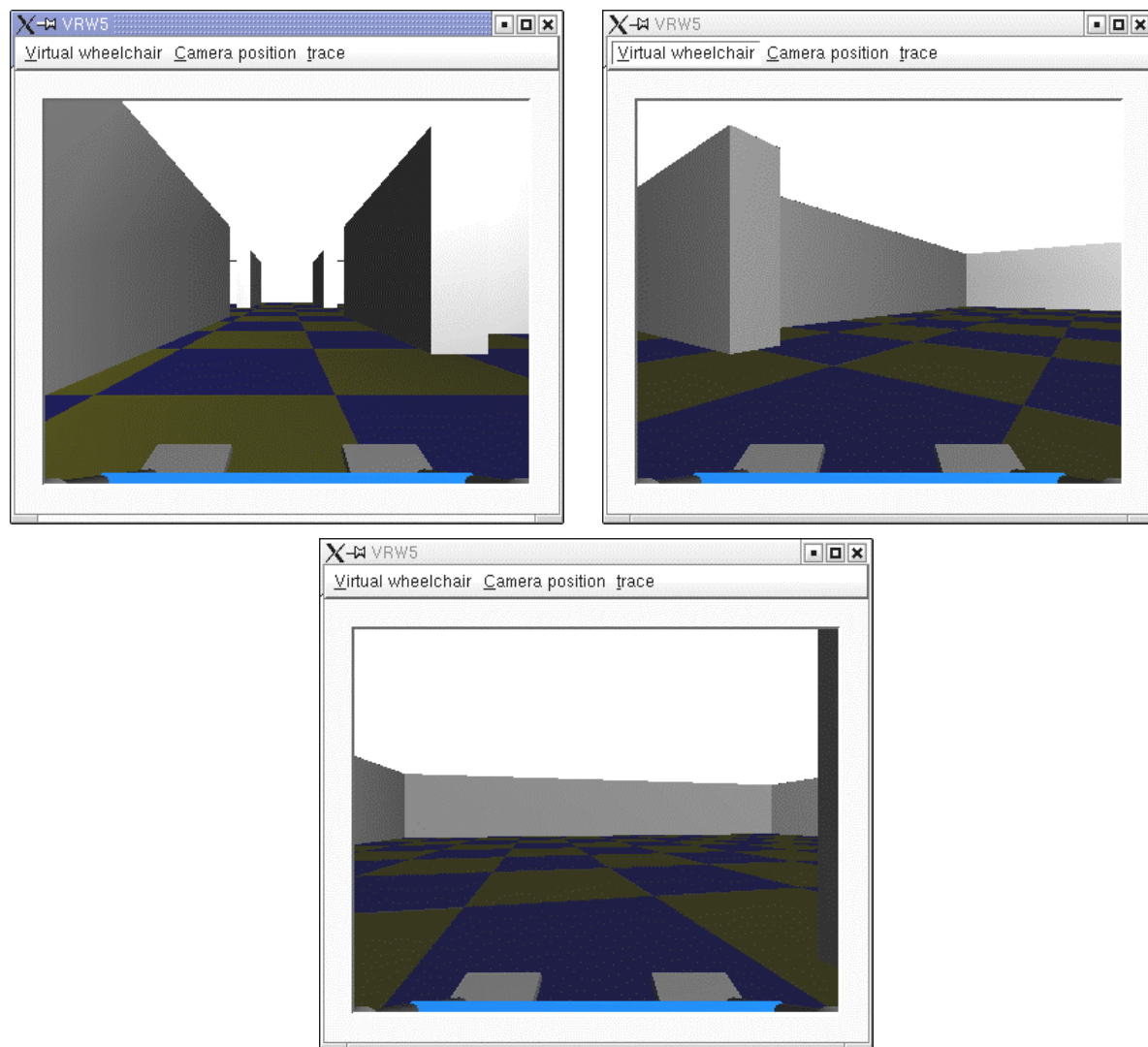


Figure 5.8 : *Navigation dans un environnement virtuel*

Le test de collision entre le FRV et les objets de l'environnement est activé. Donc après chaque action de commande, on calcule la nouvelle configuration et on teste la possibilité d'être dans une situation de collision. Dans le cas d'une prédiction de collision, la commande ne sera pas appliquée et le FRV reste immobile. Seulement lorsque l'handicapé applique une commande qui ne conduit pas à une collision elle sera transmise au fauteuil.

L'utilisateur du simulateur peut choisir le mode de visualisation par le choix de la position du caméra comme suit:

- **Par défaut :** caméra positionnée en un point fixe,
- **Navigation :** caméra embarqué sur le fauteuil, c'est avec ce mode que l'handicape apprend à utiliser son fauteuil en navigant et explorant l'environnement.
- **En haut :** caméra positionnée en haut ce qui donne un affichage proche d'une vue 2D. Ce mode de visualisation permet d'avoir une vision globale du fauteuil (Figure 5.9) et de son environnement, on peut alors voir par exemple ce qui se passe à l'arrière du fauteuil (notamment les collisions), ce qui n'est pas possible dans le mode précédent.

Le simulateur offre à son utilisateur la possibilité de visualiser la trace de son mouvement en 2D.

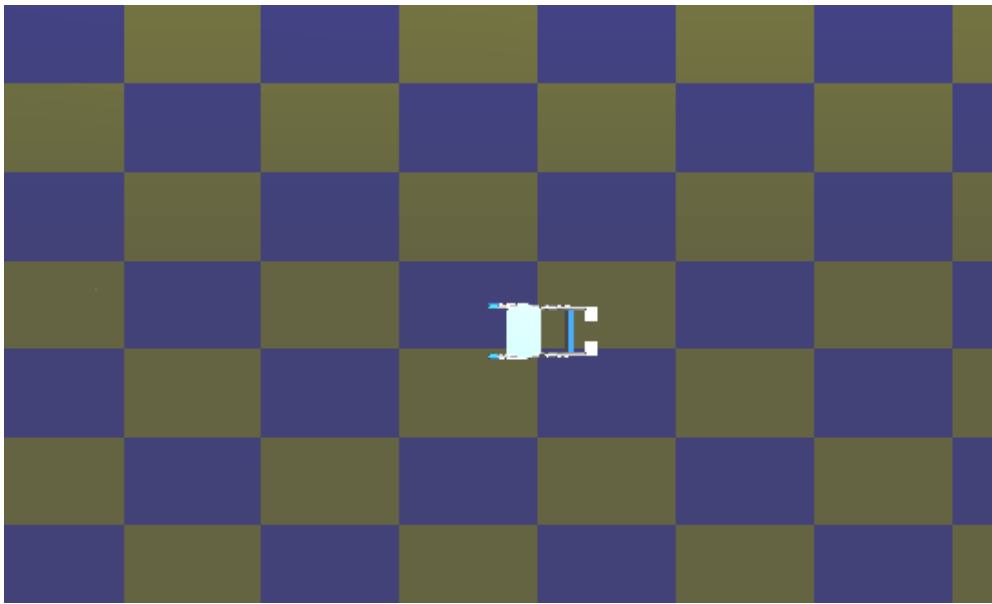


Figure 5.9 : *Visualisation par une caméra en haut*

4. Conclusion

Ce chapitre est dédié à une présentation du simulateur de point de vue implémentation, il est développé sous le système Linux utilisant le moteur OpenGL pour le graphisme et la visualisation.

Notre système d'apprentissage par réalité virtuelle met l'utilisateur, handicapé, dans des situations très proches des situations réelles. il permet ainsi d'acquérir le savoir pour se déplacer de façon autonome et indépendamment.

Ce simulateur permet aussi de familiariser l'utilisateur avec une interface homme machine de contrôle de type switch scanning. L'utilisation des différents environnements d'entraînement et la visualisation par le mode "Navigation" facilite la compréhension du fonctionnement du fauteuil roulant électrique et aide l'handicapé dans l'amélioration de ses habilités sensorielles et de contrôle en assurant sa sécurité et son indépendance.

CONCLUSION

Tout au long de ce mémoire, nous avons présenté les différents modules nécessaires dans la conception d'un système de simulation de fauteuil roulant électrique. Dans la première section de cette conclusion, nous présentons le travail que nous avons réalisé en montrant nos apports, les résultats obtenus ainsi que les limites de notre simulateur. L'existence de ces limites nous amène à présenter, dans la deuxième section, les prolongements intéressants et les perspectives de recherche.

1. Travail réalisé

Nous avons présenté le développement d'un simulateur de conduite de fauteuil roulant électrique constitué de plusieurs modules logiciels, à savoir :

- ✓ Les modélisations géométrique et cinématique du fauteuil roulant électrique ;
- ✓ Conception d'une interface virtuelle émulant une interface homme machine de contrôle de type switch scanning ;
- ✓ Modélisation des objets virtuels et détection des collisions ;
- ✓ Développement d'un capteur US virtuel (modèle du capteur pour la simulation) et construction de plusieurs systèmes de perception à base de ce capteur ;
- ✓ Programme d'entraînement constitué de deux environnements virtuels.

2. Apport et résultats

Modélisation cinématique du fauteuil : le FRE se déplace avec des faibles vitesses. C'est la raison pour laquelle nous avons établi un modèle cinématique en configuration permettant de simuler, d'une façon réaliste, les déplacements du FRE ainsi l'état des différentes roues (surtout roues folles). En réalité l'état des roues folles n'influe pas sur la situation du FRE (position et orientation) mais il permet une bonne simulation en 3D. Notons qu'aucun des projets analysés pendant notre étude bibliographique n'a utilisé ce type de modélisation.

IHM : l'handicapé conduit son fauteuil via une IHM selon son degré d'handicap. Nous avons émulé une IHM de type switch scanning (BWI) car elle permet aux personnes sévèrement handicapées de dépasser leurs limites.

Contrôle : le simulateur est un outil d'entraînement donc le fauteuil roulant virtuel doit se comporter comme un fauteuil réel. Dans notre travail, le mode de contrôle utilisé est le mode manuel où les commandes sont appliquées directement au fauteuil roulant via l'interface virtuelle.

Modélisation de l'environnement virtuel : l'environnement est décrit géométriquement, ainsi par les interactions entre objets. Le FRV est l'objet dynamique, son mouvement est généré par le calcul de sa configuration utilisant le modèle cinématique selon la commande exercée. Au niveau de cette phase de simulation, le module de détection de collision est activé

lorsque l'environnement contient des obstacles. Cela permet de prédire une situation de collision entre le fauteuil roulant virtuel et son environnement. En cas de collision prédite, le FRV reste immobile tant que la commande conduit à l'entrer dans une situation de collision. L'implémentation de ce module impose le développement de plusieurs algorithmes (chapitre 3).

Capteur US : la simulation du processus de détection des obstacles par capteur à US est un point critique dans la simulation. Seul le projet présenté dans [Nin 00] prend en considération ce point, cependant le modèle utilisé est unidimensionnel. Au sein de notre projet, nous avons implémenté un modèle géométrique 2D de prédiction de mesures US. Notre contribution réside dans la proposition d'un critère pour l'évitement de la détection des objets cachés.

Scénarios d'entraînement : nous avons proposé deux scénarios d'entraînement dont le but est d'offrir aux handicapés des situations de test. Le premier est un environnement ouvert pour permettre à l'handicapé d'apprendre l'utilisation d'un switch. Le deuxième est un plan d'appartement pour lui offrir la possibilité d'améliorer ses habiletés de perception et de contrôle. L'utilisation d'un mode de visualisation "Navigation" permet de l'immerger dans son environnement pour mieux l'apprendre.

3. Perspectives :

IHM : pour qu'un simulateur soit utilisable par une grande population de personnes handicapées, il est indispensable d'offrir la possibilité de choisir l'IHM à utiliser selon le degré d'handicap. Nous pensons par exemple à l'utilisation d'un joystick et des interfaces basées sur le mouvement de tête et de main. Ainsi, à l'aide d'un simulateur nous pouvons développer des IHMs de type GUI (Graphical User Interface). Ces dernières peuvent être ensuite implémenté sur des fauteuils réels.

Contrôle : comme ce simulateur est adressé aux spécialistes de robotique de réhabilitation, il peut être considéré comme une base pour le développement des architecture de contrôle. Afin de valider des systèmes de contrôle en coopération homme-machine, il est intéressant de les simuler et d'étudier l'acceptation par l'handicapé des systèmes proposés.

Environnement virtuel : les modèles utilisés sont, à l'heure actuelle, incomplets et doivent tenir compte de la nature des surfaces. Il serait aussi intéressant d'introduire un traitement des collisions par la génération d'un son lorsque le fauteuil rencontre un objet.

Capteur US : le modèle que nous avons utilisé dans la simulation du processus de détection des obstacles par capteur US est un modèle géométrique 2D. Il serait pertinent de développer un modèle tridimensionnel.

Scénarios d'entraînement: notre objectif est de proposer aux handicapés, surtout enfants, un système pour l'apprentissage de l'utilisation d'un fauteuil roulant électrique d'une façon indépendante. La phase de test du simulateur par des handicapés moteurs, de différents âges et qui n'ont jamais utilisé un fauteuil, et l'analyse de l'évaluation de leurs habiletés de contrôle et de perception sont très importantes.

Matériel : ce projet est une application logicielle de la réalité virtuelle dans le domaine de la robotique de réhabilitation. Il est bien connu que le degré d'immersion et d'interactivité

dans une telle application dépend du matériel utilisé, donc il est conseillé d'introduire quelques dispositifs comme un visiocasque (HMD).

ANNEXE A : CALCUL DU MODELE CINEMATIQUE DU FAUTEUIL

Avant de faire le calcul du modèle cinématique, notons que la différence entre les deux schémas dans la deuxième chapitre (Figure 2.2 et Figure 2.5 (chapitre2)) réside dans le sens des angles de rotation φ .

Les valeurs des paramètres géométriques des roues sont résumées dans le tableau Tabl A.1.

Roues	α	β	φ	l	r	d
f_1	$-\pi/2$	0	φ_1	$\frac{L}{2}$	r_1	-
f_2	$\pi/2$	0	φ_2	$\frac{L}{2}$	r_1	-
d_1	$-\pi/4$	β_{d1}	φ_3	$\sqrt{2} \cdot \frac{L}{2}$	r_2	d
d_2	$\pi/4$	β_{d2}	φ_4	$\sqrt{2} \cdot \frac{L}{2}$	r_2	d

Tab A.1: paramètres géométriques d'un fauteuil roulant électrique

Représentation des contraintes de roulement sans glissement:

$$J_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + J_2 \cdot \dot{\varphi} = 0$$

$$C_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p + C_2 \cdot \dot{\beta}_d = 0$$

détermination des matrices :

$$\bullet \quad J_1 = \begin{bmatrix} J_{1f} \\ J_1(\beta_d) \end{bmatrix}$$

et comme le fauteuil possède deux roues décentrées orientables :

$$J_1(\beta_d) = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_{d1} + \beta_{d1}) & \cos(\alpha_{d1} + \beta_{d1}) & l_{d1} \cos(\beta_{d1}) \\ -\sin(\alpha_{d2} + \beta_{d2}) & \cos(\alpha_{d2} + \beta_{d2}) & l_{d2} \cos(\beta_{d2}) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & \sqrt{2} \frac{L}{2} \cos(\beta_{d1}) \\ -\sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & \sqrt{2} \frac{L}{2} \cos(\beta_{d2}) \end{bmatrix}$$

et deux roues fixes :

$$J_{1f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{L}{2} \\ -1 & 0 & \frac{L}{2} \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad J_2 = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad C_1(\beta_d) = \begin{bmatrix} C_{1f} \\ C_{1d}(\beta_d) \end{bmatrix} \text{ où}$$

$$C_{1f} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{f1} + \beta_{f1}) & \sin(\alpha_{f1} + \beta_{f1}) & l_{f1} \sin(\beta_{f1}) \\ \cos(\alpha_{f2} + \beta_{f2}) & \sin(\alpha_{f2} + \beta_{f2}) & l_{f2} \cos(\beta_{f2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

et

$$C_{1d}(\beta_d) = \begin{bmatrix} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & d + \sqrt{2} \frac{L}{2} \sin(\beta_{d1}) \\ \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & d + \sqrt{2} \frac{L}{2} \sin(\beta_{d2}) \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ d & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \text{ et } C_{2d} = \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix}$$

Calcul du modèle cinématique :

- Configuration de posture : d'après (2.13), il en découle que $C_1^* = C_1$, une base de

$$\text{noyau}(C_1^*) \text{ est donnée par } \Sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le degré de mobilité de la plate forme vaut donc :

$$\delta_{mp} = \dim(\text{noyau}(C_1^*)) = 3 - \text{rang}(C_1^*) = 2$$

Le degré de dirigeabilité $\delta_{sp} = 0$ et le degré de manœuvrabilité $\delta_{Mp} = 2$. En absence de roues centrées orientables, les commandes de mobilité et de manœuvrabilité sont identiques.

D'après (2.15), il existe η_p , vecteur de dimension 2 tel que :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot c_\theta \\ \dot{y} = v \cdot s_\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \text{ donc } \dot{\xi}_p = R^T(\theta) \cdot \Sigma \eta_p = \begin{bmatrix} c_\theta & 0 \\ s_\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \eta_p$$

On peut identifier $v = \eta_{p1}$ et $\omega = \eta_{p2}$.

- Détermination de $\dot{\beta}_d$:

Rappelons (2.20) que : $\dot{\beta}_d = C^{-1}_2 \cdot C_1(\beta_c, \beta_d) \cdot R(\theta) \cdot \dot{\xi}_p$

$$\dot{\beta}_d = \begin{bmatrix} -\frac{1}{d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & -\frac{1}{d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \cdot \sin(\beta_{d1})\right) \\ -\frac{1}{d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & -\frac{1}{d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \cdot \sin(\beta_{d2})\right) \end{bmatrix} \cdot \eta_p$$

- Détermination de $\dot{\phi}$: utilisant (2.19)

$$\dot{\phi} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_1} & -\frac{L}{2 \cdot r_1} \\ \frac{1}{r_1} & -\frac{L}{2 \cdot r_1} \\ \frac{1}{r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) \\ \frac{1}{r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) \end{bmatrix} \cdot \eta_p$$

- Sachant que $\eta_p = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$ et comme le contrôle du fauteuil sera fait en commandant les

rotations des deux roues fixes :

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = \frac{r_1}{2}(-\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)$$

$$\omega = \frac{1}{L}(v_1 - v_2) = -\frac{r_1}{L}(\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)$$

donc

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_1}{2} & \frac{r_1}{2} \\ -\frac{r_1}{L} & -\frac{r_1}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_1} & -\frac{L}{2 \cdot r_1} \\ \frac{1}{r_1} & -\frac{L}{2 \cdot r_1} \\ \frac{1}{r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) \\ \frac{1}{r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{L}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) \\ \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{1}{d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & -\frac{1}{d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) \right) \\ -\frac{1}{d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & -\frac{1}{d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) \right) \end{bmatrix} \cdot \eta_p$$

Remplaçons $\eta_p = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$ par $\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$, le modèle cinématique complet devient :

$$\dot{q}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) & \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) \\ -\frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) & \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{r_1}{r_2} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) \\ -\frac{r_1}{2} \cos(\theta) & \frac{r_1}{2} \cos(\theta) \\ -\frac{r_1}{2} \sin(\theta) & \frac{r_1}{2} \sin(\theta) \\ -\frac{r_1}{L} & -\frac{r_1}{L} \\ \frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1}) \right) & -\frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(-\frac{\pi}{4} + \beta_{d1}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1}) \right) \\ \frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d2}) \right) & -\frac{r_1}{2 \cdot d} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \beta_{d2}\right) + \frac{r_1}{L \cdot d} \left(d + \frac{\sqrt{2}}{2} L \sin(\beta_{d1}) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

ANNEXE B : CONFIGURATION DES SYSTEMES DE PERCEPTION

Les ceintures à base des capteurs à US que nous avons simulés sont développés pour le robot LabMate

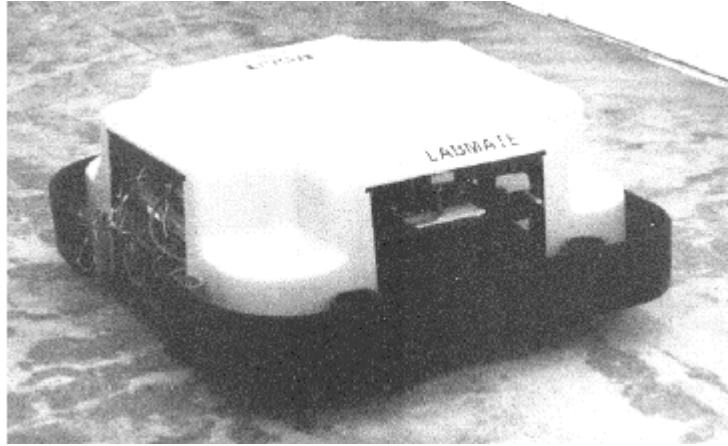


Figure B.1 : Le robot LabMate [Nev 98]

- L'origine de coordonnées est le milieu de l'axe des roues arrière pour les configurations de Blossom et Swami Jr. Pour la configuration de Walky, l'origine est le centre de la plate forme mobile.

Configuration de Blossom [Hog 94]:

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)	θ
1	450	-287	$-\pi/2$
2	489	-277	$-\pi/3$
3	516	-249	$-\pi/6$
4	526	-211	0
5	526	211	0
6	516	249	$\pi/6$
7	489	277	$\pi/3$
8	450	287	$\pi/2$

Configuration de Swami Jr [Hog 94]:

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y(mm)	θ
1	520	-200	$-\pi/4$
2	670	-160	$-\pi/2$
3	700	-50	$-\pi/12$
4	700	50	$\pi/12$
5	670	160	$\pi/2$
6	520	200	$\pi/4$
7	0	200	$\pi/2$
8	0	-200	$-\pi/2$

Configuration de Walky [Nev 98]:

N° du capteur	Coordonnée X (mm)	Coordonnée Y (mm)	θ
1	125	-250	$-\pi/2$
2	227	-300	$-\pi/6$
3	260	-200	$-\pi/12$
4	275	-100	0
5	275	100	0
6	260	200	$\pi/12$
7	270	300	$\pi/6$
8	125	250	$\pi/2$
9	-125	250	$\pi/2$
10	-272	112	π
11	-272	-112	π
12	-125	-250	$-\pi/2$

BIBLIOGRAPHIE

- [Agb 02] D. Agbodan, “*Nomination persistante dans un modèle paramétrique. Identification non-ambiguë et appariement générique d’entité topologique*”. Thèse de doctorat en Informatique de l’Université de Poitiers, France 2002.
- [Arg 02] A. Argyros, P. Georgiadis, P. Trahanlas and D. Tsakiris, “Semi-autonomous Navigation of a Robotic Wheelchair”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 34: pp. 315–329, 2002. Kluwer Academic Publishers.
- [Arn 03] B. Arnaldi , “*Présentation générale de la Réalité Virtuelle*”, IRISA, France 2003
- [Bay 01] B. Bayle, “*Modélisation et commande cinématiques des manipulateurs mobiles à roues*”. Thèse de l’Université Paul Sabatier, Laboratoire d’Analyse et d’Architecture des Systèmes , Décembre 2001.
- [Bly 99] D. Blythe, Silicon Graphics, “Lighting and Shading Techniques for Interactive Applications”, *SIGGRAPH* ‘99.
- [Bol 95] G. Bolmsj, H. Neveryd and H. Eftving, “Robotics in Rehabilitation”, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol 3, N° 1, pp. 77-83, March 1995
- [Bou 96] G. Bourhis and P. Pino, “Mobile robotics and mobility assistance for people with motor impairments: rational justification for the VAHM project”, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, VOL. 4, N° 1, March 1996, pp. 7-11
- [Bru 94] Donald P. Brutzman “*Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*”, PhD thesis of Naval Postgraduate School Monterey, California, December 1994
- [Cam 96] G. Campion, G. Bastin, B. D’Andrea-Novel, “Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 1996, Vol 12, N°1, pp. 47-62
- [Che 96] L. Chen and H. Fujimoto, “Developpement of wheelchair Experience system and spatial recognition in virtual environment”, *22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996 IEEE IECON*, pp. 743-748.
- [Col 02] E. Coll , Y. Rybarczyk, P. Hoppenot, “ARPH: An assistant robot for disabled people”, *SMC’2002-Hammanet Tunisia*, 6-9 october
- [Com 98] J. Comas, J. Pivik, M. Laflamme, “Curent uses of Virtual Reality for Children with disabilities”, *Virtual Environments in Clinical Psychology and Neuroscience*, 1998 Ios Press: Amsterdam, Netherlands.

- [Des 98] M. Desbonnet , S. Cox and A. Rahman, "Development and evaluation of a virtual reality based training system for disabled children", *Proc. 2nd Euro. Conf. Disability, Virtual Reality & Assoc. Tech.*, Skvde, Sweden, 1998, *ECDVRAT and University of Reading, UK*; ISBN 0 7049 1141 8
- [Fra 99] L. France, A. Girault, J-D. Gascuel, B. Espiau, "Sensor Modeling for a Walking Robot Simulation", *Eurographics workshop on computer Animation and Simulation*, pp. 189-198, 1999.
- [Fus 02] P. Fush, G. Moreau, "*Le traité de la Réalité Virtuelle*", Livre, Ecole des Mines de Paris, 2002
- [Got 96] S.Gottschalk, M.C.Lin, et D.Manocha, "OBBTree : A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection", *Proc. of ACM SIGGRAPH'96*
- [Gra 03] M. Grant, "Wheelchair Simulation in Virtual Reality Space Requirements for Wheeled Mobility", *An International Workshop*, October 9-11, 2003, University Inn, Amherst New York
- [Har 00] C. Harrison, M. Grant, B .Conway, "Development of a Wheelchair Virtual Reality Platform for Use in Evaluating Wheelchair Access", *3rd International Conference on Disability, VR and Associated Technologies*, Sardinia.
- [Has 94] M. Hassoun, "*Contrôle d'exécution des mouvements d'un robot mobile : application à l'assistance à la conduite automobile*", thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique Grenoble, France.
- [Hog 94] J. Hogan, P. Schmitt, W. Book, "Ultrasonic Sensor Model and Configuration Simulations for Mobile Robot Navigation in Narrow Aisles" *Westinghouse Savannah River Company through ERDA*, December, 1994.
- [Hol 98] T. Holliday, "*Real-Time 3D Sonar Modeling and Visualisation*", Master Thesis of Science in Applied Physics from the Naval Postgraduate School Monterey, California, June 1998.
- [Hop 01] P. Hoppenot, E. Colle, O. Ait Aider, Y. Rybarczyk, "ARPH - Assistant Robot for Handicapped People – A pluridisciplinary project", *IEEE Roman'2001, Bordeaux and Paris*, pp. 624-629, 18-21 Sept 2001.
- [Inm 95] D. Inman, K. Loge, and J. Leavens, "Virtual Reality Solutions for Children With Physical Disabilities", *The Second International Conference on the Military Applications of Synthetic Environments and Virtual Reality*, MASEVR '95
- [Inm 97] D. Inman, K Loge, and J Leavens, "VR education and rehabilitation", *Communications of The ACM*, August 1997/Vol. 40, N°.8
- [Khe 02] A. Kheddar, P. Coiffet, "*Téléopération et réalité virtuelle*", Livre Traité IC2, série Systèmes automatisés, 2002

- [Koo 94] R. Kooper, “*Virtually Present : Treatment of Acrophobia by Using Virtual Reality Graded Exposure*”, Masters thesis in Computer Science at the Technical University of Delft.
- [Lan 00] A. Lankenau, Thomas Rofer, “Smart wheelchairs: state of the art in emerging market”, *Künstliche Intelligenz* (Heftschwerpunkt Autonome Mobile Systeme), N° 4, pp. 37–39
- [Lau 00] E. Laurin, “*Système intelligent d'assistance à la perception dans la conduite de véhicule*”, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées Spécialité : génie électrique. Sherbrooke (Québec), Canada
- [Lin 93] M. Lin, “*Efficient collision detection for animation and robotics*”, Phd thesis in Engineering, Electrical engineering and computer sciences from the University of California, Berkeley, CA
- [Lev 99] S. Levine, D. Bell, L. Jaros, R. Simpson and Y. Koren, “The NavChair Assistive Wheelchair Navigation system”, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 7, N°. 4, December 1999, pp. 443-450
- [Mal 99] M. Mallem, “*Mémoire d'habilitation Sur la Réalité Augmentée pour la Téléopération*”, Université d'Evry-Val d'Essonne, France 1999.
- [Maz 01] M. Mazo and the Research Group Of The SIAMO Project, “An Integral System for Assisted Mobility The Modularity of the Electronic guidance Systems of the SIAMO Wheelchair Allows for User-Specific Adaptability Based on Environment and Degree of Handicap”, *IEEE robotics & automation magazine MARCH 2001*, pp. 45-56
- [Mil 99] D. Miller, “Semi-autonomous mobility verses semi-mobile autonomy”, *Aiii* 1999
- [Möl 97] T. Möller, “A Fast Triangle-Triangle Intersection Test”, *Journal of Graphics Tools*, 2(2):25-30, 1997
- [Moe 95] C. Mœz, “*Planification de mouvements pour un robot mobiles autonome tout-terrain : une approche par l'utilisation des modèles physique*”, thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique Grenoble 95
- [Nad 00] A. Nadif, H. Niniss, “Système de simulation pour fauteuil roulant électrique, premiers résultats”, *Journal Européen des systèmes automatisés*, Vol 34 N°6-7 2000, pp 799-815
- [Nev 98] H. Neveryd, “*Sensor-based navigating mobile robots for people with disabilities*”, licentiatthesis certec, lth nummer 1:1998
- [Nin 00] H. Niniss, A. Nadif, “Simulation of the behaviour of a powered wheelchair using Virtual Reality”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Disabilities, Virtual Reality and Associated, Technologies (ICDVRAT'2000)*, pp.9-14, 23-25 September 2000, Sardinia, Italy.

- [Nin 01] H. Niniss, A. Nadif, "Intelligent Powered Wheelchair *Evolving in a Virtual Environment*", *Automation 2001, Conference on Automation, Innovation and Perspectives*, pp.206-211, 38-30 March 2001, Warsaw, Poland.
- [Oja 91] J. Ojala, K.Inoue, "Development Of An Intelligent Wheelchair Using Computer Graphics And Simulation", *Computer Graphics Forum* (1991), pp. 285-295
- [Oth 00] S. Otmane, E. Colle, M. Mallem, P. Hoppenot, "Disabled people assistance by a semi-autonomous robotic system", *SCI'2000, Vol 3 - Virtual Engineering and Emergent Computing*, pp.684-689, Orlando, Florida, USA, 23-26 July 2000.
- [Oui 02] R. Ouiguini, R. Toumi, K. Rebai, "Modélisation 2D d'un capteur ultrasonore en vue de son utilisation à la simulation d'un robot mobile", *3^{ème} Conférence sur le Génie Electrique CGE'03, EMP* Février 2004, Alger
- [Roa 02] C. Roast, P. O'Neill and M. Hawley, "Improved Assistive Technology Prescription via Usage Log Analysis", *1st Cambridge Workshop on Universal Acces and Assistive Technology*, March 2002 (Cwuaat 2002)
- [Sch 01] M.T. Schultheis, A. A. Rizzo, "The Application of Virtual Reality Technology for Rehabilitation", *Rehabilitation Psychology, 2001*, Vol 46, No3, pp. 296-311
- [Sim 99] Richard C. Simpson and Simon P. Levine, "Automatic Adaptation in the NavChair Assistive Wheelchair Navigation System", *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, Vol 7, N° 4, December 1999, pp. 452-463
- [Sim 97] S. Simon, "Wheelchair User Proficiency Through Virtual Simulation", *Project VI of the Ohio State University's Rehabilitation Engineering Center for the Quantification of Physical Performance, Ohio*
http://www.osc.edu/Biomed/wc_new.html, 1997
- [Son 99] W. Song, H. Lee, Z. Bien, "KARES : Intelligent Wheelchair- mounted robotic arm system using vision and force sensor", *Robotics and Autonomous system N° 28* (1999) pp. 83-94
- [Yan 00] H. Yanco, "*Shared User-Computer Control of a Robotic Wheelchair System*" Phd thesis at the MIT, September 2000
- [Yod 96] J. Yoder, Eric T. Baumgatner, and Steven B. Skaar, "initial results in the development of a guidance system for a powered wheelchair", *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, VOL. 4, N°. 3, September 1996, pp. 143-151
- [Zac 00] G. Zachmann, "*Virtual Reality in Assembly Simulation - Collision Detection, Simulation Algorithms, and Interaction Techniques*", Dissertation thesis, Dem Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt eingereichte, 2000
- [Zuo 00] B. Zuo, I. Chen, "Predict Sonar Returns for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environment", *6th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 2000.