



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE METZ

100286

U.F.R. MIM

THESE

présentée pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE METZ

Spécialité Automatique

par

Yves AGOSTINI

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE -METZ	
N° inv	19960305
Cote	S/M3 96/15
Loc	Magasin

ARCHITECTURE COOPERATIVE POUR LA COMMANDE D'UN FAUTEUIL ROULANT ROBOTISE

Soutenue publiquement le 03 juillet 1996
devant la commission d'examen :

Rapporteurs : E. DOMBRE
J.M. TOULOTTE

Examineurs : R. SOENEN
C. GUIDAT de QUEIROZ
A. PRUSKI
G. BOURHIS



- H E R G É - THE ADVENTURES OF TINTIN

**EXPLORERS
ON THE MOON**

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles de l'Université de Metz, au sein de l'équipe Capteurs et Machines Intelligentes dirigée par Monsieur le Professeur A. PRUSKI.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur E. DOMBRE, Directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-Electronique de Montpellier et Directeur adjoint du Département de Robotique, ainsi que Monsieur J.M. TOULOTTE, professeur au Centre d'Automatique de Lille, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail en qualité de rapporteurs.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame C. GUIDAT de QUEIROZ, Professeur à l'ENSGSI-INPL de Villers-les-Nancy, et Monsieur R. SOENEN, Professeur au Laboratoire d'Automatique et Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, pour avoir accepté de siéger à la commission d'examen.

Mes remerciements vont également à mon directeur scientifique de thèse Monsieur le Professeur A. PRUSKI de l'université de Metz qui m'a suivi pendant cette étude.

J'exprime ma gratitude à Monsieur G. BOURHIS, Maître de Conférence de l'Université de Metz qui m'a soutenu et guidé durant ces années.

Je tiens aussi à remercier tous les expérimentateurs qui ont bien voulu participer aux expériences en restant patients et de bonne humeur malgré les contraintes qu'ils subissaient parfois.

Enfin j'adresse mes plus vifs remerciements et ma sympathie à tous mes collègues et amis du laboratoire.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	10
INTRODUCTION	13
CHAPITRE I : ROBOTIQUE MOBILE ET DE COOPERATION	16
I INTRODUCTION	17
II ARCHITECTURE DES ROBOTS MOBILES	17
II.1 Introduction	17
II.2 Les architectures hiérarchisées	18
II.3 Les architectures centralisées	19
II.3.1 Tableau noir	19
II.3.2 Tableau blanc	20
II.3.3 Task Control Architecture	21
II.3.4 Conclusion sur les architectures centralisées	22
II.4 Les architectures réactives	23
II.4.1 “Subsumption architecture”	23
II.4.2 Autres travaux	24
II.4.3 Conclusion	25
II.5 Les architectures mixtes	26
II.5.1 Architecture du LAAS	26
II.5.2 Architecture SSS	28
II.6 Conclusion	30
III ROBOTIQUE DE COOPERATION	31
III.1 Introduction	31
III.1.1 Architecture générale des systèmes téléopérés	31
III.1.2 Interaction homme-machine	33
III.2 Modélisation de l’opérateur humain	34
III.2.1 Modèle OCM	34
III.2.2 Modèle général de Rasmussen	35
III.3 Coopération homme-machine	37
III.3.1 Partage des degrés de liberté	37
III.3.2 Choix des modes de commandes	37
III.3.3 Aides à la décision	39
III.4 Conclusion	40
IV CONCLUSION	41

CHAPITRE II : LES FAUTEUILS ROULANTS ROBOTISES42

I JUSTIFICATION	43
II ETAT DE L'ART	46
II.1 Introduction	46
II.2 Fauteuils sans modèle de l'environnement	46
II.3 Réalisation de parcours planifiés ou pré-enregistrés	55
II.4 Discussion	62
III LE PROJET VAHM	63
III.1 Spécificités de l'application	63
III.1.1 Compromis coût/performance	63
III.1.2 Conditions d'utilisation	64
III.1.3 Modularité	64
III.1.4 Sécurité	65
III.1.5 Acceptabilité	66
III.2 Présentation du système	67
III.2.1 Modélisation et planification	69
III.2.2 Perception	69
III.2.3 Navigation	71
III.2.4 Système homme-machine	74
IV EVALUATION DU PROTOTYPE VAHM	79
IV.1 Méthodologie	79
IV.2 Observations	80
V CONCLUSION	82

CHAPITRE III : ARCHITECTURE COOPERATIVE83

I INTRODUCTION	84
II PRINCIPES GENERAUX	85
II.1 Communication et symboles, quelques définitions	85
II.1.1 Introduction	85
II.2.2 Le lien au réel	85
II.2.3 Aspects du symbole	86
II.2 Symboles et robotique	87
II.3 Niveaux d'abstraction du projet VAHM	88
II.4 Définition des tâches	89
III TACHES DE BAS NIVEAUX	92
III.1 Acquisition/Transmission	92
III.1.1 Objectifs	92
III.1.2 Echange de données	92
III.1.3 Fonctionnalités	94
III.2 Navigation	94
III.2.1 Objectifs	94
III.2.2 Echange de données	95
III.2.3 Fonctionnalités	97

III.3 Perception	97
III.3.1 Objectifs	97
III.3.2 Echange de données	98
III.3.3 Fonctionnalités	99
III.4 Communication	101
III.4.1 Objectifs	101
III.4.2 Echange de données	102
III.4.3 Fonctionnalités	103
IV SUPERVISEUR	105
IV.1 Objectifs	105
IV.2 Echange de données	105
IV.3 Représentation des connaissances	107
IV.3.1 Les faits	107
IV.3.2 Les règles	108
IV.3.3 Configuration de la base de connaissances	109
IV.4 Le raisonnement	110
IV.4.1 Définitions	110
IV.4.2 Application	111
V COOPERATION HOMME-MACHINE	116
VI CONCLUSION	118
 CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX	 119
I INTRODUCTION	120
II PROTOCOLE EXPERIMENTAL	121
II.1 Conditions d'expérimentation	121
II.1.1 Conditions matérielles	121
II.1.2 Conditions fonctionnelles	122
II.2 Evaluation du dialogue	125
II.2.1 Critères d'évaluation	125
II.2.2 Scénario	126
II.3 Evaluation de l'assistance	128
II.3.1 Critères d'évaluation	128
II.3.2 Scénario	128
III RESULTATS	130
III.1 Phase préliminaire	130
III.2 Analyse des résultats	132
III.2.1 Introduction	132
III.2.2 Premier scénario	133
III.2.3 Second scénario	134
IV DISCUSSION	136
IV.1 Introduction	136
IV.2 Capacités de déplacement	136
IV.2.1 Perception	136
IV.2.2 Primitives semi-automatiques	137

IV.2.3 Mode automatique	138
IV.3 Coopération homme-machine	139
IV.3.1 Aides à l'action	139
IV.3.2 Aides à la décision	140
IV.3.3 Aide à l'information.....	141
IV.4 Conclusion.....	141
V PERSPECTIVES.....	142
VI CONCLUSION	143
 CONCLUSION	 144
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 147

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ROBOTIQUE MOBILE ET DE COOPERATION 16

Figure I.1 : architecture de DOLPHIN : système de cartographie et de navigation	20
Figure I.2 : architecture de NAVLAB 1	21
Figure I.3 : architecture TCA pour AMBLER.....	21
Figure I.4 : arbre de tâches pour une marche automatique	22
Figure I.5 : architecture du LAAS	26
Figure I.6 : architecture SSS	28
Figure I.7 : contraintes géométriques de l'environnement, carte symbolique perçue et reconstruite	29
Figure I.8 : architecture générale d'un système de téléopération d'après [MILL 91]	32
Figure I.9 : modèle OCM	34
Figure I.10 : modèle du comportement de l'opérateur d'après Rasmussen	35
Figure I.11 : principe de la coopération homme-machine verticale d'après [MILL 91]	38
Figure I.12 : principe de la coopération homme-machine horizontale d'après [MILL 91]	39

CHAPITRE II : LES FAUTEUILS ROULANTS ROBOTISES 42

Figure II.1 : exemples de fauteuils roulants électriques	43
Figure II.2 : sites anatomiques d'après [DUPO 84]	44
Figure II.3 : "The Smart Wheelchair"	47
Figure II.4 : comportement "entrer en contact et tourner"	47
Figure II.5 : "Vector Field Histogram"	49
Figure II.6 : "The Navchair System"	49
Figure II.7 : détermination du choix 2a ou 2b suivant la manière d'approche de 1	50
Figure II.8 : architecture de contrôle de "Navchair"	51
Figure II.9 : "Mister Ed"	52
Figure II.10 : exemple de déplacement avec l'application "Mister Ed"	54
Figure II.11 : le projet OMNI et le système "Mecanum-Wheels"	55
Figure II.12 : hiérarchie des fonctionnalités du projet OMNI	56
Figure II.13 : architecture et structure des modules du projet OMNI	56
Figure II.14 : suivi de ligne du fauteuil roulant électrique de Wakaumi	57
Figure II.15 : diagramme du circuit de commande du fauteuil filoguidé de Wakaumi	58
Figure II.16 : fauteuil robotisé de Madarasz.....	59
Figure II.17 : modélisation de l'environnement dans [MADA 86]	59
Figure II.18 : architecture de commande du projet SENARIO	61
Figure II.19 : le prototype du robot VAHM	68
Figure II.20 : exemple de modélisation de l'environnement et planification de trajectoire.....	69
Figure II.21 : capteurs implantés sur la base mobile du projet VAHM.....	70
Figure II.22 : méthode de suivi de ligne de K. Moumen [MOUM 94]	71
Figure II.23 : zone de contournement d'obstacles à deux niveaux de vitesse	72
Figure II.24 : suivi de mur avec contournement d'obstacles	73
Figure II.25 : interface de commande "tout ou rien"	74
Figure II.26 : validation des choix avec l'interface de type proportionnel	75
Figure II.27 : synoptique de l'interface de type tout ou rien	77
Figure II.28 : centre de réadaptation de Lay Saint Christophe	79
Figure II.29 : troisième expérimentatrice du fauteuil robotisé	81

CHAPITRE III : ARCHITECTURE COOPERATIVE83

Figure III.1 : apparences d'un symbole 85

Figure III.2 : représentation du signe 86

Figure III.3 : une situation du monde des blocs 87

Figure III.4 : architecture de commande du robot VAHM 91

Figure III.5 : échange de données au niveau physique 93

Figure III.6 : échange de données avec la tâche de navigation 96

Figure III.7 : échange de données avec la tâche de perception 99

Figure III.8 : tâche de communication 103

Figure III.9 : bibliothèque de pages-écran 104

Figure III.10 : communication avec la tâche de supervision 106

Figure III.11 : représentation a priori de l'environnement 109

Figure III.12 : dialogue et état du système 113

Figure III.13 : proposition d'assistance 114

Figure III.14 : informations au cours d'un déplacement automatique 114

Figure III.15 : évolution de la base de connaissances 115

Figure III.16 : interface pour un capteur de commande de type tout ou rien 116

Figure III.17 : interactions entre le robot VAHM et l'opérateur humain 117

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX119

Figure IV.1 : appartement test 121

Figure IV.2 : passage de portes et contournement d'obstacles 123

Figure IV.3 : exemples de dégagements 123

Figure IV.4 : déplacement automatique de la télévision au téléphone 124

Figure IV.5 : premier scénario 126

Figure IV.6 : déplacement de la chambre à la porte d'entrée 127

Figure IV.7 : trajectoire planifiée puis réalisée 127

Figure IV.8 : second scénario 129

Figure IV.9 : déplacements dans une zone encombrée en utilisant le contournement d'obstacles 129

Figure IV.10 : adaptations de l'interface 131

Figure IV.11 : exemple de fichier espion 132

Figure IV.12 : propositions d'assistances 135

Figure IV.13 : confort de deux primitives semi-automatiques dans un couloir 137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 : performances des utilisateurs au cours du premier scénario 133

Tableau IV.2 : performances des utilisateurs et propositions d'assistances au cours du second scénario 134

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Depuis 1991, le projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs) du Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielle de l'université de METZ s'est donné pour objectif d'améliorer les possibilités de mobilité des personnes sévèrement handicapées. La solution envisagée consiste à rendre le fauteuil électrique "intelligent" en intégrant des techniques de déplacement développées en robotique mobile. Cependant, travailler dans le domaine de la technologie pour handicapés implique des contraintes de coût et d'acceptabilité psychologique. Pour réaliser un compromis entre ces contraintes et la performance du système, il faut mettre en oeuvre une coopération entre l'homme et la machine et optimiser le système global composé par les deux entités.

Un premier prototype a été réalisé pour valider les principes de base du projet, en particulier la définition des différents modes de fonctionnement. Dans ce but une série de tests a été effectuée en centre de réadaptation. Les enseignements d'ordre essentiellement qualitatifs qui en ont été déduits constituent l'introduction au travail présenté plus particulièrement dans ce mémoire. Nous allons en effet nous attacher à définir et mettre en oeuvre une architecture pour le fauteuil robotisé VAHM qui facilite la coopération entre le pilote et la base mobile. Nous concevons ainsi un système où l'homme apporte de l'aide à la machine grâce à ses facultés cognitives et la machine à l'homme par ses capacités de mobilité mais aussi par une aide à l'information et à la décision.

Le premier chapitre décrit les démarches élaborées dans la commande de robots mobiles autonomes en mettant l'accent sur la représentation du monde d'évolution. La seconde partie de ce chapitre présente un domaine s'intéressant plus particulièrement aux interactions entre l'homme et la machine : la robotique de coopération.

Le second chapitre expose l'état de l'art des différents travaux de recherche concernant les fauteuils robotisés. Les travaux effectués dans le cadre du projet VAHM sont ensuite relatés. Ceux-ci concernent les différents modules intégrés ou en cours d'intégration. Ce chapitre

se termine par la description des premiers tests que nous avons réalisés en centre de réadaptation avec des personnes aux possibilités fonctionnelles très diverses.

Au chapitre suivant, une réflexion sur la représentation et l'utilisation des connaissances traitées va permettre de décrire la structure développée pour la commande du fauteuil robotisé. Chaque module est ensuite présenté en détaillant ses objectifs, ses relations avec les autres modules puis ses propriétés fonctionnelles.

Le dernier chapitre présente les essais réalisés par douze personnes valides dans le but d'évaluer les nouvelles capacités de dialogue et d'assistance implantées sur le prototype du fauteuil robotisé. Les observations effectuées au cours de ces essais vont permettre de valider les possibilités de coopération de l'architecture de commande proposée puis de mener une discussion sur les évolutions à court terme et les perspectives à plus long terme que cette architecture laisse envisager.

CHAPITRE I

ROBOTIQUE MOBILE ET DE COOPERATION

I INTRODUCTION

II ARCHITECTURE DES ROBOTS MOBILES

III ROBOTIQUE DE COOPERATION

IV CONCLUSION

I INTRODUCTION

L'objectif du projet VAHM est d'apporter une aide à la mobilité des personnes handicapées en dotant les fauteuils roulants électriques de capacités de navigation autonome. Il se fonde sur les travaux effectués en ce sens dans le cadre général des recherches en robotique mobile et, plus particulièrement, sur les capacités des différentes architectures de commande. Celles-ci feront l'objet de la première partie de ce chapitre.

Cependant le fait d'embarquer une personne qui doit garder le contrôle du robot nous place dans le cadre de la robotique de coopération et nous impose également de prendre en compte l'optimisation du système global homme-machine. Il s'agit alors d'introduire l'homme dans l'architecture de commande du robot. Les travaux décrits en ce sens seront évoqués dans la deuxième partie de ce chapitre. Ils se situent pour la plupart dans le domaine de la téléopération assistée par ordinateur (TAO) et en particulier dans le cadre de la supervision de processus automatisés. Ces domaines d'application s'appuient sur les travaux réalisés sur la modélisation de l'opérateur humain.

II ARCHITECTURE DES ROBOTS MOBILES

II.1 INTRODUCTION

L'objectif de la robotique mobile est de réaliser la commande d'une machine dotée de moyens mécaniques de déplacement (roues, pattes, chenilles, ...) dans le but de réaliser une tâche, c'est à dire une suite d'actions cohérentes. La tâche la plus élémentaire consiste à se déplacer d'un point à un autre sans intervention humaine et souvent dans un environnement peu connu, voire inconnu. Il s'agit donc d'obtenir une machine autonome. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des capteurs extéroceptifs permettant de percevoir l'environnement. Ce point est particulièrement délicat en raison des technologies actuelles des capteurs de perception d'un robot mobile, bien moins efficaces que les moyens de perception de l'être humain. Il s'agit alors d'effectuer la **planification** des tâches et de **naviguer** en fonction de la **perception** de l'environnement. L'architecture de com-

mande peut se définir comme l'organisation des éléments capables de réaliser ces tâches.

Afin de mieux appréhender la justification des différentes solutions envisagées, nous allons présenter dans un ordre semi-chronologique, par ordre d'apparition des principes fondamentaux, les quatre principales familles d'architecture de commande :

- les architectures hiérarchisées,
- les architectures centralisées,
- les architectures réactives,
- les architectures mixtes.

II.2 LES ARCHITECTURES HIERARCHISEES

Les premiers travaux en robotique mobile sont apparus à la fin des années 60 à l'Institut de Recherche de Stanford (Californie). A la suite des travaux réalisés en Intelligence Artificielle sur la manipulation d'entités symboliques N. Nilson [NILS 69] applique un générateur de plan d'action (planificateur) STRIPS au premier robot mobile SHAKEY. L'architecture de SHAKEY fait apparaître deux niveaux hiérarchiques, le niveau décisionnel qui crée et modifie les plans d'actions et un niveau de contrôle d'exécution qui gère les capteurs et les actionneurs. L'approche "traditionnelle" de la robotique mobile est née, une approche de haut en bas (top-down) où le but est d'appliquer des décisions "intelligentes" ou plus exactement un raisonnement automatisé. Les premières applications ont été les robots CART à Stanford en 1966 et JASON à Berkeley en 1970. Si les premiers projets ont été abandonnés, autant par manque de crédit que par manque de capteurs et de moyens informatiques, ces travaux ont apporté les premières réflexions sur la modélisation de l'environnement et la planification des actions.

Au milieu des années 70 des projets ambitieux sont lancés pour mettre au point des systèmes autonomes d'exploration planétaire, en particulier pour la planète Mars. La NASA avec Le Jet Propulsion Laboratory lance le projet JPL Mars Rover. Ils seront rejoint par le Robotics Institute du CMU (Carnegie Mellon University) pour former le plus gros pôle de robotique mobile. Dans les années 80 [WEIS 93] apparaîtront les robots Rocky au JPL, CMU-Rover (appliqué dans Navlab une camionnette qui embarque tout le système), ou Ambler un robot à pattes au CMU. En France

dès 78, le LAAS travaille sur le robot Hilare.

Si les premiers travaux ont surtout été des tentatives d'application des nouvelles théories de l'intelligence artificielle, très vite les avancées théoriques et technologiques sur les moyens de planification ou de perception, comme par exemple le traitement d'images, ont permis d'envisager des applications à moyen terme et d'apporter des crédits. Ces nouvelles applications dans des environnements réels, par opposition à des environnements industriels qui peuvent être aménagés et peu changeants, ont fait apparaître le principal problème de la robotique mobile : l'apport d'une grande quantité d'informations de nature très différente. Une des premières approches a été de les centraliser pour pouvoir prendre la meilleure décision possible.

II.3 LES ARCHITECTURES CENTRALISEES

II.3.1 Tableau noir

Pour commander le CMU-Rover A. Elfes [ELFE 83] définit un ensemble de modules, les "experts", qui centralisent leurs données sur un tableau noir (blackboard). Ce système de contrôle, développé à l'origine au CMU pour le système de compréhension automatique de la parole HEARSAY-II [EDMO 80] est en fait une base de données centrale accessible à chaque module, également appelés agents. Ainsi tous les modules coopèrent pour résoudre un problème. Un module, compte tenu de ses capacités, va décomposer ce problème en sous problèmes et les réinjecter sur le tableau noir pour les soumettre à la compétence des autres modules. Le tableau noir possède ainsi une photographie de l'état du système à un instant t .

La coordination des différents modules et l'exploitation des données présentes sur le tableau noir ont donné lieux à différents travaux. Elfes [ELFE 86] propose le système de cartographie et de navigation DOLPHIN (fig. I.1) testé sur les robots mobiles Neptune et Terregator. Chaque module dédié à une tâche particulière (commande d'un capteur, d'un effecteur, ...) est composé d'un esclave qui effectue le traitement et d'un maître qui dialogue avec le tableau noir. Le gestionnaire de tableau noir assure l'intégrité des données et séquence l'exécution des modules en fonction du plan de contrôle.

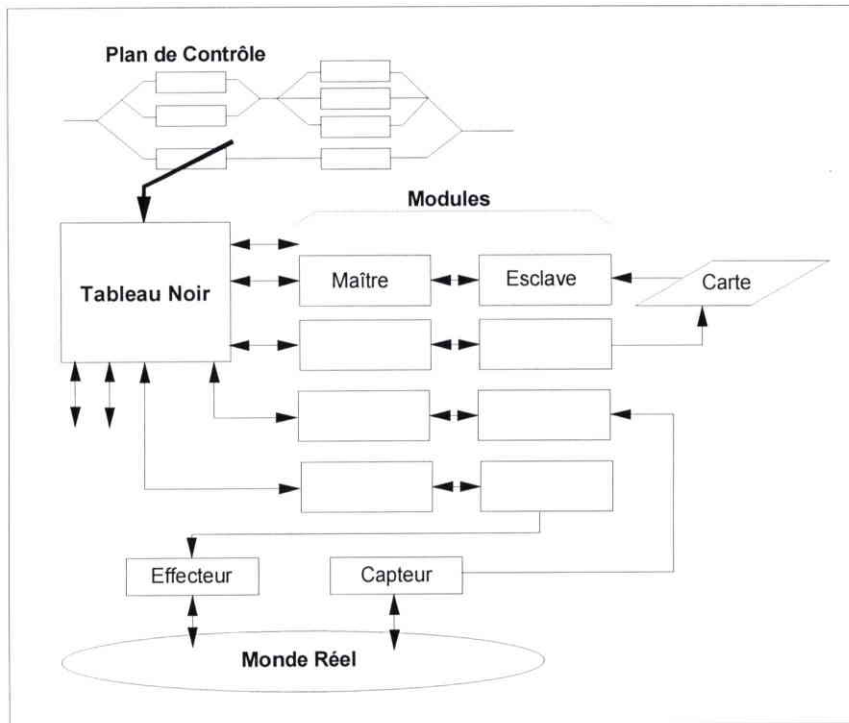


Figure I.1 : architecture de DOLPHIN : système de cartographie et de navigation

II.3.2 Tableau blanc

Dans le cadre du projet ALV (Autonomous Land Vehicle), dérivé du projet CMU Rover et destiné à équiper une camionnette de caméras (NAVLAB 1^{ère} version) pour effectuer un suivi de route, le Robotics Institute du CMU proposa une architecture centrée autour d'un "tableau blanc" [THOR 86] (fig. I.2). Un module de perception et un module de locomotion sont coordonnés par un module de pilotage et dialoguent avec un module de navigation qui choisit la meilleure route et un module de contrôle de la mission. La base de données centrale CODGER (COmmunication Database with GEometric Reasoning) qui maintient la carte locale commune à tous les modules, est en fait un tableau noir capable d'effectuer des manipulations géométriques (calculs d'enveloppes convexes, intersections de segments, transformations de repères) et dont les cinq modules associés peuvent lire ou écrire dans la base de données de façon asynchrone ou attendre certains types d'informations pour se synchroniser. De plus, un mécanisme de pipeline cadence les tronçons de route à effectuer pour soulager le traitement des données.

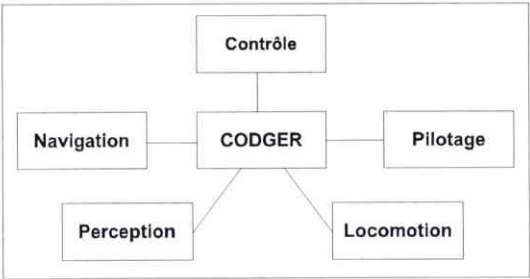


Figure I.2 : architecture de NAVLAB 1

II.3.3 Task Control Architecture

Actuellement, le type d’architecture centralisée encore développée au Robotics Institute du CMU est l’architecture TCA (Task Control Architecture). Développée dans le cadre du projet Mars Rover, elle a été appliquée à l’origine sur le robot à six pattes AMBLER [SIMM 90] ; depuis lors elle est utilisée sur une douzaine de robots, dont le robot mobile XAVIER ou le robot mobile lunaire RATLER [SIMM 95]. Le tableau noir centralise toutes les communications entre les différents modules (demande d’information, de replanification ou transmission d’ordre) en routant les messages en fonction des contraintes temporelles imposées par le gestionnaire de tâches. Celui-ci gère un arbre de tâches hiérarchiques qui représente la planification des actions du robot (fig. I.4).

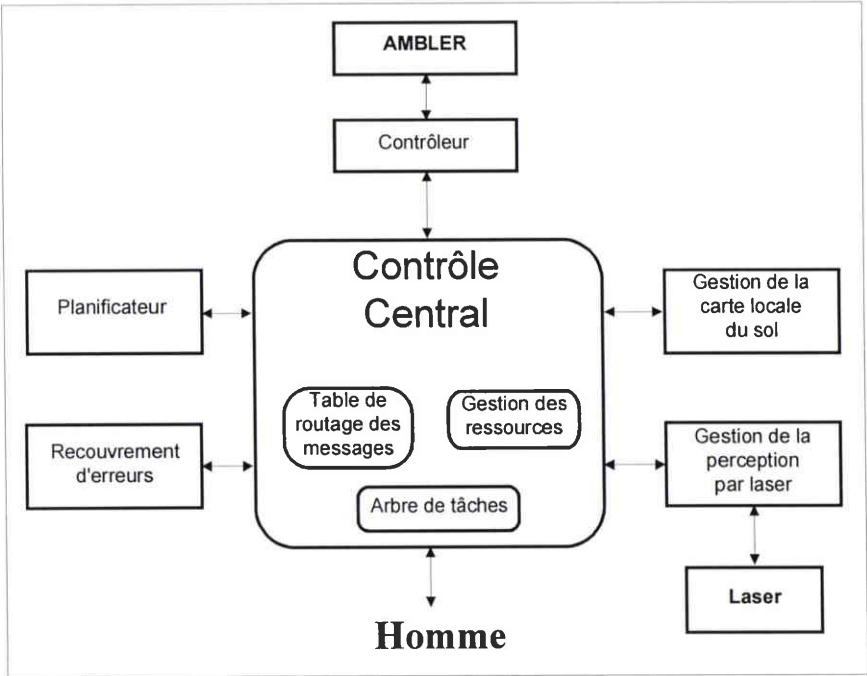


Figure I.3 : architecture TCA pour AMBLER

Les tâches peuvent être automatiquement décomposées en sous-tâches en fonction des demandes des modules qui fournissent aussi les contraintes temporelles. Les modules peuvent suspendre des tâches, demander des contrôles d’action à l’aide de mécanismes appelés moniteurs ou gérer des exceptions. L’arbre de tâches est ainsi créé dynamiquement et peut avoir une profondeur variable (fig. 1.4).

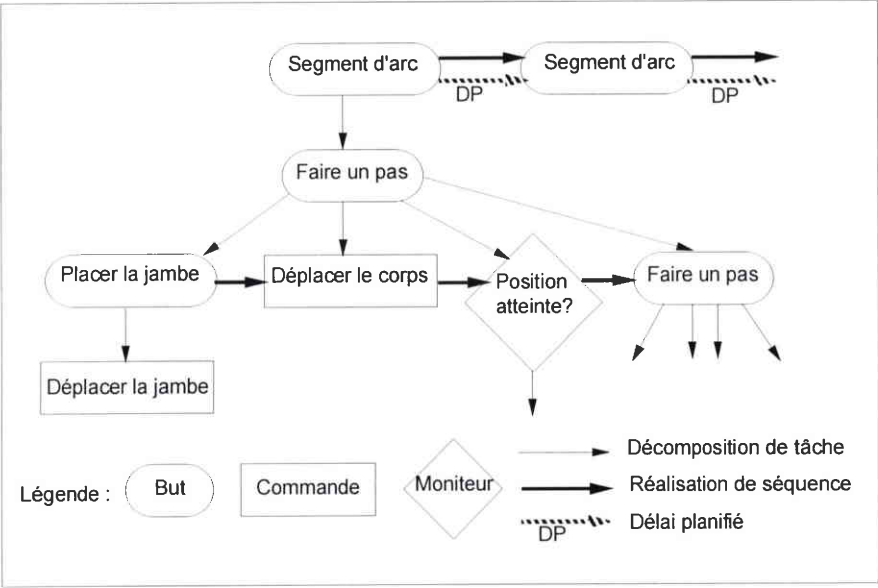


Figure I.4 : arbre de tâches pour une marche automatique

Ce type d’architecture centralisée où des modules communiquent à travers un tableau noir est appelé “architecture blackboard parallèle”. De nombreuses autres architectures de ce type ont été développées comme pour le robot GSR [HARM 87] qui propose un tableau noir faisant la fusion des données capteurs pour représenter l’environnement sous forme d’arbre de classes, ou l’architecture B-Robot dont le tableau noir BB1 [HAYE 93] est destiné à résoudre les conflits. Les architectures “blackboard” distribuées proposent l’utilisation de plusieurs tableaux noirs. Par exemple dans Pang [PANG 90] chaque tableau noir gère une base de connaissance sur un sous système : la locomotion, l’environnement, l’identification de produit, etc ...

II.3.4 Conclusion sur les architectures centralisées

La centralisation des connaissances vient naturellement à l’esprit, et les architectures existantes ont démontré leur capacité de modularité en développant des structures pouvant être vues comme

des systèmes de raisonnement ou des systèmes d'organisation des données. Mais l'utilisation de ce type d'architecture soulève un problème majeur : pour répondre à un problème donné il faut s'assurer que les informations traitées sont cohérentes, c'est à dire non-contradictaires et complètes. Pour cela il faut utiliser des systèmes de contrôle performants capables de gérer la qualité et la quantité d'information afin d'empêcher la saturation de la base de données centrale et surtout de donner une réponse en temps réel. Les travaux actuels portent sur l'amélioration des performances de réaction en temps réel [TIGL 93], [HAYE 93], un des principes fondateur des architectures réactives.

II.4 LES ARCHITECTURES REACTIVES

II.4.1 “Subsumption architecture”

Dès le milieu des années 80, R.A. Brooks du M.I.T. propose une alternative à la décomposition traditionnelle “percevoir - modéliser - planifier - agir” [BROO 86]. Il constate que les outils de l'intelligence artificielle mènent une réflexion à partir d'abstractions, comme les symboles “table”, “mur” ou des coordonnées absolues dans des cartes à deux dimensions, et non à partir des objets réels. Les problèmes de perception sont occultés. L'intelligence artificielle offre alors une modélisation d'états et non de processus. A partir de travaux réalisés en éthologie, deux constatations importantes s'imposent : les animaux utilisent de nombreux capteurs redondants et l'apparente complexité de leur comportement émerge de l'interaction de plusieurs comportements élémentaires.

Il propose alors une décomposition en niveaux de compétence. Chaque niveau gère un comportement où l'action dépend directement de la perception. Le système est réactif : il réagit à l'environnement sans modéliser ni planifier. Les comportements peuvent être actifs simultanément ou les niveaux supérieurs peuvent inhiber les niveaux inférieurs. Les comportements supérieurs “encapsulent” les comportement inférieurs.

Huit niveaux de comportement sont définis à l'origine :

- 0 : Eviter les contacts avec les objets statiques et dynamiques.
- 1 : Se déplacer sans but précis et sans collision.

- 2 : Explorer le monde et rechercher des zones libres vers lesquelles se diriger.
- 3 : Construire une carte de l'environnement et planifier une route.
- 4 : Constater les changements dans l'environnement statique.
- 5 : Raisonner sur les objets identifiables et exécuter des tâches apparentées à ces objets.
- 6 : Formuler et exécuter des plans qui transforment d'une certaine manière l'état du monde.
- 7 : Raisonner sur le comportement des objets du monde et modifier les plans en conséquence.

Les trois premiers niveaux ont été implantés sur plusieurs robots dont un à pattes [BROO 89]. Les résultats obtenus font apparaître une meilleure robustesse de fonctionnement due à la diminution des cas de conflits entre les modèles et la réalité perçue. Ils ont mis en évidence que de nombreuses tâches peuvent être réalisées sans modèle de l'environnement, sans contrôle central et sans planification et que peut ainsi émerger une “intelligence sans raisonnement” [BROO 91].

J. Connell a implanté le quatrième niveau qui effectue la modélisation du monde et la planification de chemins [CONN 88], [MATA 92]. M.C. Torrance [TORR 94] décrit la conception d'un niveau permettant la réalisation de l'apprentissage de l'environnement et le dialogue en langage naturel.

II.4.2 Autres travaux

La volonté de réagir directement aux événements perçus tout en conservant des capacités de planification, a inspiré d'autres travaux. Payton [PAYT 86] utilise des “agents experts” composés de “comportements réflexifs” et de “capteurs virtuels”. Ces derniers fournissent uniquement les données nécessaires à la réalisation immédiate du comportement. Les modules supérieurs sélectionnent des groupes d'agents experts qui fournissent des messages d'échec et d'état. Les cas de conflits sont résolus par un tableau noir en fonction de la priorité de chaque expert. A la différence des travaux de Brooks, les niveaux hiérarchiques sont ici dépendants de la portée locale ou globale

des données traitées.

L'utilisation de méthodes d'arbitrage, les comportements supérieurs inhibant les comportements inférieurs pour Brooks ou l'association de priorités aux agents experts pour Payton, a été vue comme une immixtion du concepteur dans l'autonomie du système. Pour contourner ce problème, Arkin [ARKI 89] propose une architecture réactive, AuRA (Autonomous Robot Architecture), basée sur l'utilisation de "schémas moteurs". Ces schémas moteurs possèdent des schémas de perception et sont dédiés à une situation unique comme par exemple "éviter un obstacle statique". Chaque schéma moteur peut cependant être instancié plusieurs fois avec des paramètres différents. Il utilise un champ de potentiel spécifique pour générer un vecteur vitesse. La somme des vecteurs vitesse produits par les schémas moteurs actifs génère la commande globale du système. La planification des actions est réalisée par un planificateur hiérarchique associé au gestionnaire de schémas moteurs qui instancie les schémas pouvant permettre d'atteindre le but fixé. Les travaux actuels portent sur l'apprentissage et l'adaptation en ligne du paramétrage des schémas moteurs [RAM 92], [RAM 93].

II.4.3 Conclusion

Contrairement aux architectures hiérarchiques ou centralisées où l'on cherche à appliquer un raisonnement déductif, les architectures réactives cherchent à favoriser un raisonnement inductif. Si le raisonnement déductif est du point de vue logique juste, puisque le cas particulier est déduit du cas général, il est néanmoins coûteux en temps car il faut modéliser chaque nouvelle information avant d'effectuer un raisonnement, et potentiellement dangereux si la réalité ne correspond pas aux modèles généraux. L'approche développée par les architectures réactives est radicalement différente des approches antérieures sur deux points : le problème est traité de bas en haut, "le monde étant vu comme son meilleur modèle", et le traitement des connaissances est fortement décentralisé favorisant ainsi l'autonomie de chaque module et donc leur robustesse et leur rapidité de réaction. Cependant les mécanismes de raisonnement sont difficiles à implanter du fait du manque de contrôle des actions.

au niveau contrôle. Celui ci est composé de quatre modules : le superviseur, le module de gestion des surveillances, le module exécutif et le module de diagnostic et de recouvrement des erreurs.

Le superviseur reçoit le plan et contrôle son exécution. Il interagit soit avec le planificateur soit avec l'utilisateur. Les tâches transmises ou reçues des autres modules sont composées d'ordres, de surveillances et de structures de contrôle.

- Le gestionnaire des surveillances transmet les événements à surveiller au niveau fonctionnel et exécute les actions réflexes programmées.

Par exemple : **s1: MNTR (S_us-treshold((4 40)(5 40))) $\Rightarrow$ (stop){...}** est une instruction qui crée un moniteur de surveillance (MNTR). Celui ci surveille les capteurs à ultrasons 4 et 5. Si la distance des obstacles est inférieure à 40 cm, l'action déclenchée est "stop" et peut être suivie d'autres actions ...

- Le module exécutif reçoit les tâches à exécuter (étapes du plan) et gère les ressources du robot contenues au niveau fonctionnel. C'est en quelque sorte le système d'exploitation du robot. Si la tâche s'effectue correctement le module exécutif contrôle la suivante sinon il fait appel au module de diagnostic et de recouvrement d'erreur.
- Ce dernier module cherche à corriger l'erreur en modifiant le plan localement par l'insertion d'une mission de recouvrement.

Le niveau fonctionnel est composé de trois types de modules : les modules capteurs/effec-teurs, les unités fonctionnelles et les servoprocessus.

- Les modules capteurs interprètent les données brutes en fonction du niveau d'interprétation choisi comme l'extraction de segment ou du modèle local de l'environnement, et intègrent les moniteurs des surveillances programmables. Les modules effecteurs interprètent et exécutent les ordres.
- Les unités fonctionnelles utilisent les données fournies par les capteurs. Il s'agit de processus de type "planification de trajectoire" ou "localisation".
- Les servoprocessus effectuent des actions réactives reliant directement la percep-

tion à l'action comme "l'évitement d'obstacles", le "suivi de mur" ou le "suivi de cible".

Les recherches actuelles sur l'architecture visent à une génération automatique de ces modules dans le but de permettre une intégration rapide à différents projets (ADAM, Commutor, Indumat) [FLEU 96].

L'architecture proposée par le LAAS est à l'origine une architecture hiérarchique dans le sens où elle cherche à appliquer une planification hors ligne. Elle a évolué vers une structure mixte en intégrant des capacités de réactivité à travers les servoprocessus mais aussi en contrôlant cette réactivité grâce aux moniteurs de surveillances. Une autre approche est celle de l'architecture SSS qui part de l'architecture purement réactive de Brooks pour y intégrer une planification.

II.5.2 L'architecture SSS

J.H. Connell [CONN 92] constate que les contrôles décentralisés des architectures réactives ne permettent pas d'avoir une représentation globale et donc centralisée du monde, cette représentation pouvant être bénéfique à certaines tâches. Par exemple, la navigation peut être optimisée par une planification d'un chemin plus court ou moins encombré. L'architecture proposée (fig. I.6) est composée de trois techniques de contrôle caractérisées par leur traitement de l'espace et du temps.

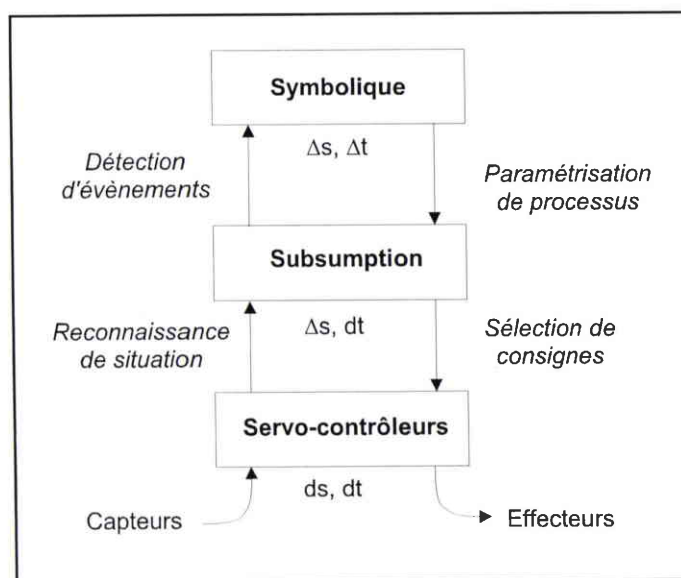


Figure I.6 : architecture SSS

Le bas niveau travaille dans un domaine de temps et d'espace continu et traite des données scalaires comme l'asservissement des moteurs par des servo-contrôleurs.

Le niveau intermédiaire est une architecture de type "subsumption" qui discrétise les états du monde en un petit nombre de comportements, par exemple, "suivre un mur" ou "connaître la position odométrique".

Le niveau symbolique discrétise le temps en événements significatifs. Il utilise des termes du type "après X faire Y" ou "faire A jusqu'à ce que B apparaisse". En fait, il crée une carte du monde où apparaissent les points où l'espace libre est perçu et la distance odométrique entre ces points (fig. I.7).

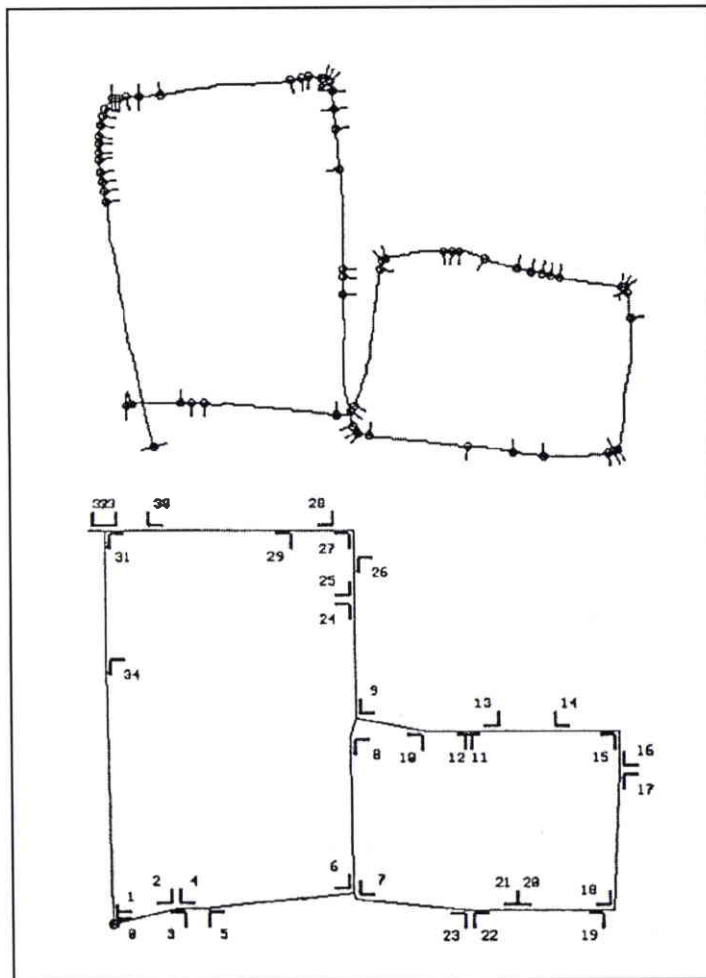


Figure I.7 : contraintes géométriques de l'environnement,
carte symbolique perçue et reconstruite

Cette carte peut alors être arrangée et utilisée pour calculer des trajectoires ou mémoriser des informations plus complexes comme "le bureau de Mark" [TORR 94].

II.6 CONCLUSION

L'objectif de la robotique mobile est de faire évoluer une machine dans un environnement non ou peu aménagé, ceci de façon autonome, c'est à dire sans intervention humaine.

L'apport de capacités de navigation autonome à un véhicule soulève de nombreux problèmes. Le plus crucial est la représentation du monde. Il faut prendre en compte les multiples événements pouvant surgir d'un monde peu connu ou changeant. Deux approches existent. La première consiste à centraliser les connaissances pour implanter des mécanismes de raisonnement permettant de planifier une solution, mais apparaît alors le problème de l'adéquation du monde ainsi modélisé au monde réel. La seconde approche considère que le monde est son meilleur modèle et cherche à répondre immédiatement aux événements perçus sans modéliser ce monde et donc sans avoir besoin de centraliser les connaissances. Les architectures mixtes essayent de concilier ces deux approches antagonistes et permettent d'apporter une certaine autonomie aux robots mobiles. Cette autonomie n'est pourtant pas totale. Des événements peuvent être mal perçus ou mal modélisés et donc mal interprétés. Un système automatisé n'a pas les capacités d'imagination et de créativité d'un être humain. Si les architectures à base de réseaux neuronaux offrent de nouvelles voies de recherches, elles ne sont pour l'instant appliquées qu'à bas niveau. La présence de l'homme est encore souvent nécessaire.

De plus dans le cadre de notre application, il est psychologiquement difficilement acceptable qu'un fauteuil pour personne handicapée soit une machine totalement autonome, l'homme n'étant plus alors qu'un objet transporté. La machine peut apporter ses capacités de déplacement autonome et l'homme sa meilleure interprétation du monde.

Il s'agit alors d'étudier la place que doit prendre l'homme dans la structure de commande de la machine. Cette problématique est couramment abordée dans le domaine de la téléopération de robots.

III ROBOTIQUE DE COOPERATION

III.1 INTRODUCTION

Contrairement aux *robots de substitution* dont l'objectif est de remplacer l'homme, les *robots de coopération* sont des héritiers de la notion d'*outil*, prolongement de l'homme permettant une démultiplication des efforts et des mouvements et le travail à distance. La machine est alors utilisée pour ses qualités de précision, de répétabilité et de puissance ou, dans des environnements inaccessibles à l'homme, pour des raisons de sécurité ; l'homme apporte ses capacités d'analyse de la situation et d'élaboration de stratégies complexes. Cependant, ce dernier a des performances variables en fonction de son état psychologique (fatigue, handicap, ...) et de sa connaissance du système à piloter. Il est alors utile de modéliser le comportement humain dans le but d'améliorer les performances de l'opérateur dans la conduite d'un système automatisé.

Très tôt de nombreuses applications ont vu le jour que se soit dans le domaine industriel (chimie, nucléaire [CLEM 91], aéronautique [HIRZ 93], naval, ...) ou médical [TROC 95]. L'architecture générale de ces systèmes téléopérés est présentée en début de ce chapitre. Elle est suivie par la description des méthodes de modélisation de l'opérateur humain. La fin de ce chapitre traite des différents types de coopération envisageables entre l'homme et la machine.

III.1.1 Architecture générale des systèmes téléopérés

La téléopération peut en fait se décomposer en plusieurs classes :

- la *télémanipulation* où l'homme exécute la tâche à l'aide d'un robot,
- la *téléassistance* où l'homme transmet au robot les informations et les méthodes nécessaires à la réalisation de la tâche,
- la *télésurveillance* où l'homme décrit la tâche à exécuter et surveille le bon fonctionnement.

La fonction de l'homme est donc variable, de la manipulation à la supervision du système.

Généralement, un système de téléopération est composé de deux niveaux (fig. I.8)

- un niveau d'exécution, où un opérateur exécute et surveille les opérations de télémanipulation,
- un niveau de supervision, où un autre opérateur surveille la globalité de la mission pour détecter les anomalies et prend les décisions qui seront appliquées par le niveau d'exécution.

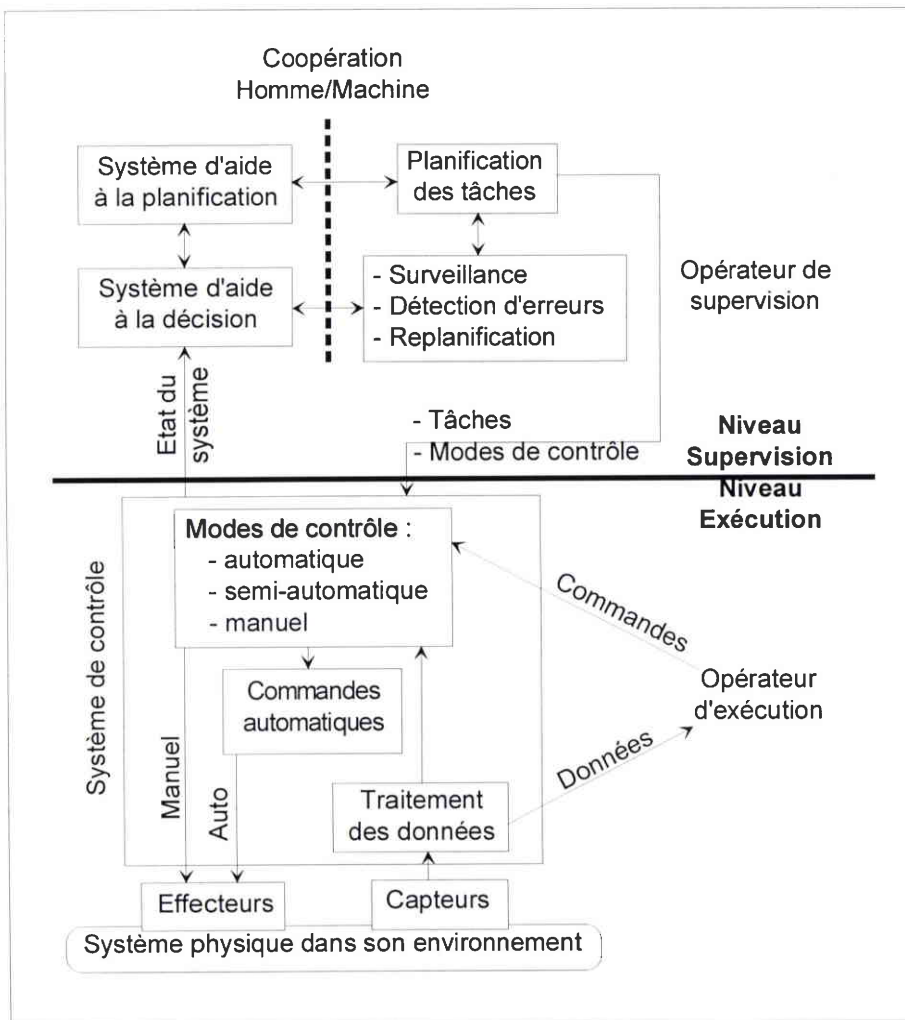


Figure I.8 : architecture générale d'un système de téléopération d'après [MILL 91]

Le niveau d'exécution est le niveau physique du système. Il est composé d'une part des capteurs et des effecteurs et d'autre part du module de contrôle.

Trois principaux modes de contrôle sont généralement définis :

- le *mode manuel* : l'opérateur a le contrôle total du système,
- le *mode semi-automatique* : la tâche est réalisée conjointement par l'homme et la machine en se partageant les degrés de liberté,
- le *mode automatique* : les actions sont effectuées par la machine supervisée par l'opérateur.

III.1.2 Interaction homme-machine

Actuellement les objectifs de la téléopération sont l'amélioration de l'ergonomie des interfaces et l'évaluation des systèmes homme-machine [JOHA 94], mais aussi l'automatisation des tâches de supervision en concevant des systèmes et des outils d'aide à la décision [PARK 88]. Dans le but d'optimiser le système global homme-machine, les systèmes de téléopération doivent aider l'opérateur dans ses activités d'exécution et de supervision en apportant une assistance à l'action, à l'information et à la décision.

Les assistances à l'action sont étudiées depuis longtemps. Elles concernent par exemple la commande et le retour d'effort de bras manipulateur et ont permis de développer des modèles de commande continue. Le modèle OCM, présenté ci-dessous (§ III.2.1) en est un exemple.

Comme il est ardu de prévoir les initiatives humaines et que les environnements d'évolution sont souvent peu ou mal modélisés, les planificateurs de tâches étudiés en intelligence artificielle sont difficilement utilisables de façon continue et en temps réel. Jusqu'à présent l'opérateur doit définir hors ligne les tâches à exécuter pour atteindre le but désiré et surveiller en ligne les opérations de télémanipulation pour détecter les anomalies pouvant nécessiter des corrections ou une re planification des tâches. Par contre, l'association de ces planificateurs à des systèmes permettant d'effectuer des tests des planifications envisagées en réalité virtuelle permet d'apporter une aide à la décision. La réalité virtuelle permet également de créer une "réalité augmentée" en surimprimant par exemple des images complémentaires à une scène réelle. Elle est alors utilisée comme une assistance à l'information et donc à la décision [COIF 95].

Un autre aspect de l'optimisation d'un système homme-machine concerne la répartition optimale des tâches entre ces deux entités. Il s'agit d'étudier les performances respectives de l'homme et de la machine afin de réaliser un partage des tâches en fonction des capacités de chacun [MILL 88]. Une modélisation de l'homme réalisant la tâche est nécessaire pour estimer et prendre en compte sa performance.

III.2 MODELISATION DE L'OPERATEUR HUMAIN

III.2.1 Modèle OCM

Parmi les nombreux modèles développés pour modéliser le comportement humain au cours des tâches de contrôle en mode manuel, le modèle OCM (Optimal Control Model) [PEW 82] est le plus sophistiqué. Il est composé d'une partie perception et focalisation, d'une partie traitement de l'information à partir d'une représentation du système contrôlé et d'une partie action qui génère le signal de contrôle (fig. I.9). Le filtre de Kalman est utilisé pour prédire le temps d'observation nécessaire à un opérateur pour détecter un défaut.

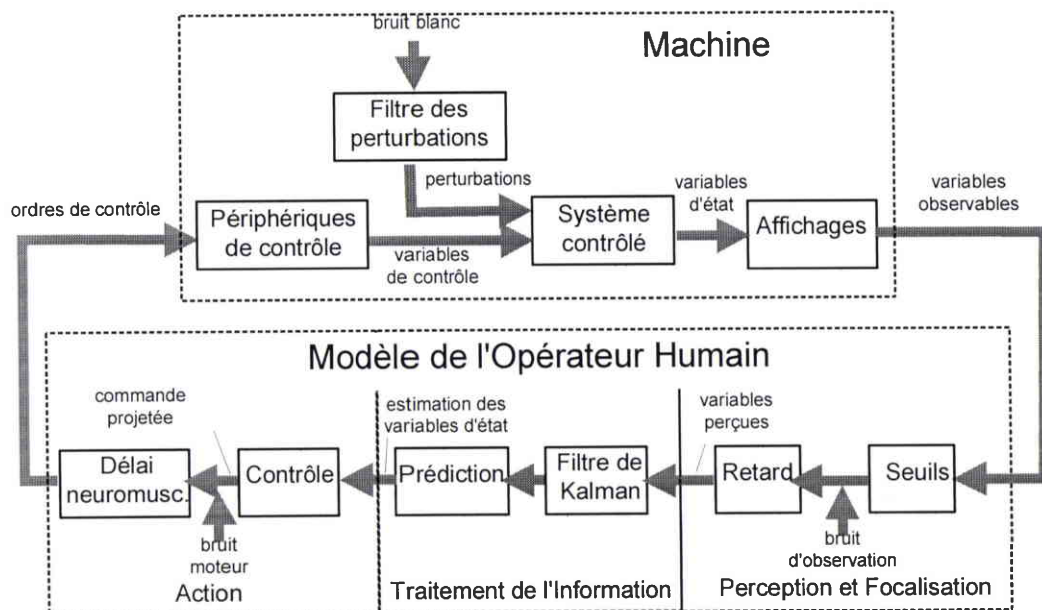


Figure I.9 : modèle OCM

Ce modèle peut prédire précisément la performance humaine dans des activités de poursuite de cible de difficulté croissante malgré les commandes aléatoires de l'opérateur. Il a été validé par son application dans de nombreuses tâches de contrôle continu, que ce soit dans des systèmes pilote/véhicule ou d'analyse de données [PEW 82]. Il est par contre mal adapté à la prise en compte des phénomènes non-linéaires et intermittents apparaissant au cours d'une tâche de supervision [JOHA 82].

III.2.2 Modèle général de Rasmussen

Le modèle généralement admis par les disciplines étudiant l'opérateur et, en particulier, l'opérateur de supervision est celui développé par J. Rasmussen et son équipe dans les années 70/80 au Danemark. Il classifie le comportement de l'opérateur en trois étapes [RASM 83] (fig. I.10).

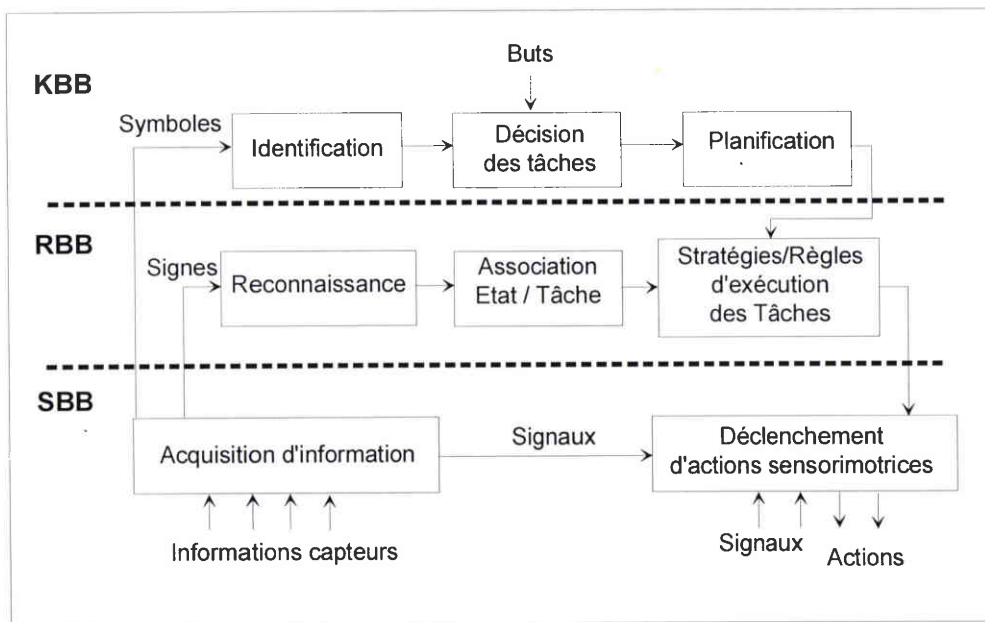


Figure I.10 : modèle du comportement de l'opérateur d'après Rasmussen

Le comportement basé sur l'habileté (**Skill-Based Behaviour**) se caractérise par une activité de type réflexe et non-consciente. L'opérateur reproduit des séquences opératoires simples qu'il maîtrise parfaitement et qui ont été acquises par la pratique. Les tâches d'intervention en mode manuel ou sur un état stationnaire du système, par exemple la réaction à une alarme, sont menées par ce type de comportement.

La surveillance, l'interprétation et l'apprentissage dépendent plutôt du comportement basé sur des règles (**Rule-Based Behaviour**). Il s'agit d'un comportement conscient correspondant à une activité mise en jeu face à une situation connue. Il est régi par des règles ou "stratégies". Celles-ci sont mémorisées par l'opérateur lors de l'apprentissage ou consignées dans des documents.

Pour faire face à des situations inconnues, où aucun savoir-faire ou stratégie ne sont disponibles, l'opérateur doit avoir un comportement plus conceptuel basé sur la connaissance (**Knowledge-Based Behaviour**). Il doit utiliser ses connaissances ou ses modèles mentaux du système pour identifier l'état de celui-ci, comprendre les problèmes, envisager et évaluer de nouveaux plans en fonction du but qu'il s'est fixé.

Les trois niveaux sont caractérisés par des utilisations différentes de l'information disponible sur l'interface de communication entre l'opérateur et le système. Rasmussen [RASM 83] propose les termes de *signaux*, *signes* et *symboles* pour désigner les informations traitées par chaque niveau.

- Les *signaux* sont des stimuli représentant l'évolution spatio-temporelle de l'environnement du système,
- les *signes* définissent un état du système qui conditionne l'activation d'une stratégie mémorisée,
- les *symboles* représentent des concepts. Ceux-ci sont exprimés par des relations ou des processus qui peuvent être rattachées par convention à des caractéristiques du monde extérieur.

La classification de l'information en signaux, signes et symboles ne dépend pas généralement de la forme sous laquelle elle est présentée, mais plutôt du contexte dans laquelle elle est perçue, c'est à dire des intentions et des attentes de l'opérateur. Les signaux appartiennent au monde physique du procédé alors que les symboles appartiennent au monde mental de l'opérateur.

Ce modèle très important pour l'étude de l'opérateur permet de modéliser la résolution de problèmes et induit des outils d'évaluation d'un système homme-machine.

III.3 COOPERATION HOMME-MACHINE

III.3.1 Partage des degrés de liberté

Une première étape dans la coopération homme-machine est l'intégration de l'homme dans la boucle de commande au cours d'un mode automatique ou semi automatique. Il s'agit alors de partager le contrôle des degrés de liberté entre l'homme et la machine. Si la plupart de ces techniques de téléopération ont été développées pour des bras manipulateur, elles sont également transposables en robotique mobile. Nous pouvons distinguer trois types d'intégration de l'homme dans la boucle de commande : le choix explicite, l'action progressive et l'action mesurée.

- dans [YOKO 93], pour la commande d'un bras manipulateur, l'homme choisit explicitement le niveau d'assistance. L'enchaînement des modes étant fixe le choix doit devenir intuitif.
- dans [TARN 95] l'homme apparaît dans la commande comme une information capteur supplémentaire influençant la commande globale d'un bras manipulateur. Pour la commande automatique ou télépilotée du véhicule REMI de la SAGEM, I. Rivals [RIVA 95] a développé des correcteurs à base de réseaux de neurones pouvant intégrer, en raison de leur robustesse, les commandes provenant de l'utilisateur à partir du volant, des pédales de freinage ou d'accélération.
- S. Lee [LEE 93] propose de déterminer le degré de confiance entre les données fournies par une fusion multicapteur et la commande de l'opérateur, ce dernier pouvant choisir le poids de la confiance accordée aux différentes données.

III.3.2 Choix des modes de commandes

Dans le cadre d'un système homme-machine, un problème essentiel est le choix du mode de commande. En effet, certains problèmes insolubles pour la machine nécessitent l'intervention de l'homme. Inversement, si l'homme est trop peu sollicité par la machine son attention baisse ainsi que sa capacité à agir au moment voulu, et donc sa performance. Il s'agit alors de déterminer la meilleure répartition des tâches entre l'homme et la machine.

A cet effet, il est nécessaire de déterminer des critères de choix, certains concernant l'opérateur et d'autres la tâche à exécuter. Ces derniers peuvent être liés à la complexité de la tâche, à la qualité de réalisation, ou encore à la quantité/qualité d'information à traiter [JOLL 91], [CAST 91]. Les ergonomes ont défini différents critères pour déterminer la performance de l'opérateur. Nous pouvons grossièrement les regrouper en deux classes : l'état de l'opérateur et sa *charge de travail* [SPER 88]. L'état de l'opérateur peut être évalué par sa motivation ou son intérêt pour la tâche exécutée, et par son niveau d'apprentissage et son modèle mental de la conduite du système. La charge de travail correspond à la fraction de capacité de travail que l'opérateur investit dans la tâche. Les modèles du comportement humain font apparaître qu'elle est liée à la quantité d'informations traitées.

Pour soulager la charge de travail mentale d'un opérateur, il est nécessaire d'intégrer une aide à la décision du choix de mode de conduite. Celle-ci peut être envisagée de deux manières conduisant à deux types de coopération homme-machine [MILL 88] :

- la *coopération verticale* (fig. I.11) consiste à affecter la surveillance de l'ensemble des variables du procédé à l'opérateur, mais à lui fournir, s'il le demande, des outils d'aide à la détection, au diagnostic et à la reprise des défauts,

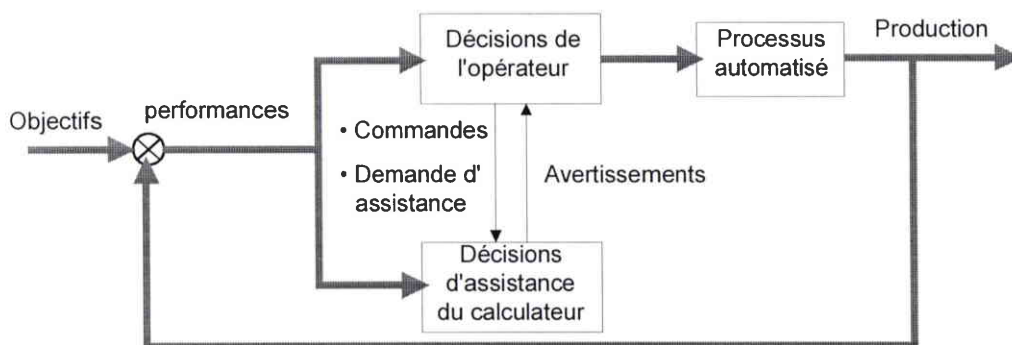


Figure I.11 : principe de la coopération homme-machine verticale d'après [MILL 91]

- le second type, appelé *coopération horizontale* (fig. I.12), consiste à répartir dynamiquement les tâches entre l'homme et la machine. La gestion de la répartition des tâches peut être confiée, soit au calculateur, soit à l'opérateur. La coopération est dite *explicite* lorsque l'homme est chargé de la répartition des tâches et *implicite* lorsque celle-ci est confiée à la machine.

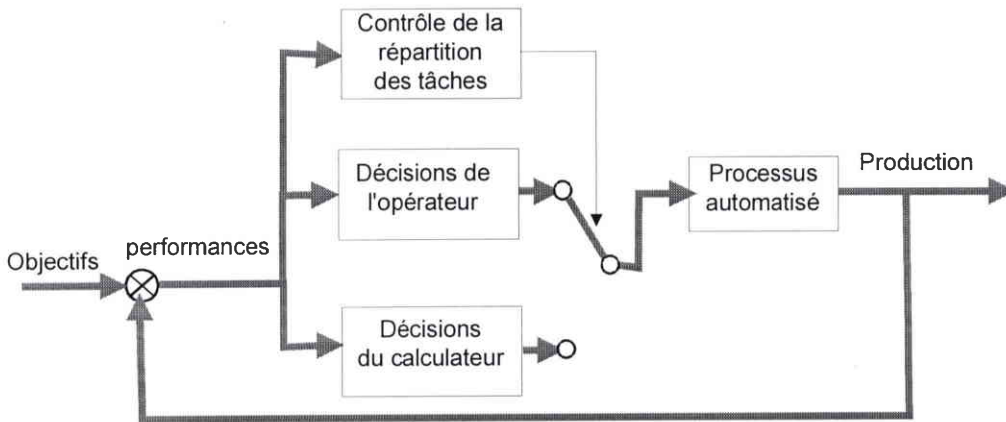


Figure I.12 : principe de la coopération homme-machine horizontale d'après [MILL 91]

III.3.3 Aides à la décision

Les outils développés en intelligence artificielle permettent d'apporter différents types d'aides à la décision. Si la tâche minimale est de réaliser un suivi du processus et d'apporter une aide à la gestion des alarmes, il peut être aussi bénéfique d'apporter une aide à la planification, une aide au diagnostic ou une aide à la perception.

En dehors des systèmes d'aide à la planification qui peuvent être utilisés hors ligne, la contrainte générale de ces systèmes d'assistance est leur réponse en temps réel. On trouve dans [HATO 91] la présentation de différents systèmes temps réel, allant de PEER du Jet Propulsion Laboratory qui cherche à diagnostiquer les pannes et replanifier, à CHRONOS et G2 qui sont des outils de développement de systèmes experts de suivi et de diagnostic d'applications complexes. L'intérêt des systèmes experts est leur capacité d'explication du raisonnement suivi. Ainsi, face à un problème, si le système expert et l'opérateur arrivent aux mêmes conclusions, ce dernier sera conforté dans sa décision. S'il y a conflit, l'opérateur pourra déceler la faille en suivant pas à pas le raisonnement.

nement appliqué par la machine. Si le système est parfaitement opérationnel, l'erreur de l'opérateur peut provenir d'une mauvaise identification de l'état du système ou de l'oubli de certaines informations.

Un autre type d'aide pouvant être implanté est l'aide à la perception, et plus particulièrement la perception visuelle. Ainsi, pour compenser le retard de transmission, le système ROTEX permet de réaliser une visualisation prédictive pour les bras manipulateurs d'une station orbitale [HIRZ 93]. Dans le cadre du projet AMR2 de robots d'interventions en milieux hostiles [CLEM 91], le CEA a développé le système PYRAMIDE [EVEN 91] qui à l'aide d'images 3D virtuelles permet d'adapter librement les points de visualisation des scènes fournies par les caméras.

III.4 CONCLUSION

En raison de la diversité des applications développées, la robotique de coopération offre un grand nombre de thèmes de recherche. Certains thèmes importants comme l'ergonomie et l'évaluation des systèmes n'ont été qu'évoqués en introduction pour nous permettre de développer plutôt le rôle de l'homme dans la boucle de commande de la machine. Il apparaît, en accord avec les modèles du comportement humain, qu'il est possible de mettre en place les assistances adéquates lui permettant d'agir en collaboration avec la machine tant au niveau de l'exécution des tâches qu'au cours de la supervision du système.

IV CONCLUSION

Ce chapitre a présenté l'état de l'art dans deux domaines connexes à l'étude de l'automatisation d'un fauteuil roulant électrique. Ces deux domaines sont la robotique mobile et la téléopération.

Dans un premier temps, nous avons décrit différentes approches développées en robotique mobile pour apporter une certaine autonomie à un véhicule. Les problèmes rencontrés sont particulièrement centrés sur la représentation du monde. Les architectures réactives ont démontré la robustesse apportée par une représentation décentralisée proche de la perception de la machine. Elles impliquent par contre des difficultés d'implantation des mécanismes de raisonnement couramment utilisés dans les architectures centralisées. Il s'agit alors de développer une approche mixte permettant de garder les caractéristiques de robustesse apportées par les architectures réactives et les possibilités de raisonnement des architectures centralisées. Le problème de l'adéquation entre le monde réel et le monde modélisé utilisé lors d'un raisonnement automatique limite les capacités d'autonomie de la machine.

Une autonomie totale du robot ne semblant ni souhaitable ni réaliste dans le cadre de notre application, nous avons cherché à étudier le rôle de l'homme face à un système automatisé. Ainsi la deuxième partie a présenté des études menées en téléopération avec pour objectif le partage des tâches entre l'homme et la machine ou encore l'aide à la décision.

CHAPITRE II

LES FAUTEUILS ROULANTS ROBOTISES

I JUSTIFICATION

II ETAT DE L'ART

III LE FAUTEUIL ROBOTISE VAHM

IV EVALUATION DU PROTOTYPE VAHM

V CONCLUSION

I JUSTIFICATION

L'importance du fauteuil roulant électrique comme facteur d'autonomie et d'insertion sociale n'est plus à démontrer. Ainsi, Cruble et Ferrant-Canu [CRUB 91] soulignent que le pilote d'un fauteuil roulant électrique retrouve ou bien découvre l'autonomie dans ses déplacements, améliorant de manière spectaculaire la maîtrise de son environnement, et de ce fait, des événements qui peuvent se produire. De même, à la suite de leur enquête sur l'évaluation des aides techniques de communication pour les IMC, Legrand et Le Cardinal [LEGR 87] soulignent que : "... pouvoir se déplacer en fauteuil roulant électrique permet de se mettre en présence" et donc d'entamer un début de communication.

Le fauteuil roulant électrique (fig. II.1) a évolué en suivant les progrès technologiques depuis les années 70 qui ont marqué le début de son utilisation. La maîtrise de la conduite des fauteuils est à présent facilitée par les boîtiers de commande électronique qui améliorent l'asservissement de la commande des moteurs (possibilité de réglage de vitesse, d'accélération, ...), s'adaptant ainsi aux besoins des utilisateurs. Les modes de commande proposés par les fabricants ou modifiés par les ergothérapeutes de façon personnalisée font qu'un plus grand nombre de personnes atteintes des membres supérieurs peuvent piloter un fauteuil roulant électrique, alors que le pilotage avec un joystick leur serait impossible ou pénible.



Figure II.1 : exemples de fauteuils roulants électriques

"Micro" de POIRIER, "Quartz" de DUPONT

La diversité des personnes handicapées (tétraplégiques, myopathes, IMC ...) ne permet pas d'utiliser de capteurs de commande universels. Ainsi, dans 10 % des cas des personnes handicapées ne peuvent pas contrôler un joystick, le capteur le plus communément utilisé. De nombreux sites anatomiques sont cependant susceptibles de générer des signaux de commandes exploitables, par exemple (fig. II.2) :

- A : menton,
- B : tête (pression sur un appui-tête),
- C : main,
- D : bras, coude,
- E : tête (mouvement : gauche, droite, avant, arrière)
- F : épaule,
- G1 : bouche (aspiration, inspiration),
- G2 : voix (commande vocale),
- G3 : langues, lèvres,
- H : pieds,
- I : genoux,
- J : muscles contrôlables (E.M.G.).

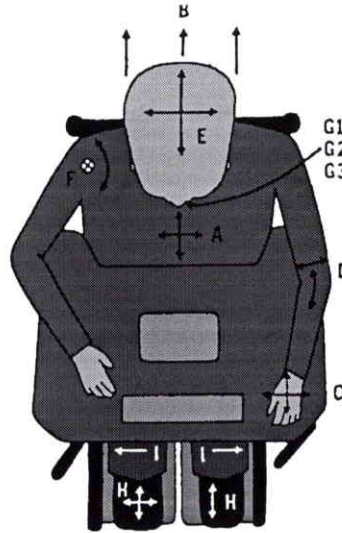


Figure II.2 : sites anatomiques, d'après [DUPO 84]

Les capteurs pouvant percevoir ces signaux peuvent être classés en deux catégories : les capteurs proportionnels, du type joystick, ou les capteurs "tout ou rien" à base de micro-interrupteurs électriques.

Les améliorations des fauteuils électriques standard, tant dans l'assise que dans le développement de capteurs d'interface spécifiques (capteurs de mouvements de tête, filtrage de mouvements parasites, ...) permettent de pallier en partie aux difficultés de commande. Cependant, pour les personnes à fort handicap moteur, le problème n'est pas seulement de prendre en compte les ordres de l'utilisateur, mais aussi d'obtenir une conduite suffisamment confortable pour qu'elle soit acceptable. Il est alors nécessaire d'envisager l'ajout de fonctionnalités intelligentes issues des recherches en robotique mobile.

Suivant qu'elles nécessitent, ou non, de disposer d'une connaissance globale de l'environnement les fonctionnalités issues de la robotique mobile peuvent être classées en deux types :

- Les asservissement locaux qui permettent :
 - la *détection d'obstacles* pour prévenir une collision,
 - l'*évitement d'obstacles* pour calculer une trajectoire d'évitement,
 - le *suivi de mur* qui peut être intéressant dans de longs couloirs pour une personne ayant des difficultés à maintenir une trajectoire droite,
 - le *suivi de personnes*,
 - le *passage de portes* ou de chicanes.
- Les primitives globales qui peuvent fournir :
 - un *suivi automatique* d'un parcours long et complexe, à partir de trajectoires préenregistrées ou planifiées,
 - une *aide à la localisation*, qui peut être intéressante pour des personnes souffrant de troubles cognitifs, à la suite par exemple d'un traumatisme crânien ou simplement dus à la vieillesse, mais aussi pour apporter une assistance spécifique à l'environnement d'évolution comme des contrôles de l'environnement permettant d'allumer une télévision ou d'utiliser un téléphone mains-libres.

Du fait qu'il n'existe pas actuellement de fauteuil robotisé polyvalent en évaluation à domicile ou en centre de réadaptation, les besoins en matière de fauteuil roulant électrique intelligent restent flous. Contrairement aux bras manipulateurs, seules des réponses à des questionnaires sur les attentes, a priori, des utilisateurs et des ergothérapeutes sont disponibles [NELS 90], [VERB 91], [TIDE 94]. Il apparaît que les aspirations sont très diverses en fonction du type de handicap des utilisateurs potentiels ou encore de leur âge. Il semble alors nécessaire de s'orienter vers un fauteuil réellement modulaire et polyvalent.

Ce chapitre présente les travaux essentiels réalisés depuis la fin des années 80 dans le domaine des fauteuils roulants robotisés, puis les solutions étudiées dans le cadre du projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs) développé au LAEI. Une série de tests en centre de réadaptation sont décrits en conclusion. Ils concernent le premier prototype du fauteuil robotisé VAHM. Les enseignements que l'on en tire vont contribuer à faire évoluer l'architecture relativement sommaire de celui-ci vers une structure facilitant la coopération entre l'homme et la machine.

II ETAT DE L'ART

II.1 INTRODUCTION

Le but primaire d'un fauteuil robotisé est de se déplacer en évitant les obstacles pour soulager l'utilisateur de cette manoeuvre et/ou lui apporter une sécurité de déplacement. Il existe plusieurs approches pour réaliser cette assistance à la navigation. Elles peuvent se distinguer par le type de connaissance sur l'environnement dont le système dispose. Dans la plupart des projets, le robot ne dispose d'aucune information sur l'environnement mais il cherche à s'adapter à celui-ci. Dans d'autres cas, un modèle sommaire est constitué de déplacements pré-enregistrés. Plus rarement, des projets plus ambitieux décrivent des modèles constitués de balises naturelles ou artificielles, voire des modèles topologiques complets de l'environnement.

II.2 FAUTEUILS SANS MODELE DE L'ENVIRONNEMENT

Dans cette hypothèse d'aide à la navigation sans modèle de l'environnement, le fauteuil a un comportement réactiviste vis-à-vis de l'environnement. Il n'utilise que des asservissements locaux. Ces applications sont les plus couramment décrites dans la littérature concernant la robotique mobile pour handicapés.

- C'est dans un but éducatif, thérapeutique, ainsi que pour augmenter la motivation des enfants handicapés, que Craig et Nisbet [CRAI 93] proposent l'utilisation à l'école d'un fauteuil roulant électrique "intelligent" piloté par un réseau de processeurs. Cette réalisation n'est pas décrite en tant qu'aide à la mobilité fonctionnelle, mais plutôt comme un outil pour l'aide au développement physique, cognitif, perceptif, social et communicatif des enfants handicapés.

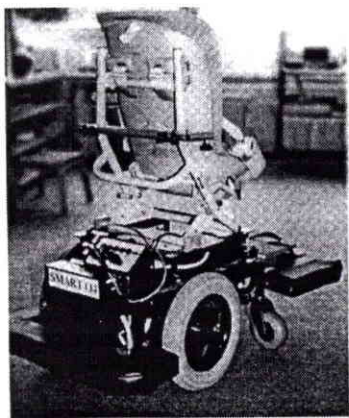


Figure II.3 : “The Smart Wheelchair”

Le fauteuil (fig. II.3) est équipé de deux capteurs de contact à l’avant et à l’arrière du fauteuil au niveau des repose-pieds et de huit capteurs à ultrasons à l’avant. La commande est réalisée à distance par un micro-ordinateur. L’architecture de commande est dérivée de la “subsumption architecture” de Brooks [NISB 90]. A titre d’exemple, la figure II.4 présente le comportement “entrer en contact et tourner”. Le plus haut niveau permet de configurer le comportement souhaité pour chaque utilisateur. Le plus bas niveau prend en compte les ordres de l’utilisateur et les applique aux moteurs du fauteuil si ces ordres ne sont pas inhibés par un niveau supérieur.

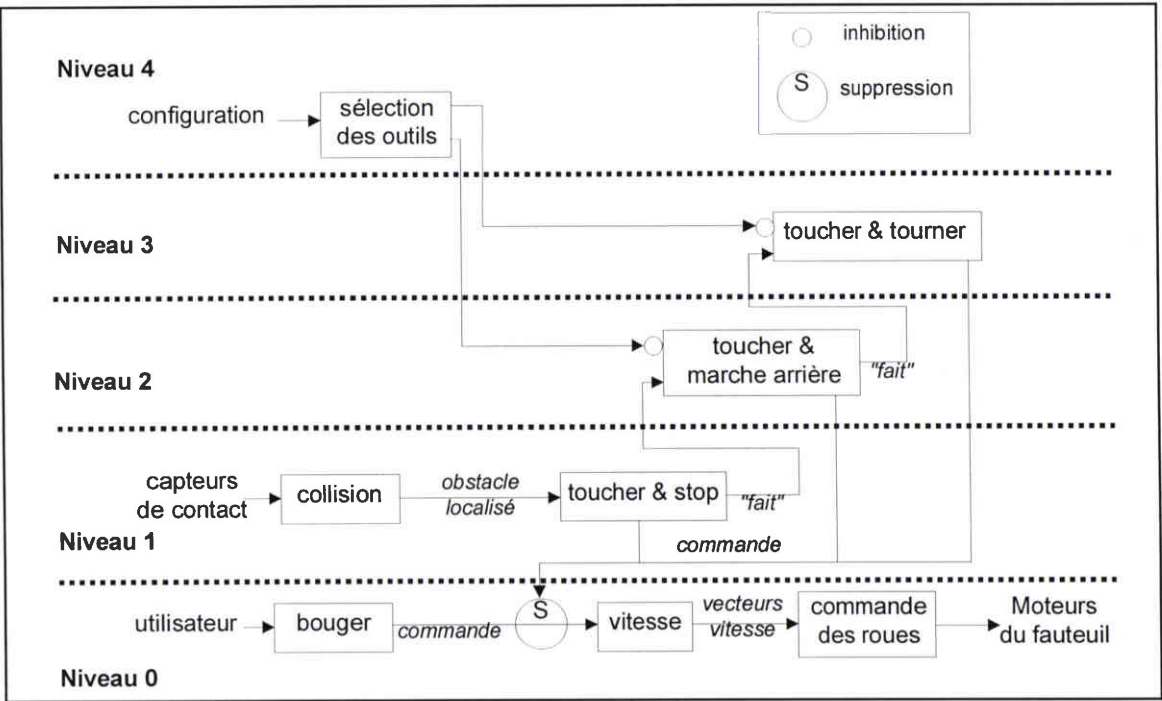


Figure II.4 : comportement “entrer en contact et tourner”

Pour éviter les comportements contradictoire inhérents à ce type d'architecture, la communication entre les différents comportements actifs est gérée par une pile "FILO" qui permet de cadencer et de contrôler les informations.

• A partir d'une méthode originale d'évitement d'obstacles intitulée "Vector Field Histogram (VFH)", Levine et Borenstein [LEVI 89] étudient diverses applications d'une base mobile pour personnes souffrant de déficits moteurs ou cognitifs. La méthode "VFH" permet de choisir la meilleure direction d'avance du fauteuil en fonction des obstacles proches et de la commande provenant d'un joystick (fig. II.5). Elle se déroule en quatre étapes [BORE 91] :

- Pour obtenir rapidement les données des capteurs ultrasons situés autour de la base mobile et regroupés par noeuds, une méthode nommée : "EERUF" a été développée. Celle-ci élimine les erreurs des données ultrasonores dues à une réception prématurée d'une onde provenant de l'émission d'un noeud précédant (phénomène "cross-talk") en activant chaque noeud à des intervalles de temps variables. Les données représentent alors la probabilité de présence d'un obstacle près de la base et sont placées dans un tableau à deux dimensions (position, probabilité).
- Ces données sont ensuite réduites pour être placées dans un histogramme polaire à une dimension qui indique le temps de collision probable en fonction de la direction prise par la base mobile.
- Cet histogramme permet de rechercher une zone libre de passage entre les obstacles par rapport à la direction demandée par l'utilisateur via le joystick.
- La direction et la vitesse du fauteuil sont modifiées proportionnellement en fonction de la zone libre attractive et de la force répulsive virtuelle des obstacles.

La méthode "VFH" autorise un évitement automatique et rapide d'obstacles (commande des roues toutes les 30 millisecondes). Dans [BORE 92] la méthode "VFH" a été implantée sur une base mobile LABMATE ayant la possibilité de se déplacer à 1 m/s. L'environnement était encombré d'obstacles de petites tailles : des barres de 8 mm de diamètre posées à la verticale et distantes de 1.36 m.

La base mobile a pu traverser cet environnement sans encombre à vitesse maximum sauf pendant les virages brusques où la vitesse était de 0.8 m/s.

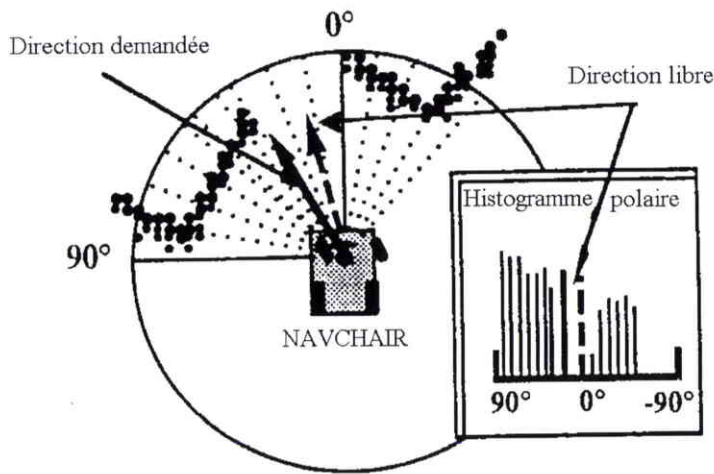


Figure II.5 : “Vector Field Histogram”

L’algorithme “VFH” est implanté dans “The Navchair System” (fig. II.6) [BORE 90], [JARO 93], [BELL 93]. Ce projet a pour objectif de réduire les efforts physiques et cognitifs requis dans les manoeuvres de déplacements du fauteuil en aidant à éviter les obstacles, à suivre les murs et à passer les portes. Cette application est constituée d’un fauteuil électrique standard sur lequel est fixée une ceinture de capteurs à ultrasons et un ordinateur (486DX33).



Figure II.6 : “The Navchair System”

Le mode d'évitement d'obstacles, utilisant la méthode "VFH", est activé en permanence. Cela permet d'utiliser ce mode de façon détournée pour faire du suivi de mur ou du passage de porte, qui ne sont en fait que des évitements d'obstacles particuliers, sans avoir à changer de fonctionnalité d'assistance.

Dans [BELL 94], les efforts ont particulièrement porté sur l'analyse du comportement de l'utilisateur en étudiant les mouvements du joystick manipulé par la personne, ceci afin de prédire ses intentions. Par exemple, si le fauteuil se rapproche d'un obstacle, alors que la personne maintient un ordre de déplacement vers celui-ci, l'évitement de l'obstacle "demandé" reste actif, sinon il se transforme en accostage automatique (fig. II.7). Cette sélection automatique de tâches peut-être affinée par une extraction automatique des caractéristiques de l'environnement proche (reconnaissance de murs, de portes, ...). Une étude en ce sens, basée sur l'utilisation de réseaux de neurones est décrite dans [SIMP 94].

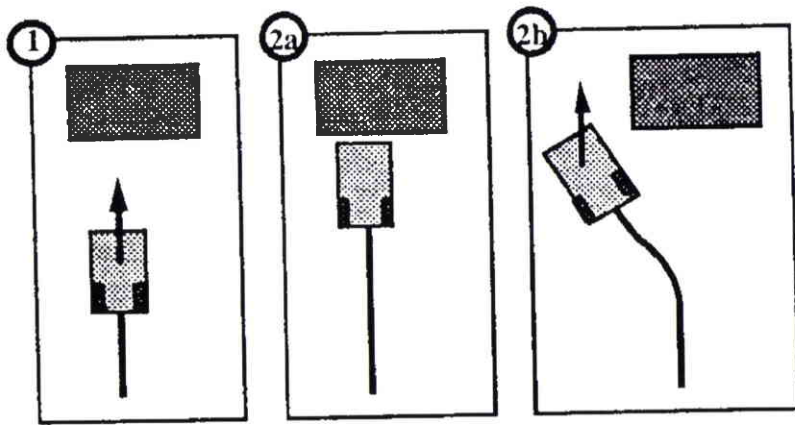


Figure II.7 : détermination du choix **2a** ou **2b** suivant la manière d'approche de **1**

L'architecture de commande est présentée comme une boucle de commande interne (fig. II.8) de période **T** inférieure à la période **Td** qui correspond au temps de décision et d'exécution de la commande par l'utilisateur. Cette boucle de contrôle interne court-circuite la boucle de commande externe utilisateur-fauteuil-environnement sur ordre d'un répartiteur de commande.

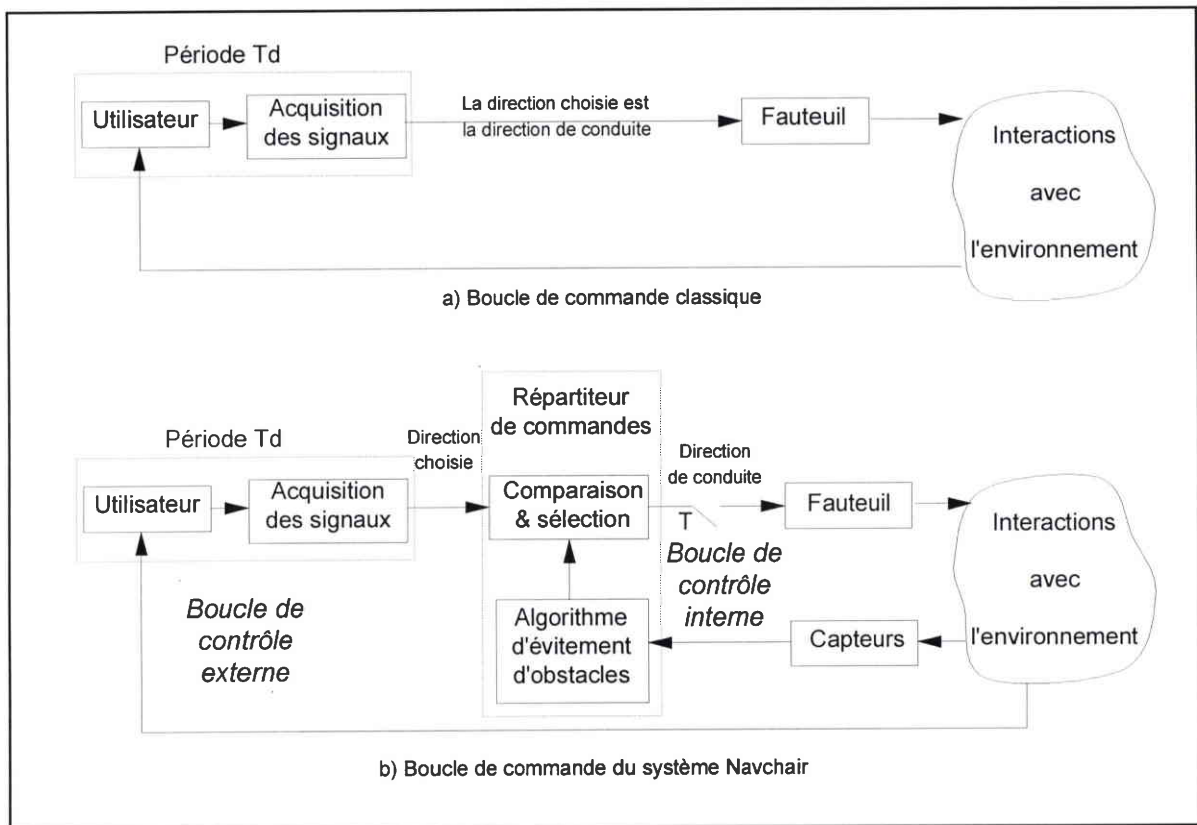


Figure II.8 : architecture de contrôle de "Navchair"

• En France, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) à partir du projet COACH (Computer Assisted wheelChair for Handicaped people) [DETR 92], propose une solution proche de celle présentée ci-dessus, en privilégiant des asservissements locaux à des primitives globales qui augmenteraient d'avantage l'autonomie de la machine plutôt que celle de l'homme [GELI 93].

Le système est implanté sur un fauteuil électrique du commerce (POIRIER) équipé d'un ordinateur, de quatorze capteurs à ultrasons et de deux télémètres à infrarouges. L'utilisateur dispose d'un suivi de mur et d'une interprétation des commandes en fonction de l'environnement, le passage de porte devant être réalisé grâce à des marqueurs indiquant les portes. Le fauteuil se commande via un joystick suivant trois modes :

- Le mode direct : l'utilisateur pilote le fauteuil de façon classique avec le joystick.
- Le mode filtré : ce mode est prévu pour les personnes présentant une forte spasticité. Les mouvements appliqués au joystick par le pilote sont filtrés afin d'obtenir une trajectoire lissée. Un module de détection d'obstacles proches

du fauteuil est activé en permanence. Celui-ci stoppe le fauteuil si un obstacle pénètre dans une zone de sécurité définie autour du fauteuil.

- Le mode corrigé : avec ce mode, le fauteuil se déplace en fonction des ordres demandés par l'utilisateur et l'environnement proche. Si un mur est détecté, le contrôleur s'assure qu'une distance minimale est respectée. S'il y a deux murs, le fauteuil est maintenu au milieu du couloir.

Ce système doit être évalué en centre de réadaptation à partir de janvier 1996.

• “Mister Ed” (fig. II.9) est une application des travaux sur les architectures réactivistes en robotique mobile [CONN 90]. Elle s'apparente à l'assistance au pilotage d'un fauteuil roulant électrique. Ainsi, à l'instar du cheval vis-à-vis de son cavalier, la fauteuil réagit aux ordres du pilote tant que ceux-ci ne provoquent pas de situations dangereuses. En l'absence de commande le fauteuil poursuit son chemin en évitant les obstacles éventuels.

La base mobile est équipée de deux capteurs à ultrasons détectant les obstacles frontaux, de huit capteurs à infrarouges (deux en façade, deux de chaque côté et deux en diagonale à l'avant) et de quatre capteurs de contact dans chaque coin. Le contrôle du fauteuil s'effectue par l'intermédiaire d'un joystick et d'un clavier.

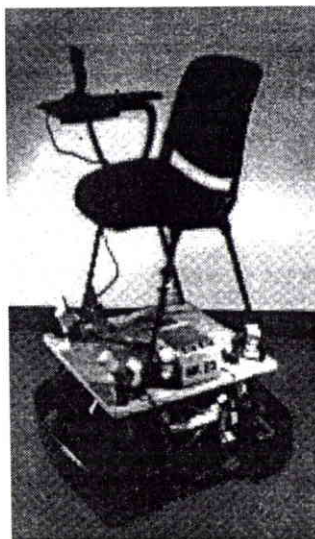


Figure II.9 : “Mister Ed”

Suivant les principes de l'architecture de BROOKS, la commande est réalisée de façon décentralisée par le déclenchement de deux types de comportements : "avance" et "rotation". Le comportement global est la combinaison des comportement actifs. Chaque comportement est composé de plusieurs niveaux supprimant les actions des niveaux inférieurs.

- **Avance** est composé de :

approcher : le comportement de plus bas niveau : avancer tant qu'aucun obstacle n'est détecté par les capteurs à ultrasons

voyager : avancer tant qu'aucun obstacle n'est détecté par les capteurs à infrarouges

s'éloigner : reculer si un obstacle est détecté à proximité par les capteurs à ultrasons

joystick : prendre un compte les ordres en translation provenant du joystick

rebondir : avancer ou reculer en fonction du capteur de contact activé

halte : empêcher le mouvement en fonction du capteur de contact activé

bloquer : empêcher l'avance si un capteur infrarouge en façade est activé

- **Rotation** est composé de :

aligner : se tourner vers le plus proche objet détecté par les capteurs à ultrasons

parallèle : tourner jusqu'à ce que deux capteurs à infrarouges trouvent un mur

tourner : tourner pour s'éloigner de l'obstacle détecté par un capteur de contact

impasse : tourner à gauche si tous les capteurs infrarouges en façade sont actifs

se faufiler : tourner pour désactiver un capteur infrarouge en façade

virer : tourner pour désactiver un capteur infrarouge en diagonale

contourner : tourner dans la direction où une information infrarouge persistante vient de disparaître

joystick : prendre en compte les ordres de rotation du joystick

arrêter : empêcher toute rotation si un capteur de contact est actif

Le joystick contrôle de façon classique les déplacements du fauteuil, alors que le clavier commande un choix multiple de fonctionnalités comme "suivre un mur" ou "suivre une personne" qui sont des macro-commandes correspondant à des groupes de comportements.

La figure II.10 présente un exemple d'utilisation où des comportements se déclenchent en fonction de l'environnement et apportent de cette manière une aide à l'utilisateur.

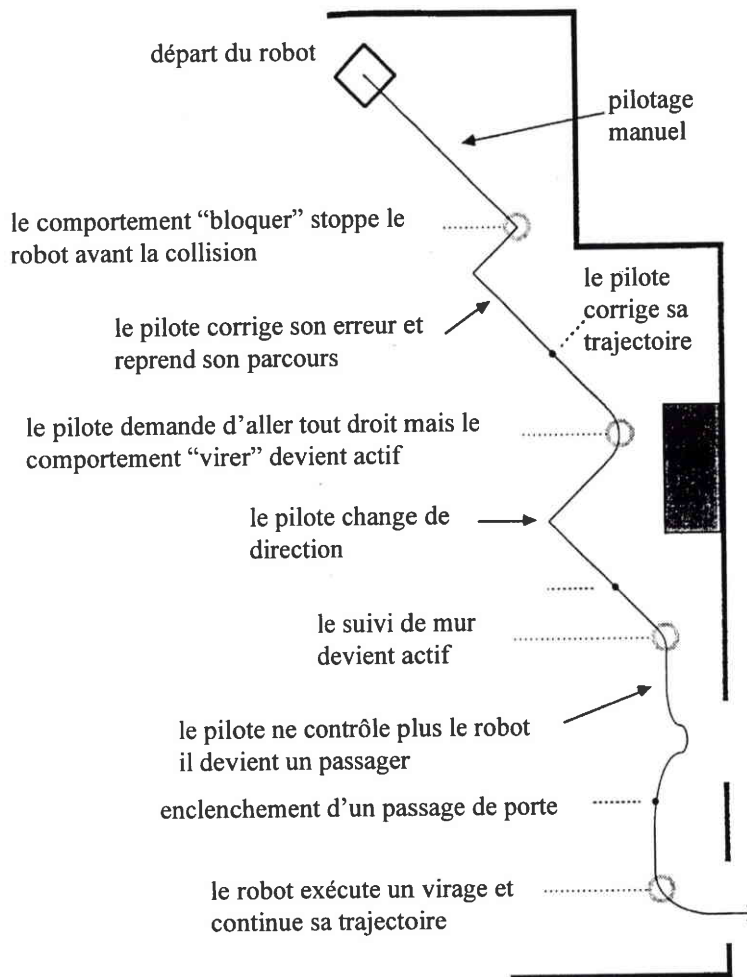


Figure II.10 : exemple de déplacement avec l'application "Mister Ed"

II.3 REALISATION DE PARCOURS PLANIFIES OU PRE-ENREGISTRES

• Dans le cadre du programme européen TIDE (Technology Initiative for Disabled and Elderly persons), le projet OMNI (Office wheelchair with high Manoeuvrability and Navigational Intelligence) (TIDE 1097) [BUHL 95], fédère les travaux réalisés pour le “Smart Wheelchair” (§ II.2) sur la commande de bas niveau et les travaux de Buhler et Humann [BUHL 93] sur un fauteuil équipé d’un système mécanique original de roues, “Mecanum-Wheels”, permettant les déplacements latéraux (fig. II.11).



Figure II.11 : le projet OMNI et le système “Mecanum-Wheels”

D’un point de vue fonctionnel le système est composé de plusieurs niveaux hiérarchiques permettant d’augmenter l’assistance à l’utilisateur tout en diminuant sa fatigue (fig. II.12). Il s’agit essentiellement de fonctionnalités ne nécessitant pas de modèle interne de l’environnement. Au plus bas niveau, le fauteuil se conduit avec un joystick comme pour un fauteuil électrique standard mais avec des possibilités de déplacements holonomes. Les niveaux supérieurs utilisent les capteurs pour éviter les obstacles, les caractéristiques de l’environnement pour réaliser un suivi de mur ou un passage de porte. Les niveaux les plus hauts permettent d’accéder à des fonctionnalités pré-enregistrées comme refaire un chemin mémorisé ou refaire en marche arrière les dernières manoeuvres réalisées. Le dernier niveau est destiné à exécuter des mouvements automatiques en suivant une ligne magnétique ou en utilisant des balises à infrarouges.

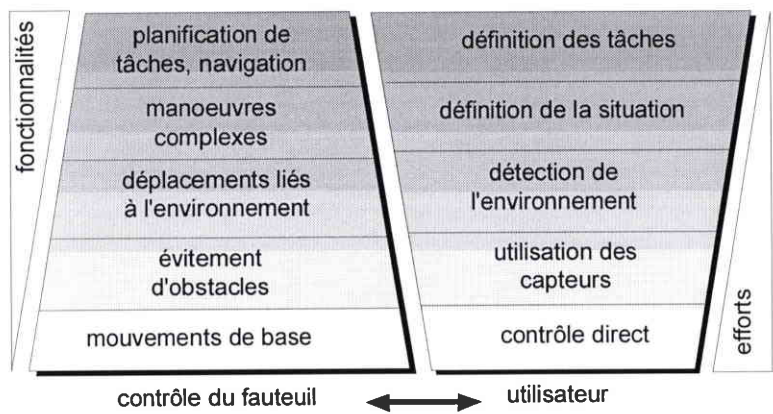


Figure II.12 : hiérarchie des fonctionnalités du projet OMNI

Pour rendre le fauteuil adaptable à l'utilisateur, ses concepteurs ont opté pour une architecture de contrôle modulaire [HOYE 94] (fig. II.13). L'administrateur configure les interfaces adaptées à l'utilisateur en choisissant une commande vocale, un clavier ou un joystick. A haut niveau, l'ordinateur effectue les planifications de tâches et la navigation. A bas niveau, un bus VME gère les moteurs, les capteurs et un bras manipulateur. Chacun de ces modules est constitué d'une unité de communication, d'une unité fonctionnelle et d'une "base de connaissances hybride". Cette dernière gère d'une part l'état et la communication du module, et d'autre part les règles permettant d'agir en fonction des données disponibles ou la réaction en cas d'erreur ou d'absence d'un module. On dispose ainsi d'un système facilement adaptable à chaque cas particulier par ajout ou retrait d'un module.

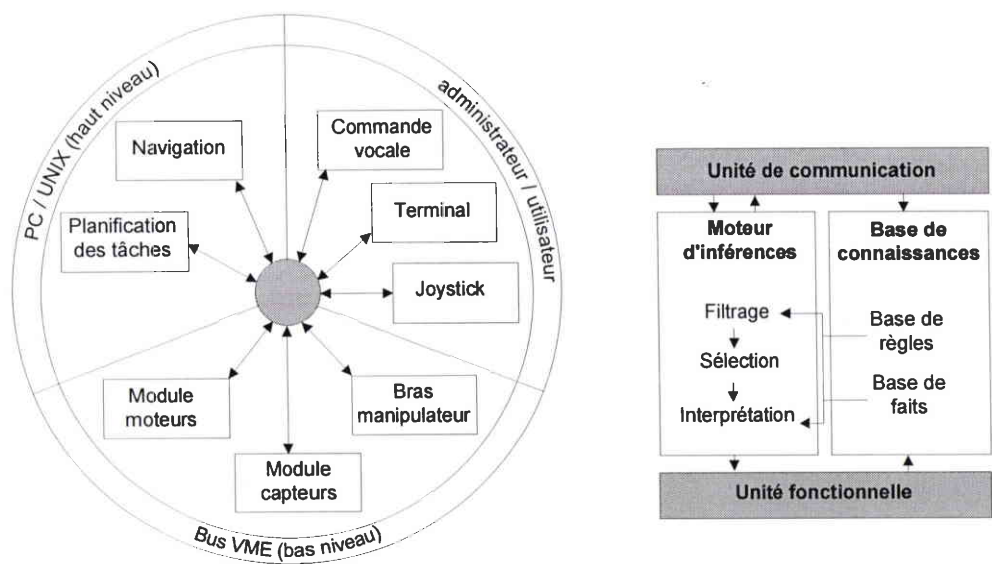


Figure II.13 : architecture et structure des modules du projet OMNI

- Pour apporter un aide à la navigation Wakaumi et al. [WAKA 92] ont utilisé l'application industrielle la plus importante de la robotique mobile : le filoguidage d'un convoyeur. Ils ont réalisé un suivi de ligne au sol pour permettre aux personnes handicapées de se déplacer simplement d'une manière rapide et fiable à l'intérieur comme à l'extérieur. Leur choix s'est porté sur un système de suivi de ligne magnétique insensible à la poussière, à la saleté, aux coupures de ligne et aux variations de lumière (fig. II.14). Un système de vision n'a pu être utilisé, les temps de calcul ne permettant pas un mouvement suffisamment rapide.

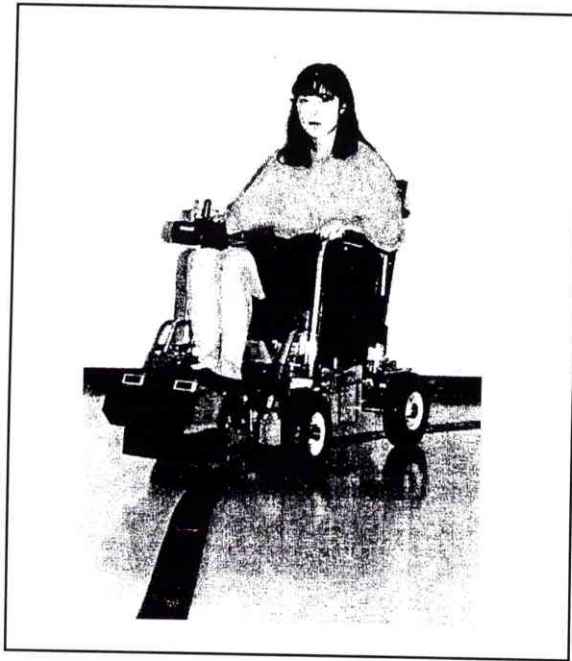


Figure II.14 : suivi de ligne du fauteuil roulant électrique de Wakaumi.

Pour enclencher le mode automatique, la personne positionne le capteur de détection de ligne placé sous ses repose-pieds au-dessus de la ligne à suivre et enclenche le suivi automatique grâce à un interrupteur. Un relais ferme le circuit réalisant l'asservissement de la direction des roues avant en fonction de la ligne à suivre (fig. II.15).

Un capteur à infrarouge situé sous le fauteuil détecte des marques collées au sol près de la bande, ce qui permet de déterminer des points d'arrêt selon les besoins de l'utilisateur. Un autre système de détection à infrarouge, fixé à l'avant des repose-pieds du pilote, stoppe le fauteuil dès qu'un obstacle se trouve sur la trajectoire et autorise la reprise du mouvement une fois que celui-ci est enlevé.

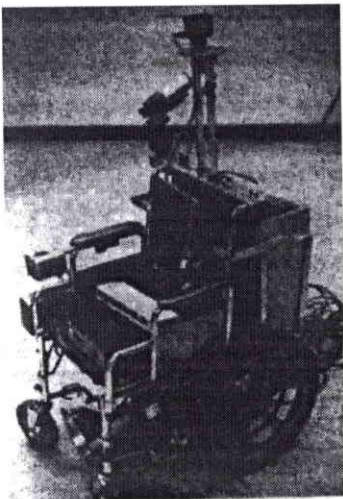


Figure II.16 : fauteuil robotisé de Madarasz

L'environnement est modélisé sous forme symbolique. En raison de l'imprécision des capteurs et des déplacements, le modèle ne contient pas de distance absolue mais des points de repère (des balises) représentant des structures naturelles comme les murs, les intersections de couloirs ou les ascenseurs. En fait, seulement trois dimensions ont été retenues dans la structure du modèle (fig. II.17), une pour le numéro de l'étage, une pour le nombre de murs et une dernière pour la position absolue des chambres de l'étage.

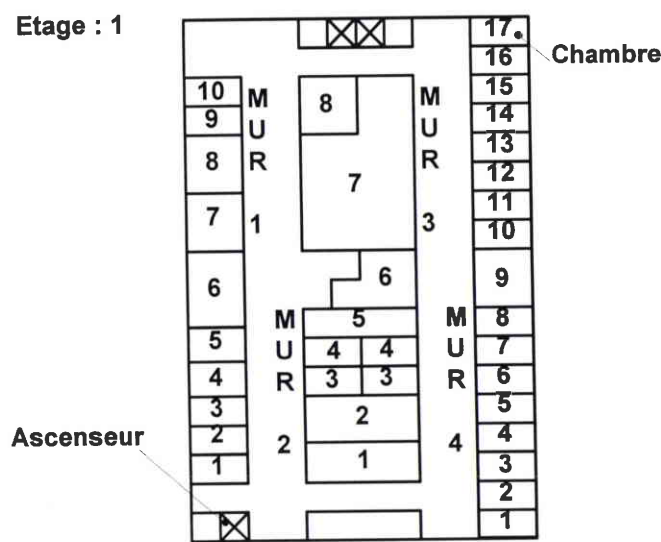


Figure II.17 : modélisation de l'environnement dans [MADA 86]

Ce modèle permet de réaliser une planification de mouvement du type :

- **suivre** le mur 3 **jusqu'à** l'ascenseur 1
- **tourner de 90°**
- **suivre** le mur 2 **jusqu'à** l'intersection 4
- **tourner de -90°**
- **suivre ...jusqu'à** la chambre 12

Les obstacles obstruant le passage de véhicule sans qu'il soit possible de les contourner à l'aide d'une primitive d'évitement d'obstacles (non implantée) sont inclus dans le modèle et une nouvelle planification est demandée.

Les capteurs à ultrasons sont utilisés pour contourner les obstacles, s'aligner à un mur ou en association avec la caméra, déterminer si une porte est fermée. L'essentiel de la perception est réalisé par le système de vision. Il doit trouver le centre des couloirs pour permettre la navigation, reconnaître des objets comme les ascenseurs ou les numéros de porte, ou déterminer si d'autres objets sont en mouvement.

Le système de vision rend les capacités du fauteuil fortement tributaires des conditions d'éclairage de l'environnement d'évolution et limite sa vitesse.

En fait, seule l'étude de l'intégration de certaines techniques de la robotique mobile a été décrite et testée. L'interface entre la personne handicapée et la machine n'a pas été étudiée.

• Le projet SENARIO [KATE 95] (Programme TIDE 1045) se propose d'utiliser les capacités fournies par un modèle de l'environnement.

Deux modes de fonctionnement sont disponibles :

- un mode d'apprentissage où l'utilisateur peut définir hors-ligne des chemins dans un modèle topographique de l'environnement,
- un mode de marche où l'utilisateur choisit un chemin prédéfini dans la bibliothèque de chemins disponibles. Le système réalise le suivi en utilisant les informations du modèle et des capteurs pour éviter les obstacles.

L'architecture du système (fig. II.18) est centrée sur le module d'"évitement de risques" qui inclut la planification de chemin et de tâches, la détection de risque, l'évitement d'obstacle et le suivi de trajectoire. Ce module reçoit des informations des modules de perception, de localisation, et du panneau de contrôle et transmet les commandes au module de contrôle de puissance.

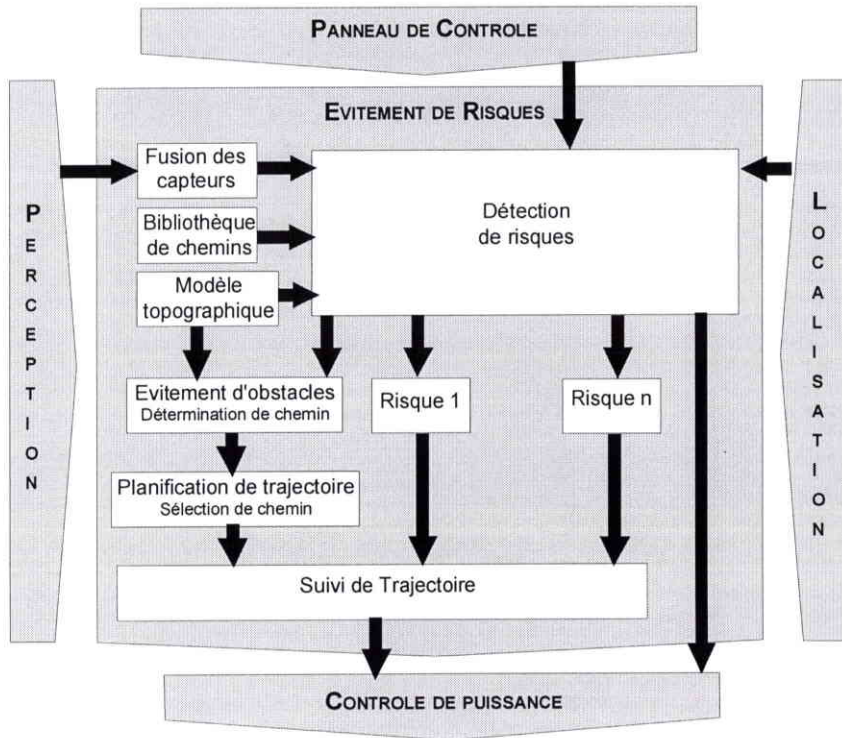


Figure II.18 : architecture de commande du projet SENARIO

L'utilisation du bus standardisé M3S [COOP 95] doit permettre d'intégrer différents types de capteurs, comme par exemple une commande vocale, et de se connecter à tout fauteuil électrique équipé de ce bus avec un minimum de modification.

II.4 DISCUSSION

Depuis environ deux ou trois ans, on constate que la robotique mobile appliquée à l'aide aux personnes handicapées a perdu de son caractère marginal. Outre l'effet de mode, deux facteurs peuvent sans doute expliquer cet état de fait :

- après les projets spatiaux et d'intervention dans les milieux inaccessibles à l'homme, la robotique mobile se cherche des applications dans le cadre de la robotique de service, et l'assistance aux personnes handicapées est une application intéressante et motivante,
- les programmes européens, en particulier TIDE (acronyme anglais pour "Initiatives technologiques pour les personnes handicapées et les personnes âgées"), ont incité un certain nombre d'équipes de recherche en robotique à s'intéresser à ce domaine.

Concernant les projets relatés au cours de cet état de l'art, deux points sont à noter :

- il n'y a pas encore de retour d'évaluation des systèmes décrits dans la littérature, hormis pour le Smart Wheelchair du Call Center mais l'objectif était l'étude de l'apport éducatif plutôt que des problèmes de modularité et de mobilité,
- l'aspect interface homme-machine n'est généralement que peu évoqué, voir totalement éludé. Il s'agit pourtant là d'un aspect essentiel pour l'acceptabilité et donc la réussite de tels projets.

Les problèmes soulevés par ces deux points proviennent de la focalisation sur les problèmes techniques d'adaptation des recherches en robotique mobile et de l'absence de l'utilisateur potentiel. Les évaluations cliniques qui ne sauraient tarder devraient changer cette situation, à condition qu'elles soient faites suffisamment tôt et aux différentes étapes du développement.

III LE PROJET VAHM

Malgré leurs récentes et importantes évolutions techniques les fauteuils roulants électriques ne suffisent pas toujours à compenser le handicap de mobilité : une spasticité trop importante, des possibilités physiques résiduelles trop faibles ou certains handicaps cognitifs interdisent ou gênent leur utilisation.

Une assistance à la navigation dans ces cas de figures apparaît indispensable. En améliorant le confort de conduite, cette assistance pourra de plus, diminuer la fatigue physique et nerveuse de l'utilisateur habituel d'un fauteuil électrique.

Dans ce qui suit nous allons tenter de définir les contraintes afférentes à une telle application de la robotique mobile. Nous concluerons par l'énoncé des principes à la base de la conception du fauteuil robotisé VAHM.

III.1 SPECIFICITES DE L'APPLICATION

Un fauteuil roulant électrique automatisé est une application de la robotique mobile apparentée à la robotique de service où l'utilisateur n'est pas, a priori, compétent dans le domaine technologique. Cette application est également apparentée à la téléopération au sens où l'homme apporte sa meilleure compréhension de l'environnement et la machine ses facultés de précision et de répétabilité [NORE 91] [LEE 93]. L'implantation de ces techniques et technologies soulève des problèmes spécifiques à ce type d'application. Nous les avons regroupés sous cinq thèmes : le nécessaire compromis coût/performance, qui influence les conditions d'utilisation du système et impose des contraintes de modularité, la sécurité et enfin l'acceptabilité psychologique du robot. Nous verrons que ces contraintes ne sont pas contradictoires mais imposent une coopération entre l'homme et la machine pour l'accomplissement d'une tâche de mobilité.

III.1.1 Compromis coût/performance

Dès lors que l'on travaille dans le domaine de la technologie pour personnes handicapées, du fait de l'étroitesse du marché potentiel, le facteur coût apparaît comme primordial dans l'établisse-

ment du cahier des charges. Ce facteur influence nécessairement les choix technologiques et il est alors préférable d'utiliser, autant que possible, un matériel non-spécifique.

Ainsi, en premier lieu, le système doit être adaptable aux fauteuils et aux assistance techniques du commerce. Le développement de normes européennes comme le bus M3S devrait faciliter à plus long terme cette intégration.

Le facteur coût influe ensuite sur le choix des capteurs. Comme il est indispensable d'utiliser des capteurs permettant une perception de l'environnement, on se contentera pour l'instant de capteurs à ultrasons ou à infrarouges. S'il est envisageable que le prix des télémètres laser puisse devenir abordable, les données fournies étant assez similaires à des données ultrasonores, leur intégration ne posera pas de problème fondamental. Par contre, l'utilisation d'un système de vision est actuellement à rejeter en raison du coût induit par l'architecture informatique nécessaire au traitement de ce type de données.

III.1.2 Conditions d'utilisation

Dans un premier temps, les contraintes technologiques imposent des contraintes d'utilisation. Ainsi, un fauteuil électrique standard est un véhicule non-holonyme : les mouvements transversaux sont impossibles et le rayon de braquage est limité. De plus, les variations des pressions de gonflage des pneus ou la répartition variable du poids de la personne influent sur les dimensions des roues et donc sur l'odométrie, la rendant ainsi peu fiable.

Il est nécessaire de réaliser une coopération avec l'utilisateur pour gérer les situations de blocage dues à des évolutions dans un environnement peu structuré. En effet, l'environnement réel peut être assez différent de l'environnement préalablement modélisé en raison d'éléments imprévus ajoutés ou d'autres déplacés.

III.1.3 Modularité

La diversité des lieux d'utilisation qui peuvent être un appartement ou des grandes structures du type hôpital ou centre de réadaptation, ainsi que la diversité des utilisateurs nécessite un système modulaire.

Les contraintes que cela implique sont de deux ordres :

- le système doit accepter des informations provenant de tous types de capteurs, qu'ils soient tout ou rien (capteurs de souffle, contacteurs pneumatiques ou mécaniques, ...), proportionnels (joystick, boule, capteurs de mouvements de menton, ...) ou complexes (reconnaissance automatique de la parole, ...).
- Le second point, qui découle de cette condition de modularité, est la facilité de paramétrage, d'adaptation et de maintenance du système. Il s'agit alors de prendre en compte le second utilisateur du système : le personnel médical.

III.1.4 Sécurité

La sécurité du pilote et de son entourage est également un facteur important. Deux aspects devront être étudiés dans ce cadre. Le premier a déjà été évoqué puisqu'il concerne la réalisation de fonctionnalités d'évitement de collisions ou de chutes en utilisant les capteurs de perception de l'environnement. Le second aspect concerne la fiabilité de la machine selon deux niveaux d'intervention :

- La fiabilité de bas niveau qui concerne les composants du système (capteurs, actionneurs et architecture hardware) et de leur agencement. Les données issues des capteurs ne doivent pas être sensibles aux bruits ambiants ou aux défauts internes survenus au cours de leur utilisation. Des systèmes d'auto-surveillance et/ou de filtrage en mesure de détecter les défauts peuvent solutionner ces problèmes, les données défectueuses étant ainsi éliminées.
- La fiabilité de haut niveau, ou encore la robustesse de fonctionnement, qui est un facteur important de sécurité de la personne mais contribue également à une bonne acceptabilité de la machine. Ainsi faut-il éviter toute situation de blocage définitif de la machine quitte à dégrader son fonctionnement jusqu'à un contrôle manuel classique de fauteuil électrique. La personne garde alors le contrôle total de la machine, en ayant continuellement la possibilité d'intervenir, même s'il ne s'agit que d'arrêter la machine.

III.1.5 Acceptabilité

Si les conditions énoncées au cours de la présentation des contraintes de modularité et de sécurité sont nécessaires pour l'acceptation psychologique d'une aide technique complexe, elles ne sont cependant pas suffisantes. Des utilisateurs du système peuvent le refuser pour des motifs aussi divers que la peur de ne pas savoir l'utiliser ou tout simplement parce que le système est trop encombrant ou trop voyant. Une personne handicapée peut avoir peur du regard d'autrui, son fauteuil électrique étant en quelque sorte un prolongement d'elle-même. L'esthétique du système est donc un élément important.

Un autre problème très sensible dans la conception d'une téléthèse concerne l'interface entre l'homme et la machine. L'utilisateur ayant par hypothèse des possibilités physiques très réduites, le dialogue établi doit minimiser le nombre d'actions nécessaires pour accéder à une commande. Par ailleurs l'interface doit être suffisamment conviviale et modulaire pour s'adapter aux capacités cognitives et intellectuelles du pilote.

Un autre point est le confort de déplacement. Celui-ci doit être physique, au sens où il faut éviter les variations de vitesse ou de direction brutales, mais aussi psychologique, les mouvements du fauteuil devant être prévisibles.

Notons enfin que le mouvement n'étant généralement pas une fin en soi, le fauteuil "intelligent" doit être doté d'un contrôle de l'environnement afin qu'il augmente effectivement l'autonomie de l'utilisateur et pas uniquement ses capacités à se déplacer.

III.2 PRESENTATION DU SYSTEME

Le projet intitulé VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs) [PRUS 91] [BOUR 93a, 93b] initié en 1991 par l'équipe Capteurs et Machines Intelligentes (CMI) du Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles (LAEI) de l'Université de METZ, se propose d'améliorer la commande des fauteuils roulants électriques en leur adjoignant des facultés de mobilité autonome.

Trois modes de commande ont alors été définis :

- Mode de commande automatique : une génération et un suivi automatique de chemin sont réalisés. La personne n'intervient que pour désigner l'objectif à atteindre et, éventuellement, en cours de mouvement pour modifier localement la trajectoire.
- Mode de commande semi-automatique ou manuelle assistée : le fauteuil est piloté de façon classique par un capteur de commande tout ou rien ou proportionnel avec possibilité d'appel à des fonctionnalités de bas niveau telles que, par exemple, le contournement automatique d'obstacles ou le suivi de mur.
- Mode de commande manuelle : il est similaire à une commande classique de fauteuil roulant électrique.

L'implantation pratique de ceci a été effectuée sur un prototype de fauteuil roulant électrique muni de fonctionnalités intelligentes construit à partir d'une base mobile ROBUTER, d'un micro-ordinateur embarqué (486DX4) et d'un siège pour personne handicapée (fig. II.19). La base mobile développée par la société ROBOSOFT a des dimensions identiques à celles d'un fauteuil électrique standard d'extérieur (0.70*1.10 m). L'ordinateur embarqué est muni d'un écran couleur autorisant un dialogue entre la machine et l'utilisateur sans lui obstruer exagérément la vue. Seule la hauteur d'évolution de notre prototype ne respecte pas la vraisemblance d'un pilotage de fauteuil électrique. Néanmoins la validité des essais en situation réelle n'est pas faussée par ce paramètre.



Figure II.19 : le prototype du robot VAHM

Pour l'étude et le développement de ce premier prototype du robot VAHM quatre tâches ont été définies, la planification, la navigation, la perception et enfin l'interaction homme-machine.

III.2.1 Modélisation et planification

Lors d'une tâche de mobilité, l'intelligence de la machine, tout comme celle de l'homme, repose d'une part sur la connaissance de son environnement et d'autre part sur ses facultés d'interprétation et d'adaptation à la situation. La méthode des codes multivaleurs [PRUS 92] développée au L.A.E.I. permet de disposer d'un modèle géométrique discret de l'environnement. A partir d'une carte de l'environnement, les obstacles et l'espace libre sont codés sous formes de rectangloïdes (fig. II.20a). Des travaux ont été réalisés pour pouvoir rapidement mettre à jour ce modèle ou accepter une représentation incertaine de l'environnement [HABE 95].

A partir d'un algorithme A^* , en tenant compte des dimensions du fauteuil et des contraintes de non holonomie [ROHM 93], un module de planification calcule une trajectoire passant au mieux dans l'espace libre, de la position initiale du fauteuil à sa position d'arrivée désignée par la personne. La trajectoire ainsi définie apparaît sous forme de ligne brisée (fig. II.20b).

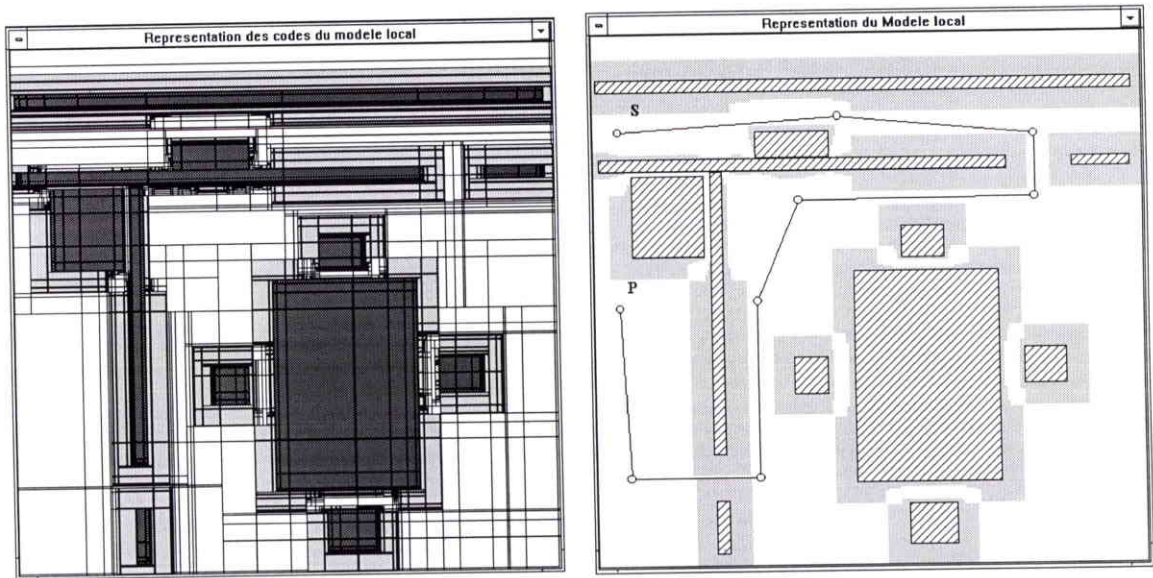


Figure II.20 : exemple de modélisation de l'environnement et planification de trajectoire

III.2.2 Perception

La perception s'effectue au travers des capteurs disponibles sur le robot (fig. II.21). Actuellement,

un microprocesseur 68000 gère une ceinture de 14 capteurs à ultrasons et un microprocesseur 68020 traite les données odométriques. Ces informations sont transmises au PC par une liaison série à 9600 bauds. Des capteurs à infrarouges développés au LAEI [PINO 95c], permettant la détection d'objets à courte distance et la détection de balises actives sont en cours d'implantation. Les balises actives permettent de détecter des points particuliers de l'environnement, par exemple le passage d'une zone non-modélisée à une zone modélisée. Une nouvelle ceinture de capteurs à ultrasons est actuellement étudiée au LAEI pour optimiser le temps d'acquisition des données, rejeter les mesures erronées et diminuer de 18 à 5 cm la zone aveugle due au temps de relaxation des transducteurs.

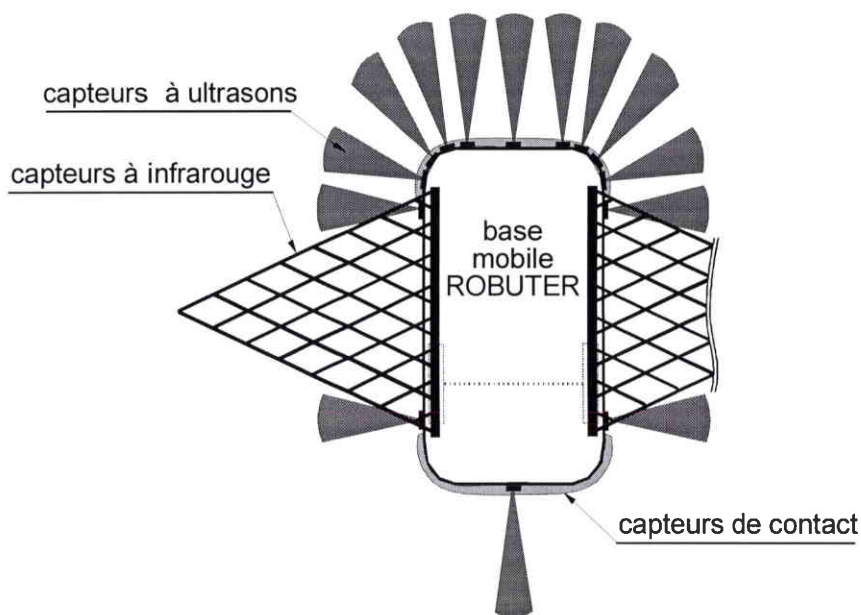


Figure II.21 : capteurs implantés sur la base mobile du projet VAHM

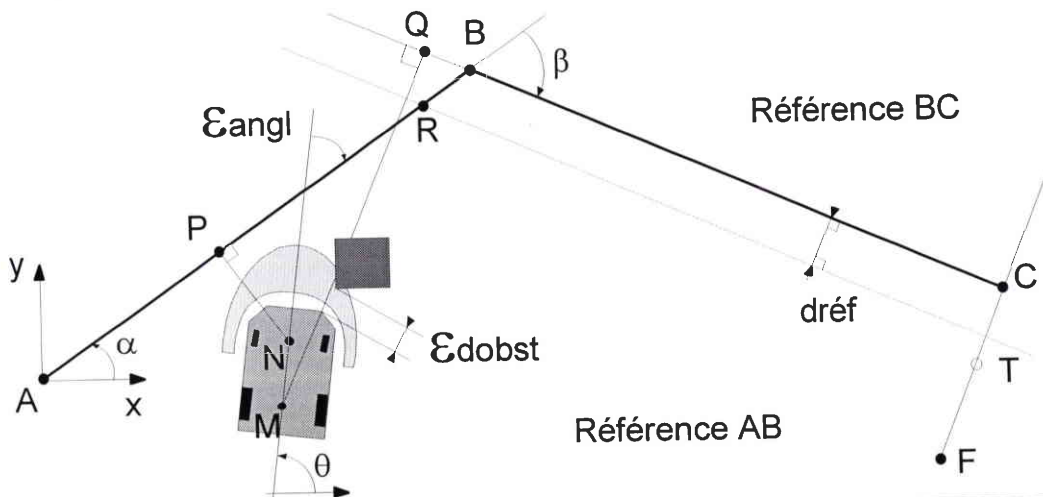
Pour compenser les erreurs odométriques, des méthodes ont été développées pour réaliser une localisation statique et dynamique en fusionnant les données odométriques et ultrasonores avec les modèles géométriques de l'environnement [HORN 94]. D'autres méthodes sont étudiées pour détecter des éléments caractéristiques de l'environnement comme les murs ou les coins.

III.2.3 Navigation

La navigation permet à la base de suivre la ligne brisée fournie par le module de planification en tenant compte :

- de la cinématique du fauteuil (rayon de braquage, contrainte de non holonomie),
- du confort de la personne (lissage de la trajectoire, accélérations/décélérations douces, ...),
- des obstacles imprécisément modélisés ou non modélisés à contourner,
- de la possibilité de dévier momentanément de la trajectoire à la demande de l'utilisateur.

La méthode utilisée a été développée par K. Moumen [MOUM94, 94a]. Il s'agit d'un correcteur proportionnel de la position cartésienne et angulaire du robot par rapport à la ligne à suivre. Les obstacles détectés et/ou la demande de déviation de l'utilisateur apparaissent comme des perturbations volontaires (fig. II.22).



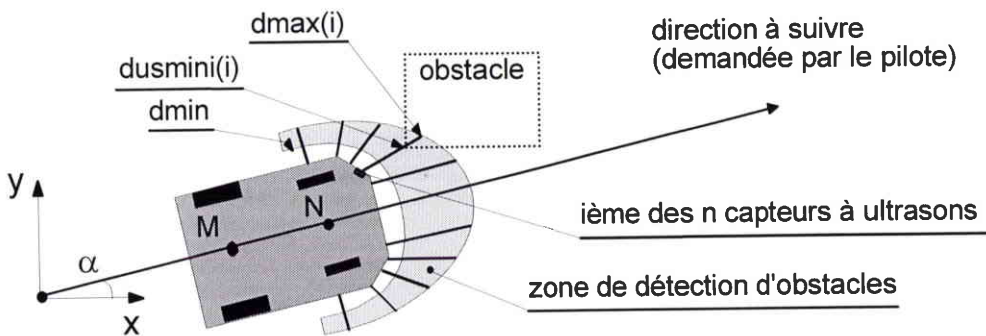
Algorithme : **TANT QUE** la base n'est pas arrivée au point C
FAIRE
 SI $QM \leq dréf$ **ALORS** droite de référence BC
SINON droite de référence AB
 $d\omega = -(k_1 \cdot \epsilon_{dist} + k_2 \cdot \epsilon_{angl}) + k_3 / \epsilon_{dobst} + k_4 \cdot \epsilon_{dman}$
 SI référence BC en cours
ET SI MT change de signe **OU** arrêt du mouvement demandé
ALORS arrêt du suivi automatique

avec : $\epsilon_{dist} = PN$; $\epsilon_{ang} = \alpha - \theta$; $dréf = RB \cdot \sin(\beta)$; $T = \text{proj}(M) \text{ sur } FC$
 $\epsilon_{dobst} = \text{dist mini obst-base mobile}$
 $\epsilon_{dman} = \text{déviat ion manuelle demandée (signe fct du sens droite ou gauche)}$
 $d\omega = \text{variation de la vitesse angulaire à appliquer aux roues de la base}$
 pour que celle-ci suive automatiquement la ligne de référence en cours

Figure II.22 : méthode de suivi de ligne de K. Moumen [MOUM 94]

L'adaptation de cette méthode et plus particulièrement de la zone de détection d'obstacles permet de réaliser d'autres modes de navigation, comme le contournement d'obstacles ou le suivi de mur.

Le contournement d'obstacle est utilisable dans les environnements non modélisés. L'utilisateur choisit une orientation en se positionnant. Le mode contournement d'obstacles permet de suivre cette direction sous forme d'une unique ligne droite en évitant les obstacles ou en stoppant s'il n'y a plus d'autre possibilité. La probabilité de rencontrer des obstacles est plus élevée que dans le cadre d'une planification de trajectoire dans l'espace a priori libre. La zone de détection est alors plus grande et la vitesse est diminuée lorsque les obstacles sont proches pour permettre à la base mobile de les éviter (fig. II.23).

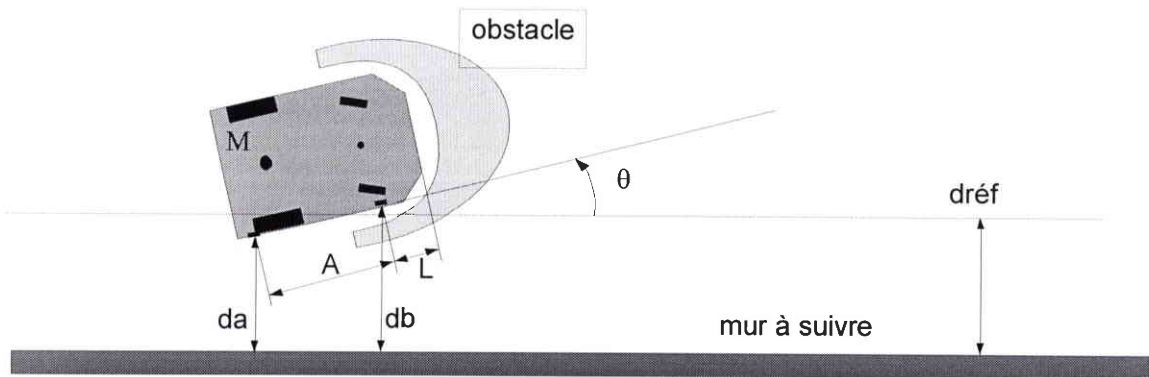


Algorithme : **TANT QUE** l'arrêt du mode contournement d'obstacle n'est pas demandé
FAIRE
SI $\varepsilon_{\text{dobst}} > \text{mini}$ **ALORS** vitesse d'avance = 10cm/s
SINON vitesse d'avance = 20cm/s
 $d\omega = -(k_1 * \varepsilon_{\text{dist}} + k_2 * \varepsilon_{\text{angl}}) + k_3 / \varepsilon_{\text{dobst}} * \text{sens}$

avec : $\varepsilon_{\text{dobst}} = \inf ((d_{\text{max}}(i) - d_{\text{mini}}(i)) / (d_{\text{max}}(i) - d_{\text{min}}))$ pour $i=1$ à n
 (force de répulsion) $\varepsilon_{\text{dobst}} = 0$: pas d'obstacle, $\varepsilon_{\text{dobst}} = 1$: obstacle très proche
 mini = valeur minimale de la force de répulsion à partir de laquelle
 il faut réduire la vitesse d'avance pour pouvoir contourner l'obstacle,
 expérimentalement fixée à 0.7
 sens = sens de contournement de l'obstacle (fct du ième capteur : 1 ou -1)
 $d\omega$ = variation de la vitesse angulaire à appliquer aux roues de la base
 pour que celle-ci suive automatiquement la direction demandée

Figure II.23 : zone de contournement d'obstacle à deux niveaux de vitesse

Le mode suivi de mur est basé sur ce même principe de suivi de ligne avec contournement des obstacles éventuels. Cependant, ici, ce ne sont pas les données cartésiennes qui sont utilisées mais les données ultrasonores augmentées de la distance d de consigne (fig. II.24). Les données cartésiennes permettent d'estimer la présence d'une porte ouverte et donc de négliger temporairement les données ultrasonores.



Algorithme : **TANT QUE** l'arrêt du mode suivi de mur n'est pas demandé
FAIRE
SI $\varepsilon_{\text{dobst}} > \text{mini}$ **ALORS** vitesse d'avance = 10cm/s
SINON vitesse d'avance = 20cm/s
 $d\omega = -(k_1 * \varepsilon_{\text{dist}} + k_2 * \varepsilon_{\text{angl}}) + k_3 / \varepsilon_{\text{dobst}} * \text{sens}$

avec : $\varepsilon_{\text{dist}} = (db + L * \sin(\theta)) - \text{dréf}$; $\varepsilon_{\text{angl}} = \theta = \arcsin((db - da)/A)$
 $\varepsilon_{\text{dobst}}$ = force de répulsion fonction de l'obstacle dans la zone de détection
mini = valeur minimale de la force de répulsion à partir de laquelle
il faut réduire la vitesse d'avance pour pouvoir contourner l'obstacle,
expérimentalement fixée à 0.7
sens = sens de contournement de l'obstacle (fct du ième capteur : 1 ou -1)
 $d\omega$ = variation de la vitesse angulaire à appliquer aux roues de la base
pour que celle-ci suive automatiquement le mur demandé

Figure II.24 : suivi de mur avec contournement d'obstacles

III.2.4 Système homme-machine

Le système homme-machine est un élément essentiel de notre application. En effet, l'homme ayant par hypothèse des capacités physiques limitées, il est important, tant pour la performance que pour l'acceptabilité du système, d'optimiser le transfert d'information entre ces deux entités. La conception de l'interface et les critères d'évaluation du système sont détaillés dans [PINO 95a]. On en rappelle ici les grandes lignes.

a) Conception de l'interface

Le projet VAHM est destiné aux personnes souffrant d'un fort handicap moteur. Ces personnes ont la capacité d'agir sur des capteurs de type tout ou rien (interrupteur) ou de type proportionnel (joystick).

Deux types d'interface ont été définies :

- interface de commande tout ou rien : de façon analogue aux systèmes de désigneurs couramment employés pour l'aide à la communication ou au contrôle d'environnement, les actions possibles sont sélectionnables par balayage des choix représentés par des boutons (fig. II.25).

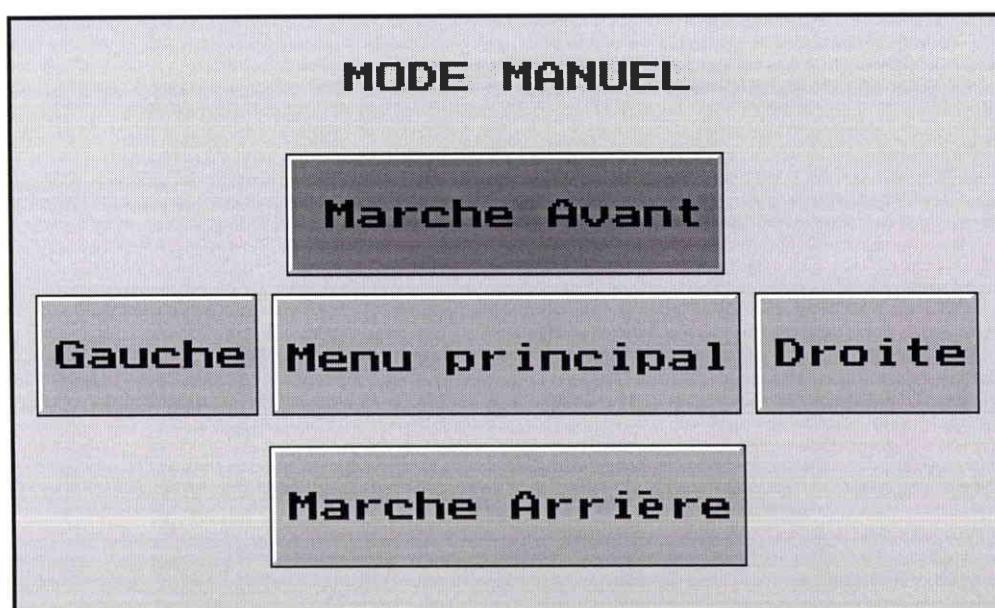


Figure II.25 : interface de commande tout ou rien

- interface de commande proportionnelle : la personne valide un choix en “appuyant” sur un bouton avec un joystick virtuel (fig. II.26).

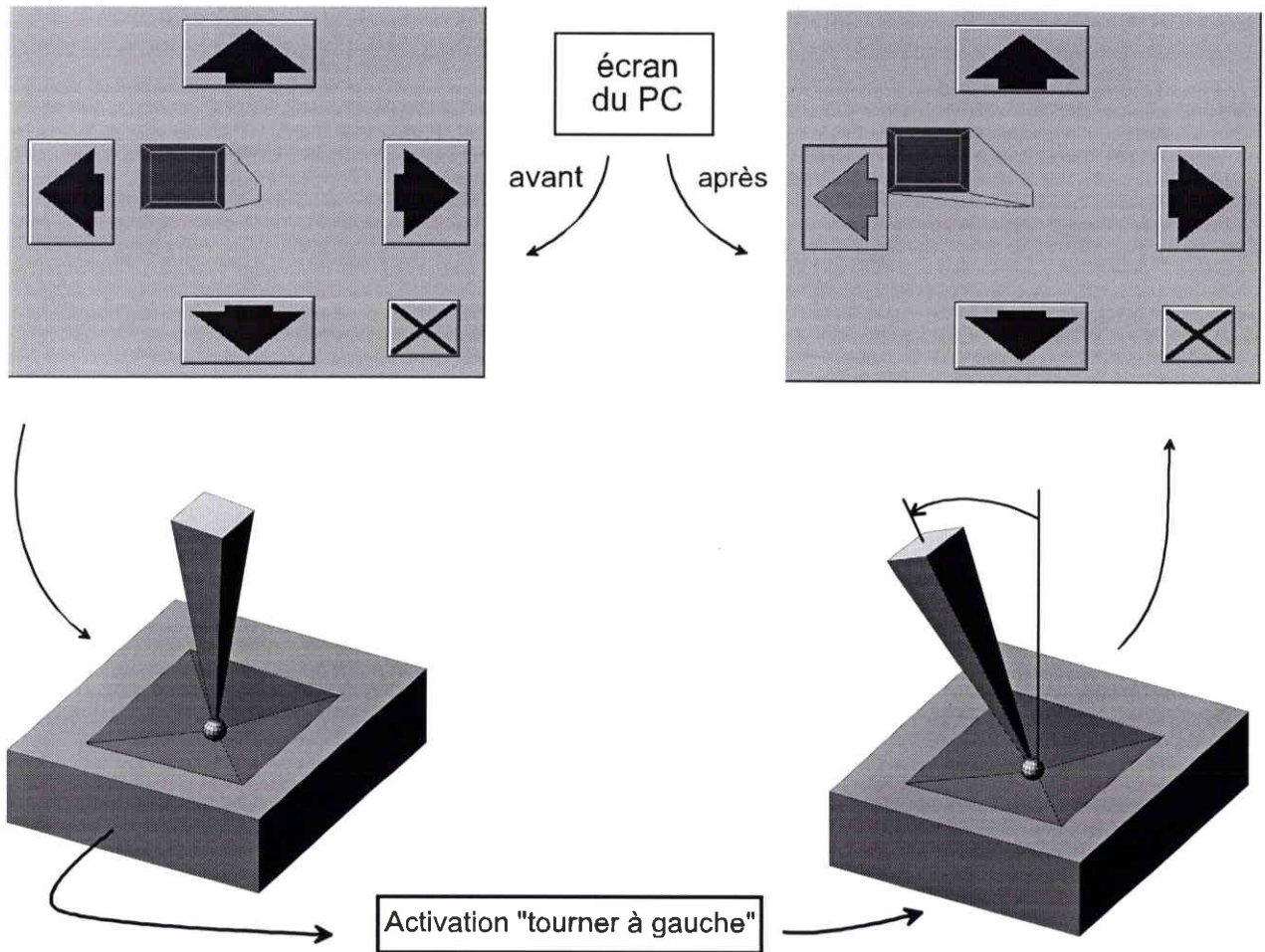


Figure II.26 : validation des choix avec l’interface de type proportionnel

Les critères d’ergonomie utilisés pour ces interfaces sont :

- le retour d’information (feed-back) est réalisé à l’écran en représentant un bouton appuyé, et par l’action correspondante : un changement d’écran, un déplacement, etc ...,
- les stéréotypes des couleurs : un choix validé est vert, un choix validable (pouvant provoquer une action) est rouge, un choix libre est bleu,
- les boutons effectuant le même type d’action, par exemple “Stop”, doivent être positionnés au même endroit, quelle que soit la page écran,

- pour minimiser le nombre d'actions et éviter un temps de défilement trop long, le nombre maximal de choix par écran est limité à cinq. Pour une interface de type proportionnel ce nombre dépend de la dextérité du pilote à manier un joystick et de la taille de l'écran,
- pour personnaliser les interfaces au type de handicap, il faut pouvoir adapter le temps de défilement et la prise en compte des actions sur front montant ou descendant. Pour une interface proportionnelle il faut pouvoir changer la position des boutons ; il est par exemple plus facile pour certaines personnes de pousser un joystick que de le tirer vers soi,
- il est parfois nécessaire d'indiquer un point particulier de l'environnement. La désignation est réalisée par un "radar" en trois étapes : balayage de l'écran, position cartésienne d'arrivée et orientation finale souhaitée.

Ces interfaces permettent d'utiliser les différents modes de commande (fig. II.27) :

- le mode automatique permet de calculer et de suivre une trajectoire dans un environnement modélisé après la désignation d'un point d'arrivée à l'aide du radar,
 - le mode semi-automatique ou "manuel assisté" permet d'utiliser des primitives comme le suivi de mur ou le contournement d'obstacle,
 - le mode manuel est similaire au mode de commande classique d'un fauteuil électrique,
 - un mode de contrôle de l'environnement permet d'agir sur l'environnement proche, comme une télévision, une radio ou encore un téléphone mains-libres.
- 

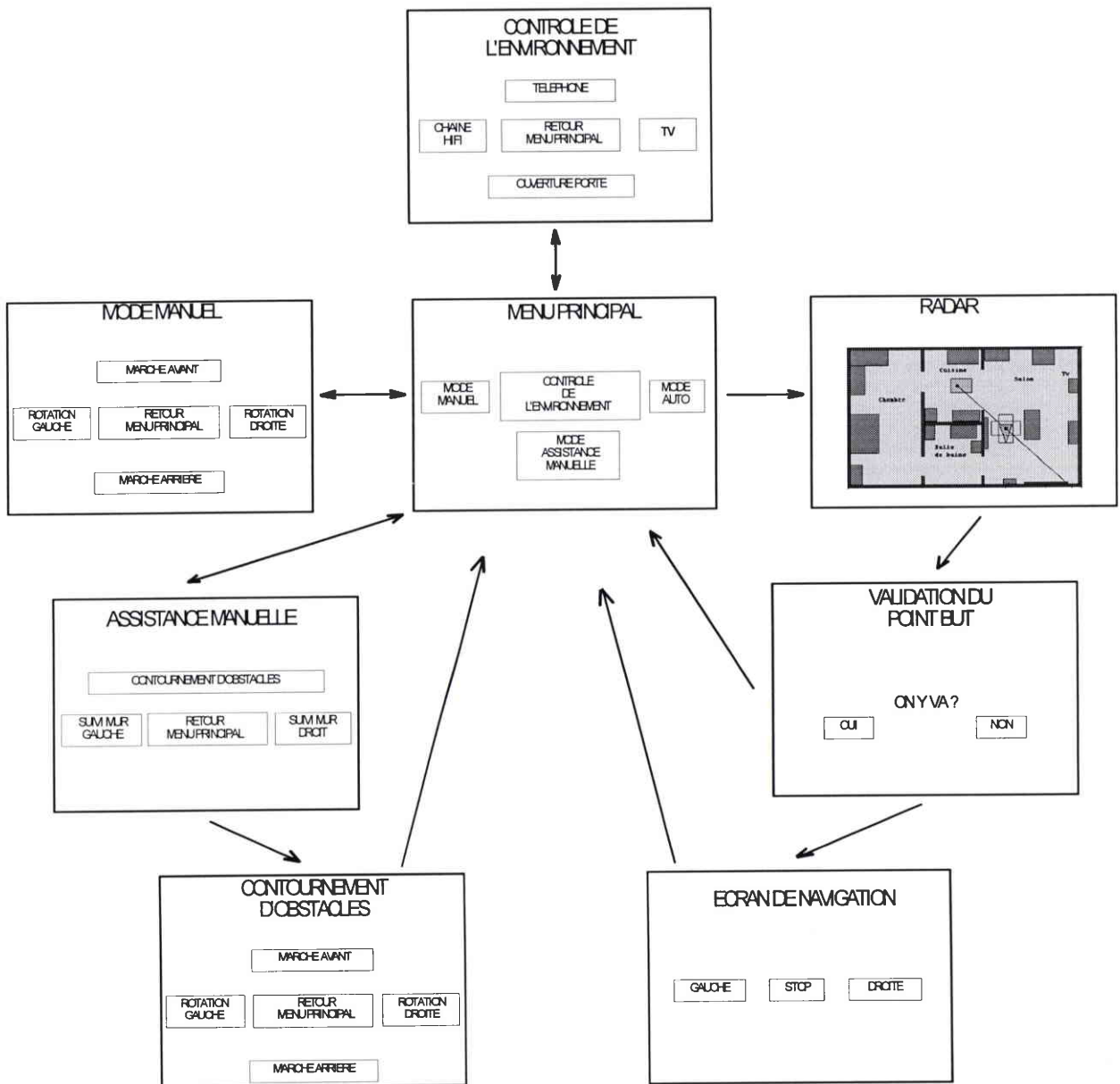


Figure II.27 : synoptique de l'interface de type "tout ou rien"

b) Critères d'évaluation du système homme-machine

Dans un appartement test reconstitué dans notre laboratoire, à partir d'un même scénario, des personnes valides ont testé les différents modes de commande en fonction de l'environnement, ceci pour chaque type d'interface. A partir de l'enregistrement du flux de données échangées entre la personne et la machine et des questionnaires effectués au cours de ces essais P. Pino a déterminé quatre critères d'évaluation [PINO 95a] :

- un critère de performance du pilote qui peut se décomposer en deux sous critères :
 - un critère d'incohérence de déplacement qui repère une suite de commandes de déplacements incohérents, par exemple avant-arrière-avant-arrière, ou une suite de mouvements très courts,
 - un critère d'incohérence de validation : un choix est sélectionné trop rapidement ou inutilement,
- un critère de confiance est défini en observant la propension de la personne à laisser le fauteuil s'approcher des obstacles,
- un critère de confort de navigation est estimé par la mesure des variations de vitesse linéaires et angulaires du fauteuil,
- un critère d'efficacité temporelle permet de mesurer pour chaque mode de commande le temps nécessaire pour réaliser une action en fonction du type de capteur d'interfacage et de l'environnement. Ainsi pour une personne utilisant un capteur tout ou rien, le mode de commande le plus efficace dans un environnement modélisé est le mode automatique, suivi du mode semi-automatique. Le mode manuel est le plus pénible à mettre en oeuvre. Par contre, pour une personne utilisant un capteur proportionnel, le mode manuel reste le plus rapide bien qu'il puisse être plus fatigant tant physiquement, il faut toujours tenir le joystick, que nerveusement, il faut rester vigilant à proximité des obstacles.

Les essais avec des personnes valides et de bonnes conditions de répétabilité ont permis de mettre au point le système et de déterminer les critères d'évaluation. Par contre, les contraintes inhérentes aux conditions réelles d'utilisation ne peuvent apparaître clairement que par une évaluation clinique.

IV EVALUATION DU PROTOTYPE VAHM

Pour valider les choix qui ont précédés à la conception du système et pour orienter nos propres travaux sur la conception d'une architecture coopérative, une première série d'essais a été effectuée d'octobre à décembre 1994 au centre de réadaptation de Lay S' Christophe de NANCY (54) [BOUR 96] [PINO 95b].

IV.1 METHODOLOGIE

En relation avec le personnel médical, nous avons mis au point des scénarios s'intégrant au mieux dans la vie du centre et prenant en compte les besoins de déplacement des personnes handicapées. L'environnement d'évolution (fig. II.28) comprend des salles de soin, des couloirs et un studio destiné à la réadaptation de personnes souffrant de troubles cognitifs. Quatre personnes diversement handicapées ont participé à cette évaluation, deux utilisaient un capteur proportionnel, la troisième un capteur tout ou rien, la dernière étant un jeune aveugle.

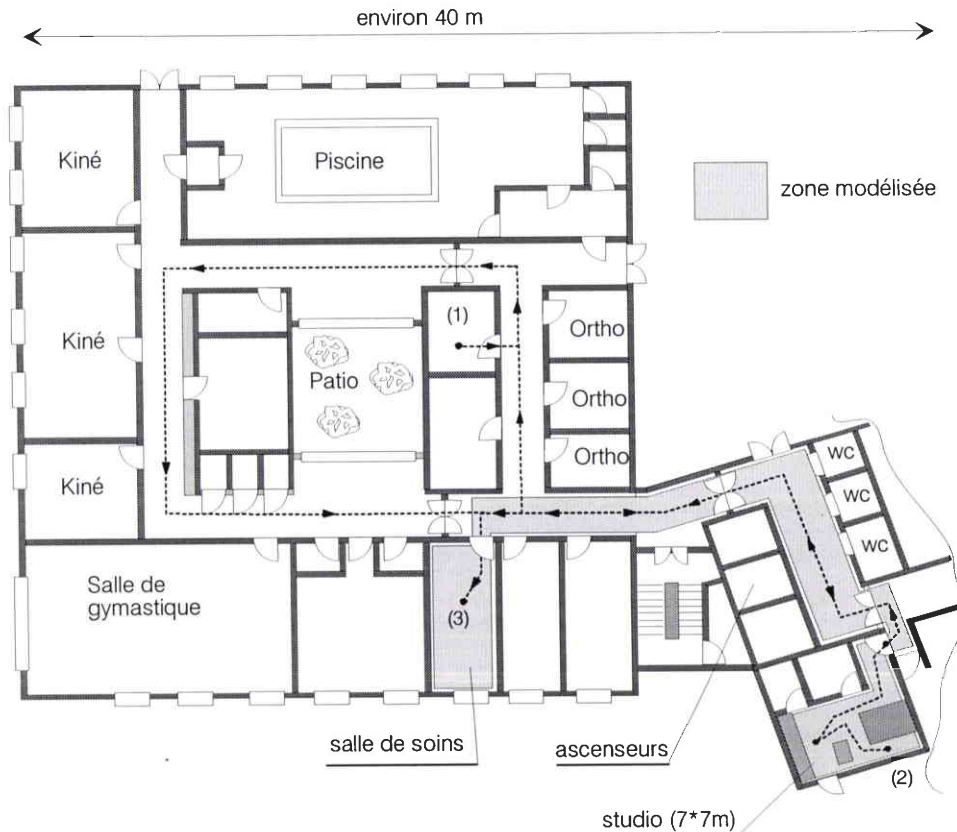


Figure II.28 : centre de réadaptation de Lay Saint Christophe

Les essais ont commencé par une phase d'apprentissage dans la pièce (1), puis les personnes devaient se rendre dans le studio (2) en faisant le tour du patio et en utilisant des modes semi-automatiques. Le mode automatique était ensuite utilisé dans le studio et pour se rendre jusqu'à la salle de soin (3).

Les résultats obtenus sont tirés des observations effectuées au cours de ces essais et des réponses des utilisateurs à un questionnaire "à chaud" réalisé à la fin du scénario.

IV.2 OBSERVATIONS

Le premier utilisateur a piloté facilement son fauteuil avec un joystick standard sans adaptation. La commande des différents modes du fauteuil ne lui a posé aucun problème. Cependant, du fait de sa bonne maîtrise du véhicule, un système robotisé n'est globalement pas utile tant que l'accès et l'exécution des fonctionnalités automatiques ne s'effectuent pas plus rapidement que le mouvement manuel équivalent. Par contre, une aide ponctuelle dans des manoeuvres délicates, comme par exemple un "passage de porte", serait appréciée si sa sélection est aisée.

Le deuxième utilisateur contrôle plus difficilement un joystick avec le dos de la main, ce qui lui apporte une gêne dans les manoeuvres fines et cette posture entraîne rapidement une fatigue musculaire. Malgré quelques confusions entre les modes de commande, le confort d'évolution, la sécurité apportée par la détection d'obstacles ainsi que la diminution du nombre de manoeuvres ont été particulièrement appréciés.

La troisième personne (fig. II.29) ne disposait que de possibilités motrices très réduites : seul un interrupteur commandé par un mouvement de tête lui permettait de communiquer et de contrôler l'environnement via un désigneuse. Les choix sont effectués par un balayage d'icônes à l'écran suivi d'une validation. Cette personne ne pouvait pas utiliser de fauteuil électrique. La commande manuelle (marche avant, arrière, rotation droite ou gauche) s'est avérée laborieuse, ce qui était prévisible en raison de la stratégie contraignante à mettre en oeuvre. Le mode automatique s'est révélé indispensable.

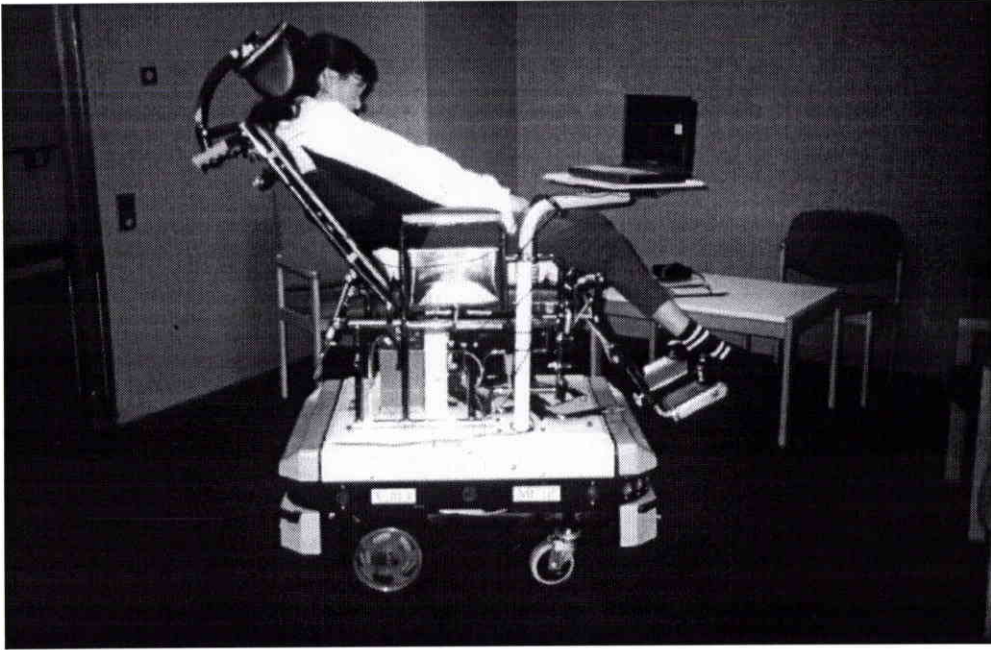


Figure II.29 : troisième expérimentatrice du fauteuil robotisé

Pour la dernière personne, un jeune non-voyant, l'utilisation d'un fauteuil électrique est interdite non pas du fait de son déficit moteur mais de son déficit sensoriel. Les problèmes à résoudre, étaient ici plus proches de ceux rencontrés dans le domaine de l'aide à la localisation des personnes handicapées cognitives [JAFF 92]. Les informations concernant la perception de l'environnement du robot ont dû être transmises via un synthétiseur vocal.

V CONCLUSION

Après une justification des travaux concernant les fauteuils roulants robotisés et un état de l'art en ce domaine, nous avons décrit le premier prototype du robot VAHM.

Une série d'essais a démontré l'intérêt de notre application pour des personnes ayant des difficultés à piloter un fauteuil électrique. Certains choix essentiels ont été validés comme la possibilité de personnalisation du système grâce à la modularité de l'interface et la définition de modes de commande dégradables, du mode automatique au mode manuel, en fonction de l'environnement et des capacités de l'utilisateur.

De plus, à la suite de ces essais, il apparaît nécessaire d'apporter des améliorations techniques concernant par exemple l'acquisition et le traitement des données capteurs ou la planification de trajectoires mais aussi des améliorations plus conceptuelles concernant la coopération entre l'homme et la machine. Ainsi, au cours des essais, l'utilisateur choisit seul le mode de commande en fonction de la situation. Grâce aux critères observables la machine pourrait lui apporter de l'aide.

L'architecture de coopération développée dans le cadre de ce mémoire pour le projet VAHM est présentée au chapitre suivant. Elle permet de réaliser une commande plus transparente et apporte des possibilités de coopération entre l'homme et la machine aux différents niveaux de contrôle du système.

CHAPITRE III

ARCHITECTURE COOPERATIVE

I INTRODUCTION

II PRINCIPES GENERAUX

III TACHES DE BAS NIVEAUX

IV SUPERVISEUR

V COOPERATION HOMME-MACHINE

VI CONCLUSION

I INTRODUCTION

L'objectif du projet VAHM est d'apporter une aide à la mobilité aux personnes présentant de fortes déficiences motrices, ceci à partir de l'automatisation d'un fauteuil roulant électrique. Les besoins et les contraintes d'une telle application présentés au chapitre précédent, peuvent se résumer par :

- l'apport de fonctionnalité et des caractéristiques de robustesse d'un robot mobile autonome,
- une commande réalisant une coopération entre l'homme et la machine pour que l'homme puisse apporter sa meilleure compréhension du monde d'évolution et la machine une aide à la navigation, tant par ses capacités de déplacement que par ses capacités d'analyse de la situation.

La coopération entre l'homme et la machine passe nécessairement par la communication d'informations entre les deux coopérants. L'homme, inclus dans la boucle de commande de la machine, transmet ses ordres et informations par le dialogue. L'optimisation de celui-ci est essentiel dans une application où l'opérateur humain a des possibilités physique limitées. S'il faut minimiser le nombre d'actions demandées à l'utilisateur, il faut aussi mener une réflexion sur leur traitement et leur représentation. Dans cette optique, la première partie de ce chapitre s'intéresse à la manipulation d'informations symboliques. De cette étude générale on déduit pour le fauteuil robotisé une architecture de commande à trois niveaux, la décomposition étant fondée sur l'abstraction des données traitées.

La seconde partie décrit les tâches de bas niveaux, le plus haut niveau de l'architecture étant détaillé en troisième partie. La dernière partie concerne les capacités globales de coopération entre l'opérateur humain et la machine au cours d'une tâche de mobilité.

II PRINCIPES GENERAUX

II.1 COMMUNICATION ET SYMBOLES, QUELQUES DEFINITIONS

II.1.1 Introduction

Il apparaît naturel à tout à chacun de communiquer à l'aide de “symboles”, par contre le définir apparaît plus déroutant étant donné les multiples apparences que peut emprunter un même symbole (fig. III.1).



Figure III.1 : apparences d'un symbole

Pourtant un symbole est avant tout un médium de communication, une information transitant sur une voie de communication, le Message du schéma (simplifié) de Jakobson : [Source - Emetteur - Canal - Message - Destinataire]. Son but est d'évoquer un concept : “arrêter le mouvement”. La communication est établie si ce concept est commun à la Source et au Destinataire.

II.2.2 Le lien au réel

Un *concept* est formé à partir de son extension, des exemples qui sont les instances du concept (catégorisation), ou à partir de son intention, une description symbolique du concept à travers ses propriétés caractéristiques.

Pour la sémiotique, le symbole et le concept sont des éléments du *signe* représenté par la triade (fig. III.2) *réfèrent* (objet) - *signifiant* (symbole) - *signifié* (concept) [ECO 92].

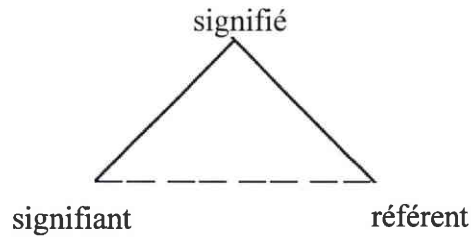


Figure III.2 : représentation du signe

Le lien entre réfèrent et symbole est illustré sur la figure ci-dessus en trait pointillé car il reste obscur. En effet, le symbole /licorne/ est clair alors que l'objet n'existe pas et l'image “” nous fait inmanquablement penser à un vélo, mais certains utilisent le symbole /bicycle/ et d'autres /ciclo/... Cette association apparemment arbitraire pose le problème de l'adéquation du symbole au monde réel. Le symbole est donc *abstrait* puisqu'il est par nature détaché du réel.

II.2.3 Aspects du symbole

Chez l'être humain le concept se crée en manipulant les symboles sous différents aspects. A partir de la genèse du symbole chez l'enfant, A. Grumbach [GRUM 93] met en lumière ces aspects du symbole naturel :

- a) *communication* d'une entité entre deux “roseaux pensant”,
- b) *absence* perceptive de l'entité (séparation),
- c) *re-présentation* de cette entité absente, par un signe, un objet (ré-union),
- d) *focalisation* sur un trait particulier caractéristique de l'entité,
- e) *ressemblance* superficielle (apparence externe) ou profonde (sémantique) avec l'entité représentée,
- f) situation *émotionnelle* déclenchant la *création* d'un symbole.

Les symboles artificiels (créés par une machine) ne possédant pas cette richesse d'expression ne seront pas aussi facilement interprétés par l'être humain.

II.2 SYMBOLES ET ROBOTIQUE

L'intelligence artificielle (IA) traditionnelle utilise essentiellement les aspects *absence* (b) et *représentation* (c) du symbole. Le symbole est alors une représentation d'un *état* (ensemble des données caractéristiques d'un système). Dans un univers particulier, une situation est définie par un ensemble d'états. Par exemple, dans l'univers particulier du monde des blocs (fig. III.3) où il existe un objet **A** noir, un objet **B** gris et un objet blanc **C**, la logique des prédicats du premier ordre [HATO 91] permet d'exprimer des relations comme "noir(a) (a est noir)" : *représentation* de l'objet a ; ou " $\forall x(\text{noir}(x) \Rightarrow \neg \text{gris}(x))$ (tous les objets noirs ne sont pas gris)" : *absence* des objets.

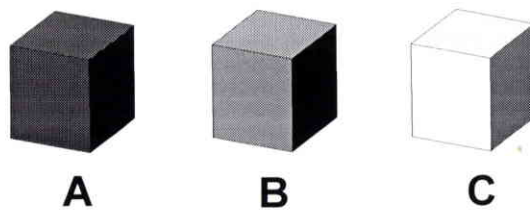


Figure III.3 : une situation du monde des blocs

L'utilisation de ces symboles (qui sont des atomes de représentation) et de structures sur ces symboles (règles, arbres, listes, ...) permet de manipuler des "concepts". Ce sont le concepteur et l'utilisateur du système qui créent la relation au réel. Cette propriété est particulièrement utilisée dans les systèmes d'IA appelés "systèmes experts" qui utilisent l'aspect *communication* du symbole, mais le domaine d'application du système doit être connu de l'expert, du concepteur et de l'utilisateur.

Nous retrouvons ici le problème d'adéquation du symbole au monde réel, habituellement désigné en IA par le *problème d'ancrage du symbole* et particulièrement crucial en robotique. Ainsi, planifier l'arrêt d'un robot en présence d'un "vélo" est hasardeux, surtout si, comme pour le projet VAHM, la perception de son environnement est en deux dimensions. En effet, le vélo apparaîtra comme un obstacle aux contours indéfinis mais il sera difficile de reconnaître au moins une roue caractéristique. Un autre exemple peut être le robot CART qui confondait les murs et leur ombre (cité dans [BROO 91]). Une première solution est d'améliorer l'aspect *ressemblance* (d) du symbole grâce à la perception. Mais, en dehors des problèmes de coûts, cette amélioration a des

limites technologiques. Ainsi, un contre-jour important pose de gros problèmes à une caméra et l'interprétation des scènes est encore plus problématique ; un système de vision est encore loin d'égaler l'oeil humain. Une deuxième solution est d'implanter des mécanismes de rattrapage d'erreurs comme les moniteurs de surveillance développés au LAAS (§I.II.5.1). La troisième solution préconisée dans l'architecture de Brooks est de créer et d'utiliser des symboles appartenant exclusivement à la représentation du robot afin de déclencher des comportements élémentaires (aspect f). La quatrième voie est celle de l'IA connexionniste qui cherche à mémoriser la corrélation entre la catégorisation d'un objet réalisée par un réseau de neurones et sa catégorie [GRUM 93] (aspect a au cours de l'apprentissage et f en fonctionnement).

Comme il apparaît ici, le “symbole artificiel” est notablement moins riche que le symbole naturel. Cette incomplétude peut porter à confusion dans le cadre d'un processus de communication entre une machine et un utilisateur qui ne dispose pas d'une connaissance technique de cette machine. Ainsi, si le concept de “s'arrêter en présence d'un vélo” est clair pour l'utilisateur, il peut n'avoir aucune signification pour la machine, et, réciproquement, une variable interne comme “distance_us1=899” n'évoquera rien pour l'utilisateur. Un système robotisé destiné à effectuer des opérations symboliques doit alors contrôler ces possibilités de confusion à travers sa gestion des différents aspects d'un symbole.

II.3 NIVEAUX D'ABSTRACTION DU PROJET VAHM

Dans le cadre du projet VAHM, il est dans un premier temps important d'associer à la perception de la machine une signification intelligible pour l'utilisateur. Un *système de gestion de base de connaissances* (système expert) dérivé d'un système d'aide aux déplacements dans un centre de réadaptation d'une personne ayant des problèmes cognitifs [AGOS 92] est utilisé pour ses capacités de communication. En effet, il est ainsi possible de définir des objets non perceptibles par la machine, par exemple “une porte vitrée”. De plus, comme l'incite à penser certaines études sur les animaux [ELLE 87], la représentation de l'environnement se fait par la définition des positions relatives des objets. Ainsi, la “porte vitrée” se trouve entre le “couloir” et le “salon”. Pour ancrer ces symboles au monde réel, nous proposons alors de créer un processus de signification à trois

niveaux d'abstraction où il s'agit :

- d'acquérir la connaissance de la machine. On remarque que celle-ci est limitée par la capacité de ses capteurs (profondeur de vision de 6 m pour les capteurs à ultrasons),
- interpréter cette connaissance locale à l'aide de la connaissance d'un expert qui fournira un signifiant (la position $x = 12$, $y = 254$, $t\acute{e}ta = 90^\circ$ correspond à /télé/),
- enrichir sémantiquement cette connaissance. En effet le signifié "télé" se trouve dans le salon, on peut allumer la télé, on peut aller au salon en passant par la cuisine, etc...

Nous définissons alors trois niveaux d'abstractions caractérisés par la nature des informations manipulées.

- Le bas niveau ou “**niveau physique**” manipule des informations numériques. C’est la représentation instantanée du réel de la machine. La granularité est fine et l’abstraction est faible.
- Le “**niveau local**” interprète les données numériques et les données globales en fonction des ordres de l'utilisateur.
- Le “**niveau global**” est le haut niveau. Il effectue les manipulations de symboles. La granularité est grossière et l’abstraction est élevée. Comme nous l’avons vu précédemment, ces “symboles artificiels” sont destinés à créer des “signes artificiels”. Ils ont alors une portée générale et sont adaptés à gérer l’état global du système dans des termes compréhensibles par l'utilisateur. Mais leur niveau d'abstraction (leur éloignement du réel) ne leur permet pas d'encapsuler, d'inhiber ou d'être prioritaires face à un autre type d'information.

II.4 DEFINITION DES TACHES

Les tâches à accomplir par le système sont proches des tâches humaines. Selon la taxonomie citée par [GAWR 89], ces tâches humaines peuvent être réparties en quatre grandes classes : les tâches de perception, les tâches de communication, les tâches motrices et les tâches cognitives.

Les tâches de perception ont principalement deux fonctions : la recherche d'information (dé-

tection, observation, ...) et l'identification (discrimination, identification).

Les tâches de communication sont destinées à la transmission d'information.

Les tâches motrices peuvent être de type réflexe, continu (alignement, synchronisation (oeil-main), poursuite) ou discret (actions sur des organes de commande ou de réglage).

Les tâches cognitives sont liées au traitement pur de l'information (calcul, codage), à la résolution de problèmes et au rappel des connaissances.

Chaque classe a apparemment un but distinct mais tous ces buts sont finalement complémentaires. Il s'agit en fait du principe des architectures réactives, qu'il serait plus juste d'appeler architectures comportementales, où le comportement global est l'interaction des comportements actifs. Nous avons cherché à obtenir les mêmes compétences : percevoir, se déplacer, communiquer et réfléchir. Pour cela nous avons défini des tâches qui, en fonction des données disponibles à chaque niveau, nous permettent d'obtenir ces comportements. Actuellement cinq tâches ont été définies : **Acquisition/Transmission, Navigation, Perception, Communication, Supervision.**

Chaque tâche est asynchrone. Elle est composée d'un *contrôleur d'exécution* et d'*outils*. Le contrôleur d'exécution est chargé d'assurer la cohérence et la robustesse du comportement à partir de *stratégies* utilisant les différents outils. Dans ce but, il doit être muni de capacités d'auto-analyse, comme par exemple les critères d'évaluation du système défini par P. Pino (cf. chap. II §III.2.4.b). Il est aussi chargé de la gestion de la communication avec les autres tâches afin de ne pas être bloqué par un manque d'information, ni fournir aux autres tâches ou à l'utilisateur des informations inutiles ou trop erronées.

La figure III.4 ci-dessous, présente l'architecture générale proposée pour le fauteuil robotisé VAHM. La description détaillée de chaque tâche sera effectuée aux paragraphes suivants.

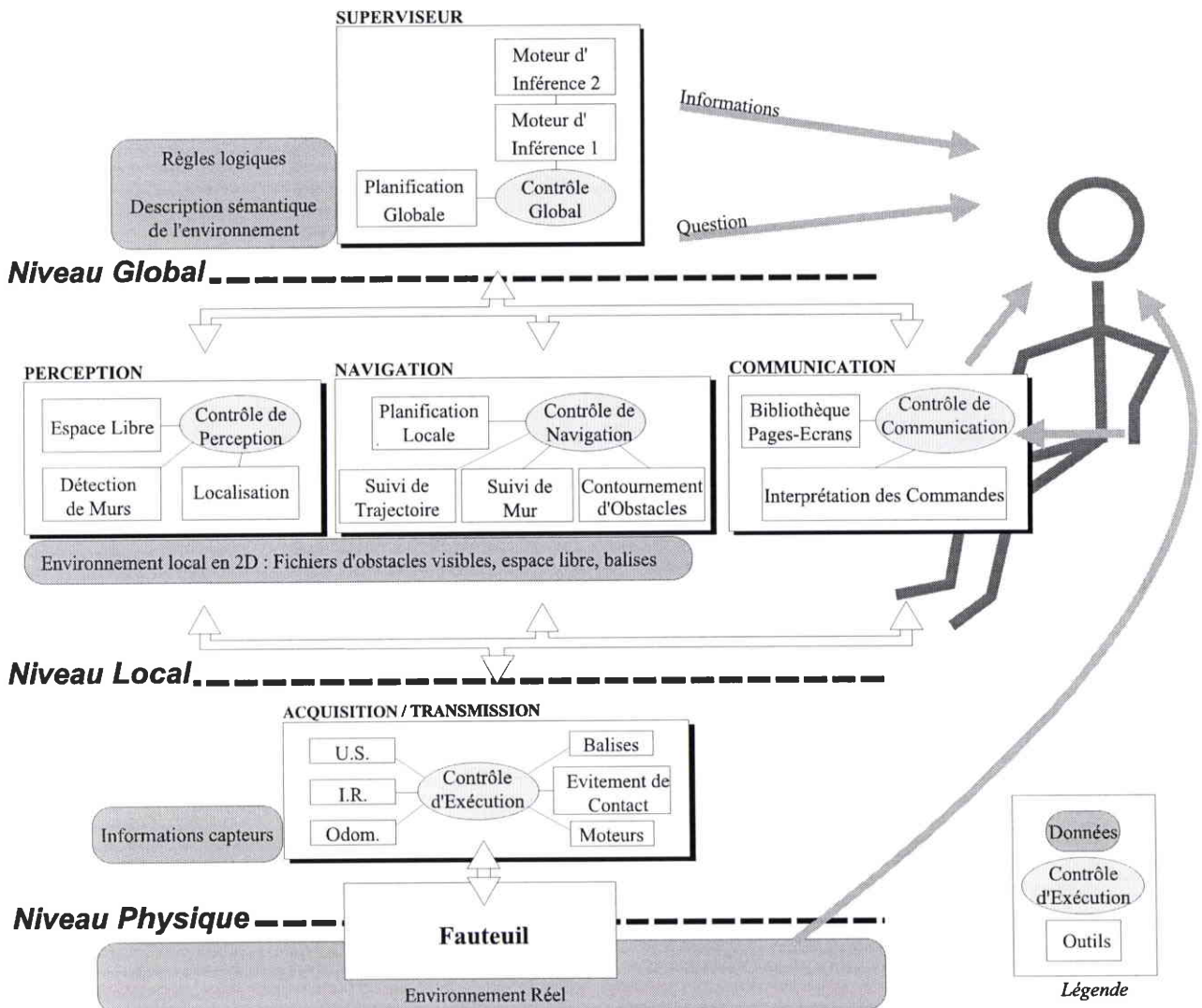


Figure III.4 : architecture de commande du robot VAHM

III TACHES DE BAS NIVEAUX

III.1 ACQUISITION/TRANSMISSION

III.1.1 Objectifs

L'objectif de la tâche d'Acquisition/Transmission est d'acquérir continuellement des informations numériques de qualité en provenance du robot et de les transmettre au niveau local. Les tâches du niveau local interprètent ces données en fonction de leur but respectif et transmettent les ordres au robot. La tâche d'Acquisition/Transmission doit alors vérifier la qualité de cette transmission.

La nature des données ultrasonores ne garantit pas une acquisition en un temps fixe. En effet, celui-ci dépend du temps de vol de l'onde ultrasonore qui varie énormément si l'on mesure la longueur d'un couloir ou un obstacle proche. Le fonctionnement de la tâche d'Acquisition/Transmission est alors asynchrone et les modules nécessitant un fonctionnement en temps réel ou synchrone comme le calcul du temps de vol, la lecture des codeurs odométriques ou l'asservissement des moteurs sont réalisés par des cartes dédiées.

III.1.2 Echange de données

La communication des données au niveau supérieur est assurée grâce au protocole DDE (Dynamic Data Exchange) du système d'exploitation WindowsTM. Il s'agit en fait d'une zone mémoire pouvant être partagée par plusieurs applications Windows. Une application peut créer un lien DDE grâce à un nom de "service" et un nom de "sujet" (topic) commun. Les types de données échangées sont identifiés par un nom d'"item". Des échanges de messages entre applications permettent d'indiquer que les données ont changé.

Ainsi toute application se connectant au service intitulé "Robosoft", au sujet "Liaison" peut recevoir de la tâche d'Acquisition/Transmission (fig. III.5) des données "TableauHL" et envoyer des commandes sous le nom "DDEData". Les données envoyées sont contenues dans un tableau de vingt lignes de dix caractères. La ligne 0 contient l'orientation fournie par le capteur odométrique

(en degré). La ligne 1 donne la position suivant l'axe des ordonnées (en mètres) dans un repère lié au centre de l'axe de transmission du robot. La ligne 2 donne la position suivant l'axe des abscisses, à gauche du robot. Les lignes suivantes contiennent les valeurs des 14 capteurs à ultrasons. La ligne 17 est destinée aux barrières infrarouges. La ligne 18 reçoit le code de la balise infrarouge détectée.

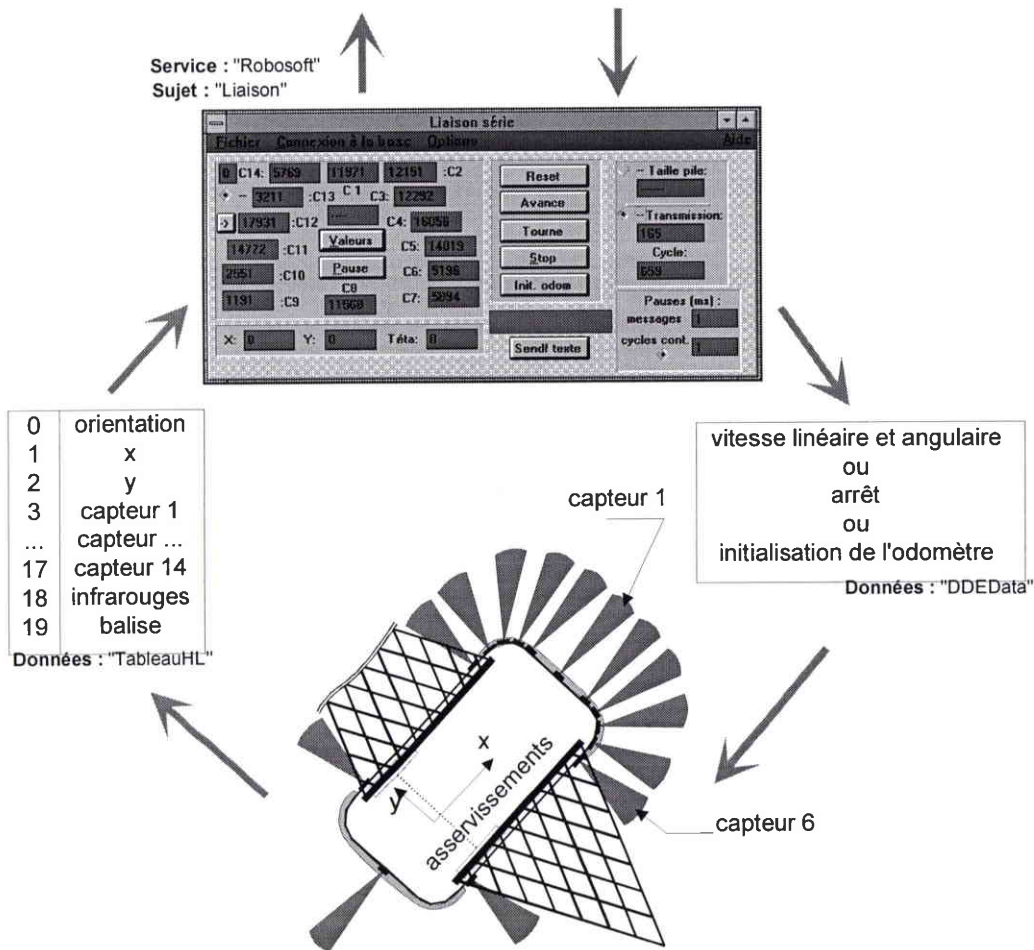


Figure III.5 : échange de données au niveau physique

Les asservissements des moteurs sont réalisés par le robot à l'aide de cartes dédiées. La communication avec le robot est réalisée par liaison série à 9600 bauds suivant le protocole de commande établi par Robosoft. Les commandes essentiellement utilisées sont :

- la commande en vitesse linéaire et angulaire des moteurs, "motv la v=150 w=0 in"
dans le protocole Robosoft pour une commande en vitesse linéaire de 150 mm/s
et 0 mrad/s en vitesse angulaire,

- l'arrêt (motv ki),
- l'initialisation des valeurs de l'odomètre (odos c=0,0,0).

La liaison série est également utilisée pour lire les données fournies par le microcontrôleur qui gère les barrières infrarouges.

III.1.3 Fonctionnalités

La sécurité des informations est assurée de diverses manières. Une pile FIFO permet de garantir que toutes les informations sont transmises au robot. La gestion des erreurs de communication au cours des échanges de messages permet de vérifier la qualité des informations.

La détection de balises infrarouges génère une interruption sur le bus du PC. Le code de la balise est ensuite transmis sur la liaison série [HENR 94].

La standardisation du protocole DDE permet de connecter tout autre logiciel, en particulier des logiciels spécialisés comme MatLab™ pour une étude mathématique des capteurs. A cet effet, un fonctionnement en mode synchrone permet une commande en position et l'acquisition des données sur demande (DDERequest).

III.2 NAVIGATION

III.2.1 Objectifs

La tâche de navigation est destinée à réaliser les déplacements du robot. Cette tâche doit être particulièrement robuste et efficace puisque elle doit répondre à la première attente de l'utilisateur, se déplacer. Elle doit alors être autonome et utiliser les données brutes fournies par le niveau inférieur, ainsi la réaction correspond directement aux données. Un traitement supplémentaire des données, à destination d'autres tâches et donc d'autres objectifs, ne ferait qu'augmenter le temps de traitement et les possibilités d'erreurs dues à une nouvelle interprétation des données.

Elle gère les modes de déplacements automatiques et semi-automatiques. Ainsi dans un environnement modélisé à l'aide de codes multivaleurs (Chap.II §III.2.1), elle calcule un chemin dans

l'espace libre et réalise le suivi de la trajectoire, définie sous forme de segments de droites, grâce à un correcteur proportionnel (fig. II.22). Ce même module de suivi de trajectoire permet de réaliser les primitives du mode semi-automatique comme le "contournement d'obstacles" ou le "suivi de mur". Le contournement d'obstacles effectue un suivi d'une ligne infinie possédant la même orientation que le robot. Dans le cadre du suivi de mur, la ligne à suivre est définie par les capteurs perpendiculaires au mur (fig. II.24).

Pour assurer la sécurité du déplacement un module de détection d'obstacle est continuellement actif. Une zone de détection est définie et provoque une déviation de la trajectoire si un obstacle apparaît ou un arrêt temporaire si la déviation n'est plus possible. Ce module n'est débrayable que pour des actions spécifiques comme "pousser un obstacle".

III.2.2 Echange de données

a) niveau physique

La tâche de navigation reçoit les informations odométriques et ultrasonores du niveau physique et envoie la commande en vitesse linéaire et angulaire calculée ou l'ordre d'arrêt ou l'initialisation du capteur odométrique au début d'un déplacement (convention arbitraire) (fig. III.6).

b) niveau global

Elle reçoit du niveau global sa zone d'activité et son but : nous sommes dans la "cuisine", nous devons nous rendre en "b1". Si une carte locale existe, un chemin peut alors être calculé et exécuté jusqu'à ce que le but soit atteint. La tâche communique alors la fin du mode automatique. S'il n'existe pas de carte locale, seuls les modes semi-automatiques sont utilisables. Le but sera alors "suivre un mur", "contourner les obstacles" ou "dégagement".

c) niveau local

Le mode de dégagement est réalisé en collaboration avec la tâche locale de perception. Celle-

ci fournit la direction où l'espace est "le plus libre" et la tâche de navigation se dirige dans cette direction en mode contournement d'obstacles. Si la seule direction libre est à l'arrière du robot, la tâche de navigation réalise une marche arrière jusqu'à ce qu'elle trouve un espace libre à droite ou à gauche. La tâche de perception fournit aussi la position initiale exacte pour permettre le calcul de trajectoire, ainsi que le mur à suivre.

Si cette dernière information n'est pas disponible, la tâche de navigation interroge l'utilisateur au travers de la tâche de communication. Au cours d'un déplacement en mode semi-automatique cette tâche transmet aussi l'ordre d'arrêt ou de déviation de la trajectoire. Si la zone est modélisée, elle peut aussi fournir un point d'arrivée particulier en x, y et une orientation d'arrivée ou une direction à suivre pour le mode contournement d'obstacles.

Niveau Global :

Niveau Local :

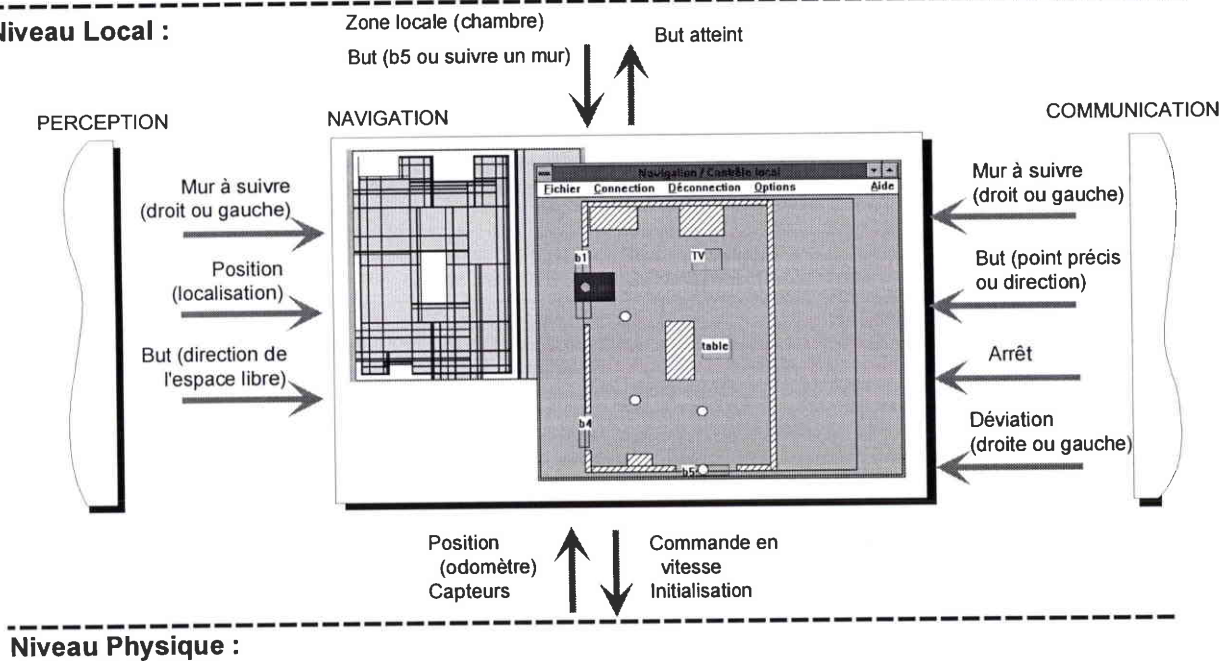


Figure III.6 : échange de données avec la tâche de navigation

On remarque que les données échangées avec le niveau physique sont numériques : il s'agit de référents dans le monde du robot. Au niveau local, elles concernent la proximité du robot alors qu'au niveau global, il s'agit d'étiquettes (de signifiants).

III.2.3 Fonctionnalités

Les stratégies mises en oeuvre par le contrôleur d'exécution assurent la robustesse de l'application. L'absence de données ne doit pas faire échouer la tâche mais modifier les stratégies. Ainsi, s'il n'existe pas de carte locale, seuls les modes semi-automatiques seront disponibles. Si la tâche de perception ne fournit pas de localisation précise, les données odométriques brutes seront utilisées. De la même façon, la direction de l'espace libre n'est pas impérative mais modifie juste la trajectoire suivie en contournant les obstacles.

Nous pouvons alors dire que la commande du déplacement est réalisée en boucle ouverte, si l'on n'inclut pas l'utilisateur dans la boucle de commande du système. L'absence de données provoque la dégradation des modes de fonctionnement. En réalité, l'utilisateur se trouve dans la boucle de commande générale du système : il surveille constamment le comportement du robot et arrête le mouvement si celui-ci ne lui convient pas.

Le critère de confort permet de se rendre compte des variations de vitesse linéaire et angulaire et le critère de confiance d'estimer si la personne laisse le fauteuil approcher des obstacles. Ces deux critères permettent d'évaluer l'efficacité de la tâche de navigation et son influence sur l'utilisateur. Ils sont destinés entre autres à modifier certains paramètres de navigation comme la taille de la zone d'évitement d'obstacles ou la force de répulsion des obstacles.

III.3 PERCEPTION

III.3.1 Objectifs

La tâche de perception doit enrichir les données brutes fournies par le niveau physique pour les transmettre au niveau supérieur ou fournir un complément d'information aux autres tâches du niveau local. Actuellement, trois modules ont été définis : la localisation, la détection de mur et la détection d'espace libre.

La localisation doit fournir la position exacte du robot. Les balises infrarouges apportent une information approximative quant à la position dans l'environnement. Cette information doit être

corrélée avec les cartes locales disponibles et les données ultrasonores. De plus, il faut réaliser une fusion entre les données odométriques et les données ultrasonores pour compenser et corriger la dérive de l'odomètre [HORN 94]. La position du robot dans les environnements modélisés permet de détecter des zones auxquelles un signifiant (une étiquette) est associé. Cette “balise virtuelle” permet d'envoyer une information au niveau supérieur ou de désigner une zone approximative.

Le module de détection de mur permet à partir de l'analyse des données ultrasonores et odométriques de trouver les éléments caractéristiques d'un environnement non modélisé [BELL 95]. Il est destiné dans un premier temps à détecter le mur à suivre.

Le module d'espace libre cherche à détecter une direction unique d'évolution libre d'obstacle.

III.3.2 Echange de données

a) niveau physique

La tâche de perception reçoit les informations odométriques, ultrasonores et infrarouges du niveau physique et envoie la correction du capteur odométrique. Elle peut aussi demander un petit déplacement pour changer l'angle de vision du robot. Cette option ne sera peut-être pas implantée si les tests d'évaluation démontrent que ces mouvements non-explicitement demandés inquiètent ou gênent l'utilisateur.

b) niveau global

Le niveau global transmet la zone d'évolution correspondant à une carte locale et éventuellement la position approximative d'origine identifiée par une balise. Si un “dégagement” est proposé, la destination de l'espace libre est transmise à la tâche de navigation. S'il s'agit de “suivre un mur”, c'est la position du mur à suivre, à droite ou à gauche du robot, qui est transmise. La tâche de perception envoie au niveau supérieur les balises détectées qu'elles soient virtuelles ou infrarouges, et ses capacités de localisation. Par exemple, s'il n'existe pas de carte locale, la zone n'est pas modélisée et la localisation n'est pas utilisable.

c) niveau local

Outre la direction de l'espace libre et du mur à suivre, la tâche de perception fournit la position du robot dans l'environnement aux tâches de navigation et de communication. Cette position est utilisée par la tâche de navigation pour calculer un chemin, et donne une référence à l'utilisateur lorsqu'il désigne, à l'aide de la tâche de communication, un point d'arrivée particulier. Il est envisagé que l'utilisateur ait la possibilité de fournir de façon similaire la position du robot, si la tâche de perception n'est plus capable de la déterminer.

Niveau Global :

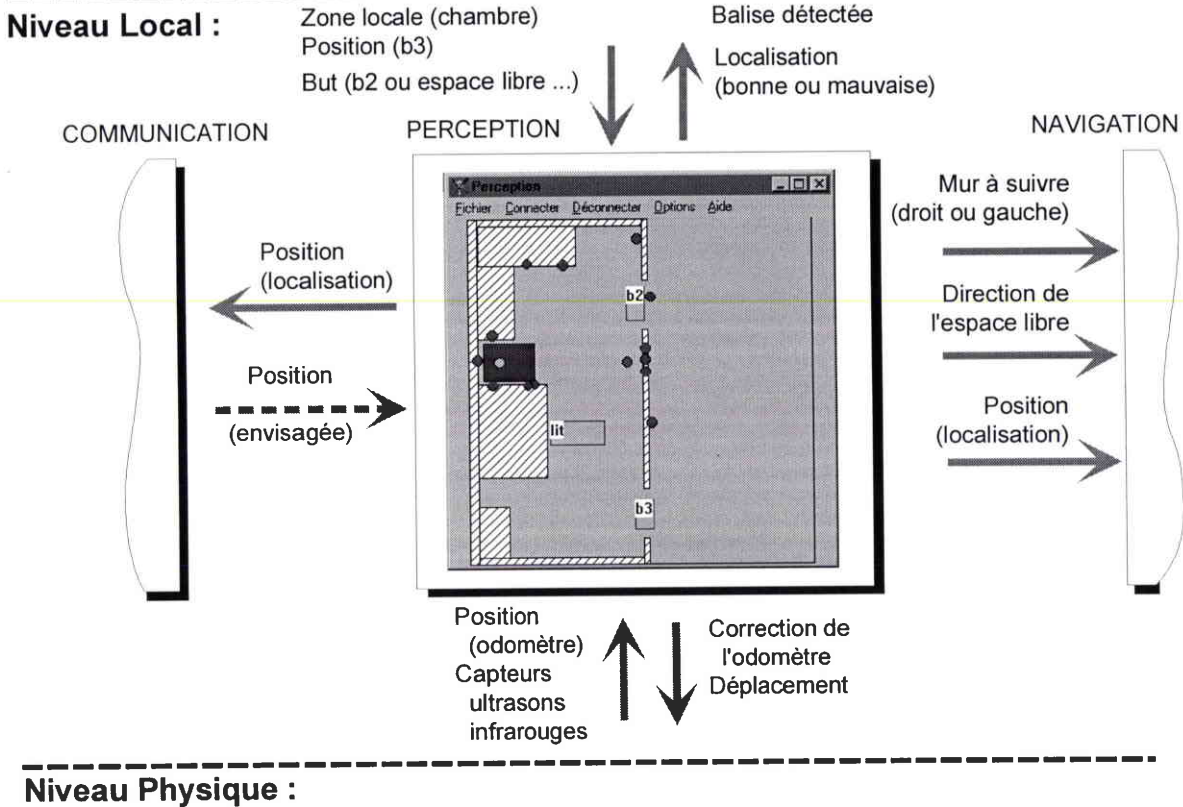


Figure III.7 : échange de données avec la tâche de perception

III.3.3 Fonctionnalités

Une description du module d'espace libre fait apparaître les stratégies à mettre en oeuvre pour obtenir un comportement suffisamment robuste et cohérent.

L'algorithme suivant propose une méthode de recherche d'espace libre :

Si le capteur central ne détecte pas d'obstacle à moins de 1m50 l'espace libre est droit devant
sinon si 2 des 3 capteurs frontaux détectent un obstacle très proche et qu'il n'y a pas d'obstacle à l'arrière **alors** l'espace libre est derrière,
sinon si la somme des mesures des 3 capteurs à droite est supérieure à la somme des mesures des trois capteurs à gauche **alors** l'espace libre est dans la direction du capteur droit qui détecte le plus d'espace **et réciproquement**.

Cet algorithme ne traite pas tous les cas de figure, par exemple lorsqu'un seul capteur détecte un obstacle proche. En fait, le rôle du module de détection d'espace libre est d'apporter un complément d'information au lieu d'imposer une solution. En fait, si un seul capteur détecte un obstacle proche, la direction reste "droit devant" et le module de contournement d'obstacles doit être capable de l'éviter. En réalité, en dehors de sa grande simplicité qui lui permet de s'exécuter très rapidement, il apporte l'avantage de privilégier un comportement intéressant pour notre application, la marche en avant.

Cependant, cet algorithme n'est pas directement utilisable. Son premier inconvénient est d'apporter trop d'informations identiques. S'il n'y a pas d'obstacle devant, il est inutile d'indiquer continuellement la direction à suivre. Ce problème est facile à résoudre : il suffit de fournir l'information de direction uniquement lorsqu'elle change. Un problème plus complexe apparaît alors, lorsque les directions successives sont opposées. Si le robot recule devant un obstacle et que la direction libre trouvée est en avant, nous avons de fortes chances de réaliser un ridicule mouvement de rebonds pendant un temps indéfini. Il s'agit alors d'interdire la configuration : repartir en avant après avoir reculé. Une autre configuration peu encore être gênante, "arrière-droite-avant-arrière-droite...", où les solutions trouvées sont toujours identiques. Il faut alors interdire cette configuration ou détecter l'échec du module et arrêter le déplacement pour laisser la commande à l'utilisateur. Ainsi, pour obtenir le comportement souhaité, les modules doivent non seulement être composés d'un algorithme de traitement mais aussi de méthodes d'auto-analyse permettant de mettre en oeuvre des stratégies déterministes.

Actuellement les modules de localisation et de détection d'éléments caractéristiques sont au

stade algorithmique et les stratégies alternatives déterminées par auto-analyse n'ont pas encore été développées. Par conséquent, ces modules n'ont pas encore été implantés.

III.4 COMMUNICATION

III.4.1 Objectifs

Le but de la tâche de communication est d'acquérir les informations en provenance de l'utilisateur. Ces informations peuvent provenir de différents types de capteurs de commandes, tout ou rien ou proportionnel. Elle doit alors gérer différents types d'interfaces adaptées et configurables.

Les informations fournies par l'utilisateur dépendent de sa perception de l'environnement. S'il s'agit de son environnement proche, ces informations concernent les tâches du niveau local ou directement la commande des moteurs du fauteuil robotisé. S'il s'agit de son environnement lointain ou du système dans sa globalité, l'imprécision de ces données sera traitée au niveau supérieur.

Si la personne utilise le mode manuel, elle dispose du contrôle complet du fauteuil robotisé. Ce mode est géré par la tâche de communication et les commandes de déplacement sont directement envoyées au fauteuil. En effet, ces commandes n'ont pas besoin de transiter par la tâche de navigation puisqu'elles ne nécessitent pas d'information locale supplémentaire, ou d'un traitement spécifique de l'information, comme par exemple lors de la réalisation d'un suivi de trajectoire. Le seul traitement optionnel est un évitement de contact où le mouvement est bloqué si des obstacles sont proches.

La relation privilégiée de cette tâche avec l'utilisateur permet de réaliser une première analyse des ordres communiqués en utilisant les critères de performance définis par P. Pino (Chap.II §III.2.4b). Il est possible de déterminer le critère de performance du pilote à utiliser le système robotisé en estimant ses déplacements lorsqu'il utilise le mode manuel, ou en analysant ses choix.

III.4.2 Echange de données

a) utilisateur

Grâce à une interface adaptée, la tâche de communication reçoit de l'utilisateur des informations de type tout ou rien ou proportionnel (Chap.II §III.2.4, fig. II.25-26).

b) niveau global

Pour dialoguer avec le superviseur, l'utilisateur sélectionne un bouton désigné par une croix (fig. III.8). Une requête de dialogue est alors envoyée au niveau supérieur suivie de la validation du choix proposé. Le superviseur envoie ses conclusions. S'il s'agit d'un déplacement en mode automatique, la tâche de communication transmet l'information d'arrêt du mouvement ou de déviation. Toutes les autres options mettent en place les interfaces spécifiques.

c) niveau local

L'interface "radar" (fig. III.9) permet de désigner un point et une orientation particulière d'arrivée dans un environnement modélisé. La tâche de communication reçoit du niveau supérieur la zone d'évolution, et de la tâche de perception la position précise dans cet environnement. Le point désigné est ensuite transmis à la tâche de navigation. Une méthode similaire doit être utilisée pour transmettre la position du fauteuil à la tâche de perception. Le mode semi-automatique de contournement d'obstacles permet d'orienter le fauteuil ; l'ordre de marche avant en contournant les obstacles est transmis à la tâche de navigation.

L'ordre d'arrêt d'un mouvement automatique ou semi-automatique est transmis à la tâche de navigation mais également au fauteuil robotisé. Les commandes de déplacement en mode manuel sont directement transmises au fauteuil.

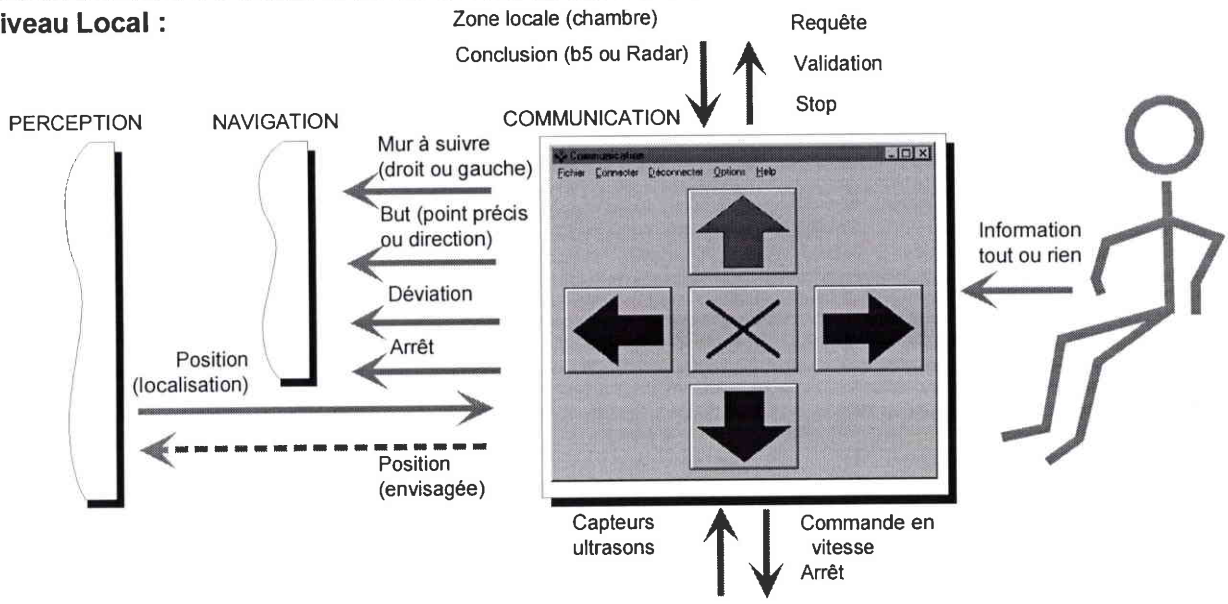
Niveau Global :**Niveau Local :**

Figure III.8 : tâche de communication

III.4.3 Fonctionnalités

Actuellement, six types de pages-écran sont nécessaires :

- mode manuel avec requête au superviseur,
- validation d'un choix,
- déplacement automatique ou semi-automatique avec arrêt et éventuellement déviation,
- radar,
- orientation et avance en contournant les obstacles,
- sélection du mur à suivre.

La figure suivante présente quelques pages-écran :

TOUT OU RIEN

PROPORTIONNEL

MODE MANUEL
ARRET
VALIDATION
RADAR

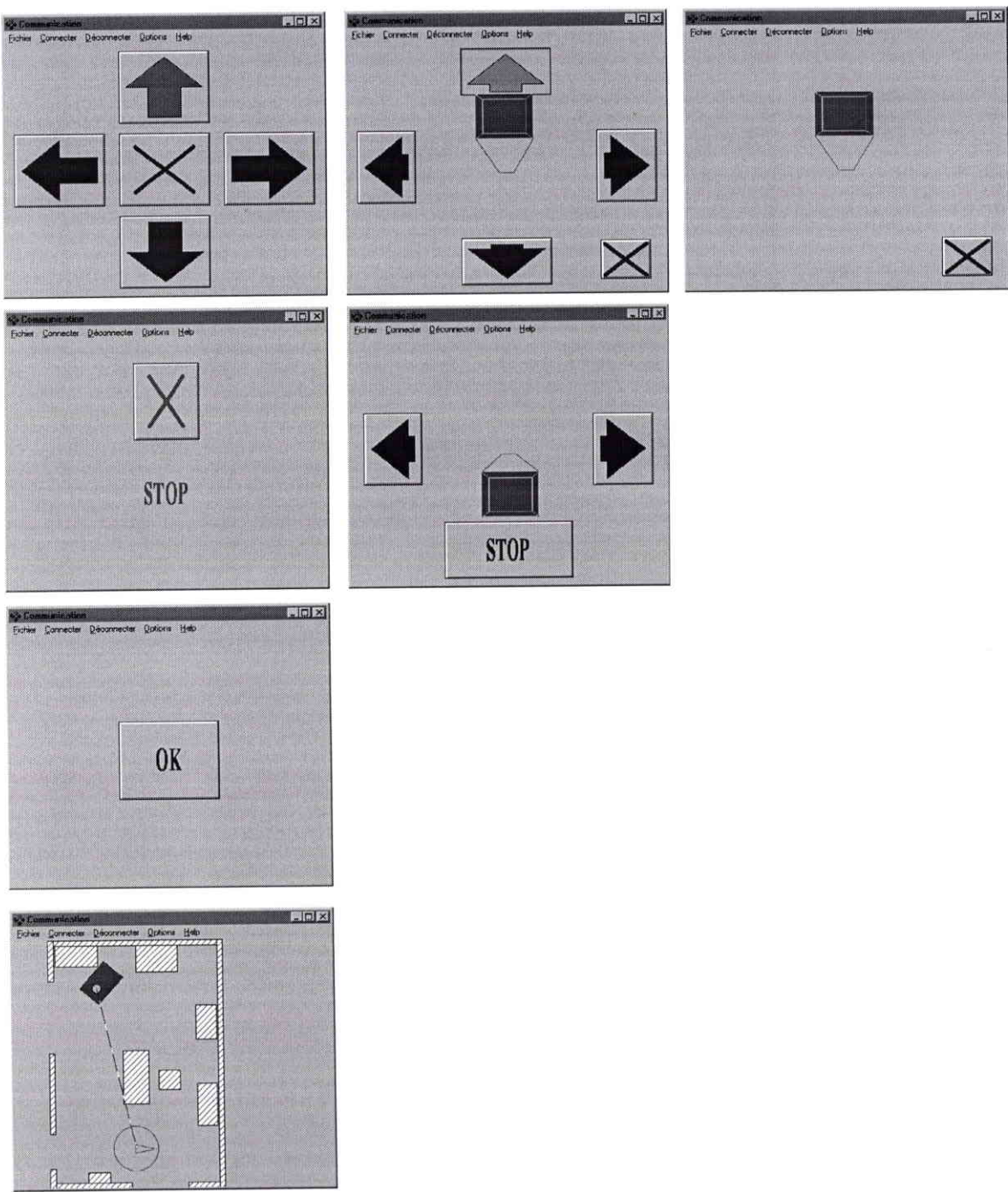


Figure III.9 : bibliothèque de pages-écran

IV SUPERVISEUR

IV.1 OBJECTIFS

Le but de la tâche de supervision est de gérer les informations provenant, sous forme de signifiants, du niveau local pour contrôler l'état global du système, en informer l'utilisateur et dialoguer avec celui-ci.

Un système de gestion de bases de connaissances, trivialement appelé "système expert", permet d'enrichir ces signifiants pour que le signe obtenu soit mieux adapté à l'utilisateur. Les signifiants du système sont complétés par une tierce-personne, le configurateur du système, qui fournit d'autres signifiants et une description de leurs relations. Le système effectue les manipulations de ces signifiants dont le sens est commun à l'utilisateur et au configurateur. Celui-ci peut être un ergothérapeute qui connaît l'environnement d'évolution et plus particulièrement les besoins de l'utilisateur.

Traditionnellement, dans le domaine des "systèmes experts", les signifiants sont des *faits* et leurs relations sont décrites par des *règles*, la tierce personne étant l'expert. Les connaissances du système sont contenues dans une base de faits et une base de règles. Les relations entre les faits connus permettent de réaliser des *inférences* amenant à la déduction de nouveaux faits. Le problème de l'ancrage au réel de ces faits (§ III.1) ne permet pas de les utiliser comme une représentation des états du système. En effet, leur niveau d'abstraction n'assure pas une définition complète des données caractéristiques du système. Ils sont par contre adaptés à la représentation imprécise et globale d'un environnement et permettent par conséquent d'effectuer des planifications a priori. Ils permettent également de réaliser un dialogue mais uniquement à partir de propositions, les décisions définitives restant sous le contrôle de l'utilisateur.

IV.2 ECHANGE DE DONNEES

a) utilisateur

La tâche de supervision communique à l'utilisateur l'état général du système, sa localisation

globale, et les propositions disponibles dans une fenêtre graphique intitulée “informations” (fig. III.10). Lorsqu’elle reçoit une requête de dialogue en provenance de la tâche de communication, les propositions défilent dans une fenêtre “question” jusqu’à la validation d’un choix. Les conclusions transmises au niveau local sont composées de :

- la zone d’évolution si celle-ci change,
- de la position d’origine si elle est caractérisée par un fait,
- du but, qui peut-être soit une position dans l’environnement, soit un mode de fonctionnement, soit un élément permettant de contrôler l’environnement.

b) niveau local

La tâche de supervision reçoit du niveau local uniquement des informations certaines. Elle peuvent être par exemple, la détection d’une balise, l’arrêt du mode automatique sur décision de l’utilisateur ou lorsque le but est atteint, le mode de fonctionnement ou encore la détection de déplacements incohérents.

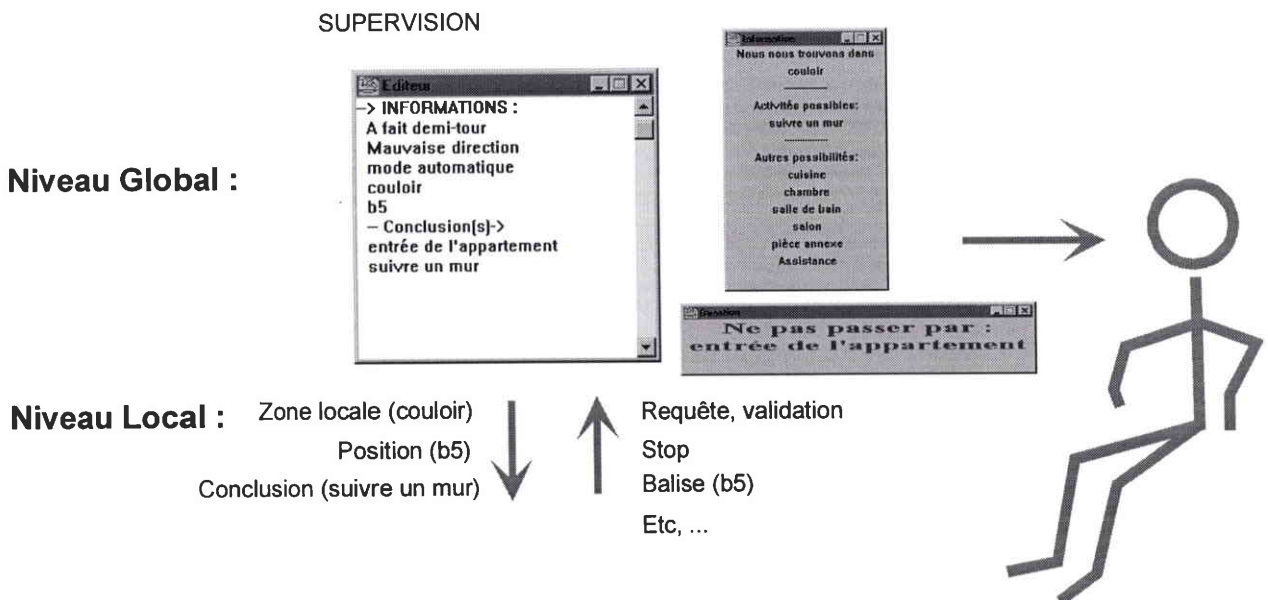


Figure III.10 : communication avec la tâche de supervision

IV.3 REPRESENTATION DES CONNAISSANCES

IV.3.1 Les faits

Un fait est un atome de connaissance. Il existe plusieurs façons de le représenter, suivant le formalisme mathématique choisi. Les formalismes les plus courants sont :

- la logique des propositions pures (logique d'ordre 0) : un fait est représenté par un symbole (une chaîne de caractères), par exemple "porte_de_la_chambre".
- la logique des propositions avec variables globales (ordre 0+) : un fait est représenté par un triplet <objet, comparateur, valeur>, par exemple "distance du mur > 50cm".
- la logique des prédicats (ordre 1) mise en oeuvre dans le langage PROLOG : le fait est représenté par un couple <prédicat, variable>, par exemple "pièce(x), distance du mur(y), portes de la chambre (b2, b3)".

Diverses méthodes et logiques ont été proposées pour résoudre le problème de la valeur de vérité d'un fait. Celui-ci n'étant pas uniquement vrai ou faux, il est souvent imprécis ou absent. Dans [LEAS 88], le groupe de travail Lea Sombe présente une étude comparative de différentes logiques et il apparaît que le choix d'une logique dépend des aspects des symboles manipulés.

Nous avons choisi d'utiliser la représentation en logique des propositions pures, logique d'ordre 0, pour ses qualités de simplicité et de clarté d'expression. Le problème de l'imprécision du fait étant lié à son niveau d'abstraction, il est traité par les niveaux inférieurs. Les faits n'apparaissent que lorsqu'ils sont sûrement détectés dans leur contexte et les déductions du système sont soumises à l'appréciation de l'utilisateur. Le problème de l'absence du fait est traité de manière algorithmique par le mécanisme de raisonnement.

Le domaine d'application du système étant défini (l'apport d'une assistance au déplacement dans un environnement partiellement modélisé), certains faits sont traités de façon similaire. Ce caractère systématique permet d'optimiser le traitement en définissant un fait non seulement par son libellé, mais aussi par son type et par des variables internes de travail.

Quatre types de faits ont été définis :

- les *balises* : elles déterminent des points de passage dans l'environnement. Une variable interne permet d'indiquer si cette balise est franchissable (le passage peut être temporairement ou définitivement obstrué), ce qui influencera les chemins proposés.
- les *activités* sont des positions particulières dans l'environnement ou les modules utilisables du système, par exemple, la position d'où l'on peut regarder la télévision, l'action d'allumer un poste radio ou l'utilisation d'une fonctionnalité comme le contournement d'obstacle. Ces actions peuvent être déclarées comme autorisées ou non.
- les *zones* représentent des contextes, des groupements de faits. Ainsi, une pièce contient les balises qui la délimitent et éventuellement, comme pour l'assistance disponible, certaines activités. Les zones non-autorisées ne seront pas proposées à l'utilisateur,
- les *prédicats* sont des faits utilisés au cours du raisonnement. Ils peuvent être éditables à l'intention de l'utilisateur ou non.

L'ensemble des faits est représenté dans une liste chaînée : la base de faits.

IV.3.2 Les règles

Les règles permettent de définir les relations entre les faits. De façon générale elles se présentent sous la forme “Si <conditions> Alors <actions>”, où “conditions” est un ensemble de faits, appelés “prémisses” de la règle, et “actions” ce qui doit être fait lorsque la règle est déclenchée, quand les prémisses sont vérifiées. Dans le cas général de *règles de production* restreintes à la “clause de HORN”, l'action est un fait unique.

Les règles doivent être autosuffisantes, elles ne doivent pas appeler d'autres règles mais être entièrement définies par leurs prémisses. Ceci permet d'ajouter ou de retirer des règles sans modifier les procédures appelées ou appelantes.

Cette propriété d'indépendance des règles est intéressante pour notre application, où l'environnement d'évolution peut être partiellement modélisé par le configurateur du système ou adapté

à chaque utilisateur. Les règles nous servent à décrire l'environnement ou certains événements.

Nous avons défini deux types de règles :

- des *règles de production* qui nous permettent de décrire un événement, par exemple : **Si fait_1 et Si fait_2 et Si ... Alors fait_n.**

- des *règles de description* pour définir un contexte : **fait_n Contient fait_1 Ou fait_2 Ou ...**

Les parties action et conditions des règles sont des listes de pointeurs sur les faits concernés. Chaque fait possède une liste de pointeurs sur les règles dont il est action et une liste de pointeurs sur les règles dont il est condition. Le maintien de ce réseau est appelé "compilation" de la base de règle. Il permet d'optimiser le temps de recherche dans la base de connaissances. Ainsi, chaque fait connu décrémente le nombre de prémisses à vérifier de la règle dont il est condition. Si tous les faits sont connus, cette règle est applicable et son action devient connue.

IV.3.3 Configuration de la base de connaissances

La première tâche de configuration du système est la représentation de l'environnement. Ainsi, une règle de description permet de définir que le "salon" contient les destinations "TV", "table", "téléphone" et est limité par les points de passage "b1" et "b2" (fig. III.11). La position approximative des balises, qui nous permet de nous affranchir d'un repère géométrique global, est suffisante pour planifier a priori un chemin global. Ainsi pour se rendre, de la chambre au salon, il faut passer par "b2" puis par "b1". La position réelle des balises est définie dans le modèle local.

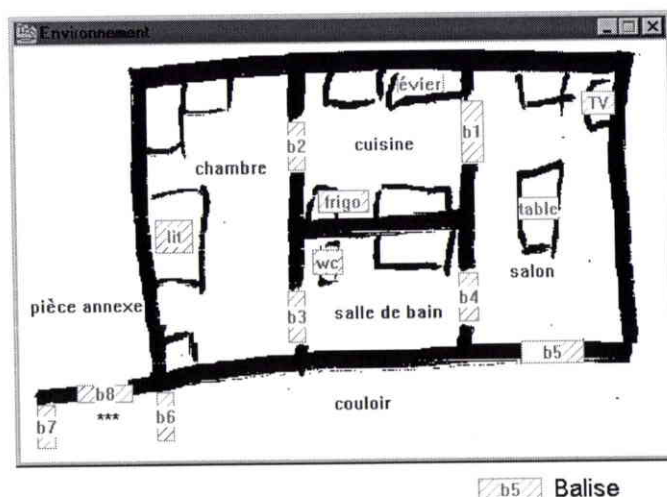


Figure III.11 : représentation a priori de l'environnement

La seconde étape est l'enrichissement de cette représentation à l'aide de règles de production. Ainsi, si l'on se trouve dans le "salon", "b5" est la "sortie de l'appartement" : Si salon et si b5 Alors sortie de l'appartement. On peut aussi privilégier certaines activités comme proposer de "suivre un mur" dans le "couloir".

La dernière étape est la configuration du système et en particulier de l'assistance disponible. Certaines personnes peuvent utiliser le module de désignation par Radar, d'autres ne pourront pas se passer du module d'évitement de contact. Ces options sont définies par la règle : "Assistance **Contient** suivre un mur, contournement d'obstacle, radar, ...".

IV.4 LE RAISONNEMENT

IV.4.1 Définitions

Les connaissances provenant du configurateur et du système doivent être exploitées de façon raisonnée. Les raisonnements utilisés en IA peuvent être classés en cinq modes [HATO 91] :

- le *raisonnement formel*, encore appelé *raisonnement logique* : il est fondé sur la manipulation des structures symboliques et utilisé dans le cadre des systèmes experts et planificateurs,
- le *raisonnement procédural* dans lequel toutes les connaissances et la façon de les utiliser sont figées sous la forme d'algorithmes,
- le *raisonnement géométrique* qui sous des formes très diverses concerne la manipulation d'objets physiques et les décisions à prendre,
- le *raisonnement par généralisation et abstraction* lié à l'apprentissage et traité dans le cadre de l'IA connexioniste,
- le *raisonnement par analogie*, très naturel et efficace chez l'homme mais difficile à mettre en oeuvre car mal connu et difficilement contrôlable.

Pour réaliser un raisonnement logique, les systèmes experts sont composés d'un *moteur d'inférence* [ERMI 89]. Celui-ci applique un *raisonnement déductif* en appliquant les règles contenues

dans la base de connaissances. Ce type de raisonnement est le seul *valide* [CHEN 75], car il applique des connaissances générales à un cas particulier, contrairement aux *raisonnements inductif ou abductif* qui cherchent à généraliser des faits ou à attacher une conséquence plausible à un ensemble de prémisses. Les moteurs d'inférence fonctionnent en *chaînage avant* lorsqu'à partir des prémisses ils cherchent à déclencher une règle et en *chaînage arrière* lorsqu'à partir d'une règle considérée comme une *hypothèse*, ils cherchent à vérifier la valeur de vérité des prémisses.

Dans un système expert classique, basé sur des règles de production et destiné au diagnostic, comme par exemple "MYCIN", le comportement du raisonnement est *monotone*, chaque fait déduit d'une règle est ajouté à la base de connaissances. Celle-ci ne peut donc qu'augmenter de façon monotone, ce qui est naturel pour un système d'aide au diagnostic où la connaissance ne fait qu'augmenter au fur et à mesure des observations. Pour une application en robotique, le raisonnement doit être généralement *non-monotone*, les faits perçus à un instant donné peuvent ne plus être perçus ou ne plus être vrais un instant plus tard et disparaître de la base de connaissances.

Les possibilités d'ajout ou de retrait de faits ou de règles posent le problème de la *cohérence* de la base de connaissances. Par exemple, ajouter la règle "**Si B Alors A**" alors que la base de connaissances contient déjà "**Si A Alors B**" entraîne généralement une explosion combinatoire pour un système monotone et un cercle vicieux pour un système non-monotone. La cohérence de la base de connaissances doit être assurée par l'expert mais aussi par le système.

IV.4.2 Application

Les raisonnements géométriques sont réalisés au niveau local, les informations manipulées ayant une portée locale. Le niveau global réalise le raisonnement logique. Pour obtenir un comportement non-monotone, le contrôleur d'exécution maintient un *ensemble de connaissances*, recréé à chaque nouveau fait fourni par le système et enrichi par inférence. Cet ensemble de connaissances contient les faits connus du système.

Un premier moteur d'inférence procédural, permet de réaliser une focalisation sur les trois thèmes actuellement gérés : le déplacement, le dialogue et l'apprentissage des préférences de l'uti-

lisateur. Un second moteur d'inférence déclaratif complète en chaînage avant l'ensemble des connaissances. Ce moteur monotone est limité en nombre d'inférences pour assurer une réponse en temps réel et éviter les conséquences dues à une incohérence de la base de connaissances. Les conclusions déduites sont alors transmises au système et à l'utilisateur par le premier moteur d'inférence.

a) déplacement

Le premier moteur d'inférence a deux modes de travail : le mode surveillance et le mode automatique. Le "mode automatique" est déduit lorsqu'une destination est demandée et qu'un chemin global a été planifié. Par défaut, si l'utilisateur est à l'arrêt ou se déplace en mode manuel ou semi-automatique, le moteur d'inférence travaille en "mode surveillance".

La règle de description de la zone d'évolution fournit un contexte aux informations traitées. Le premier moteur d'inférence cherche à déduire en chaînage avant des informations concernant le déplacement. Ainsi si le fauteuil se trouve dans la "cuisine" et que "b1" est détecté, le fauteuil évolue alors dans le "salon". Ce type de déduction étant systématique, elle est réalisée de façon procédurale en utilisant les informations implicites des règles de description : "cuisine **contient** b1, ..." et "salon **contient** b1, ...". Un moteur d'inférence déclaratif utilisant des règles de production aurait eu besoin des règles supplémentaires "**Si** cuisine **Et** b1 **Alors** salon" et "**Si** salon **Et** b1 **Alors** cuisine".

Au cours du mode surveillance des contextes fugitifs peuvent apparaître. Par exemple, si la règle "**Si** déplacement incohérent **Alors** Assistance" est inférée, la règle de description du fait "Assistance" devient un contexte permettant d'interpréter les informations du système.

En mode automatique, le premier moteur d'inférence travaille en chaînage arrière. Le chemin global planifié est considéré comme une hypothèse dont il faut vérifier les prémisses (les balises planifiées) jusqu'à l'arrêt du fauteuil. Si au cours du déplacement des obstacles ou des déviations de l'utilisateur modifient la trajectoire, d'autres balises de la zone d'évolution peuvent être détectées et un nouveau chemin est alors planifié. Si la balise détectée appartient au chemin, le moteur d'inférence peut déduire le fait "Bonne direction". S'il s'agit d'un autre chemin, différent du premier, il s'agit d'une "Autre direction" mais aussi d'une "Bonne direction". Si le nouveau chemin

est similaire au premier, il s'agit d'une "Mauvaise direction". Si la balise a déjà été détectée, le fauteuil "A fait demi-tour".

b) dialogue

L'information contextuelle contenue dans la règle de description de la zone d'évolution est également utilisée dans le cadre du dialogue. Le premier moteur d'inférence indique, dans la fenêtre "Informations", l'état global du système. L'information "**Nous nous trouvons dans : salon**" est suffisante à l'utilisateur pour évaluer la qualité des propositions du système.

A partir de cette information, le premier moteur d'inférence crée également une *liste de propositions*. Celle-ci contient en premier lieu les activités non connues (n'appartenant pas à l'ensemble des connaissances) disponibles dans la pièce, éventuellement complétées par le second moteur d'inférence, puis toutes les zones autorisées. Par exemple, le salon est décrit par la règle "salon **contient** TV, table, téléphone, b1, b4, b5". S'il existe en plus la règle "**Si** salon **Alors** Radar" et si le fauteuil se trouve dans le salon, la liste de propositions sera : "Radar, TV, table, téléphone, cuisine, chambre, ...". Si l'utilisateur dispose uniquement d'un capteur de type tout ou rien, lorsque le contrôleur d'exécution reçoit une requête de dialogue, les propositions de cette liste sont transmises séquentiellement dans la fenêtre "Question" (fig. III.12). Un capteur proportionnel permet d'indiquer la position du choix sélectionné. Un contexte fugitif, comme l'assistance, est traité de la même façon : sa description est intégrée dans la liste de propositions et un message d'avertissement est envoyé dans la fenêtre "Question" (fig. III.13).

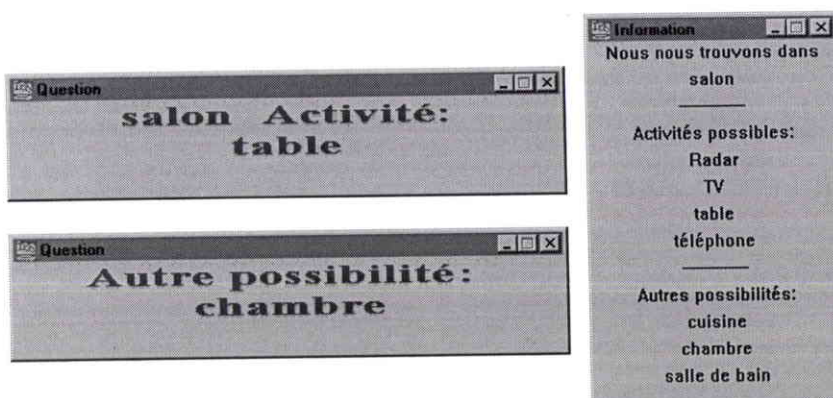


Figure III.12 : dialogue et état du système

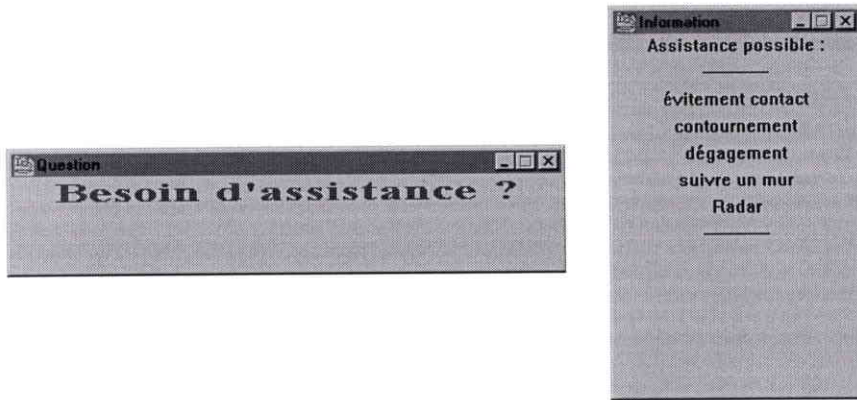


Figure III.13 : proposition d'assistance

Au cours d'un déplacement automatique, des règles de production du type “**Si** chambre **et si** b3 **Alors** porte de la salle de bain” permettent d'indiquer à l'utilisateur la destination choisie par le planificateur (fig. III.14). Si l'utilisateur arrête un déplacement automatique, il est raisonnable d'estimer que cette destination ne lui convient pas. Le système propose de ne pas passer par la “porte de la salle de bain”. Si ce choix est validé, un autre chemin est calculé en considérant la balise destination comme infranchissable. Si n'y a pas d'autre chemin, le mode automatique est arrêté.



Figure III.14 : informations au cours d'un déplacement automatique

c) apprentissage

La liste de propositions est créée en parcourant la base de faits et les règles dont ces faits sont prémisses. Le résultat est alors dépendant de l'ordre de rangement de ces faits. Chaque fait validé par l'utilisateur est placé en tête de la base de faits et en tête de la liste des prémisses des règles dont il est condition. Cette modification des liens permet un accès plus rapide aux choix disponibles si l'on ne dispose que d'un capteur tout ou rien, mais aussi dans un premier temps de réaliser une mémoire à court terme des dernières actions de l'utilisateur et à plus long terme de réaliser un apprentissage des choix les plus fréquemment réalisés. La base de connaissances s'adapte alors à

l'utilisateur. Cette fonctionnalité permet de réaliser un raisonnement par abstraction. La figure III.15 ci-dessous, présente une évolution de la base de connaissances, après que l'utilisateur ait demandé de se rendre au téléphone, dans la chambre et dans le couloir.

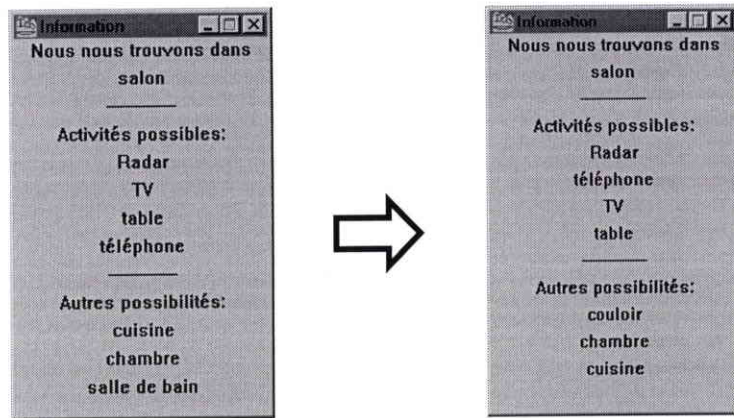


Figure III.15 : évolution de la base de connaissances

V COOPERATION HOMME-MACHINE

Ce chapitre a permis de décrire l'architecture proposée pour le fauteuil robotisé VAHM. Il est cependant nécessaire de souligner les divers échanges et partages de tâches possible entre l'homme et la machine, pour justifier son appellation d' "architecture coopérative".

Le comportement général émergeant apparaît au travers des déplacements du fauteuil robotisé et de la gestion de l'interface. Celle-ci est composée des pages-écrans de la tâche de communication et des fenêtres "Information" et "Question" gérées par le superviseur (fig. III.16).

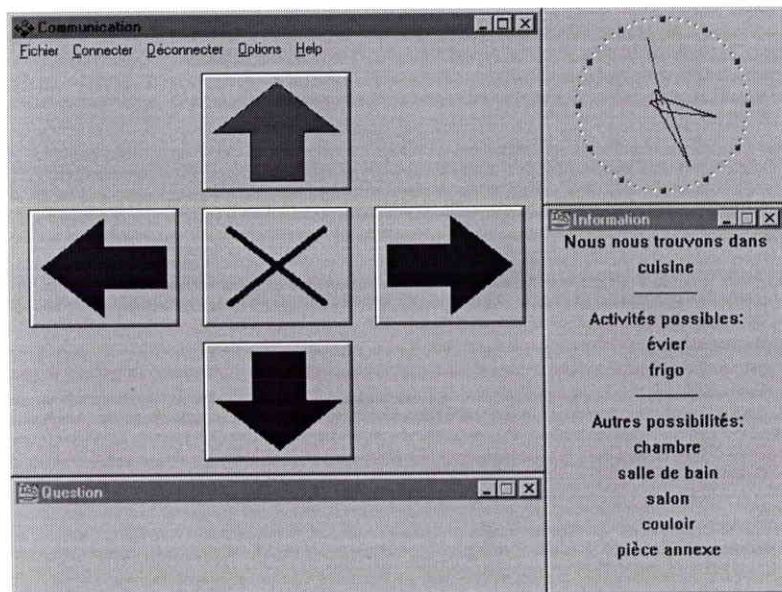


Figure III.16 : interface pour un capteur de commande de type tout ou rien

Par analogie avec les systèmes de téléopération, l'utilisateur peut être vu comme l'opérateur d'exécution et le niveau supérieur du système comme l'opérateur de supervision. Le dialogue entre les deux entités, dépendant des caractéristiques de l'environnement, des informations du configurateur et des préférences de l'utilisateur, permet le choix du mode de commande et le partage des tâches. Ainsi, au cours d'une tâche de mobilité, deux cas de figure apparaissent, soit l'homme, soit la machine supervise le système :

- Lors de déplacements en mode manuel dont l'objectif reste inconnu à la machine, celle-ci supervise le système :

- en apportant des informations de localisation représentatives de l'état global du système, "nous sommes dans la cuisine",
 - en maintenant une liste de but ou d'activités disponibles,
 - en faisant des propositions d'assistance et donc de changement de mode de commande,
 - en fournissant éventuellement une aide au déplacement comme l'évitement de contact.
- Lorsque le but est connu la machine apporte une aide en planifiant le chemin et en informant l'utilisateur de sa décision. Au cours du déplacement automatique, ou semi-automatique, la machine gère le partage des degrés de liberté et l'homme devient superviseur du système :
- il s'assure que les déplacements produits répondent bien à son attente,
 - il agit sur ces déplacements : déviation, choix de l'orientation initiale, arrêt.

Le modèle du comportement de l'opérateur de Rasmussen (chap.I, §III.2.2) permet d'illustrer les interactions et les aides fournies pour chaque type de comportement par le robot VAHM.

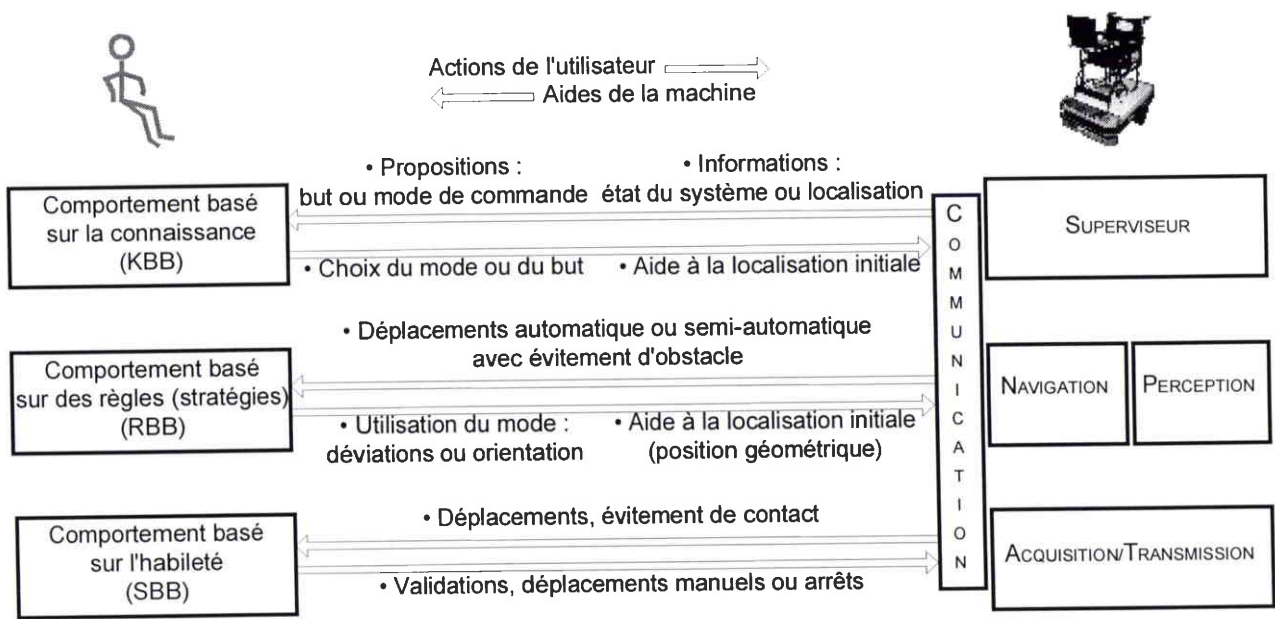


Figure III.17 : interactions entre le robot VAHM et l'opérateur humain

En réalité, cette figure illustre les réponses du système face à des comportements au cours d'une situation particulière. En effet, le modèle de Rasmussen représente une situation figée et ne

tient pas compte de l'évolution du savoir-faire de l'opérateur. Cette acquisition du savoir-faire est décomposée par H.L. Dreyfus [DREY 92] en cinq étapes : novice, débutant avancé, compétence, maîtrise, expertise. Au fur et à mesure de cette évolution, le comportement de l'être humain tend de plus en plus vers un comportement basé sur l'habileté où l'exécutant reconnaît des classes de situations et agit apparemment sans délibérer ni chercher à connaître leur signification. H.L. Dreyfus cite l'exemple d'une expérience où un maître d'échec (J. Kaplan) joue une partie éclair (cinq seconde le coup) tout en additionnant des nombres qui lui sont communiqués à voix haute. Les connaissances sont alors utilisées de façon inconsciente.

En fait, les assistances mises en place par le système sont fonction de la granularité des informations traitées et restent disponibles quel que soit le comportement mis en oeuvre par l'opérateur.

VI CONCLUSION

Ce chapitre a présenté l'architecture conçue dans le cadre de ce mémoire pour le fauteuil robotisé VAHM. Elle se caractérise, dans un premier temps par un traitement des données en fonction de leur granularité suivant différents niveaux d'abstraction. Ces données en provenance du système ou de l'utilisateur, sont utilisées par chaque tâche pour obtenir un comportement déterminé. Le comportement général émergent est illustré par les déplacements du fauteuil robotisé et la gestion de l'interface.

Cette architecture permet de mettre en place différentes aides, de l'assistance au déplacement jusqu'à l'assistance à la commande et à la décision. Ces aides sont bilatérales. En effet, aussi bien l'homme que la machine peut assister l'autre entité dans la prise de décision lors de la définition ou au cours de la réalisation d'une tâche de mobilité.

Une série d'essais, présentée au chapitre suivant, va permettre d'évaluer les capacités de cette architecture et fera apparaître les perspectives d'évolution.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX

I INTRODUCTION

II PROTOCOLE EXPERIMENTAL

III RESULTATS

IV DISCUSSION

V PERSPECTIVES

VI CONCLUSION

I INTRODUCTION

Le chapitre précédent a permis de décrire l'architecture de commande du fauteuil robotisé VAHM. Celle-ci a été implantée sur le prototype et testée tout au long de son développement. Cependant, bien qu'il soit techniquement possible de simuler les déplacements du robot et sa perception, il est difficile de prendre en compte les conditions réelles d'utilisation. Celles-ci font apparaître des dysfonctionnements temporaires du système, dus à des erreurs de transmission d'informations, à un capteur défaillant ou encore à des obstacles difficilement perceptibles comme les pieds de chaise ou de table. De plus, il n'est pas aisé de simuler les réactions de l'utilisateur en situation réelle de pilotage.

Une première série d'essais avec des personnes handicapées a déjà permis d'estimer l'intérêt et les capacités des différents modes de commande. Afin d'évaluer les capacités de coopération et de dialogue de l'architecture proposée il est nécessaire de réaliser des essais en condition réelles avec différents pilotes ne connaissant pas forcément l'application. Etant donné que ces essais peuvent être fatiguants pour des personnes fortement handicapées et comme les modules actuellement disponibles sur le prototype n'autorisent pas une utilisation de longue durée, les capacités de dialogue et de proposition d'assistance ont été testées par des personnes valides.

Ce chapitre présente tout d'abord les conditions d'expérimentation. Les résultats obtenus font apparaître les modifications envisageables à court terme et les perspectives d'évolution de cette architecture.

Les figures illustrant les déplacements du fauteuil robotisé ont été réalisées en ligne à partir de situations réelles, bien que la gestion de l'affichage diminue sensiblement les performances du système.

II PROTOCOLE EXPERIMENTAL

II.1 CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

II.1.1 Conditions matérielles

• Les essais ont été réalisés dans l'appartement test (fig. IV.1) reconstitué dans les locaux du laboratoire à partir de plans d'appartements destinés à des personnes handicapées. Il respecte, en particulier, une largeur de porte de 100 cm nécessaire à l'évolution d'un fauteuil roulant électrique. Nous disposons ainsi en permanence d'un appartement réaliste de grandeur nature.

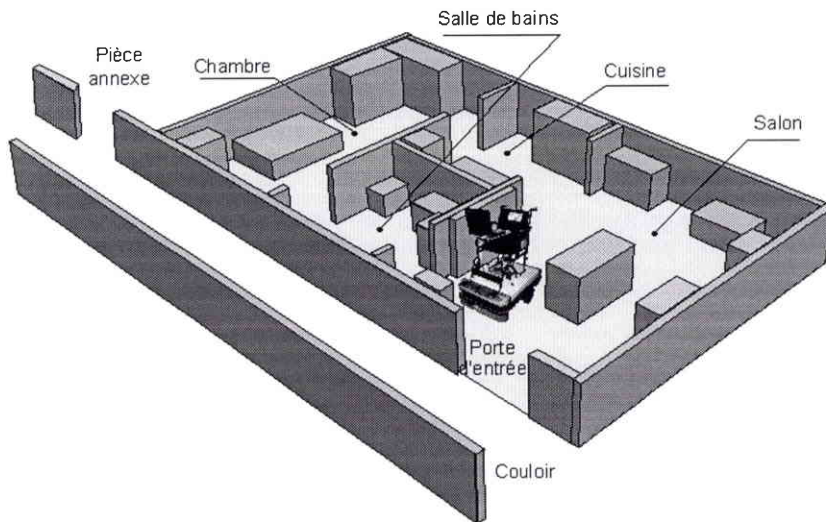


Figure IV.1 : appartement test

• Comme nous l'avons vu précédemment, le prototype utilisé est une base mobile ROBUTER™ sur laquelle est installé un fauteuil pour personne handicapée. La commande de la base est réalisée par un ordinateur compatible IBM (PC486DX4). Les ordres et les lectures des capteurs sont transmis via la liaison série à 9600 bauds. Le protocole de communication imposant une moyenne de 150 caractères, le temps de transmission d'une commande est de 160 ms. Les quatorze capteurs à ultrasons qui équipent la base mobile ont une portée de 12 m, une focale de 30° et une zone aveugle de 15 cm. Ils sont répartis en trois noeuds interrogeables indépendamment. Les capteurs de chaque noeud étant activés simultanément, la répartition de ceux-ci en trois noeuds permet de limiter l'ef-

fet de “cross-talk”, réception d’un écho ultrasonore provenant d’un autre capteur à ultrasons. Les informations sont transmises au pilote grâce à un écran plat de dimension réduite ne lui obstruant pas exagérément la vue. Les commandes de l’utilisateur disposant d’un capteur tout ou rien sont acquises via le port parallèle. Ce dernier est également utilisé pour l’acquisition des informations provenant d’une balise infrarouge indiquant le passage d’une zone modélisée, l’appartement, permettant des déplacements en mode automatique, à une zone non modélisée, le couloir.

II.1.2 Conditions fonctionnelles

- La tâche d’acquisition/transmission réalise la lecture successive des trois noeuds de capteurs ultrasons et de l’odomètre. Le temps de cycle est alors technologiquement limité à 640 ms. Au cours d’un déplacement automatique ou semi-automatique, s’il n’y a pas d’obstacle proche, une commande de roue est transmise à chaque changement des valeurs fournies par l’odomètre. Le temps de cycle augmente alors d’une centaine de millisecondes. Si les capteurs détectent un obstacle proche, la tâche de navigation transmet une commande de déplacement dès réception des données d’un noeud de capteurs à ultrasons.

- La tâche de perception ne fournit que le module de détection d’espace libre. Les modules de localisation et de détection de murs étant en cours de développement, ils ne sont pas encore suffisamment robustes pour être implantés sur le système. Au cours des essais, la localisation est réalisée à partir d’un point de départ fixe et grâce aux valeurs fournies par l’odomètre. Celles-ci sont suffisantes pour un déplacement d’une trentaine de mètres.

- La tâche de navigation met à disposition les outils de contournement d’obstacles (fig. IV.2), de suivi de mur et de planification avec suivi de trajectoire et contournement d’obstacles. La vitesse d’évolution fixée lors des essais en centre de réadaptation a été maintenue à 0.2 m/s. Cette vitesse est suffisamment confortable pour le pilote et rassurante pour les personnes évoluant dans l’entourage de la machine. La lenteur d’acquisition des données ultrasonores impose une réaction immédiate. Le phénomène de “cross-talk” produit dans certaines configurations se traduit alors par un léger “chaloupement” du à l’oscillation de l’angle de cap.

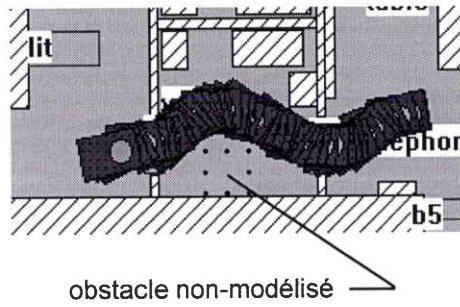


Figure IV.2 : passage de portes et contournement d'obstacles

Un module de “dégagement” est obtenu en réalisant un suivi de l'espace libre fourni par la tâche de perception (fig. IV.3). Il permet de réaliser une marche arrière lorsque le fauteuil ne peut plus effectuer de contournement d'obstacles. La marche arrière est arrêtée dès qu'un espace libre est détecté latéralement. Le fauteuil réalise alors une rotation pure et se dirige vers cette direction. Ce module est actuellement peu utilisé car le fauteuil ne dispose que d'un unique capteur arrière. Le risque de collision au cours d'une marche arrière est donc élevé en raison de la forte probabilité de *spécularité* que produit la réflexion d'un écho ultrasonore en dehors du cône de réception du capteur.

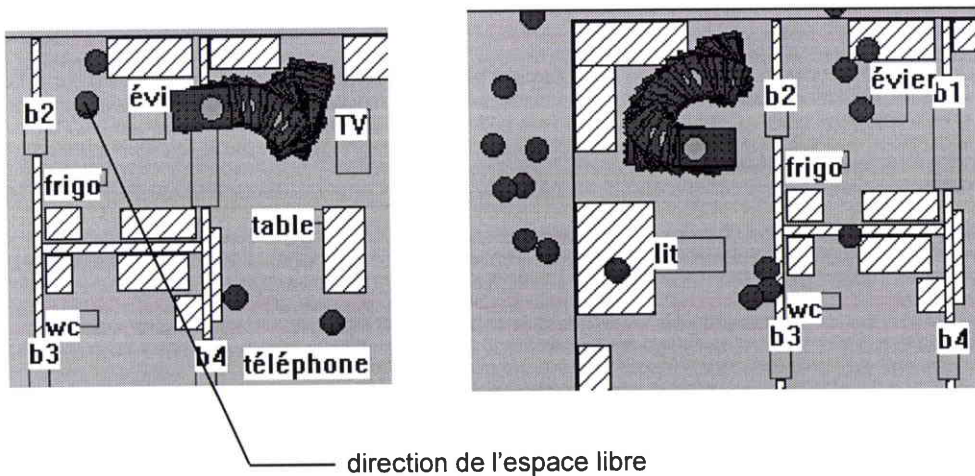


Figure IV.3 : exemples de dégagements

La planification locale est réalisée pour un robot point dans l'espace libre modélisé diminué de la demi-largeur du robot. Le déplacement débute par une rotation pure initiale en direction du premier point planifié et se termine par une rotation finale déterminée par l'utilisateur ou par l'activité demandée (fig. IV.4).

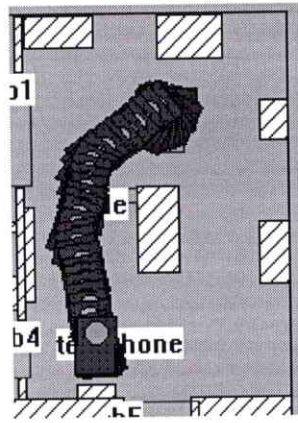


Figure IV.4 : déplacement automatique de la télévision au téléphone

- La base de données contient une description de l'environnement d'évolution : le couloir et l'appartement composé d'une chambre, d'une cuisine, d'un salon et d'une salle de bain. L'assistance disponible contient "évitement de contact", "contournement", "dégagement", "suivre un mur" et "radar". La règle "**Si** couloir **Alors** suivre un mur" permet d'indiquer que l'utilisation du mode de suivi de mur est préférable dans le couloir.

La règle "**Si** déplacement incohérent **Alors** assistance" propose les possibilités d'assistance dès qu'un déplacement incohérent est détecté.

L'ordonnancement de la base de données initiale est aléatoire et non optimal. Elle reste identique au début de chaque essai.

- La communication est établie pour un pilote utilisant un capteur de commande tout ou rien. Le défilement est rapide (1s) et l'action est prise en compte sur front montant. Ces choix ne sont pas très réalistes pour une personne fortement handicapée. Ils limitent cependant les contraintes liées aux risques de raté de validation des pilotes valides qui vont réaliser les essais, et leur permettent ainsi de mieux appréhender le dialogue avec le système.

Au vu des tests réalisés en centre de réadaptation avec une personne utilisant un capteur tout ou rien, il apparaît qu'une assistance minimale au déplacement est constamment nécessaire pour la sécurité du pilote. De ce fait, le système est configuré pour les essais avec un évitement de contact continuellement actif et non débrayable. Le contournement d'obstacles au cours d'une marche avant est maintenu une fois qu'il a été sélectionné.

II.2 EVALUATION DU DIALOGUE

L'évaluation de la qualité du dialogue entre l'homme et la machine n'est pas une chose aisée en raison du caractère fortement subjectif du processus de communication. De ce fait, les données observables seront essentiellement qualitatives. Elles sont cependant complétées par les critères d'évaluation de la performance de la personne (chap.II §.III.2.4.b). Ceux-ci sont des composants de la charge de travail. L'étude de la charge de travail à partir de la méthode "TLX modifiée" [PINO 95a] a mis en évidence l'intérêt du mode automatique par rapport au mode semi-automatique et plus encore par rapport au mode manuel en particulier lors de l'utilisation d'un capteur de type "tout ou rien". Dans le but d'observer certaines invariances dans le comportement des pilotes et de leur donner des objectifs réalistes, un scénario a été mis au point où les différents utilisateurs sont confrontés aux mêmes situations et ont à résoudre les mêmes problèmes.

II.2.1 Critères d'évaluation

Trois critères sont pris en compte pour évaluer le dialogue entre l'homme et la machine:

- Le premier critère concerne les capacités de compréhension de l'interface. A cet effet, la période d'apprentissage du système est très courte et permet juste de s'adapter aux temps de réaction de la machine et aux principes élémentaires de sélection : déplacements en mode manuel, utilisation de la croix de requête de dialogue, lecture de la liste des propositions. Les objectifs sont ensuite donnés au fur et à mesure de la réalisation du scénario. L'utilisateur doit alors prendre en compte les propositions du système en fonction des buts exigés.
- Le second critère cherche à évaluer les difficultés de sélection d'un choix. Il est observable grâce aux critères d'évaluation de la performance de la personne et plus particulièrement grâce au critère d'incohérence de validation qui doit rester proche de zéro.
- Le dernier critère prend en compte les réactions de l'utilisateur face aux situations d'échec, que celles-ci soient réelles, comme les cas de blocage du déplacement face à un obstacle, ou potentielles, lorsque la direction prise va mener à un blocage.

Ces trois points sont évalués par l'observation des réticences et des difficultés des utilisateurs au cours des déplacements et à l'aide de fichiers espions qui notent l'activité de chaque tâche et en particulier des choix réalisés par l'utilisateur. Un questionnaire à chaud réalisé à la fin du scénario complète ces observations.

II.2.2 Scénario

Un scénario au déroulement réaliste a été mis au point en fonction de l'environnement disponible et des capacités de la machine. Il est composé de cinq phases. La première et la quatrième ne sont que des phases transitoires, les autres phases sont des mises en situation qui font apparaître les critères d'évaluation.

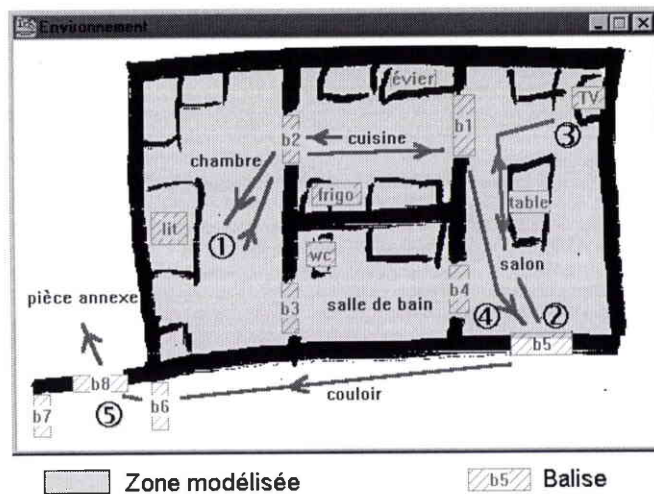


Figure IV.5 : premier scénario

1) Le scénario débute dans la cuisine. La personne doit se rendre dans la chambre en utilisant le mode manuel. Une première difficulté apparaît : le passage de porte en mode manuel.

2) Arrivée dans la chambre, on lui demande de se rendre à l'autre bout de l'appartement, devant la porte d'entrée. Elle doit passer par la cuisine, la porte de la salle de bain étant obstruée. La porte d'entrée n'étant pas un choix disponible, il faut sélectionner le couloir dans la liste de propositions et s'arrêter une fois le but atteint (fig. IV.6). La base de connaissances n'est pas ordonnée et la proposition de se rendre dans le couloir apparaît en cinquième position. Le système décide de se diriger vers la porte de la salle de bain. Les deux contraintes sont le temps nécessaire à la sélection

du choix exigé, puis l'action de refuser la décision de la machine.

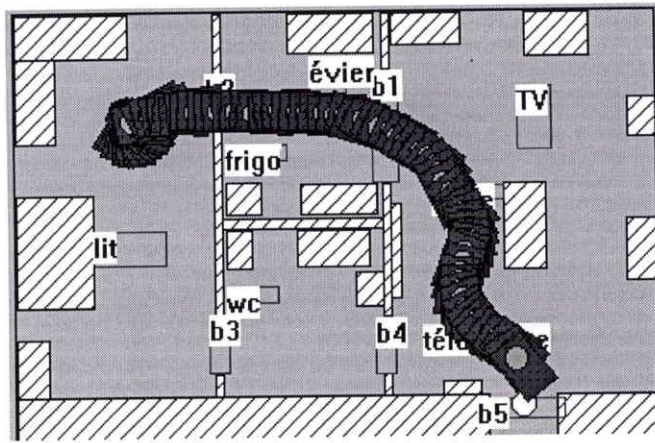


Figure IV.6 : déplacement de la chambre à la porte d'entrée

3) Arrivé devant la porte d'entrée, le pilote doit se rendre devant la télévision. Le système planifie localement une trajectoire non optimale (fig. IV.7) dont un point de passage est trop proche du canapé. Au cours du déplacement, et en fonction de sa perception, soit le fauteuil considère que le point n'est pas accessible et il décide de s'arrêter, soit il se trouve en situation d'échec face au canapé. L'utilisateur doit alors réitérer sa demande.

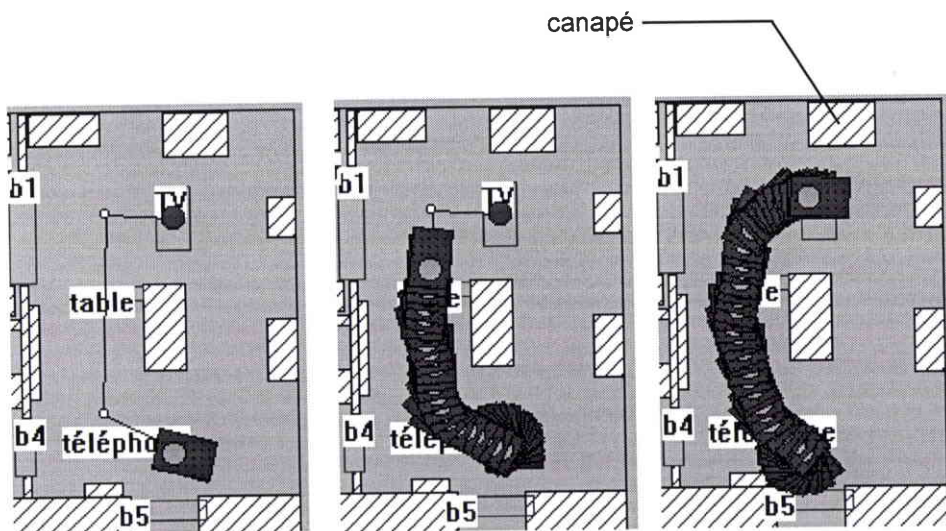


Figure IV.7 : trajectoire planifiée puis réalisée

4) L'utilisateur doit ensuite se rendre au téléphone, puis dans le couloir. Ces étapes de transition se déroulent sans contraintes particulières.

5) Dans le couloir, il est demandé à l'utilisateur de se rendre jusqu'à la pièce annexe en

“suivant un mur”, sans que ce mode n’ait été présenté au cours de l’apprentissage. L’utilisateur doit utiliser ce mode jusqu’à la pièce annexe puis revenir à la porte d’entrée.

Le retour de la porte d’entrée jusqu’au point de départ permettra au pilote de découvrir les capacités du mode de contournement d’obstacles qui sera plus particulièrement utilisé dans la seconde série d’essais.

II.3 EVALUATION DE L’ASSISTANCE

La première série d’essais permet d’analyser quelques éléments de la coopération entre l’homme et la machine. En effet, le dialogue réalisé fait apparaître une aide à la décision au cours d’un mode automatique, par exemple pour sélectionner un but accessible, ou en informant l’utilisateur de la direction du déplacement planifié. La possibilité de pouvoir rapidement et facilement réaliser un suivi de mur dans un couloir apporte une aide au choix du mode de commande. Ces aides sont cependant statiques puisqu’elles ne dépendent que du lieu d’évolution. La deuxième série d’essais a pour objectif d’évaluer les capacités de l’architecture à apporter une assistance dynamique. Cette dernière dépend des conditions d’évolution. De la même façon que pour la première série d’essais, ces conditions sont fixées par un scénario.

II.3.1 Critères d’évaluation

Deux critères vont évaluer la qualité de l’assistance proposée :

- le nombre de propositions émises au cours du scénario,
- l’adéquation de la proposition à l’évènement.

De la même façon que pour la première série d’essais, ces données seront fournies par les fichiers espions et par observation.

II.3.2 Scénario

Les propositions d’assistance n’étant inférées qu’en fonction du type de déplacement accompli en mode manuel par le pilote, le scénario va comporter trois phases :

- un déplacement en mode manuel dans un espace non encombré, le système ne doit

alors pas proposer d'assistance,

- un déplacement dans un espace encombré nécessitant beaucoup de manoeuvres de la part de l'utilisateur,
- un déplacement dans un espace où l'utilisation du mode manuel n'est pas le meilleur choix.

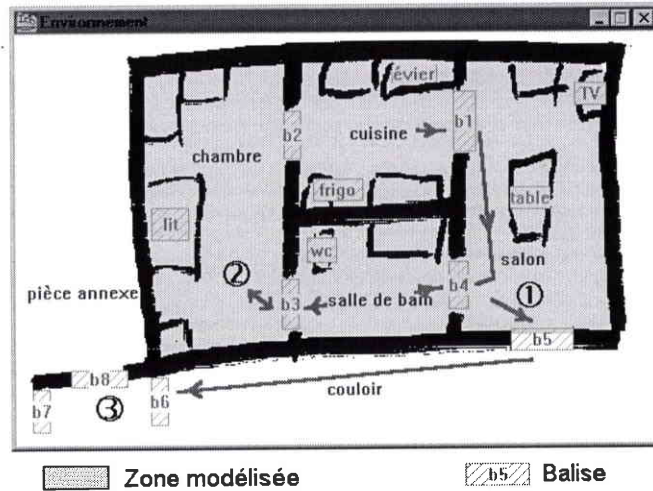


Figure IV.8 : second scénario

1) Le scénario (fig. IV.8) débute dans la cuisine et la personne peut sélectionner une aide au déplacement uniquement lorsque celle-ci a été proposée par le système. Dans un premier temps, elle doit se rendre dans le salon jusqu'au téléphone. L'espace d'évolution est dégagé.

2) A partir du salon, elle doit traverser la salle de bain pour se rendre dans la chambre. Des obstacles non modélisés encombrent le passage. Si un mode contournement a été enclenché, il est désactivé pour réaliser le même chemin en sens inverse (fig. IV.9).

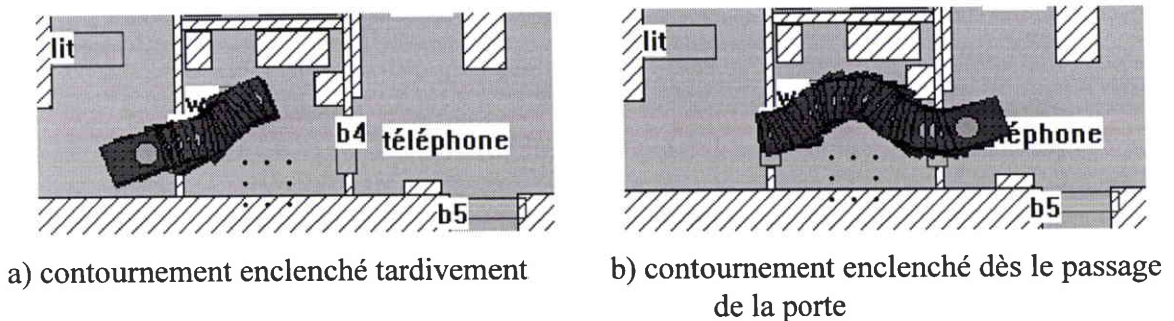


Figure IV.9 : déplacements dans une zone encombrée
en utilisant le contournement d'obstacles

3) L'utilisateur doit ensuite se rendre dans le couloir, d'où il se dirige vers la pièce annexe. Il continue pour cela à utiliser le mode contournement d'obstacles.

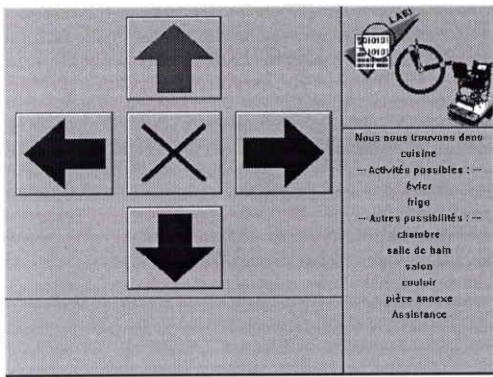
III RESULTATS

III.1 PHASE PRELIMINAIRE

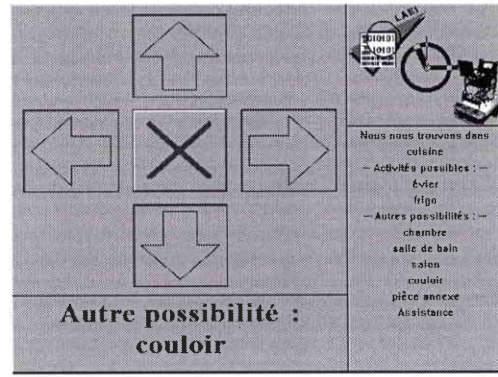
Les essais ont débuté par une première phase de mise au point, dans le but de déboguer les modules utilisés et d'améliorer la convivialité de l'interface.

Les adaptations de l'interface ont porté sur trois points :

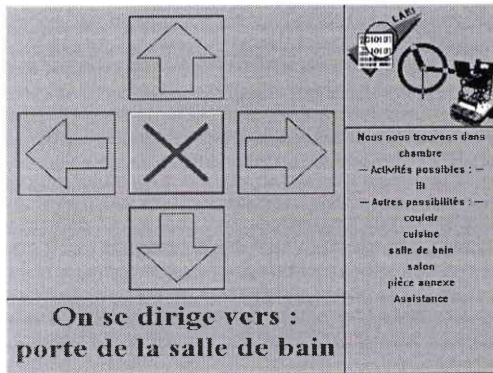
- disparition des informations inutiles, bandeaux et menus, qui gênent inutilement la lecture de l'interface (fig. IV.10),
- modification des pages écrans de façon à garder un caractère iconographique uniforme centré autour de l'utilisation des flèches de direction et de la croix de sélection (fig. IV.10.a-e). Cette uniformité doit apporter une lecture plus aisée des informations de la tâche de communication.
- redéfinition des termes lors du changement de direction proposée et de la proposition d'assistance. La phrase positive "prendre une autre direction" (fig IV.10.g) est plus facilement abordable qu'une phrase négative comme "ne pas se diriger vers ...". De façon similaire la proposition d'assistance sous la forme "assistance proposée : contournement" est plus explicite. L'assistance proposée est l'assistance la plus probable située en tête de la liste des propositions.



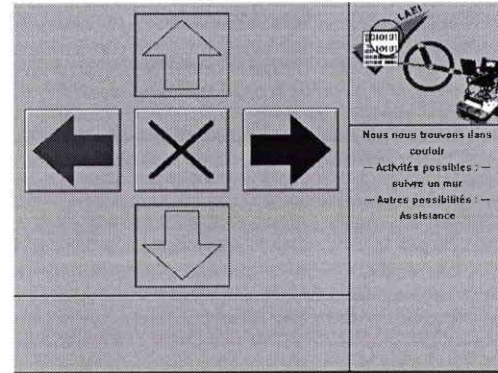
a) mode manuel



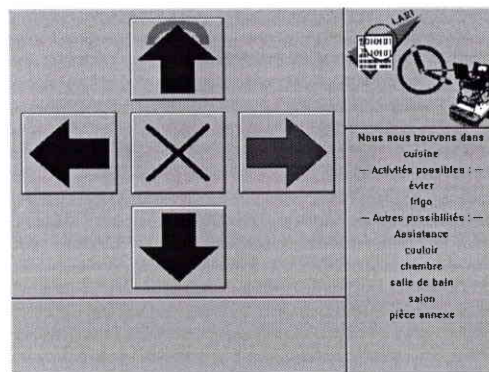
b) sélection d'un choix



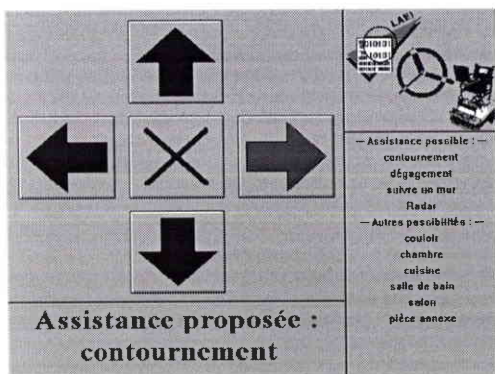
c) mode automatique



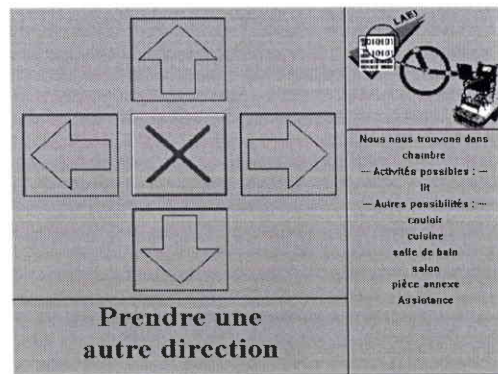
d) suivi de mur



e) contournement d'obstacles



f) proposition d'assistance



g) changement de direction

Figure IV.10 : adaptations de l'interface

III.2 ANALYSE DES RESULTATS

III.2.1 Introduction

- Pendant deux mois douze utilisateurs ont réalisés les deux scénarios exigés. Les trois premiers utilisateurs étaient familiers de l’application et avaient déjà participé à l’évaluation des modes de commande. Ils étaient par contre peu familiers de la nouvelle interface et ont ainsi contribué à la première phase de mise au point. Trois autres utilisateurs ont une formation en automatique mais ne sont pas concernés par l’application. Les six derniers (trois hommes, trois femmes) découvrent l’application et n’ont pas de formation scientifique ou liée à l’informatique. Ces trois populations sont respectivement appelées : les “Habituéés”, les “Techniciens” et les “Non-techniciens”.
- Les fichiers espions (fig. IV.11) où chaque tâche enregistre les données observables, fournissent un complément d’information aux observations qualitatives discutées ci-dessous.

<pre>[Utilisateur] Nom=***** Date=Thursday 21/03/96 16:21:46 [Superviseur] -Choix 1=16:23:34 couloir 14(s) As 1 // 14 s pour sélectionner le choix, // 1 proposition d'assistance refus 16:23:52=porte de la salle de bain 1(s) As 1 arret 16:25:16=salon 4(s) As 1 -Choix 2=16:25:33 TV 1(s) As 1 arret 16:26:28=salon 0(s) As 1 -Choix 3=16:26:33 TV 0(s) As 1 [Navigation] -Traj 1=suivi 5 (16:23:52) durée 1(s) // 5 points planifiés, fin de la trajectoire, durée conf 1=0 N 0 // critère de confiance -Traj 2=suivi 9 (16:25:15) durée 81(s) conf 2=100 N 21 -Traj 3=suivi 3 (16:26:28) durée 54(s) conf 3=100 N 30 -Traj 4=suivi 1 (16:26:55) durée 20(s) conf 4=74 N 1</pre>	<pre>[Interface] Nb actions=63 Nb inco type Dépl=2 Nb inco temp Dépl=2 Nb err valid=1 Nb err Mode=3 Prop Assist=4 >16:22:8=Manoeuvres As1 (typ0 temp1) // 1 proposition d'assistance, // erreur temporelle de déplacement enreg 16:25:20=7 (ma4:dr1:ar0:ga2) // 7 manoeuvres : // 4 marches avant, 1 rotation à droite, 2 à gauche ->16:23:34=--Action 1 // 1ère action autre qu'un mode manuel Fin 16:25:20=durée 106(s) (Nb 5) // 5 validations // (X, choix, arret, autre direction, arret) ->16:25:33=--Action 2 Fin 16:26:29=durée 55(s) (Nb 3) >16:26:30=Manoeuvres As1 (typ0 temp1) enreg 16:26:55=1 (ma0:dr0:ar1:ga0) ->16:26:33=--Action 3 Fin 16:26:55=durée 21(s) (Nb 2)</pre>
---	---

Figure IV.11 : exemple de fichier espion

- Seuls les critères évaluant la performance de l’utilisateur sont significatifs. En effet, les

critères de confort et de confiance sont sensiblement identiques pour tous les utilisateurs puisque les scénarios imposent des parcours similaires et proches des obstacles. Le nombre d’actions nécessaires à la réalisation d’un scénario est représentatif de la facilité d’utilisation du système. Cette capacité est confirmée par les critères d’incohérence de validation et de déplacement qui déterminent la performance de la personne.

Les déplacements successifs en sens opposés créent une incohérence de type de déplacement et l’incohérence temporelle de déplacement est obtenue par une suite de courts déplacements.

Le critère d’incohérence de validation est composé des erreurs de validation et de mode. L’erreur de validation est observée lorsqu’une validation est précédée de la très brève sélection d’un choix proche. L’erreur de mode provient d’une requête de dialogue avec le système qui n’est pas suivie de la validation d’une proposition.

III.2.2 Premier scénario

L’utilisation intensive du mode automatique, imposée par le premier scénario, demandait peu d’efforts de la part du pilote. Les valeurs des critères concernant sa performance doivent alors être faibles.

	Nombre d'actions			Critère d'incohérence de validation		Critère d'incohérence de déplacement
	30<Nb<60	60<Nb<90	90<Nb	erreurs de validation	erreurs de mode	propositions d'assistance
H / 3	3			1	0	4
T / 3		2	1 (16 err. de valid.)	1 {+16}	1	9
N / 6	1	5		14	6	10

Tableau IV.1 : performances des utilisateurs au cours du premier scénario

Les résultats obtenus (tab. IV.1) montrent que les critères d'incohérence de validation et de déplacement sont très faibles quel que soit le niveau d'apprentissage du pilote. Ces valeurs démontrent que les utilisateurs n'ont pas eu de difficultés majeures à utiliser le système.

Les écarts entre les différentes populations proviennent essentiellement de la stratégie de déplacement mise en oeuvre au cours de l'utilisation du mode manuel. Les habitués se déplacent en "escalier" alors que les non-habitués cherchent à réaliser des déplacements naturels nécessitant plus de manoeuvres pour lisser les trajectoires.

III.2.3 Second scénario

Le second scénario est destiné à évaluer les propositions d'assistance. Les utilisateurs sont confrontés à quatre situations difficiles nécessitant une assistance au déplacement, deux passages étroits et deux déplacements en mode manuel dans le couloir.

Le tableau ci-dessous (tab. IV.2) présente les résultats obtenus.

	Nombre d'actions		Critère d'incohérence de validation				Critère d'incohérence de déplacement		
			Nombre d'erreurs de validation			Somme des erreurs de mode	Nombre de propositions d'assistance		
	60<n<100	100<n	n<20	20<n<30	30<n		n<20	20<n<30	30<n
H / 3	3		2	1		1		3	
T / 3	3		3			1	1	2	
N / 6	1	5	3	2	1	3	1	2	3

Tableau IV.2 : performances des utilisateurs et propositions d'assistances
au cours du second scénario

Les erreurs de validation sont plus nombreuses qu'au cours du premier scénario. Ceci se justifie par l'utilisation du mode manuel pour réaliser des manoeuvres complexes. Par contre, les erreurs de mode sont toujours très faibles. Les utilisateurs n'ont donc pas eu de difficultés à utiliser le système.

Le nombre de propositions d'assistance est nettement plus élevé que les quatre propositions nécessaires. En réalité, la plupart des propositions d'assistance sont dues à des erreurs temporelles de déplacement et sont réalisées dans un court laps de temps correspondant à l'une des quatre situations difficiles (fig. IV.12).

```
>17:41:16=Manoeuvres As16 (typ0 temp16)
  enreg 17:41:58=7 (ma4:dr0:ar0:ga3)
>17:41:59=Manoeuvres As17 (typ0 temp17)
  enreg 17:41:59=1 (ma0:dr1:ar0:ga0)
>17:42:3=Manoeuvres As18 (typ0 temp18)
  enreg 17:42:4=1 (ma0:dr1:ar0:ga0)
>17:42:8=Manoeuvres As19 (typ0 temp19)
  enreg 17:42:15=2 (ma1:dr1:ar0:ga0)
>17:42:16=Manoeuvres As20 (typ0 temp20)
  enreg 17:42:16=1 (ma0:dr0:ar1:ga0)
>17:42:20=Manoeuvres As21 (typ0 temp21)
  enreg 17:42:23=2 (ma0:dr2:ar0:ga0)
->17:42:31=--Action (contournement)
```

sept manoeuvres suivies de six propositions en trente secondes

Figure IV.12 : propositions d'assistances

Les observations montrent que les propositions ont été réalisées au bon moment et que l'accumulation des propositions est perçue par le pilote comme un maintien de cette proposition. Ce fait est confirmé par la moyenne des manoeuvres réalisées sans proposition d'assistance au cours des trois déplacements ne présentant pas de difficulté :

cuisine - porte de la salle de bain : 12,7 (estimation de l'écart type : 4,7)

porte de la salle de bain - couloir : 11,8 (estimation de l'écart type : 6,9)

couloir - cuisine : 9,4 (estimation de l'écart type : 4,4)

IV DISCUSSION

IV.1 INTRODUCTION

Cette discussion est menée à partir des observations qualitatives réalisées au cours des essais des douze pilotes du fauteuil robotisé VAHM. Elle concerne plus particulièrement deux concepts actuellement intégrés dans l'architecture de commande qui sont :

- les capacités de déplacement du fauteuil robotisé,
- la coopération entre l'homme et la machine.

Si les capacités de déplacement n'ont globalement pas changé depuis l'étude réalisée par P. Pino [PINO 95a] sur l'évaluation des modes de fonctionnement, elles sont ici plus particulièrement présentées sous l'éclairage de leurs réponses aux attentes de l'utilisateur.

La discussion qui suit va mettre en valeur ces capacités et les améliorations envisageables dans le cadre de l'architecture de commande du système. Cette discussion se conclura sur l'aspect coopération homme-machine.

IV.2 CAPACITES DE DEPLACEMENT

IV.2.1 Perception

La perception des obstacles est un élément fondamental du déplacement. Au cours des essais très peu de collisions ont été observées malgré la lenteur d'acquisition des données fournies par les capteurs à ultrasons (cf §II.1.2). Ceci nous permet de valider l'utilisation de contrôles d'exécution décentralisés qui permettent d'implanter une perception spécifiquement dédiée à la navigation et qui nécessite un traitement minimal, et donc rapide, des données.

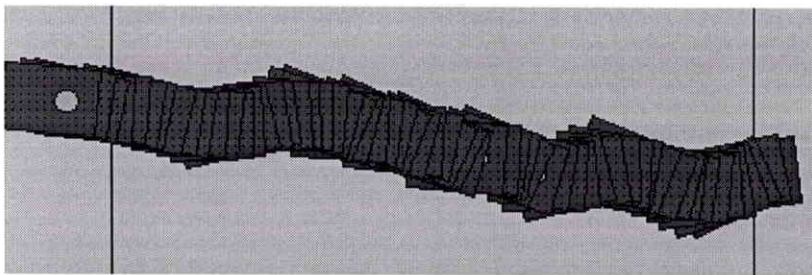
Cependant, si les effets de "cross-talk", fournissant des valeurs erronées, ne gênent pas le déplacement en raison de leurs apparitions aléatoires, la réaction immédiate à ces événements provoque de légères oscillations. Cet effet de chaloupement n'est généralement pas gênant pour le

confort physique de l'utilisateur, mais diminue plutôt son confort psychologique en raison du caractère apparemment injustifié de ces mouvements. Un traitement plus rapide des données ultrasonores permettrait d'implanter un filtrage élémentaire de ces données parasites.

IV.2.2 Primitives semi-automatiques

Les primitives semi-automatiques, comme le contournement d'obstacles et le suivi de mur, ont déjà prouvé leur efficacité et leur utilité. Cependant elles imposent à l'utilisateur des contraintes qui peuvent être diminuées en utilisant les capacités de l'architecture de commande.

Actuellement, pour utiliser un suivi de mur l'utilisateur doit être proche d'un mur et désigner celui qu'il convient de suivre (droite ou gauche). Dès que les modules de la tâche de perception le permettront, cette tâche sera dévolue au système. Le fauteuil se déplacera en contournement d'obstacles jusqu'à ce qu'un mur soit détecté. La même combinaison "suivi de mur" / "contournement d'obstacles" peut être envisagée lors d'un contournement d'obstacles inconfortable le long d'un mur. La figure IV.13 ci-dessous illustre l'inconfort occasionné par les changements de direction dûs aux tentatives d'évitement de collision lors de l'utilisation du contournement d'obstacles dans un couloir.



a) couloir parcouru avec la primitive contournement d'obstacles



b) couloir parcouru avec la primitive suivi de mur

Figure IV.13 : confort de deux primitives semi-automatiques dans un couloir

L'efficacité du contournement d'obstacles est en fait fortement dépendante de l'orientation initiale. Si l'utilisateur n'intervient pas, ce type de déplacement en marche avant conduit à une situation de blocage lorsque le fauteuil ne peut plus contourner les obstacles. Une solution envisageable est de modifier cette orientation au cours du déplacement en fonction de l'espace libre ou de la détection d'un mur. Le fauteuil est alors asservi à l'environnement perçu.

Une dernière solution en cas de blocage est l'utilisation d'une primitive du type "dégagement", c'est à dire réaliser une marche arrière jusqu'à perception d'un espace libre. Il faut alors mieux prendre en compte le risque de collision en marche arrière en augmentant les capacités de perception à l'arrière du fauteuil par l'ajout de capteurs à ultrasons ou de contact.

IV.2.3 Mode automatique

Les déplacements en mode automatique imposés par le premier scénario ont été exécutés avec succès. Cependant ces déplacements ne pouvaient se réaliser que sous certaines contraintes en raison de la planification sommaire utilisée. Le point de départ devait permettre une rotation pure initiale et le point d'arrivée être accessible en se déplaçant uniquement en marche avant.

Si tous les utilisateurs ont apprécié le confort de ce mode où il suffit seulement de deux actions de validation pour atteindre le but désiré, certains ont été dérangés par les trajectoires réalisées. Celles-ci, planifiées par le système, présentent un aspect peu naturel qui ne permet pas à l'utilisateur d'anticiper les déplacements du fauteuil. Ainsi, dans un large espace libre, alors que l'utilisateur souhaite traverser cet espace en diagonale et donc réaliser une rotation au plus tôt, le système planifie un chemin au milieu de cet espace. La rotation tardive qui suit fait douter l'utilisateur des actions du fauteuil.

Une planification pour un véhicule non-holonyme intégrant des possibilités de manoeuvre, comme des marches arrières sur de courtes distances et des rotation pures, et prenant en compte des critères de déplacement naturel permettrait d'obtenir un mode automatique plus confortable psychologiquement.

IV.3 COOPERATION HOMME-MACHINE

Les possibilités de coopération entre l'homme et la machine sont le second élément apparaissant au cours de ces essais et plus particulièrement à travers les aides offertes par la machine. Celles-ci se décomposent en aides à l'action, aides à l'information et aides à la décision.

IV.3.1 Aides à l'action

L'essentiel des aides à l'action proposées par le fauteuil robotisé VAHM apparaît dans ses capacités de déplacement présentées précédemment. Nous avons vu que ces capacités sont actuellement limitées. En effet, s'il est envisageable d'améliorer les modules utilisés, il est cependant impossible d'apporter l'assurance d'un comportement global parfait et totalement autonome en raison des conditions d'utilisation et des capteurs utilisés. Le pilote sera toujours confronté à des situations où son intervention sera requise.

Le premier scénario présente deux difficultés nécessitant l'intervention du pilote :

- Une planification globale non souhaitée : le fauteuil se déplace vers la porte de la salle de bain alors que le pilote veut passer par la porte de la cuisine. Celui-ci doit alors indiquer à la machine qu'il ne voulait pas se diriger dans cette direction. Plusieurs essais ont été nécessaires avant de trouver une expression commune permettant d'exprimer clairement pour la plupart des utilisateurs cette action. La meilleure solution semble être la proposition "prendre une autre direction" lorsque l'utilisateur stoppe le mouvement.
- Une planification locale erronée menant à une situation de blocage lorsque le fauteuil doit se rendre de la porte d'entrée à la télévision. L'utilisateur doit alors de nouveau sélectionner son choix pour que la seconde planification le conduise à son but. Le choix initial étant placé en tête de la liste des propositions, la seconde sélection est très rapide (moins de une seconde) et le désagrément minime.

Le second scénario impose deux types de déplacements pénibles :

- Un déplacement en mode manuel et évitement de contact dans un espace d'évolution restreint. Cet espace est d'autant plus réduit que les capteurs gênent le dépla-

cement en raison de l'importance de leur zone aveugle et des phénomènes de “cross-talk”. Un grand nombre de manoeuvres est alors nécessaire pour accomplir la tâche. Ces manoeuvres révélatrices d'une situation difficile provoquent une proposition d'assistance de la part de la machine.

- L'utilisation d'un mode manuel dans un couloir impose de bien choisir son orientation initiale pour que le trajet parcouru en marche avant sans recalage sur la trajectoire soit le plus long possible. Les manoeuvres nécessaires à cette sélection provoquent généralement une proposition d'assistance.

L'utilisation d'un ordinateur embarqué permet également d'implanter facilement des logiciels ou des modules supplémentaires afin de réaliser des contrôles de l'environnement. La commande à distance d'interrupteurs à l'aide des cartes d'entrée-sortie standard et de dispositifs d'émission-réception à infrarouges ou à hyperfréquences sont des processus couramment utilisés.

IV.3.2 Aides à la décision

Les aides à la décision apparaissent à l'utilisateur sous deux formes, lorsqu'il désigne le but ou la tâche à accomplir et lorsque le système propose de l'assistance.

La gestion par le système d'une liste des activités possibles apporte implicitement à l'utilisateur une aide à la planification et une aide à la décision. Le premier scénario a permis de valider ce fait. En effet, malgré une courte période d'apprentissage, tous les utilisateurs ont pu accomplir les objectifs fixés par le scénario qui leur était communiqué au fur et à mesure de sa réalisation. Ainsi, lorsque le pilote se trouve dans le couloir et qu'on lui demande de suivre un mur, il sélectionne sans difficulté ce choix qu'il découvre dans la liste des propositions alors que ce module n'a pas été mentionné au cours de l'apprentissage. Il faut cependant lui indiquer qu'il faut ensuite désigner le mur à suivre. De la même façon lui demander de se rendre au téléphone ou à la télévision ne demande que très peu de réflexion de la part de l'utilisateur puisque le système peut le lui proposer.

Le second scénario a permis d'évaluer l'adéquation des propositions d'assistance et donc de changement de mode de commande en fonction de la situation. Du fait de l'incomplétude actuelle du système il n'a pas été possible de réaliser des essais plus longs qui auraient permis d'évaluer la

pertinence des propositions réalisées. En effet, ces propositions d'assistance tenaient essentiellement compte des actions du pilote grâce à l'utilisation des critères d'incohérence temporelle et de type de déplacement. Si les résultats sont globalement positifs, les propositions s'effectuent au bon moment, l'assistance proposée pourrait être affinée par la prise en compte d'information plus précises sur l'environnement comme par exemple la présence d'un mur.

IV.3.3 Aide à l'information

La dernière aide apportée par le système est une aide à l'information. Elle permet dans un premier temps d'apprécier l'état global du système. Par exemple, deux essais ont été perturbés par une mauvaise initialisation de l'odomètre qui a faussé la localisation et de ce fait empêché l'utilisation d'un mode automatique. Le pilote s'aperçoit de la défaillance du système lorsque celui-ci lui indique qu'il se trouve dans la cuisine alors que le fauteuil est dans la chambre. Le pilote ne prend plus alors en compte les propositions du système mais il en reste toujours maître en utilisant uniquement les modes de commande manuelle et semi-automatique. Au cours d'un fonctionnement normal, l'indication de la direction choisie qui leur permettait d'appréhender les décisions du système a été appréciée par les utilisateurs. Ils ont ainsi pu l'utiliser pour influencer la direction planifiée, par exemple en refusant de passer par la porte de la salle de bain, mais aussi pour être rassuré sur le déplacement en cours lorsque la trajectoire était perturbée par des obstacles ou peu naturelle.

Il apparaît nécessaire d'implanter des informations expliquant les situations de blocage, par exemple lorsque le fauteuil ne peut plus contourner des obstacles ou lorsqu'un obstacle détecté par le capteur arrière gauche empêche une rotation pure à droite.

IV.4 CONCLUSION

Cette série d'essais a permis de réaliser une première évaluation de l'architecture proposée pour le fauteuil robotisé VAHM. Bien que le système testé était incomplet, les résultats obtenus mettent en valeur les possibilités de coopération entre l'homme et la machine. Cette coopération est indispensable à ce type d'application.

V PERSPECTIVES

A court terme trois objectifs apparus dans la discussion précédente sont prioritaires :

- améliorer la perception,
- apporter une aide à la planification des manoeuvres,
- mieux gérer les situations de blocage, soit par l'apport d'une justification de l'échec, soit en demandant de l'assistance à l'utilisateur.

En fonction des capacités de perception, de nouvelles primitives peuvent être envisagées, par exemple la combinaison du contournement d'obstacles et du suivi de mur. Il serait également possible de créer une primitive intitulée "passage de porte" en associant au contournement d'obstacles une planification de manoeuvres à partir d'une carte locale créée dynamiquement. Pour ne pas noyer l'utilisateur sous le nombre des modes de fonctionnement, la commande de ces nouvelles primitives peut être réalisée de façon similaire à la commande actuellement intitulée "dégagement". Cette dernière masque en réalité une combinaison du module de détection d'espace libre et du module de contournement d'obstacles.

Il s'agit ensuite de réaliser le transfert technologique sur un fauteuil roulant électrique standard. En effet, si le prototype du robot VAHM est satisfaisant pour évaluer les algorithmes développés et mettre en situation des pilotes occasionnels, l'intégration de nouveaux modules de plus en plus sophistiqués nécessite des essais de longue durée laissant beaucoup d'autonomie au pilote. De plus, seules des personnes handicapées peuvent évaluer l'acceptabilité globale du système en l'utilisant dans des conditions réelles.

Dans le but d'une intégration à un fauteuil standard, une ceinture de capteurs à ultrasons est en cours de développement. A partir d'une variante de l'algorithme "EERUF" (Chap.II, §II.2) elle permet d'améliorer la qualité des données ultrasonores en diminuant les effets de "cross-talk" et le temps d'acquisition. D'autre part la zone aveugle est réduite de moitié.

Un dernier objectif essentiel est la configuration du système. En effet, pour qu'un fauteuil roulant robotisé soit utilisé par le personnel médical, il faut limiter les contraintes de configuration.

Pour cela le système devra à terme être capable de réaliser l'apprentissage de son environnement d'évolution. Le personnel médical ne sera sollicité que pour fournir les informations symboliques non déductibles par le système comme la dénomination des pièces ou des points de passage alors que les modèles locaux doivent être acquis dynamiquement par le robot.

VI CONCLUSION

Ce chapitre a permis de tester l'architecture coopérative proposée pour le fauteuil robotisé VAHM. Douze personnes valides ont réalisé des essais dans des conditions proches des conditions réelles d'utilisation d'un fauteuil robotisé. Malgré les limites actuelles du système, ces essais démontrent la possibilité et l'intérêt d'intégrer une coopération entre l'homme et la machine. L'architecture proposée permet de réaliser cette coopération en gérant différents niveaux de dialogue entre l'homme et la machine pour répartir au mieux les tâches de décision.

CONCLUSION

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté l'architecture de commande développée pour le fauteuil robotisé VAHM qui a pour objectif de répondre aux besoins de mobilité des personnes souffrant d'un important handicap moteur en implantant des capacités de mouvement autonome sur un fauteuil roulant électrique. Cette architecture est dite coopérative car elle vise à mettre en oeuvre une collaboration entre l'homme et la machine où l'homme apporte ses facultés cognitives et la machine ses capacités mécaniques ainsi que ses connaissances éventuelles sur l'environnement d'évolution.

Le premier chapitre a permis de présenter deux domaines indispensables au développement d'un fauteuil roulant automatisé : la robotique mobile et la robotique de coopération. Les travaux effectués en robotique mobile proposent diverses approches pour réaliser la commande d'un robot mobile autonome. La robotique de coopération étudie plus particulièrement les relations entre l'homme et la machine. Au cours du deuxième chapitre, un état de l'art en robotique mobile médicale a fait apparaître l'importance croissante de ce domaine. On a aussi pu constater que très souvent le problème du rôle de l'homme dans les systèmes réalisés était éludé. Les solutions proposées dans le cadre du projet VAHM ont ensuite été relatées ainsi que les principes à la base de la conception d'un premier prototype.

Des essais effectués avec des personnes handicapées en centre de réadaptation ont permis de réaliser une première évaluation clinique du système. Ces essais ont démontré l'intérêt d'une telle application pour des personnes souffrant d'un fort handicap moteur. Par contre, pour certaines personnes, il est apparu nécessaire d'implanter non-seulement une aide au déplacement mais également une aide à la décision relative au choix du meilleur mode de commande. A cet effet, l'architecture de commande proposée, présentée au troisième chapitre, a pour objectif d'intégrer l'homme dans la boucle de commande de la machine. Elle est basée sur la nature des informations traitées par le système et à destination de l'utilisateur. Cette architecture de commande est composée essentiellement de niveaux hiérarchiques respectant l'abstraction des données et de contrôles d'exécution décentralisés apportant robustesse et modularité au système. A partir de la gestion de l'interface et des déplacements du robot, elle apporte des aides à l'action, à l'information et à la décision.

Le dernier chapitre décrit l'évaluation de deux nouveaux concepts instanciés par cette architecture : la communication entre l'homme et la machine et l'aide à la décision du choix du meilleur mode de commande. Les essais réalisés par douze personnes valides ont permis de valider les possibilités offertes par ces nouvelles fonctionnalités.

Les perspectives à court terme des travaux énoncés résident dans un transfert technologique de l'application robotisée à un fauteuil roulant électrique dans le but de valider cliniquement le système homme-machine dans des conditions se rapprochant de son utilisation finale. Concernant les perspectives à plus long terme, la structure de l'architecture est ouverte aux évolutions futures en permettant l'intégration de nouveaux modules dans les tâches existantes ou par l'ajout de nouvelles tâches et de nouvelles règles. Ces capacités seront particulièrement mises à contribution dans le cadre de l'apprentissage automatique de l'environnement d'évolution. Cet apprentissage nécessitera l'acquisition et le traitement des connaissances destinées à créer les modèles locaux et symboliques.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AGOS 92] AGOSTINI Y.,

“Système d'aide à la localisation et au guidage d'un mobile”, Rapport de D.E.A., Laboratoire LAEI, Université de Metz, 1992.

[ARKI 89] ARKIN R.C.,

“Motor schema-based mobile robot navigation”, Inter. Journal of Robotics Research, 8 (4), 92-112, 1989.

[BELL 93] BELL D.A., LEVINE S. L., KOREN Y., JAROS A., BORENSTEIN J.,

“Shared control of the navchair obstacle avoiding wheelchair”, RESNA, 370-372, 12-17 Juin 1993.

[BELL 94] BELL D.A., BORENSTEIN J., LEVINE S. L., KOREN Y.,

“An assistive navigation system for wheelchairs based upon mobile robot obstacle avoidance”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, California, 2018-2022, 1994.

[BELL 95] BELLON L.,

“Etude du traitement de signal des mesures d'un capteur u.s. en milieu perturbé afin de réaliser le guidage et le pilotage d'un robot mobile”, D.E.A. instrumentation et micro-electronique, L.A.E.I., Université de Metz, 1995.

[BORE 90] BORENSTEIN J., LEVINE S., KOREN Y.,

“The NavChair System - a new concept in intelligent wheelchair control”, CSUN's 5th Annual Conf. on Technology and Persons with Disabilities, Los Angeles, California, March 21-24, 117-124, 1990.

[BORE 91] BORENSTEIN J., KOREN Y.,

“The vector field histogram- fast obstacle avoidance for mobile robot”, IEEE Tran. on Robotics and Automation, vol. 7, n°3, 278-288, June 1991.

[BORE 92] BORENSTEIN J., KOREN Y.,

“Noise rejection for ultrasonic sensors in mobile robot applications”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, 1727-1732, May 1992.

[BOUR 93a] BOURHIS G., PINO P.,

“Man/Machine cooperation for the piloting of an electric wheelchair”. 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, Stockholm, Suède, May 26-28, 1993.

[BOUR 93b] BOURHIS G., MOUMEN K., PINO P., ROHMER S., PRUSKI A.,

“Assisted navigation for a powered wheelchair”. IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., Le Touquet, France, 553-558, Nov. 1993.

[BOUR 96] BOURHIS G., PINO P.,

“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, 7-12, 1996.

[BROO 86] BROOKS R.A.,

“A robust layered control for a mobile robot”, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA (2), 14-23, April 1986.

[BROO 89] BROOKS R.A.,

“A robot that walks : emergent behaviors from a carefully evolved network”, Neural Computation, 1 (2), 253-262, 1989.

[BROO 91] BROOKS R.A.,

“Intelligence without reason”, Proc. of the 1991 Inter. Joint Conf. on A.I., 569-595, 1991.

[BUHL 93] BUHLER C., HUMANN W.,

“Smart wheelchair with high manoeuvrability”, 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, Stockholm, Sweden, May-Juin 1993.

[BUHL 95] BUHLER C., HOELPER R., HOYER H., HUMANN W.,

“Autonomous robot technology for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 14, 213-222, 1995.

[CAST 91] CASTILLO E., EL MHMEDI A., BINDER Z.,

“Une approche d'aide à la planification des tâches en T.A.O.”, IIRIAM - Actes ORIA'91, 299-308, 1991.

[CHAT 81] CHATILA R.G.,

“Système de navigation pour un robot mobile autonome : modélisation et processus décisionnels”, Thèse de l’université Paul Sabatier de Toulouse, 1981.

[CHAT 95] CHATILA R.,

“Deliberation and reactivity in autonomous mobile robots”, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 16, 197-211, 1995.

[CHEN 75] CHENIQUE F.,

“Eléments de logique classique”, Tomes 1 et 2, Dunod, Paris, 1995

[CLEM 91] CLEMENT G., GRAVEZ P., MILLET R.,

“General design of the AMR2 man machine interface”, 1991 International Symposium on Advanced Robot Technology, Tokyo, March 5-7, 1991.

[COIF 95] COIFFET P.,

“Virtual reality systems, a new technique deeply improving robot behavior”, The 3rd French - Israeli Symposium on Robotics, Hertzelia, Israel, 7-16, 22-23 March 1995.

[CONN 88] CONNELL J.H.,

“Navigation by path remembering”, SPIE, Vol. 1007, Mobile Robots III, 383-390, 1988.

[CONN 90] CONNELL J., VIOLA P.

“Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot”, IEEE Conf. on Robotics and Automation Proc., 1118-1121, 1990.

[CONN 92] CONNELL J.H.,

“SSS : a hybrid architecture applied to robot navigation”, Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, 2719-2724, 1992.

[COOP 95] COOPER R.A.,

“Intelligent control of power wheelchairs”, IEEE Engineering in Medicine and Biology, 423-431, July-August 1995.

[CRAI 93] CRAIG I., NISBET P.,

“The smart wheelchair : an augmentative mobility toolkit”, 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, Stockholm, Sweden, 1993.

[CRUB 91] CRUBLE E., FERRANT-CANU N.,

“Pouvoir se déplacer, communiquer, quand le fauteuil roulant électrique permet les

deux". Colloque Communication et nouvelles technologies chez les personnes handicapées et/ou âgées, Lannion, 123-126, 11-12 octobre 1991.

[DETR 92] DETRICHE J.M., GELIN R., PLOIX C.,

"Assisted guidance device for electric wheelchair". Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, 1992.

[DREY 92] DREYFUS H.L.,

"La portée philosophique du connexionisme", Introduction aux sciences cognitives, Folio essai, 352-373, 1992.

[DUPO 84] DUPOURQUE V.,

"Panorama des capteurs de commande pour fauteuils roulants électriques", Jour. de Réadaptation Médicale, n°1, 18-21, 1984.

[ECO 92] ECO U.,

"Le signe", Le Livre de Poche, Librairie Générale Française, Paris, 1992.

[EDMO 80] EDMOND L.D., HAYES-ROTH F., LESSER V.R., READY D.R.,

"The HEARSAY-II speech understanding system : integrating knowledge to resolve uncertainty", Computing Surveys, 12(2), 213-253, June 1980.

[ELFE 83] ELFES A., TALKUDAR S.N.,

"A distributed control system for the C.M.U. Rover", 8th IJCAI, Karlsruhe (FRG), 1983.

[ELFE 86] ELFES A.,

"A distributed control architecture for an autonomous mobile robot", Artificial Intelligence, Vol. 1, n° 2, 99-108, 1986.

[ELLE 87] ELLEN P., THINUS-BLANC C.,

"Cognitive process and spatial orientation in animal and man", Martinus Nijhoff Press, Dordrecht, 1987.

[ERMI 89] ERMINE J.L.,

"Systèmes experts, théorie et pratique", Collection Technique et Documentation, Lavoisier, 1991.

[EVEN 91] EVEN P., FOURNIER R.,

"Interactives geometric description and task specification for intervention telerobotics", IIRIAM - Actes ORIA'91, 163-172, 1991.

[FLEU 96] FLEURY S.,

“Architecture de contrôle distribuée pour robots mobiles autonomes : principes, conception et applications”, Thèse de l’université Paul Sabatier de Toulouse, 1996.

[GAWR 89] GAWRON V.J.,

“A taxonomy of independant variables affecting human performance”, Int. Journal of Man-Machine Studies, n° 31, 643-672, 1989.

[GELI 93] GELIN R., DETRICHE J.M.

“The Sprint of COACH”, IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., Le Touquet, France, Nov. 1993.

[GRUM 93] GRUMBACH A.,

“Genèse du symbole artificiel”, Technique et science informatique, vol. 12, n° 3, 347-369, 1993.

[HABE 95] HABERT O.,

“Modélisation dynamique d’un environnement intérieur pour robot mobile”, Thèse de l’Université de Nancy I, Juin 1995.

[HARM 87] HARMON S.Y.,

“The Ground Surveillance Robot (GSR) : an autonomous vehicle designed to transit unknown terrain”, IEEE Journal of Robotics and Automation, 3(3), June 1987.

[HATO 91] HATON J.P.,

“Le raisonnement en intelligence artificielle”, InterEditions, Paris, 1991.

[HAYE 93] HAYES-ROTH B.,

“A control architecture for intelligent mobile robots”, Technical Report KSL-93-09, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 1993.

[HENR 94] HENRION J.

“Système de capteurs infrarouges pour la localisation et la navigation d’un robot mobile”, Rapport de D.E.A. Prod. Auto., L.A.E.I., Université de Metz, 1994.

[HIRZ 93] HIRZINGER G., BRUNNER B., DIETRICH J., HEINDL J.,

“Sensor-based space robotics - ROTEX and its telerobotic features”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, n° 5, 649-663, October 1993.

[HORN 94] HORN O., RIEHMER G. ,

“Dynamic location method for the V.A.H.M.”, Int. Symp. on Signal Processing, Robotics and Neural Networks, Lille, France, 1994.

[HOYE 94] HOYER H., HOELPER R.,

“Intelligent omnidirectionnal wheelchair with a flexible configurable functionality”, RESNA 14th Annual Conf., 353-355, 1994.

[JAFF 92] JAFFE D.L., SABELMAN G.E., CURTIS G.E.,

“Responsive environment project - Transparent navigation assistant”, RESNA 92, 176-178, 1992.

[JARO 93] JAROS L.A., BELL D.A., LEVINE S.P., BORENSTEIN J., KOREN Y.,

“Navchair : Design of Assistive Navigation System for Wheelchairs”, RESNA 13th Annual Conf., Washington DC, 379-381, 1993.

[JOHA 82] JOHANNSEN G.,

“Man-machine systems : introduction and background”, IFAC Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Syst., Baden-Baden, RFA, xiii-xvii, 1982.

[JOHA 94] JOHANNSEN G., LEVIS A.H., STASSEN H.G.,

“Theoretical problems in man-machine systems and their experimental validation”, Automatica, Vol 30, n° 2, 217-231, 1994.

[JOLL 91] JOLLY D., DESDOT A.M., WAWAK F.,

“Choix de modes de conduite en téléopération”, Revue d'Automatique et de Productique Appliquées, vol. 4, n° 4, 435-445, 1991.

[KATE 95] KATEVAS N., TZAFESTAS S., BISHOP J.M., RABISCHONG P.,

KOUTSOURIS D.,

“SENARIO - The autonomous mobile robotics technology for the locomotion handicap: operational & technical issues”, Technology Initiative for the Disabled and Elderly People (TIDE), 1995.

[LAUM 84] LAUMOND J-P.,

“Utilisation des graphes planaires pour l'apprentissage de la structure de l'espace d'évolution d'un robot mobile”, Thèse de l'université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.

[LEAS 88] LÉA SOMBÉ,

“Inférences non-classiques en intelligence artificielle”, Actes des 2èmes journées du GRECO-PRC IA, Teknea, Toulouse, 1988.

[LEE 93] LEE S.,

“Intelligent sensing and control for advanced teleoperation”, IEEE Control Systems, 19-28, June 1993.

[LEGR 87] LEGRAND C., CARDINAL G.,

“Evaluation des aides techniques de communication pour les utilisateurs infirmes moteurs cérébraux”, Echange et Santé, Bulletin de liaison et de documentation du ministère des affaires sociales et de l’emploi, n°4849, Avril-Sept. 1987.

[LEVI 89] LEVINE S.P., BORENSTEIN J., PILUTTI T.E., RASCHKE U.,

“Semi-autonomous mobile robot platform for rehabilitation and other applications”, 2nd Workshop on Medical and Healthcare Robotics, Newcastle-upon-Tyne, 15-18, 1989.

[LUMI 90] LUMIA R., FIALA J., WAVERING A.,

“The Nasrem robot control system and testbed”, International Journal of Robotics and Automation - IASTED, vol. 5, 20-26, 1990.

[MADA 86] MADARASZ R.L., HEINY L.C., CROMP R.F, MAZUR N.M.,

“The design of an autonomous vehicle for the disabled”, IEEE Jour. of Robotics and Automation, vol. RA-2, n°3, pp.117-126, Sept. 1986.

[MATA 92] MATARIC M.J.,

“Integration of representation into goal-driven behavior-based robots”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 8 (3), 304-312, June 1992.

[MILL 88] MILLOT P.,

“Supervision des procédés automatisés et ergonomie”, Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, Hermès, Paris, 1988.

[MILL 91] MILLOT P., ROUSSILLON E.,

“Man-machine cooperation in telerobotics : problematics and methodologies”, 2nd France Israel Symp. on Rob., INSTN, Gif sur Yvette, France, April 1991.

[MOUM 94] MOUMEN K., PINO P.,

“Unknown obstacle avoidance and planned or deduced trajectories following”, European Robotics and Intelligent System Conf., Malaga, Espagne, 1829-1840, August 22-25 1994.

[MOUM 94a] MOUMEN K.,

“Projet V.A.H.M. : commande de la mobilité”, Rapport interne du laboratoire LAEI, Université de Metz, Nov. 1994.

[NELS 90] NELSON P.J., VERBURG G, GIBNEY D., KORBA L.,

“The smart wheelchair. A discussion of the promises and pitfalls”, RESNA 13th Annual Conf., Washington DC, 307-308, 1990.

[NILS 69] NILSON N., J.,

“A mobile automaton : an application of artificial intelligence techniques”, Proc. 1st Int. Joint. Conf. on A.I., Washington, May 1969.

[NISB 90] NISBET P.,

“Sharing strategies and high-level planning between users and machines”, Thesis submitted for M.Sc, University of Edinburgh, 1990.

[NORE 91] NOREILS F.R., PRAJOUX R.,

“From planning to execution monitoring control for indoor mobile robots”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, 1510-1517, 1991.

[NORE 95] NOREILS F.R., CHATILA R.G.,

“Plan execution monitoring and control architecture for mobile robots”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 11 (2), 255-266, April 1995.

[PANG 90] PANG G.K.H., SHEN H.C.,

“Intelligent control of an autonomous mobile robot in a hazardous materialm spill accident - a blackboard structure appraoach”, Robotics and Autonomous Systems, 6(4), 351-365, October 1990.

[PARK 88] PARKER L.E., PIN F.G.,

“Man-robot symbiosis : a framework for cooperative intelligence and control”, SPIE, Space Station Automotion IV, Vol. 1006, 94-103, 1988.

[PAYT 86] PAYTON D.W.,

“An architecture for reflexive autonomous vehicle control”, IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat., 396-401, 1990.

[PEW 82] PEW R.W., BARON S.,

“Perspective on human performance modelling”, IFAC Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Syst., Baden-Baden, RFA, 1-14, 1982.

[PINO 95a] PINO P.,

“Robot mobile pour handicapés moteurs : évaluation du système homme-machine”,
Thèse de l’Université de Metz, Juin 1995.

**[PINO 95b] PINO P., AGOSTINI Y., BOURHIS G., ANDRÉ J.M., BRUGEROLLE B., DE
BARMON H.,**

“The V.A.H.M. project (Autonomous Vehicle for Disabled Persons) : First Results”,
RESNA’95, Vancouver, Canada, 508-510, Juin 9-14 1995.

[PINO 95C] PINO P., HENRION J., PRUSKI A.

“Capteur intelligent de profil plan pour la robotique mobile”, Revue d’Automatique et
de Productique Appliquées, 1995.

[PRUS 91] PRUSKI A., BOURHIS G.,

*“Le projet V.A.H.M. (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs : mobilité et stra-
tégie”*, Innovation and Technology in Biology and Medecine, 694-705, 1991.

[PRUS 92] PRUSKI A.,

“Multivalue Coding : Application to autonomous robots”, Robotica, vol. 10, 125-133,
1992.

[RAM 92] RAM A., ARKIN R.C., MOORMAN K., CLARK R.J.,

*“Case-based reactive navigation : a case-based method for on-line selection and adap-
tation of reactive control parameters in autonomous robotics systems”*, Technical Re-
port GIT-CC-92/57, College of Computing, Georgia Institute of Technologie, Atlanta,
GA, 1992.

[RAM 93] RAM A., SANTAMARIA J.C.,

“Knowledge compilation and speedup learning in continuous task domains”, Proc. of
the ML-93 Workshop on Knowledge Compilation and Speedup Learning, Amherst,
MA, June1993.

[RASM 83] RASMUSSEN J.,

*“Skills, rules and knowledge ; signals, signs and symbols ; and other distinctions in
human performance models”*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC 13, n° 3,
257-266, 1983.

[RIVA 95] RIVALS I.,

“Modélisation et commande de processus par réseaux de neurones ; application au pilotage d’un véhicule autonome”, Thèse de l’Université de Paris 6, Janvier 1995.

[ROHM 93] ROHMER S.,

“Modélisation d’environnement par nombre multivaleurs”, Thèse de l’Université de Nancy I, Nov. 1993.

[SIMM 90] SIMMONS R.,

“An architecture for coordination planning, sensing, and action”, Proc. of DARPA Workshop on Initiative Approaches to Plan., Sched. and Control, San Diego, CA, 292-297, 1990.

[SIMM 95] SIMMONS R.,

“Towards reliable autonomous agent”, AAAI Spring Symposium on Software Architectures, Stanford CA, March 95.

[SIMP 94] SIMPSON R., LEVINE S. P., BELL D.A., JAROS L.A.,

“The applicability of neural networks in autonomous mode selection system”, RESNA 14th Annual Conf., 578-580, 1994.

[SPER 88] SPERANDIO J.C.,

“L’ergonomie du travail mental”, Masson (Eds), 1988.

[TARN 95] TARN T., XI N., GUO C., WU Y.,

“Task-oriented human and machine cooperation in telerobotic systems”, IFAC Workshop on Human-Oriented Des. of Adv. Rob. Syst., Vienna, Austria, 13-18, September 1995.

[THOR 86] THORPE C., KANADE T.,

“1986 year end report for road following at Carnegie Mellon”, Technical Report CMU-RI-TI-87-12, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1986.

[TIDE 94] TIDE,

Commission of the European Communities Technology Initiative for the Disabled and Elderly People, 1993-1994 Workplan, 43-44, 1994.

[TIGL 93] TIGLI J.Y., OCELLO M., THOMAS M.C.,

“Towards a new intelligent reactive controller for autonomous mobile robots”, 1050-4729/93, IEEE, 1993.

[TORR 94] TORRANCE M.C.,

"Natural communication with robots", Master's thesis, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, February 1994.

[TROC 95] TROCCAZ J., DELNONDEDIEU Y., POYET A.,

"Safety issues in surgical robotics", IFAC Workshop on Human-Oriented Des. of Adv. Rob. Syst., Vienna, Austria, 19-24, September 1995.

[VERB 91] VERBURG G., BALFOUR L., SNELL E., NELSON P.J., NAUMAN S.,

"Identification of desirable features of a smart wheelchair", 1st European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, Maastricht, 1991.

[WAKA 92] WAKAUMI H., NAKAMURA K., MATSUMURA T.,

"Development of an automated wheelchair guided by a magnetic ferrite marker lane", Jour. of Rehabilitation Research and development, vol. 29, n°1, 27-34, 1992.

[WEIS 93] WEISBEN C.R., MONTEMERLO M., WHITTAKER W.,

"Evolving directions in NASA's planetary rover requirements and technology", Robotics and Autonomous Systems, n° 11, 3-11, 1993.

[YODE 94] YODER J.D., BAUMGARTNER E., SKAAR S. B.,

"Reference path description for an autonomous powered wheelchair", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, California, 2012-2017, 1994.

[YOKO 93] YOKOKOHJI Y., OGAWA A., HASUNUMA H., YOSHIKAWA T.,

"Operation modes for cooperating with autonomous functions in intelligent teleoperation systems", IEEE, 1050-4729/93, 510-515, 1993.

RESUME :

Les travaux présentés dans ce mémoire concerne l'architecture de commande développée pour le fauteuil robotisé VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs). Ce projet a pour objectif d'améliorer les possibilités de mobilité des personnes sévèrement handicapées en intégrant aux fauteuils roulants électriques des techniques de déplacement développées en robotique mobile.

La mise en oeuvre d'une collaboration entre l'homme et la machine est destinée à optimiser le système global composé par les deux entités. L'architecture proposée s'appuie sur la nature des informations traitées. Elle est composée de niveaux d'abstraction et de contrôles d'exécution distribués. L'homme et la machine peuvent coopérer à chaque niveau en apportant une aide à l'action, une aide à la décision ou encore une aide à l'information. Des essais réalisés par des personnes valides ont permis d'évaluer les capacités de communication et de collaboration d'une telle architecture.

MOTS CLES : robot mobile, handicap, architecture de commande, coopération, système expert.

ABSTRACT :

The works described in this thesis relates to the software architecture developed for the VAHM robotized wheelchair. It aims at improving the mobility of people with disabilities by using techniques and methods coming from the field of mobile robotics.

The optimization of the man-machine system is obtained by attaining a collaboration between the man operator and the machine. The architecture is based on the nature of processed data. It is composed of abstraction levels and distributed process controls. At each level man and machine can cooperate by providing help for action decision or information. Trials realised with the help of able people have allowed to evaluate communication and cooperation abilities of such an architecture.

KEY WORD : mobile robot, disabled, software architecture, cooperation, expert system.