



HAL
open science

Robot mobile pour handicapés moteurs : évaluation du système homme/machine

Pierre Pino

► **To cite this version:**

Pierre Pino. Robot mobile pour handicapés moteurs : évaluation du système homme/machine. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1995. Français. NNT : 1995METZ009S . tel-01776894

HAL Id: tel-01776894

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776894>

Submitted on 24 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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

U.F.R. MIM

THESE

présentée pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE METZ

Spécialité Automatique

par

Pierre PINO

ROBOT MOBILE POUR HANDICAPES MOTEURS : EVALUATION DU SYSTEME HOMME/MACHINE

Soutenue publiquement le 06 juin 1995
devant la commission d'examen :

Rapporteurs : F. CHAVAND
P. MILLOT

Examineurs : P. COIFFET
J.M. ANDRE
A. PRUSKI
G. BOURHIS

| BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ - | |
|--|-----------|
| N° inv | 19950165 |
| Cote | S/M3 95/9 |
| Loc | Mafeloin |

à ma famille

“Si l’on faisait en tout ce que veut la coutume, l’on ne balayerait pas l’antique poussière du temps, et l’erreur montagnaise s’élèverait trop haut pour que puisse pointer l’oeil de la vérité ...”

W. SHAKESPEARE

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 F. CHAVAND, Professeur à IIE-CNAM-EVRY et Directeur adjoint du Centre d'étude de Mécanique d'Ile de France, ainsi que Monsieur P. MILLOT, professeur au Laboratoire d'Automatique et Mécanique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis et Directeur de l'équipe, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail en qualité de rapporteurs.

Mes remerciements s'adressent aussi à Messieurs P. COIFFET, Directeur de recherche au C.N.R.S., et J.M. ANDRE, Professeur de Médecine et Directeur de Institut Régional de Réadaptation de Nancy, 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.

Mes remerciements s'adressent aussi au personnel du Centre de Réadaptation de Lay-St-Christophe (54) et plus particulièrement à Messieurs H. DE BARMON et B. BRUGEROLLE.

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 | 9 |
| INTRODUCTION | 12 |
| CHAPITRE I : ROBOTIQUE MOBILE MEDICALE | 15 |
| I INTRODUCTION | 16 |
| II LE FAUTEUIL ROULANT ELECTRIQUE | 17 |
| II.1 INTRODUCTION | 17 |
| II.2 CAHIER DES CHARGES D'UN FAUTEUIL ELECTRIQUE | 18 |
| II.2.1 Attribution des fauteuils électriques | 18 |
| II.2.2 Cahier des charges | 19 |
| II.3 LES MODES DE COMMANDE D'UN FAUTEUIL ELECTRIQUE | 19 |
| II.3.1 Généralités sur les capteurs de commande | 19 |
| II.3.2 Sites anatomiques et signaux biologiques | 20 |
| II.3.3 Classification des capteurs | 22 |
| II.3.4 Les capteurs de commande tout ou rien | 22 |
| II.3.5 Les capteurs de commande proportionnels | 23 |
| II.4 CONCLUSION SUR LES FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES | 24 |
| III AIDE A LA NAVIGATION DES FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES : | |
| ETAT DE L'ART | 24 |
| III.1 INTRODUCTION | 24 |
| III.2 AIDE A LA NAVIGATION SANS MODELE DE L'ENVIRONNEMENT | 25 |
| III.3 AIDE A LA MOBILITE PAR MOUVEMENTS PRE-ENREGISTRES | 33 |
| III.4 AIDE A LA NAVIGATION AVEC MODELE DE L'ENVIRONNEMENT | 37 |
| III.5 DISCUSSION | 41 |
| IV LE PROJET V.A.H.M. | 42 |
| IV.1 JUSTIFICATION | 42 |
| IV.1.1 Le fauteuil "intelligent" : définition des besoins | 42 |
| IV.1.2 Le fauteuil "intelligent" : définition des contraintes | 43 |
| IV.1.3 Conclusion | 44 |
| IV.2 DEFINITION DU SYSTEME | 45 |
| IV.2.1 Architecture globale | 47 |
| IV.2.2 Niveau intelligent | 49 |
| IV.2.3 Niveau contrôleur | 53 |
| IV.2.4 Niveau d'exécution | 54 |
| IV.2.5 Niveau physique | 59 |
| V CONCLUSION | 61 |

CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'EVALUATION DU SYSTEME

| | |
|--|-----------|
| HOMME/MACHINE | 63 |
| I INTRODUCTION | 64 |
| II CONCEPTION ET EVALUATION DE L'INTERFACE H/M DU PROJET V.A.H.M. | 65 |
| II.1 CONCEPTION DE L'INTERFACE HOMME/MACHINE | 66 |
| II.1.1 Analyse de la tâche | 66 |
| II.1.2 Critères ergonomiques de conception de l'interface du projet V.A.H.M. | 68 |
| II.1.3 Problèmes spécifiques de conception de l'interface du mode automatique | 70 |
| II.1.4 Conclusion sur la conception de l'interface du projet V.A.H.M. | 73 |
| II.2 EVALUATION DE L'INTERFACE HOMME/MACHINE | 74 |
| II.2.1 L'approche empirique : le diagnostic d'usage | 75 |
| II.2.2 Conclusion sur l'évaluation de l'interface homme/machine | 78 |
| III LA CHARGE DE TRAVAIL | 78 |
| III.1 LE CONCEPT DE LA CHARGE DE TRAVAIL | 78 |
| III.2 LA CHARGE DE TRAVAIL PHYSIQUE | 79 |
| III.3 LA CHARGE DE TRAVAIL MENTALE | 80 |
| IV LES METHODES D'EVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL MENTALE | 81 |
| IV.1 LES METHODES PHYSIOLOGIQUES | 81 |
| IV.2 LES METHODES COMPORTEMENTALES | 82 |
| IV.2.1 Estimation de la charge de travail à partir des performances | 83 |
| IV.2.2 Estimation de la charge de travail par la méthode de la double tâche | 84 |
| IV.3 LES METHODES SUBJECTIVES | 85 |
| IV.3.1 Echelle de COOPER-HARPER | 85 |
| IV.3.2 Méthode SWAT | 86 |
| IV.3.3 Méthode TLX | 88 |
| IV.4 LES METHODES TEMPORELLES | 90 |
| V CONCLUSION | 93 |

CHAPITRE III : DEFINITION DES CRITERES D'EVALUATION.....94

| | |
|---|-----|
| I INTRODUCTION | 95 |
| II INTERFACE H/M : EMULATION DU HANDICAP | 96 |
| III DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX | 98 |
| III.1 LE PROTOTYPE DU FAUTEUIL | 98 |
| III.2 L'APPARTEMENT D'ESSAI | 99 |
| III.3 PROTOCOLES EXPERIMENTAUX | 100 |
| III.3.1 Apprentissage | 101 |
| III.3.2 Scénarios d'évaluation | 102 |
| IV ANALYSE DES RESULTATS : OBSERVATIONS D'ORDRE GENERAL | 107 |

| | |
|---|------------|
| IV.1 LE MODE AUTOMATIQUE | 107 |
| IV.2 LA PRIMITIVE SUIVI DE MUR..... | 108 |
| IV.3 LA PRIMITIVE DE CONTOURNEMENT D'OBSTACLES | 109 |
| V ESTIMATION DES CRITERES D'EVALUATION | 110 |
| V.1 CRITERE D'EFFICACITE TEMPORELLE | 110 |
| V.1.1 Zone modélisée | 111 |
| V.1.2 Zone non modélisée..... | 117 |
| V.2 CRITERE DES PERFORMANCES DE LA PERSONNE | 119 |
| V.2.1 Interface de type tout ou rien | 120 |
| V.2.2 Interface de type proportionnel..... | 126 |
| V.3 CRITERE DE CONFIANCE | 129 |
| V.4 CRITERE DU CONFORT DE NAVIGATION | 132 |
| VI CONCLUSION | 134 |
| CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX..... | 136 |
| I INTRODUCTION..... | 137 |
| II RESULTATS EXPERIMENTAUX | 137 |
| II.1 PROTOCOLES EXPERIMENTAUX | 138 |
| II.1.2 Personnalisation du V.A.H.M..... | 138 |
| II.1.3 Déroulement des essais | 139 |
| II.2 OBSERVATIONS SUR LE DEROULEMENT DES ESSAIS | 141 |
| II.2.1 Essais : premier pilote | 141 |
| II.2.2 Essais : deuxième pilote..... | 143 |
| II.2.3 Essais : troisième pilote | 145 |
| III DISCUSSION..... | 147 |
| III.1 DISCUSSION D'ORDRE TECHNIQUE | 147 |
| III.2 DISCUSSION D'ORDRE CONCEPTUEL | 149 |
| IV CHOIX OPTIMAL DU MODE DE FONCTIONNEMENT | 151 |
| V CONCLUSION..... | 156 |
| CONCLUSION | 157 |
| ANNEXE A | 160 |
| ANNEXE B..... | 163 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 167 |

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ROBOTIQUE MOBILE MEDICALE

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : exemple de fauteuil roulant électrique (station assise). | 18 |
| Figure I.2 : sites anatomiques (tiré de [DUPO 84]). | 21 |
| Figure I.3 : exemples de capteurs tout ou rien. | 22 |
| Figure I.4 : vector field histogram. | 27 |
| Figure I.5 : "The Navchair System". | 28 |
| Figure I.6 : résultats des tests de passages de portes de "Navchair". | 28 |
| Figure I.7 : détermination du choix 2a ou 2b suivant la manière d'approche de 1. | 29 |
| Figure I.8 : "Mister Ed". | 30 |
| Figure I.9 : exemple de déplacement avec l'application "Mister Ed". | 31 |
| Figure I.10 : ensemble robotisé de KOMEDA et al. | 32 |
| Figure I.11 : architecture de contrôle du robot de KOMEDA et al. | 32 |
| Figure I.12 : structure du programme de contrôle du fauteuil de BUHLER et HUMANN. | 34 |
| Figure I.13 : "Mecanum Wheels". | 34 |
| Figure I.14 : suivi de ligne du fauteuil roulant électrique de WAKAUMI et al. | 36 |
| Figure I.15 : diagramme du circuit de contrôle du fauteuil filoguidé de WAKAUMI et al. | 36 |
| Figure I.16 : synoptique de l'application de REGALBUTO et al. | 38 |
| Figure I.17 : écran de la commande en mode téléopéré. | 38 |
| Figure I.18 : écran de visualisation permettant de désigner l'action à exécuter. | 39 |
| Figure I.19 : véhicule autonome de MANDARASZ et al. | 40 |
| Figure I.20 : exemple de modélisation de l'environnement de MADARAZ et al. | 40 |
| Figure I.21 : le prototype du projet V.A.H.M. | 46 |
| Figure I.22 : architecture du projet V.A.H.M. | 49 |
| Figure I.23 : exemple de modélisation de l'environnement et planification de trajectoire. | 50 |
| Figure I.24 : synoptique de l'interface homme/machine du projet V.A.H.M. | 51 |
| Figure I.25 : exemple où l'intervention de la personne est nécessaire en mode automatique. | 52 |
| Figure I.26 : contraintes de suivi de ligne brisée. | 55 |
| Figure I.27 : méthode de suivi de ligne de MOUMEN [MOUM 94]. | 56 |
| Figure I.28 : zone de contournement à deux niveaux de vitesse. | 58 |
| Figure I.29 : suivi de mur avec évitement d'obstacles. | 59 |
| Figure I.30 : capteurs implantés sur la base mobile du projet V.A.H.M. | 60 |

CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'EVALUATION DU SYSTEME HOMME/MACHINE

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : méthodologie de conception et d'évaluation des interfaces h/m d'après [SPER 88] et [MILL 90]. | 65 |
| Figure II.2 : validation des choix avec l'interface de type proportionnel. | 69 |
| Figure II.3 : exemple de feed-back sur l'action d'un bouton. | 70 |
| Figure II.4 : désignation de l'objectif avec une interface de type tout ou rien. | 71 |
| Figure II.5 : exemple d'écran de navigation et ses conséquences. | 72 |
| Figure II.6 : synoptique détaillé de l'interface de type tout ou rien du projet V.A.H.M. | 73 |
| Figure II.7 : synthèse des méthodes d'évaluation établie par SENACH. | 75 |
| Figure II.8 : courbe illustrant la performance de l'individu au travail en fonction de sa charge de travail. | 83 |
| Figure II.9 : échelle de COOPER-HARPER MODIFIE générale repris dans [RIER 93]. | 86 |
| Figure II.10 : les 27 "cartes" possibles de la méthode SWAT. | 88 |
| Figure II.11 : descripteur marqué par la personne. | 89 |
| Figure II.12 : paires de descripteur de la méthode TLX. | 90 |
| Figure II.13 : mesure de la charge de travail à l'aide d'un modèle observateur [RIER 93]. | 91 |

CHAPITRE III : DEFINITION DES CRITERES D'EVALUATION

| | |
|---|-----|
| Figure III.1 : émulation du handicap de type tout ou rien. | 96 |
| Figure III.2 : exemples de validation (personne valide). | 97 |
| Figure III.3 : synoptique de l'interface graphique utilisée pour la première série d'essais. | 99 |
| Figure III.4 : plan de l'appartement d'essais (6.33m*11.20m). | 100 |
| Figure III.5 : parcours prédéterminé pour les étapes de l'apprentissage. | 102 |
| Figure III.6 : points de passage à respecter lors des essais. | 103 |
| Figure III.7a : exemple de fichier "espion.esp". | 106 |
| Figure III.7b : tracés des courbes dw, us et vit _linéaire du fichier binaire. Courbes extraites d'un fichier espion.val provenant de l'exécution d'un suivi de mur. | 106 |
| Figure III.8 : cas où le point but désigné n'est pas atteint correctement. | 108 |
| Figure III.9 : recalage de la direction sur le parcours du couloir en mode manuel classique (tout ou rien). Figure tirée des données fichier espion.esp (temps_tor = 0.1s). | 109 |
| Figure III.10 : mauvaise orientation de départ pour passer la porte, engendrant l'arrivée dans un cul de sac. | 109 |
| Figure III.11 : moyennes +/- les écarts types en fonction des trajets et des modes. | 115 |
| Figure III.12 : cycle de défilement des choix dans les écrans de l'interface de type tout ou rien. | 123 |
| Figure III.13 : quadrillage en zones d'évolutions. | 126 |
| Figure III.14 : zone de détection des obstacles déclenchant un évitement automatique. | 131 |
| Figure III.14 : exemple d'estimation du critère de confiance à partir d'un fichier espion. | 132 |
| Figure III.16 : courbes montrant l'estimation du critère de confort. | 134 |

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX

| | |
|---|-----|
| Figure IV.1 : plan du centre de réadaptation de Lay-Saint-Christophe (2ème étage). | 139 |
| Figure IV.2 : déplacements automatiques réalisés dans le studio (2) durant les essais. | 140 |
| Figure IV.3 : exemple d'une courbe du critère de confiance du premier pilote. | 142 |
| Figure IV.4 : exemple d'évaluation du critère de confort au cours d'un mouvement automatique de la cuisine (b) à la porte d'entrée (c). | 143 |
| Figure IV.5 : exemple de mesure du critère de confiance du deuxième pilote. | 144 |
| Figure IV.6 : troisième expérimentatrice du fauteuil robotisé. | 145 |
| Figure IV.7 : déplacement du couloir "piscine" au couloir "ortho". | 146 |
| Figure IV.8 : préparation d'une stratégie d'évitement d'obstacles. | 148 |
| Figure IV.9 : routine de comportement à intégrer dans la planification de trajectoires. | 148 |
| Figure IV.10 : changement du point de rattachage en fonction de l'environnement proche. | 149 |
| Figure IV.11 : exemple de choix non optimal du mur à suivre. | 150 |
| Figure IV.12 : blocage de la situation causé par un arrêt trop tardif du fauteuil. | 151 |

Liste des TABLEAUX

CHAPITRE III : DEFINITION DES CRITERES D'EVALUATION

| | |
|--|-----|
| Tableau III.1 : efficacité temporelle des modes en zone modélisée. | 112 |
| Tableau III.2 : nouvelle efficacité temporelle des modes en zone modélisée. | 113 |
| Tableau III.3 : temps de parcours des trois trajets réalisés en zone modélisée (interface de type proportionnel) | 115 |
| Tableau III.4 : tableau de l'efficacité temporelle des modes en zone modélisée (joystick). | 115 |
| Tableau III.5 : efficacité temporelle en zone non modélisée : déplacement dans le couloir (interface de type tout ou rien) | 118 |
| Tableau III.6 : temps de parcours en zone non modélisée des déplacements dans le couloir en fonction des modes de fonctionnement et des pilotes (interface de type proportionnel). | 119 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Malgré une rapide évolution technologique dans le domaine de l'aide technique pour les personnes à fort handicap moteur, leur possibilité de se déplacer en fauteuil de façon autonome est encore limitée. Certains facteurs inhérents aux handicaps du pilote viennent en effet entraver la commande des fauteuils roulants électriques usuels : capteur de commande mal adapté, lenteur dans le contrôle de ce capteur entraînant de probables collisions, importante fatigabilité, domaine de vision restreint, etc...

La problématique abordée dans ce mémoire consiste alors à améliorer les possibilités de mobilité de ces personnes handicapées, augmentant ainsi leur autonomie dans la vie quotidienne. Une solution envisageable consiste à rendre "intelligent" le fauteuil électrique en y intégrant des techniques de déplacement développées dans le domaine de la robotique mobile.

Cette aide à la navigation intégrée au fauteuil roulant électrique doit être conçue de manière à respecter la présence d'une personne qui va coopérer avec la machine dans la gestion de ses déplacements. La coopération entre l'homme et la machine doit se faire naturellement en tenant compte des possibilités techniques de la machine ainsi que des capacités physiques et cognitives de la personne.

Ce mémoire s'attache alors à analyser les besoins d'une telle application, à présenter la solution d'aide à la navigation proposée, et à définir une méthodologie d'évaluation du système homme/machine. Cette dernière doit permettre de préciser les besoins des personnes handicapées moteurs en terme d'aide à la mobilité.

Le premier chapitre décrit brièvement le fauteuil roulant électrique, définit une classification des capteurs de commande et présente un état de l'art des différents travaux de recherche concernant l'aide à la navigation. Il tente ensuite d'analyser les besoins d'aide à la mobilité des personnes handicapées et conclut sur la présentation générale du projet V.A.H.M. (**V**éhicule **A**utonome pour **H**andicapés **M**oteurs), solution apportée par le L.A.E.I. (**L**aboratoire d'**A**utomatique et d'**E**lectro-**n**ique **I**ndustrielles).

Le second chapitre présente les différentes étapes relatives à la conception et à l'évaluation de l'interface homme/machine du robot V.A.H.M.. Nous constatons l'importance du concept de "charge de travail" dans l'évaluation d'un tel système homme/machine et présentons les méthodes pour l'estimer dans le contexte particulier de notre application.

Le troisième chapitre définit la méthodologie employée pour évaluer le système homme/machine en tenant compte des différentes composantes de la charge de travail citées au chapitre précédent. Cette méthode, basée sur l'analyse des données échangées entre l'homme et la machine, observe en ligne l'état du système. Ainsi, à partir d'une série d'essais avec des personnes valides dans un appartement reconstitué, nous avons défini un ensemble de critères pertinents représentatifs des différentes composantes de la charge de travail retenues pour notre application.

Le quatrième et dernier chapitre présente la première évaluation clinique de notre ensemble robotisé, réalisée dans un centre de réadaptation et concernant trois personnes handicapées. Elle nous permet de valider en situation réelle les choix inhérents à sa conception. En fin de chapitre, nous proposons des bases de réflexion pour concevoir un module d'aide à la décision permettant aux personnes handicapées d'utiliser au mieux les capacités autonomes implantées sur le fauteuil. Ce besoin d'une aide à la décision est apparu en observant les difficultés de certains expérimentateurs à utiliser de façon optimale le système homme/machine. Ces observations visuelles ont été confirmées par le calcul des critères d'évaluation.

CHAPITRE I

Robotique Mobile Médicale

I INTRODUCTION

II LE FAUTEUIL ROULANT ELECTRIQUE

**III AIDE A LA NAVIGATION DES FAUTEUILS
ROULANTS ELECTRIQUES : ETAT DE L'ART**

IV LE PROJET V.A.H.M.

V CONCLUSION

I INTRODUCTION

Depuis quelques années nous assistons à une augmentation régulière du nombre des personnes handicapées présentant de très lourds déficits fonctionnels entraînant une perte importante d'autonomie dans la vie quotidienne. Les causes de cette augmentation sont les suivantes :

- les causes traumatiques (accident de la route, de travail, de sport, ...),
- les causes néo-natales (infirmité motrice d'origine cérébrale),
- les causes médicales (maladies évolutives, maladies génétiques, accidents vasculaires, ...).

L'espérance de vie de ces personnes augmente d'année en année en raison des progrès de la médecine et de la rééducation. Leur insertion en milieu ordinaire de vie à domicile les confronte à des problèmes de mobilité, de communication et d'autonomie. Ceci nécessite la mise en place de toute une stratégie globale et personnalisée, associant les aides humaines (tierce-personne) voire animalières (singes capucins) aux aides techniques (stations de travail, fauteuils roulants électriques, appareils de contrôle de l'environnement, ...).

Le docteur BUSNEL [BUSN 92] donne la définition suivante des aides techniques : "...L'aide technique est un outil, un instrument ou un dispositif permettant de venir en aide à une personne à mobilité réduite pour accomplir une tâche qu'elle ne peut exécuter seule, compte tenu de son déficit moteur...". Il les classe en aides techniques d'assistance vitale (assistance respiratoire, collecteur d'urine, matériel anti-escarres, ...), aides techniques d'autonomie (contrôle d'environnement, fauteuil roulant, synthèse de la parole, ...), et aides techniques de confort (mobilier adapté, pince de préhension, ...). Elles permettent d'accroître l'autonomie de la personne et de lui donner une prise directe sur l'événement en étant elle-même l'acteur : elles sont commandées par la personne handicapée qui décide de leur utilisation.

Ceci est particulièrement vrai pour les fauteuils roulants électriques et les aides à la navigation s'y rapportant qui font l'objet de ce chapitre intitulé : Robotique Mobile Médicale.

La première partie présente globalement le fauteuil roulant électrique ainsi que son utilité pour des personnes à fort handicap moteur. Il y est aussi décrit les différents capteurs de commande usuels pour le pilotage de ce dernier. Nous proposerons alors une classification de ces capteurs en fonction du handicap de l'utilisateur.

La seconde partie de ce chapitre présente les travaux en cours en robotique médicale décrits dans la littérature spécialisée depuis la fin des années 80 à nos jours. Nous verrons que ces recherches concernant l'aide à la navigation en fauteuil pour personne handicapée viennent essentiellement du transfert du savoir-faire technique des différents laboratoires de recherche en robotique mobile.

La troisième partie va tenter de définir les besoins d'une aide à la mobilité pour les utilisateurs de fauteuil électrique en tenant compte de ce qu'elle peut apporter et surtout des contraintes qu'elle occasionne au contact du monde des handicapés.

La quatrième et dernière partie présente le projet V.A.H.M. (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs) développé au L.A.E.I. qui tient compte des besoins d'aide à la navigation analysés dans la troisième partie et de la nécessité d'une coopération homme/machine indispensable pour une telle application.

II LE FAUTEUIL ROULANT ELECTRIQUE

II.1 INTRODUCTION

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 s'y produire.

De même, LEGRAND et LE CARDINAL [LEGR 87], à la suite de leur enquête sur l'évaluation des aides techniques de communication pour les I.M.C., écrivaient : "...que pouvoir se déplacer en fauteuil roulant électrique permet de se mettre en présence...", ce qui est un début de toute communication avec le monde extérieur.

En France le fauteuil roulant électrique a évolué en suivant les progrès technologiques depuis les années soixante-dix qui ont marqué le début de son utilisation (fig. I.1). 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 ergothé-

rapeutes de façon personnalisée font que de nombreuses personnes atteintes des membres supérieurs peuvent piloter un fauteuil roulant électrique, alors que le pilotage avec un joystick leur serait impossible.



Figure I.1 : exemple de fauteuil roulant électrique (station assise).

II.2 CAHIER DES CHARGES D'UN FAUTEUIL ELECTRIQUE

II.2.1 Attribution des fauteuils électriques

Il n'existe pas de normes internationales pour la conception de fauteuils roulants électriques, elles ne dépendent que du pays concerné. D'après le cahier des charges des fauteuils roulants électriques français [CAHI 92], l'attribution est exclusivement réservée aux handicapés présentant simultanément une atteinte motrice définitive des membres supérieurs et d'au moins un membre inférieur, ce qui les met dans l'incapacité de marcher et d'utiliser efficacement un fauteuil roulant ordinaire [GUIT 88].

Le fauteuil roulant électrique peut être attribué aux :

- tétraplégiques dont les lésions ont une origine de nature médicale ou traumatique,
- handicapés présentant un déficit moteur des membres comme défini ci-dessus et dont les lésions sont les conséquences d'anomalies congénitales, d'infirmité motrice cérébrale, ...

II.2.2 Cahier des charges

Les fauteuils roulants électriques doivent comprendre [CAHI 92] :

- un châssis permettant le pliage ou le démontage du fauteuil après dépose de la batterie et éventuellement du groupe de propulsion,
- au moins quatre roues, deux d'entre elles assurant le changement de direction,
- un dossier fixe ou inclinable (au moins en option),
- un siège,
- deux accoudoirs,
- deux palettes réglables formant un repose-pieds,
- un système de freinage et de ralentissement,
- une batterie d'alimentation,
- un bloc de commande.

Ces fauteuils doivent pouvoir recevoir des accessoires supplémentaires permettant de les adapter à tous les cas d'utilisation en fonction de la nature du handicap, ils doivent par exemple pouvoir être livrés sans siège ni dossier pour adapter une coque moulée sur le châssis.

Tous les constituants, cités précédemment, font l'objet de spécificités dans le cahier des charges :

- vitesse maximale de 6 km/h en milieu extérieur, la vitesse en intérieur étant réglée en fonction de la personne handicapée (en moyenne 1.5 km/h),
- autonomie de 12 km en terrain plat,
- manoeuvrabilité et stabilité sur des pentes de 15%,
- etc...

II.3 LES MODES DE COMMANDE D'UN FAUTEUIL ELECTRIQUE

II.3.1 Généralités sur les capteurs de commande

La commande d'un fauteuil roulant électrique, voire de tout appareil d'assistance aux grands handicapés moteurs, se fait par l'intermédiaire d'un capteur de commande qui lie l'utilisateur à sa machine. Ces

personnes handicapées ne peuvent générer que peu de mouvements ou d'actions susceptibles d'activer un capteur de commande. La diversité des handicaps (tétraplégiques, myopathes, I.M.C, ...) ne permettant pas d'utiliser un capteur de commande universel, la qualité de déplacement du fauteuil électrique est directement liée aux performances de celui-ci : personnalisation aux besoins de l'utilisateur, performances techniques (temps de réponse, réglages, ...) [DUPO 84].

La plupart des modèles de fauteuils roulants électriques sont commandés par un joystick. Celui-ci, bien que très généralisé, n'est pas compatible avec certains types de handicaps (10 % des handicaps). C'est pourquoi, depuis plus de trente ans, de nombreux capteurs spécifiques ont été développés par les laboratoires de recherche, les centres de réadaptation et même des particuliers [WHIT 91].

II.3.2 Sites anatomiques et signaux biologiques

De nombreux sites anatomiques sont susceptibles de générer des signaux de commandes exploitables, en voici les principaux (fig. I.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 vocable),
- G3 : langues, lèvres,
- H : pieds,
- I : genou,
- J : muscles contrôlables (E.M.G.).

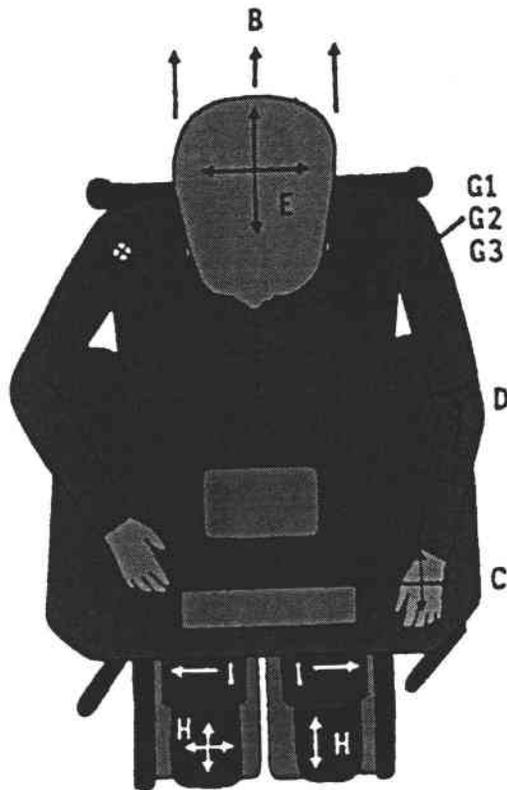


Figure I.2 : sites anatomiques tiré de [DUPO 84].

Parmi les signaux biologiques issus de ces sites anatomiques qui ont fait l'objet d'études de capteurs de commande spécifiques nous pouvons citer [DUPO 84] [GUIL 79] [BOUR 85] :

- mouvement de la main, du pied,
- aspiration, inspiration par la bouche,
- mouvement de la tête,
- mouvement du menton, de l'épaule,
- mouvement du coude, du bras,
- voix, parole,
- signaux provenant des contractions musculaires (E.M.G.).

La plupart de ces capteurs sont des capteurs de déplacement. Leurs formes et leurs caractéristiques dépendent du mouvement à exécuter.

II.3.3 Classification des capteurs

Comme il n'apparaît pas de lien direct entre la technologie d'un capteur de commande et le type de handicap auquel elle pourrait être le mieux adaptée, nous pouvons proposer une classification en termes fonctionnels plutôt que technologiques. Ceci oriente naturellement la classification des capteurs en deux grandes catégories :

- capteurs de commande tout ou rien (T.O.R.),
- capteurs de commande proportionnels.

II.3.4 Les capteurs de commande tout ou rien

La majorité d'entre eux sont conçus autour d'un ou de plusieurs micro-interrupteurs électriques ou pneumatiques. Il en existe pour la plupart des sites mentionnés plus haut (fig. I.3). Ils sont généralement associés à un balayage d'écran ou à un chenillard à leds permettant la validation des déplacements spécifiques du fauteuil roulant électrique : marche avant ou arrière, rotation pure à droite ou à gauche [BOUR 85,86] [SHIR 87].

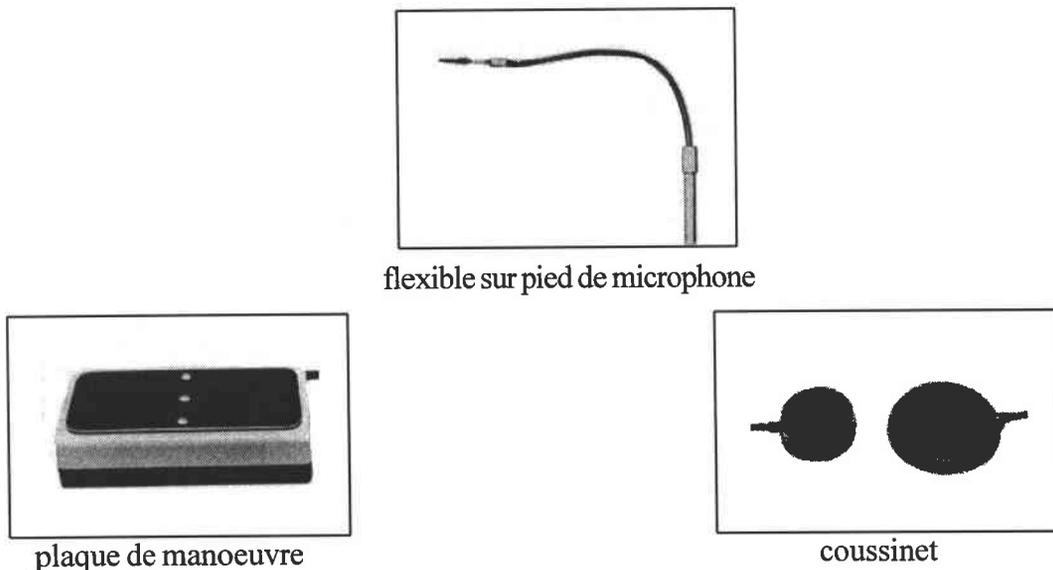


Figure I.3 : exemples de capteurs tout ou rien.

Certains, comme NAPPER et SEAMANN [NAPP 89], utilisent la reconnaissance de la parole en mots isolés pour le contrôle tout ou rien d'un déplacement spécifique du fauteuil roulant électrique.

II.3.5 Les capteurs de commande proportionnels

Le joystick est le capteur de commande proportionnel le plus utilisé sur le marché. Il est bien adapté à la commande des fauteuils roulants électriques du fait de ses deux degrés de liberté qui commandent à la fois la marche avant-arrière ainsi que sa direction gauche-droite. Il a le mérite d'être utilisable par la plupart des personnes handicapées.

Si l'utilisateur n'arrive pas à contrôler correctement les déplacements du joystick, en cas de trop forte spasticité par exemple, un filtrage électronique au niveau des signaux du joystick suffit dans bien des cas à compenser les difficultés de contrôle de son fauteuil [ANTT 91].

Des solutions de remplacement ou d'amélioration du joystick par d'autres capteurs proportionnels sont décrites dans la littérature :

- Adaptation de la mécanique du joystick sur d'autres sites anatomiques (pied, menton, tête) [HEND 91].
- Le capteur de mouvement d'épaule à deux degrés de liberté composé d'une tige et d'un boîtier de dimension réduite, est maintenu sur la poitrine à l'aide d'un ruban adhésif ou d'un harnais. Une fois installé, caché sous les vêtements, il est complètement invisible.
- POWELLS et INIGO [POWE 92] ont développé un joystick hydraulique à pression sensitive qui contrôle l'orientation des roues avant du fauteuil électrique. Le contrôle proportionnel de la rotation des roues avant dépend à la fois de la pression transmise par le pilote et de la vitesse du fauteuil. Cela permet à la personne en fauteuil d'avoir un contrôle assisté de ses déplacements en fonction de sa vitesse.
- JAFFE, HARRIS et LEUNG [JAFF 90] proposent de contrôler le déplacement du fauteuil roulant par les mouvements de la tête : un système de capteurs à ultrasons permet par triangulation de calculer sa position. Le problème de ce type de commande est d'analyser de façon pertinente la position de la tête en discriminant les actes volontaires des actes involontaires dus par exemple à l'accélération du fauteuil.
- VOCOMOTION, un système de reconnaissance de la parole développé par AMORI [AMOR 92], permet de piloter les déplacements du fauteuil de la même façon qu'un joystick. Les ordres de commande vocale sont par exemple : "go fast", "a litter faster",

“turn left”... L'utilisateur n'est pas limité à un seul type d'ordre pour commander un mouvement du fauteuil. “faster”, “speed up” ont par exemple le même effet. Il faut cependant noter que la commande vocale est plus pratique et mieux adaptée pour faire du contrôle de l'environnement, dès lors qu'il y a un danger potentiel pour la personne (risques de collisions ou de chutes), le stress dû à la situation peut modifier la voix et dégrader le taux de reconnaissance.

II.4 CONCLUSION SUR LES FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES

L'évolution technologique des fauteuils électriques, tant au niveau mécanique (possibilité de rouler en station debout, ou d'être positionné à plusieurs hauteurs sur le fauteuil en station assise, ...), qu'au niveau de la commande (maniabilité, réglage de la vitesse, de l'accélération, ...), permet à un plus grand nombre de personnes handicapées d'en bénéficier.

Cependant, lorsque ces améliorations ne suffisent plus à certaines personnes à fort handicap moteur ou cognitif, l'aide technique doit intégrer une aide à la navigation, celle-ci devant emprunter des fonctionnalités aux techniques développées en robotique mobile.

III AIDE A LA NAVIGATION DES FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES : ETAT DE L'ART

III.1 INTRODUCTION

Il existe plusieurs approches de l'assistance à la navigation des fauteuils électriques. Elles peuvent se distinguer par le type de connaissance sur l'environnement dont le système dispose. Couramment le robot ne connaît a priori aucune information sur l'environnement. Dans d'autres cas, un modèle sommaire est constitué de déplacements pré-enregistrés. Plus rarement, certains auteurs décrivent des modèles constitués de balises naturelles ou artificielles, voire des modèles topologiques complets de l'environnement.

Dans l'état de l'art qui va suivre, nous allons mêler les applications d'assistance au pilotage de fauteuils électriques à d'autres concernant la commande à distance d'un bras manipulateur installé sur une base mobile. Ces deux types de travaux procèdent en effet d'une problématique similaire, la téléopération d'un robot mobile semi-autonome par une personne à handicap moteur.

III.2 AIDE A LA NAVIGATION 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 en n'utilisant 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.

L'utilisation de ce fauteuil "intelligent" se divise en trois types d'activités :

- mobilité (apprentissage du déplacement en fauteuil),
- communication,
- "tortue" qui est un pilotage du fauteuil en langage logo (apprentissage d'un langage de déplacement).

Le projet a démarré en 1987. Un prototype a été conçu d'après les diverses spécifications du cahier des charges imposant l'utilisation de plusieurs types de capteurs de commande tout ou rien ou proportionnels pour contrôler les déplacements du fauteuil, ainsi qu'un système d'aide à la communication. Le fauteuil est maintenant évalué dans une école. Dans un souci de sécurité et pour accroître l'ensemble des activités possibles du fauteuil électrique certaines fonctionnalités ont été développées : prévention automatique d'obstacles, suivi de ligne au sol, intégration de capteurs odométriques et réglage de vitesse et d'accélération [NISB 90]. La multiplicité des capteurs de commande et des activités proposées permet à l'enfant handicapé d'avoir un fauteuil configurable en fonction de son handicap et de ses activités scolaires.

- 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 connaître à tout moment l’environnement proche du fauteuil afin d’en éviter les obstacles (fig. I.4). Elle se déroule en quatre étapes [BORE 91] :

- Pour obtenir rapidement les données des capteurs ultrasons situés autour de la base mobile, une méthode nommée : “EERUF” a été développée. Celle-ci élimine les erreurs de réception des données ultrasonores dues à l’émission simultanée de tous les capteurs (phénomène “crosstalk”) activés toutes les 100 millisecondes, en faisant varier le temps et l’ordre de lecture de chaque réception ultrasonore. 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 par rapport à la zone libre attractive et à la force répulsive virtuelle des obstacles.

La méthode “VFH” autorise un évitement automatique et rapide d’obstacles (commande des roues toutes les 30 millisecondes). Des premiers essais avec une base mobile CARMEL (vitesse maximale de 0.78 m/s) ont montré que la traversée d’un environnement encombré pouvait se faire à une vitesse de 0.58 m/s sans stopper le mobile. Dans [BORE 92] la méthode “VHF” 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 8mm de diamètre posées à la verticale et distantes de 1.36m. La base mobile a pu traverser sans encombre à vitesse maximum sauf pendant les virages brusques où la vitesse était de 0.8 m/s. BORENSTEIN et al. pensent que l’évitement d’obstacles à grande vitesse (2 m/s) est possible.

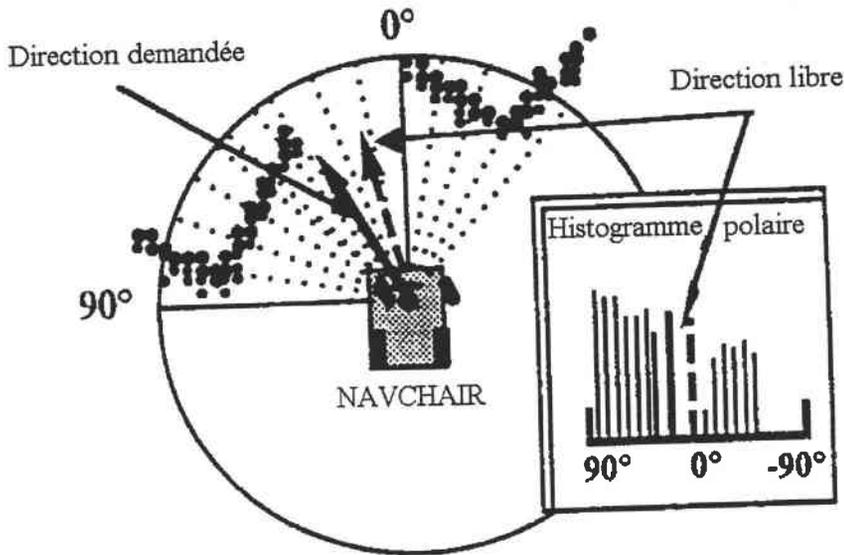


Figure I.4 : vector field histogram.

- JAROS et al. [JARO 91] proposent à partir de la méthode “VFH” un suivi de personne d’un fauteuil roulant électrique. L’accrochage de la personne à suivre, son suivi et sa recherche éventuelle, si le fauteuil la perd de vue, sont entièrement automatisés. Une ceinture de capteurs à infrarouges portée par la personne est détectée par la caméra embarquée sur le fauteuil, donnant ainsi l’orientation grossière de la direction à prendre. Les capteurs à ultrasons également fixés sur la base prennent le relais pour l’accrochage et le suivi. Le tout est supervisé par un ordinateur embarqué.

- Dans [LEVI 90] [JARO 93] [BELL 93], une application appelée “The Navchair system” développée pour l’aide à la navigation des personnes en fauteuil roulant électrique est décrite (fig. I.5). 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).

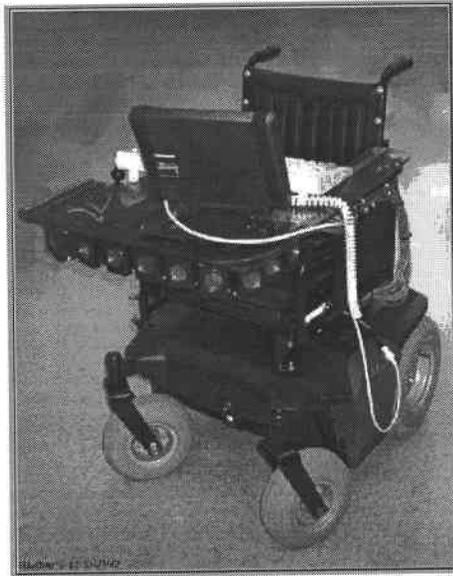


Figure I.5 : "The Navchair System".

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. Le passage de portes étroites n'est cependant pas encore très fiable du fait des carences des capteurs à ultrasons à faibles distances (fig. I.6).

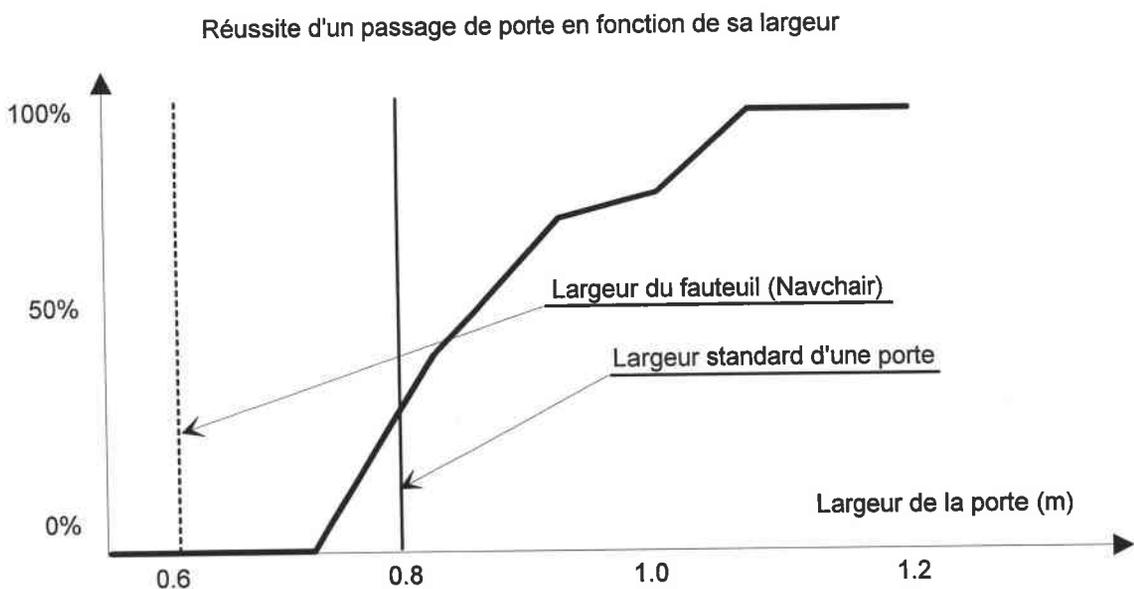


Figure I.6 : résultats des tests de passages de portes de "Navchair".

Dans [BELL 94], les efforts se sont particulièrement portés 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. I.7).

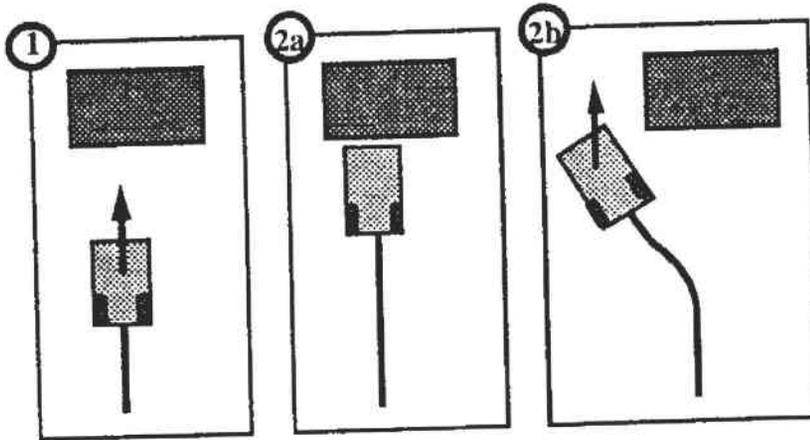


Figure I.7 : détermination du choix 2a ou 2b suivant la manière d'approche de 1.

• En France, le projet COACH (Computer Assisted wheelChair for Handicaped people) développé par le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) propose une solution d'aide à la mobilité pour handicapés moteurs du même type que celle citée ci-dessus [GELI 93] [DETR 92]. A partir d'un fauteuil électrique du commerce (POIRIER) équipé d'un ordinateur, de 14 capteurs à ultrasons et de deux télémètres à infrarouges, ils ont implanté un suivi de mur et une aide au contrôle des déplacements. Actuellement le fauteuil se commande via un joystick de trois façons différentes :

- Le mode direct : le fauteuil est piloté 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 qui l'entoure. Un suivi de mur est possible en se déplaçant soit à une certaine distance programmée, soit au milieu d'un couloir étroit.

• S'inspirant de travaux sur les architectures réactivistes en robotique mobile, CONNELL et VIOLA [CONN 90] ont développé une application s'apparentant à l'assistance au pilotage d'un fauteuil roulant électrique. A l'instar du cheval vis-à-vis de son cavalier, la fauteuil "Mister Ed" (fig. I.8) 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.

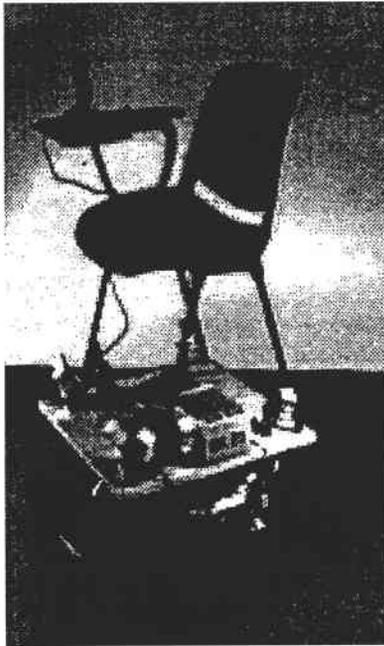


Figure I.8 : "Mister Ed".

Le panel de capteurs équipant la base mobile est constitué de deux sonars détectant les obstacles frontaux, de télémètres à infrarouges et de capteurs de contact. Le contrôle du fauteuil s'effectue par l'intermédiaire d'un joystick et d'un clavier. Le joystick contrôle de façon classique les déplacements du fauteuil, alors que le clavier commande un choix multiple de fonctionnalités comme : "Align", "Parallel", "Twist" qui sont des macro-commandes gérées par carte électronique.

Les fonctionnalités automatiques sont activées soit par le pilote en fonction de l'environnement qu'il perçoit, soit par le robot pour éviter des collisions (fig. I.9).

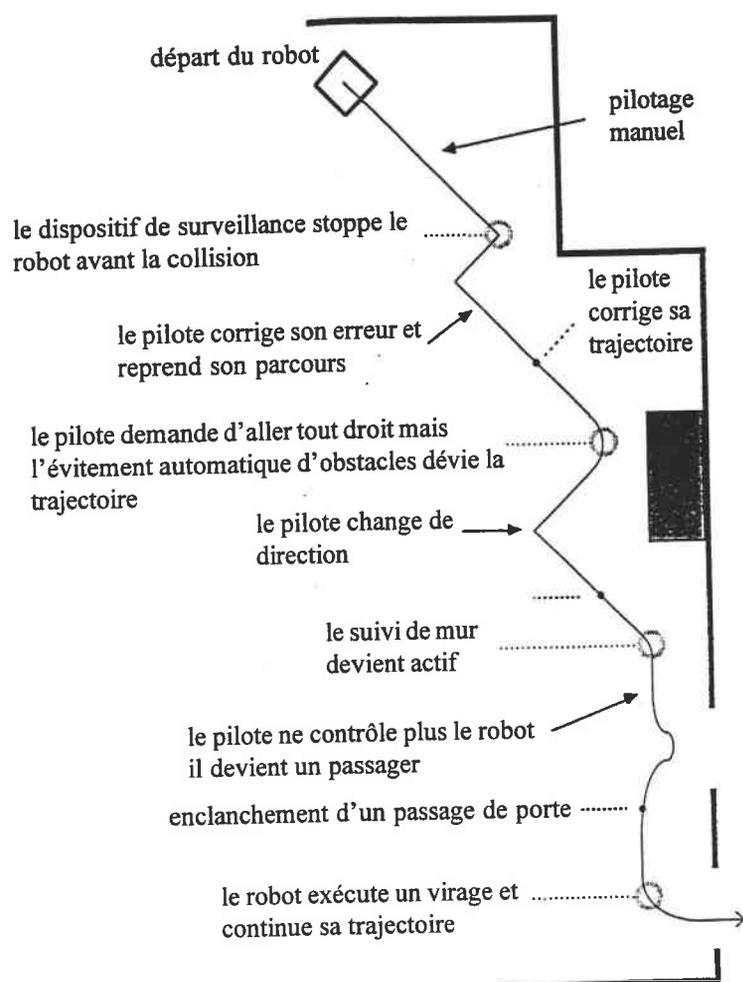


Figure I.9 : exemple de déplacement avec l'application "Mister Ed".

• Au Japon, des statistiques recensent plus de 600000 personnes alitées nécessitant des soins intensifs et l'assistance de tierces personnes. Pour tenter de répondre à ce problème social grandissant, KOMEDA et al. [KOME 93] ont développé un ensemble constitué d'une base mobile extraite d'un fauteuil roulant électrique muni de roues avant directionnelles, d'un bras manipulateur 5 axes et d'un système de vision (caméra fixé sur le bras) permettant un contrôle simplifié de celui-ci (fig. I.10). Le système de vision retransmet une image de l'environnement proche du patient. Ce système robotisé semi-autonome a été conçu pour que la personne alitée puisse aller chercher de façon autonome des objets dans la pièce où elle se situe.

Pour saisir un objet situé dans la pièce, la personne alitée doit tout d'abord positionner le bras manipulateur, ainsi que la base, à l'aide de deux joysticks afin de superposer la mire inscrite au milieu de l'écran de visualisation sur l'objet désiré.



Figure I.10 : ensemble robotisé de KOMEDA et al.

Une fois la mire positionnée, la personne enclenche le mode automatique (fig. I.11) qui en premier lieu calcule en une seconde environ la position tridimensionnelle de l'objet par analyse de sa taille à l'écran. Ensuite, une trajectoire constituée d'une ligne droite et d'un arc de cercle est générée, plaçant la base mobile à une distance suffisante pour permettre au bras embarqué la saisie automatique de l'objet.

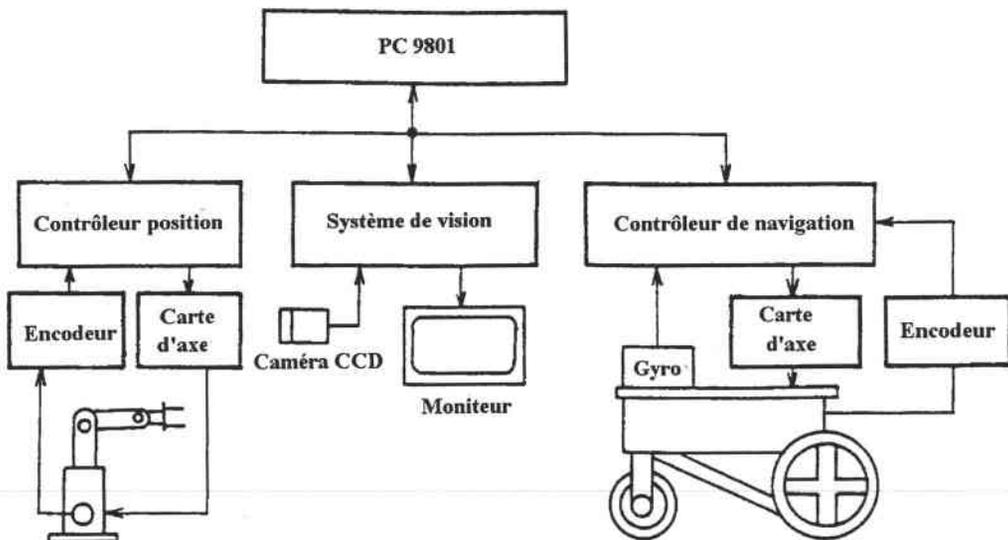


Figure I.11 : architecture de contrôle du robot de KOMEDA et al.

La gestion des déplacements de la base se fait en fusionnant la position donnée par l'odomètre et l'orientation exacte transmise par un gyroscope. Une fois l'objet saisi, le mobile fait marche arrière jusqu'à sa position de départ. D'après leurs essais, KOMEDA et al. donnent un temps total d'exécution d'une

minute environ après avoir désigné l'objet à ramener. Un panel de capteurs de commande tout ou rien et proportionnels, ainsi que des routines plus sécurisantes et fiables gérant la mobilité de leur base sont en cours de développement. Leur but est de concevoir un système compact dont le prix de revient est le plus bas possible pour être utilisé par un grand nombre de personnes.

- H.F.M. VAN DER LOOS et al. [VAND 86] ont décrit un ensemble mobile qui poursuit un objectif à peu près similaire à l'application citée précédemment. Leur base, sur laquelle est monté un bras manipulateur 6 axes, est capable de se déplacer dans toutes les directions puisqu'elle est gérée par trois roues motrices directrices. Une ceinture de capteurs à ultrasons ainsi que des capteurs de contact sont fixés autour de la base, permettant d'éviter la collision avec les obstacles proches, ou bien de connaître le point de contact, afin que le contrôleur d'exécution sache où se diriger pour forcer le passage d'une porte par exemple. Leur projet, nommé RAP (Robotic Aid Project), a été développé pour être commandé par plusieurs types de personnes handicapées, d'où un choix possible du capteur de commande. Elles peuvent ainsi effectuer avec plus d'autonomie des tâches journalières de saisie d'objet.

III.3 AIDE A LA MOBILITE PAR MOUVEMENTS PRE-ENREGISTRES

- Une aide à la navigation pour fauteuil roulant électrique proposée par BUHLER et HUMANN [BUHL 93] est en cours de développement. Elle utilise un fauteuil électrique conventionnel équipé d'une liaison série qui sert à gérer la commande en vitesse des roues (le fauteuil GENIUS fabriqué par MEYRA en Allemagne possède cette option) et un micro ordinateur compatible IBM programmé en langage C. Les mouvements du fauteuil sont contrôlés par odomètre via une des deux liaisons série reliées du PC au fauteuil, en fonction de la vitesse des moteurs et de l'orientation des roues directrices.

L'utilisateur pourra avec un joystick ou un clavier de commande sélectionner deux types d'opérations (fig. I.12) :

- l'enregistrement de séquences de déplacements pilotées par l'utilisateur,
- l'exécution de séquences enregistrées par le pilote ou pré-enregistrées, telles que "strait" ou "curve".

Actuellement seul un suivi de ligne au sol est développé pour le mode pré-enregistré, l'utilisation de capteurs non tactiles et d'un modèle de l'environnement est en cours pour éviter les restrictions qu'apporte un suivi de ligne.

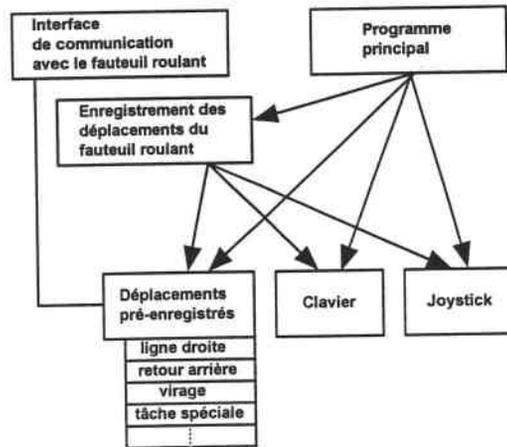


Figure I.12 : structure du programme de contrôle du fauteuil de BUHLER et HUMANN.

Parallèlement à ce travail d'automatisation des mouvements du fauteuil, ces mêmes auteurs développent un nouveau système mécanique de roue appelé "Mecanum Wheels" (fig. I.13) qui permet un pilotage omnidirectionnel (déplacements latéraux et rotations par rapport à n'importe quel point donné).

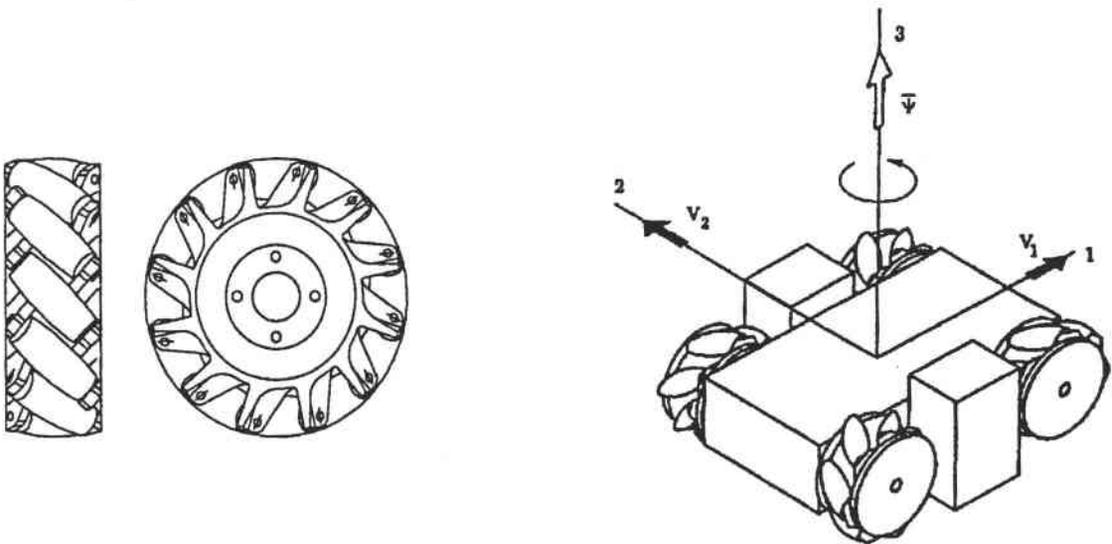


Figure I.13 : "Mecanum Wheels".

La non holonomie d'un fauteuil standard rend les manoeuvres de positionnement de type créneau difficiles, voire même impossibles à réaliser. Grâce à ses possibilités de déplacements omnidirectionnels, induites par cette nouvelle conception des roues commandées chacune par un moteur, le fauteuil peut être positionné dans des endroits encombrés ou restreints, par exemple, une salle de bain. Cependant, le

contrôle de ce fauteuil nécessite un champ visuel assez grand (vision latérale nécessaire pour le déplacement de côté) et suppose que la personne assimile la logique de déplacement omnidirectionnel du fauteuil.

- Les changements brusques de direction ou le contrôle du fauteuil sur un parcours étroit, voire sinueux, demandent une utilisation fine du capteur de commande afin d'éviter les écarts intempestifs de trajectoire occasionnant stress et inconfort. Du fait, par exemple, d'une spasticité trop importante, beaucoup de pilotes de fauteuil électrique n'ont pas l'habileté nécessaire à ce contrôle.

Pour y remédier 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. Un système de vision n'a pu être utilisé, les temps de calculs ne permettent pas un mouvement suffisamment rapide. De plus, pour les déplacements à l'extérieur, la détection de la ligne à suivre est fortement dépendante des conditions atmosphériques (pluie, neige). WAKAUMI et al. ont donc développé un fauteuil guidé par une bande magnétique (ferrite) collée au sol suivant les trajectoires choisies préalablement. 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 par une simple pression sur un bouton (fig. I.14).

Une méthode de lissage des mouvements du fauteuil roulant a été mise au point pour éviter les recalages intempestifs du fauteuil au milieu géométrique de la bande de ferrite (10 cm de large). Cette méthode est appelée "pulse-steering drive method".

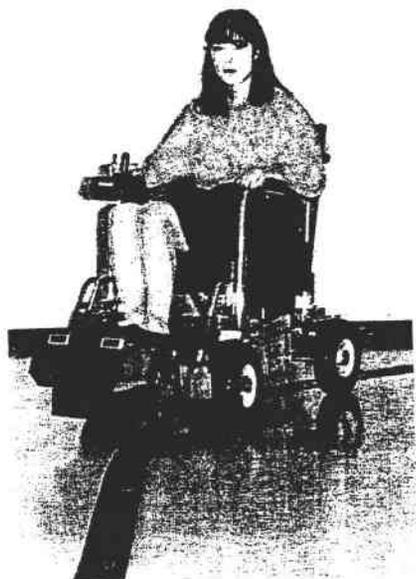


Figure I.14 : suivi de ligne du fauteuil roulant électrique de WAKAUMI et al.

La possibilité de s'arrêter à un point précis du parcours (points déterminés à l'avance suivant les besoins de l'utilisateur) a été développée : un capteur infrarouge situé sous le fauteuil détecte des marques collées au sol près de la bande, ce qui arrête le fauteuil à l'endroit programmé avant l'enclenchement du suivi (fig. I.15).

Un système de détection à infrarouges 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.

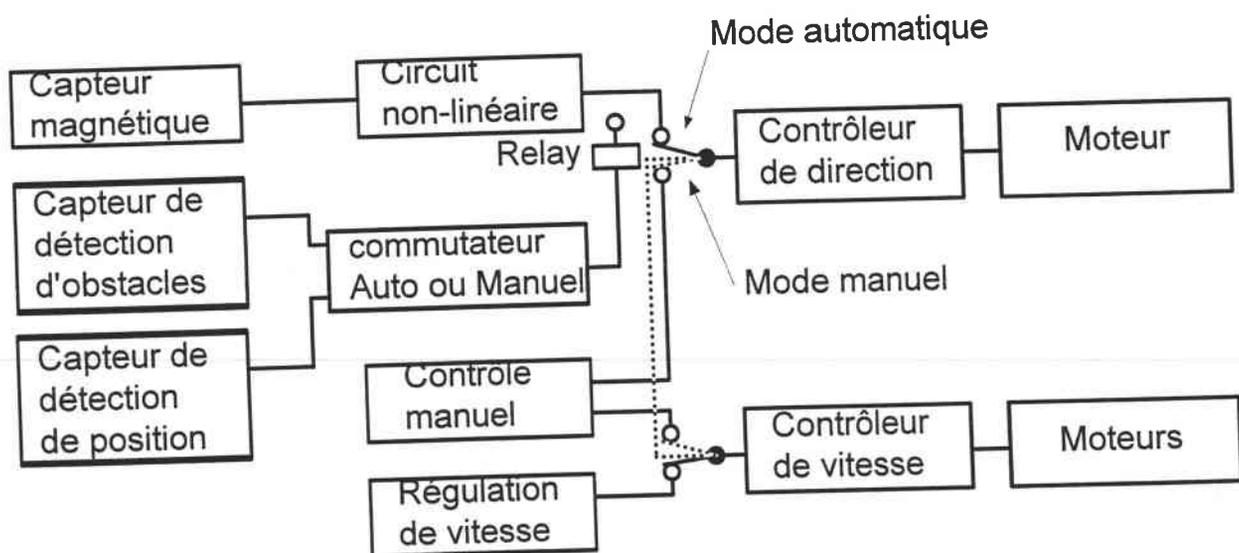


Figure I.15 : diagramme du circuit de contrôle du fauteuil filoguidé de WAKAUMI et al.

• Pour mieux tenir compte des contraintes de non holonomie du fauteuil roulant électrique YODER et al. [YODE 94] décrivent une application d'aide à la navigation par apprentissage. Les auteurs ont équipé un fauteuil électrique standard (Everest & Jenning) d'un ordinateur, d'un odomètre et d'un système de vision. L'ordinateur enregistre les trajectoires usuelles d'une personne handicapée à l'intérieur de sa maison. Ces trajectoires sont exécutées par une tierce personne qui contrôle parfaitement le fauteuil. La personne handicapée aura alors la possibilité de choisir ses déplacements parmi les trajectoires pré-enregistrées.

La présence d'un système de vision se justifie pour compenser l'imperfection des données odométriques pour l'enregistrement des points des trajectoires du fait des contraintes mécaniques qui les faussent (glissement des roues, ...). Les deux caméras localisent grossièrement des formes pertinentes de l'environnement et les enregistrent comme des balises passives. L'estimation des points de passage constituant les trajectoires pré-enregistrées est obtenue par filtrage de Kalman sur les données odométriques et les positions des balises passives.

III.4 AIDE A LA NAVIGATION AVEC MODELE DE L'ENVIRONNEMENT

Le fait de disposer d'un modèle de l'espace d'évolution de la base mobile autorise le développement de fonctionnalités de haut niveau. Les modèles de l'environnement diffèrent suivant les applications proposées. Ils peuvent être de nature géométrique ou symbolique (repérage par balises artificielles ou naturelles).

• REGALBUTO et al. [REGA 92] ont développé un ensemble robotisé d'aide aux personnes handicapées en portant leurs efforts sur l'utilisation de technologies non spécifiques dans le but de diminuer le coût et d'augmenter la fiabilité de l'ensemble. Le système comprend un robot HERO 2000, un appareil de contrôle de l'environnement (X-10 Powerhouse) et un Macintosh SE. L'ensemble HERO 2000 est une base mobile porteuse d'un bras manipulateur 5 axes conçu pour un usage essentiellement éducatif, dont la mécanique a été modifiée pour augmenter le volume accessible du bras. L'ensemble est supervisé par le Macintosh SE qui peut être contrôlé par plusieurs types de capteurs : souris, joystick, capteur de bouche type pantin de téléopération et/ou un clavier (fig. I.16). Le dialogue avec la machine s'établit par l'intermédiaire de fenêtres graphiques interactives avec les actions de l'utilisateur. La commande de la base et du bras peut se faire selon deux modes, téléopéré ou automatique.

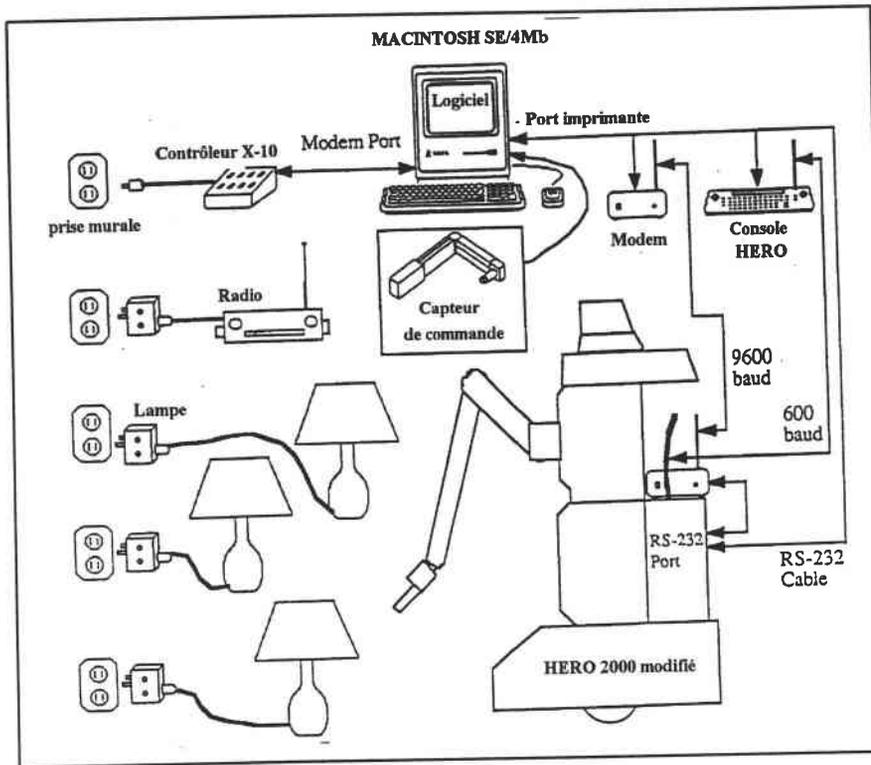


Figure I.16 : synoptique de l'application de REGALBUTO et al.

En mode téléopéré la personne commande via une fenêtre graphique ou un clavier prévu à cet effet tous les mouvements exécutables de HERO 2000 (fig. I.17). En mode automatique l'environnement dans lequel le système doit évoluer est au préalable modélisé (modèle type plan d'architecte) [REGA 89]. L'environnement est reproduit à l'écran en vue de dessus permettant la désignation d'un point but. Le choix de l'action à exécuter se fait dans une liste déroulante contenant toutes les actions réalisables dans cette pièce (fig. I.18).

| TELEOPERATOR | | | | | |
|---|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Incr. | <input type="checkbox"/> Cont. | Record | Replay | Home | Exit |
| 3 | 8 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| speed | forward | backward | spin ccw | spin cw | |
| Stop | Stop | Stop | Stop | Stop | |
| 30 | 30 | 30 | 15 30 | 30 | 30 |
| torso ccw | torso cw | arm up | arm dn | elbow up | elbow dn |
| Stop | Stop | Stop | Stop | Stop | Stop |
| 30 | 30 | 30 | 30 | 9 | 7 |
| pitch up | pitch dn | roll ccw | roll cw | grip | force |
| Stop | Stop | Stop | Stop | Stop | Stop |
| Stop Everything | | | | | |
| torso 0: arm 40: elbow 90: pitch 90: roll 0: grip 0: force 0: speed 3 ok | | | | | |

Figure I.17 : écran de la commande en mode téléopéré.

Une recherche de chemin reliant la position de la base au point but est alors générée. Le mobile peut suivre la trajectoire calculée en se localisant grâce à des balises infrarouges commandées par le superviseur via l'appareil de contrôle de l'environnement par courant porteur.

A notre connaissance, seuls des essais avec le mode téléopéré ont été effectués par des personnes handicapées. Il en est ressorti qu'il fallait cinq à dix minutes par action, et que pour certaines personnes, une aide automatisée serait nécessaire. Partant de ces constatations REGALBUTO et al. ont développé un mode automatique. Des essais avec une personne handicapée ayant fait partie de la première série d'essais, ont montré une diminution de moitié environ des temps d'action.

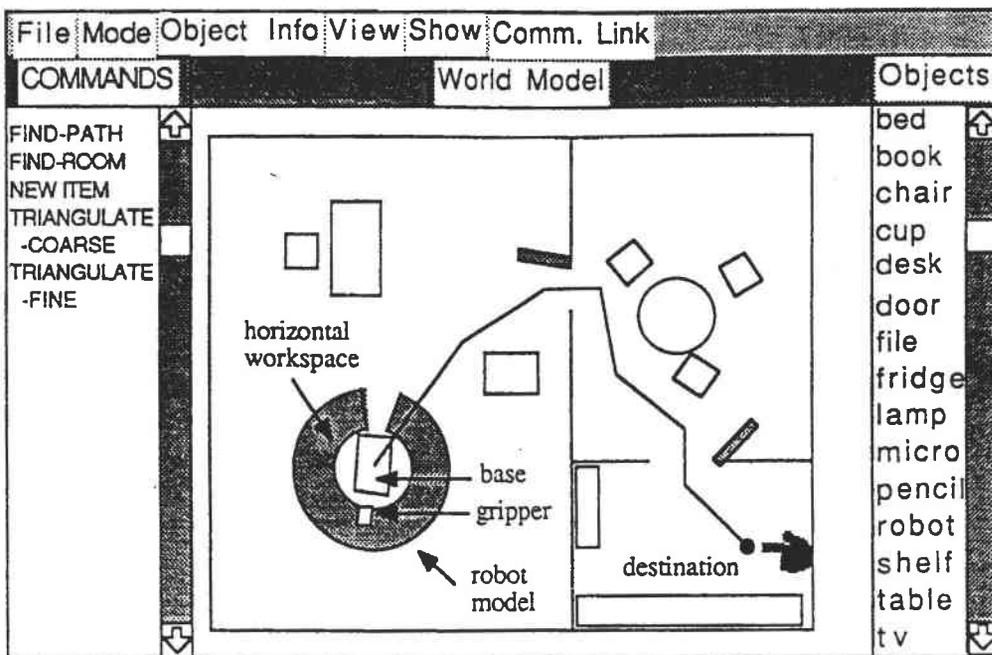


Figure I.18 : écran de visualisation permettant de désigner l'action à exécuter.

- MADARASZ et al. [MADA 86] ont développé une application d'aide à la mobilité de haut niveau permettant aux personnes handicapées de se déplacer d'un point à un autre en fauteuil électrique, et ce avec une autonomie complète. Leur robot a été prévu pour se mouvoir à l'intérieur d'un immeuble à plusieurs étages. Pour cette étude, un réseau de capteurs à ultrasons, une caméra et un ordinateur ont été installés sur un fauteuil roulant électrique standard (fig I.19).



Figure I.19 : véhicule autonome de MANDARASZ et al.

Le modèle de l'environnement est un modèle symbolique où les structures naturelles les plus représentatives (balises) sont incorporées : murs, intersection de couloirs, ascenseurs, ... La structure du modèle est à trois dimensions (fig. I.20) :

- une dimension pour le numéro de l'étage,
- une dimension pour le nombre de murs,
- une dimension pour la position absolue des chambres de l'étage.

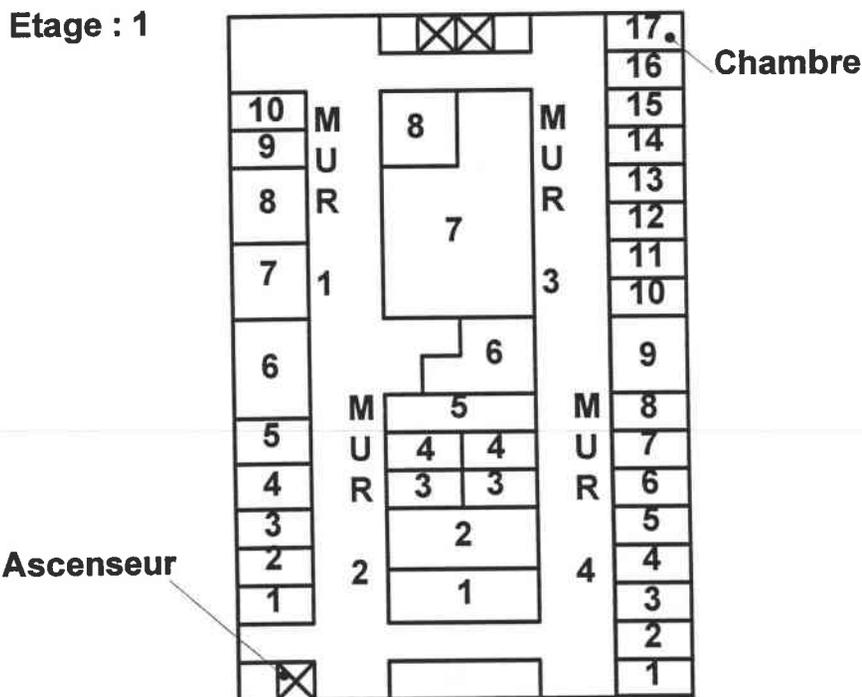


Figure I.20 : exemple de modélisation de l'environnement de MADARAZ et al.

Les obstacles obstruant le passage de véhicule sans qu'il soit possible de les contourner sont inclus dynamiquement dans le modèle.

Seule l'étude de l'intégration des techniques de la robotique mobile a été décrite et testée. L'interface entre la personne handicapée et la machine n'a pas été étudiée.

III.5 DISCUSSION

Comme nous avons pu le remarquer de plus en plus de laboratoires de recherche travaillant dans le domaine de la robotique mobile appliquent leur savoir-faire technique au monde des handicapés. La démarche adoptée le plus fréquemment ne part donc pas du besoin pour y répondre techniquement mais au contraire consiste à rechercher un champ d'application aux concepts initialement mis au point. Ainsi des travaux de CONNEL et al. [CONN 90] sur les architectures réactivistes ou ceux de BORENSTEIN [BORE 92] sur la méthode "VFH" de navigation par ultrasons découlent des réalisations concernant le pilotage des fauteuils roulants électriques.

De ce fait nous pouvons constater que les propositions d'aide à la navigation sont souvent dédiées à une seule fonctionnalité. Seul un suivi de ligne est disponible avec le fauteuil de WAKAUMI [WAKA 92], où encore avec le fauteuil de YODER et al. [YODE 94] qui propose un suivi de trajectoire enregistré au préalable par une tierce personne. Dans [BUHL 93] BUHLER et al. proposent à la personne handicapée un fauteuil doté de la capacité de déplacement holonome et des fonctionnalités de mouvements pré-enregistrés, mais ces aides ne sont pas encore implantées sur un même fauteuil. Aucune application regroupant plusieurs fonctionnalités de bas et haut niveau confondus n'a semble-t-il été publiée.

Pour les mêmes raisons, les études publiées sur l'aide à la navigation, ne décrivent pas la partie coopération et interfaçage entre la personne handicapée et le fauteuil : les publications n'explicitent généralement que l'aspect technique des fonctionnalités implantées, soit parce que les problèmes d'utilisation réelle du système semblent mineurs aux auteurs, soit simplement parce qu'ils n'ont pas été abordés.

Néanmoins, dans [BELL 94], BELL et al. cherchent à analyser les volontés de la personne en étudiant les mouvements qu'elle applique au joystick. Le système enclenche un accostage si la personne ralentit la vitesse de déplacement du fauteuil à l'approche d'un obstacle, un évitement automatique dans le cas contraire. Leurs travaux futurs consisteront à développer une répartition automatique du mode d'évitement d'obstacle et du mode passage de portes.

IV LE PROJET V.A.H.M.

IV.1 JUSTIFICATION

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 (tétraplégiques) ou certains handicaps cognitifs (personnes âgées, traumatisés crâniens) 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 besoins des utilisateurs potentiels d'un fauteuil "intelligent" ainsi que les contraintes afférentes à une telle application de la robotique mobile. Nous concluons par l'énoncé des principes à la base de la conception du projet V.A.H.M..

IV.1.1 Le fauteuil "intelligent" : définition des besoins

Très peu d'études concernant les besoins d'une aide à la navigation ont été publiées. En particulier, il n'existe pas actuellement d'évaluation clinique permettant de les définir.

Les experts européens des commissions spécialisées dans le domaine de l'aide technique pour handicapés dans le rapport [TIDE 94] ont toutefois émis le souhait que le fauteuil électrique soit doté de fonctionnalités automatiques comme la détection de collisions ou le pilotage automatique.

D'autre part à partir d'interviews d'utilisateurs de fauteuils électriques dans [NELS 90] et [VERB 91] est proposée une liste de besoins spécifiques concernant l'assistance à la mobilité. Outre les besoins en sécurité et fiabilité un certain nombre de fonctionnalités sont citées. Pour leur réalisation elles empruntent aux techniques développées en robotique mobile :

- Fonctionnalités réactives ou à mouvement pré-enregistrés telles que le suivi de mur, le suivi de ligne, le suivi de personne, l'évitement automatique d'obstacles et la prévention de collisions et de chutes (détection d'escalier).
- Fonctionnalités nécessitant un modèle de l'environnement d'évolution du fauteuil

telles que la génération et le suivi automatique de trajectoires ou la localisation du robot mobile.

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 ce déplacer.

IV.1.2 Le fauteuil "intelligent" : définition des contraintes

L'implantation de techniques et de technologies issues de la robotique mobile sur un fauteuil roulant soulève des problèmes spécifiques à ce type d'application.

Dès lors que l'on travaille dans le domaine de la technologie pour handicapés, du fait de l'étroitesse du marché potentiel, le facteur coût apparaît comme primordial dans l'établissement du cahier des charges. Les contraintes que cela implique sont de deux ordres : la structure du robot devra être de type modulaire pour s'adapter à la grande diversité des handicaps et des situations. En particulier, 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, ...). D'autre part, le choix de l'architecture hardware du robot doit également tenir compte des contraintes économiques. Ceci exclut l'utilisation des caméras en tant que capteur de localisation, non pas du fait de leur coût intrinsèque mais plutôt de celui de la structure informatique de traitement qu'elles impliquent.

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. 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 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 de la machine quitte à dégrader son fonctionnement jusqu'à un contrôle manuel classique de fauteuil électrique.

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, un dialogue doit être établi qui minimise le nombre d'actions nécessaire pour accéder à une commande. Par ailleurs l'interface devra être suffisamment modulaire pour s'adapter aux capacités cognitives et intellectuelles du pilote.

IV.1.3 Conclusion

Dans le domaine général de la robotique en milieu hostile, faute de pouvoir rendre le robot parfaitement autonome, la problématique de robotique de substitution est passée à une problématique de robotique de coopération. Ainsi cherche-t-on à répartir les tâches de façon optimale, l'homme apportant sa meilleure compréhension de l'environnement, la machine ses facultés de précision et de répétabilité [NORE 91] [LEE 93].

L'automatisation d'un fauteuil électrique rentre dans ce cadre, notre environnement quotidien étant par définition hostile à la personne handicapée. Cependant aux facteurs techniques justifiant un partage des tâches homme/machine viennent s'ajouter d'autres arguments. Le premier découle de la contrainte de coût de revient de l'ensemble : nous pouvons envisager d'optimiser le rapport coût/performance du système en compensant les lacunes des techniques implantées par des informations haut niveau provenant de la personne.

D'autre part, pour des raisons psychologiques de bonne acceptabilité d'une aide robotisée il est impératif que le fauteuil "intelligent" ne soit pas simplement un appareil permettant de transporter automatiquement la personne d'un lieu à un autre [NELS 90]. L'utilisateur via son interface doit être inclus dans la boucle de commande du fauteuil pendant l'exécution d'un mouvement.

Les contraintes de coût, de robustesse et d'acceptabilité du robot ne sont donc pas contradictoires mais imposent une coopération entre l'homme et la machine pour l'accomplissement d'une tâche de mobilité.

IV.2 DEFINITION DU SYSTEME

En réponse aux besoins cités ci-dessus, l'équipe Capteurs et Machines Intelligentes (C.M.I.) du Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles (L.A.E.I.) de l'Université de METZ a axé ses recherches en robotique mobile sur l'aide aux déplacements de personnes handicapées moteurs. Ce projet intitulé V.A.H.M. (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs) [PRUS 91] [BOUR 93a, 93b] se propose d'améliorer la commande des fauteuils roulants électriques en leur adjoignant des facultés de mobilité autonome.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est la conception d'une méthode permettant la sélection en statique voire en dynamique du meilleur mode de fonctionnement du fauteuil en fonction de l'environnement et du handicap de l'utilisateur. Il s'agit donc de définir un outil de mesure objectif de l'évolution des performances du système homme/machine et de la charge de travail de la personne.

Nous avons alors défini deux modes de commandes principaux où l'intégration de fonctionnalités de mobilité autonome et l'étude d'une coopération homme/machine sont possibles :

- 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 manuel assisté : 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.

Un troisième mode de fonctionnement, le mode manuel est similaire à une commande classique de fauteuil roulant électrique et servira donc de référence pour l'étude des deux autres.

L'implantation pratique de ceci s'effectue sur un prototype de fauteuil roulant électrique muni de fonctionnalités intelligentes construit à partir d'une base mobile ROBUTER, d'un micro-ordinateur portable (486DX33) et d'un siège pour personne handicapée (fig. I.21). 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.

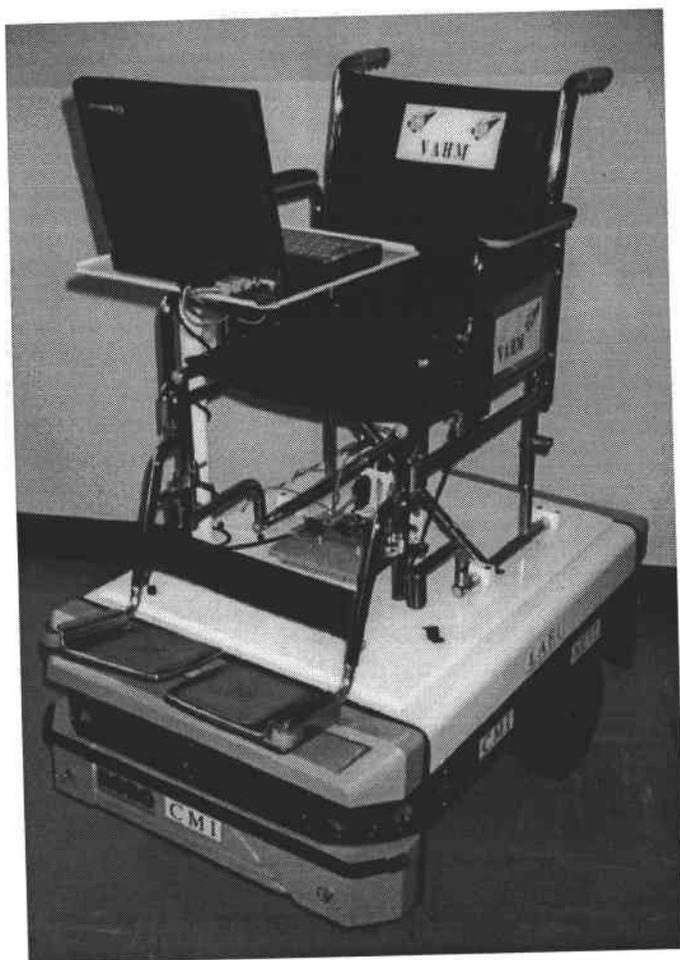


Figure I.21 : le prototype du projet V.A.H.M.

Pour l'étude et le développement du projet V.A.H.M. quatre sous-thèmes de recherche ont été constitués dans l'équipe C.M.I., la planification, la navigation, la perception et enfin la coopération homme/machine qui fait plus particulièrement l'objet de ce mémoire.

IV.2.1 Architecture globale

De toute évidence, un contrôle de fauteuil roulant électrique nécessite la planification d'une action, explicitement si un modèle de l'environnement est présent, implicitement lors d'un guidage manuel. Dans la définition de l'architecture de notre robot mobile la place de l'homme dans cette structure apparaît comme un problème fondamental. Son rôle peut en effet aller du contrôle total du fauteuil à celui d'un superviseur fixant un objectif et contrôlant sa réalisation.

Pour des raisons économiques et psychologiques déjà évoquées ci-dessus, il nous semble préférable de réaliser une véritable coopération entre l'homme et la machine. Cette démarche est actuellement la plus couramment adoptée en télémanipulation de robots, l'homme apportant sa meilleure compréhension de l'environnement et de la tâche à accomplir, la machine ses facultés de réflexes, de répétabilité et de précision [LEE 93].

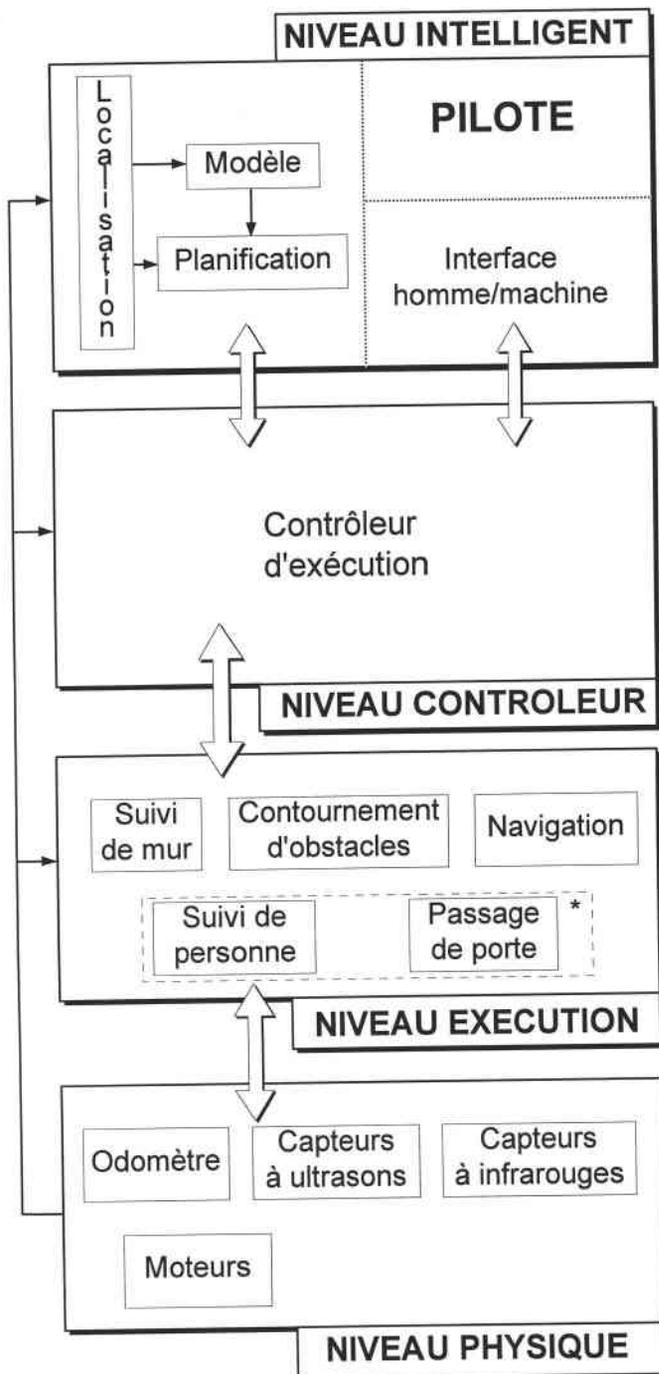
Dans le domaine de la robotique mobile deux écoles se sont affrontées : la première "réactiviste" fait largement référence à la "subsumption architecture" de R.A. BROOKS [BROO 86]. Celui-ci propose de construire une architecture software du robot mobile en empilant de manière hiérarchique des niveaux de compétence (éviter les obstacles, explorer, ...), chaque niveau pouvant inhiber ou faire appel aux niveaux inférieurs. Ce type de structure assure un bon niveau de réactivité, mais étant donnée l'absence de modèle de l'environnement, tous les mouvements planifiés sont interdits.

La seconde école utilise, quant à elle, une structure de type "modélisation-action-planification". Elle décompose le robot en modules fonctionnels (perception, planification, ...) organisés en structure hiérarchique ou distribués selon les cas [PANG 90] [PAYT 86]. Cette fois, l'inconvénient est la faible capacité de réaction aux événements imprévus (obstacles non modélisés par exemple).

Les architectures hybrides, plus récentes, offrent un compromis entre ces deux tendances en proposant un système réactiviste au niveau bas et une planification au niveau haut [NORE 91] [MATA 92]. Nous pouvons noter que les deux écoles ont actuellement tendance à se rapprocher pour arriver l'une comme l'autre à une architecture hybride. L'architecture générale adoptée pour le projet V.A.H.M. est de ce type, ce choix se justifiant par l'objectif de modularité de la commande du fauteuil "intelligent" (possibilité de fonctionnalités de haut et bas niveau). La structure du projet se compose ainsi des quatre niveaux suivants (fig.I.22) :

- niveau intelligent,
- niveau contrôleur,
- niveau exécution,
- niveau physique.

Cette architecture permet l'utilisation de la base mobile suivant les deux modes de commande sélectionnables selon les capacités de la personne handicapée et la configuration de l'environnement: mode automatique où la personne n'intervient que pour la désignation de la tâche et éventuellement pour la modifier ; mode manuel assisté où le pilote fait appel à des primitives de types réactivistes pendant le guidage manuel du fauteuil. Nous pouvons encore faire une analogie avec les robots de téléopération en milieu hostile, où le changement de mode de commande est généralement dû à une perte de transmission des données entre le poste de contrôle et le robot. Dans notre cas, le problème est similaire bien que le pilote soit situé sur le robot mobile : le choix du degré d'autonomie de la base est fonction de la quantité d'informations pertinentes provenant de l'utilisateur et des capteurs de perception de l'environnement.



(*) actuellement non implanté sur le robot (en cours de développement)

Figure I.22 : architecture du robot V.A.H.M..

IV.2.2 Niveau intelligent

A ce niveau une coopération s'établit entre les facultés d'analyse et de raisonnement de la personne handicapée via l'interface homme/machine et celles de la machine représentées, pour l'instant, par un modèle de l'environnement associé à un module de planification.

• 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 les connaissances qu'elle a de son environnement, d'autre part sur ses facultés d'interprétation et d'adaptation à la situation. A l'heure actuelle seul un modèle géométrique discret de l'environnement est implanté. Il est basé sur la méthode des codes multivaleurs développée au laboratoire L.A.E.I. [PRUS 92] où l'espace libre de l'environnement est codé par une succession de rectangloïdes (fig. I.23).

Un module de planification calcule alors une trajectoire globale de la position initiale de la base à sa position d'arrivée dans l'environnement désigné par la personne, ceci à l'aide d'un algorithme A* en tenant compte des dimensions du fauteuil ainsi que de la contrainte cinématique de non holonomie [ROHM 93]. La trajectoire ainsi définie apparaît sous forme d'une ligne brisée (fig. I.23).

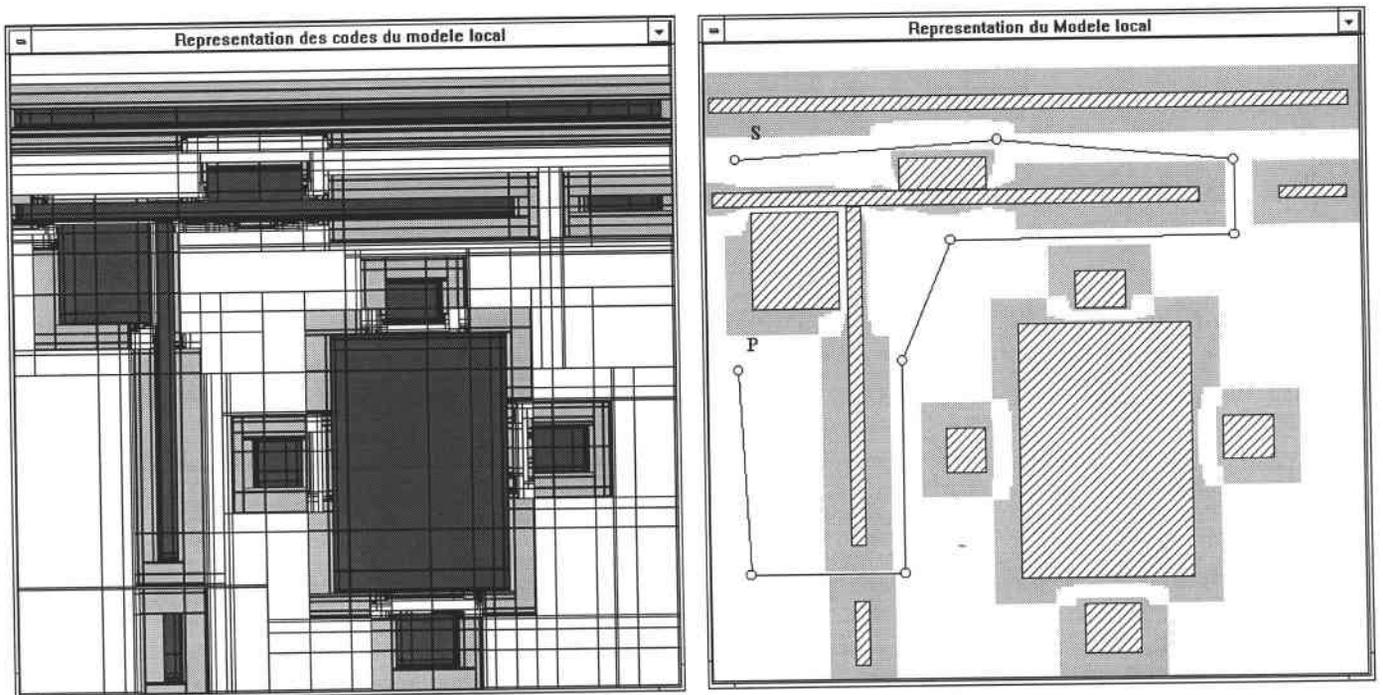


Figure I.23 : exemple de modélisation de l'environnement et planification de trajectoire.

• Le module d'interface homme/machine

C'est par l'intermédiaire de ce module que le pilote du fauteuil dialogue avec la machine par une succession de fenêtres graphiques interactives affichées à l'écran couleur de l'ordinateur portable embarqué. Pour notre application nous avons développé deux types d'interface de communication, l'une utilise

un capteur à commande tout ou rien (interrupteur quelconque) et l'autre un capteur à commande proportionnelle (joystick).

La personne peut ainsi choisir l'une des fonctionnalités suivantes :

- mode automatique,
- mode manuel assisté,
- mode manuel,
- mode contrôle de l'environnement.

Un des objectifs du projet V.A.H.M. est de définir un outil d'évaluation clinique de l'apport d'une aide à la navigation en fauteuil roulant électrique. Toutes les fonctionnalités sont donc implantées sur la base mobile (fig. I.24). L'ajout ou le retrait de certaines d'entre elles pour une application donnée ne modifie que le module d'interface homme/machine.

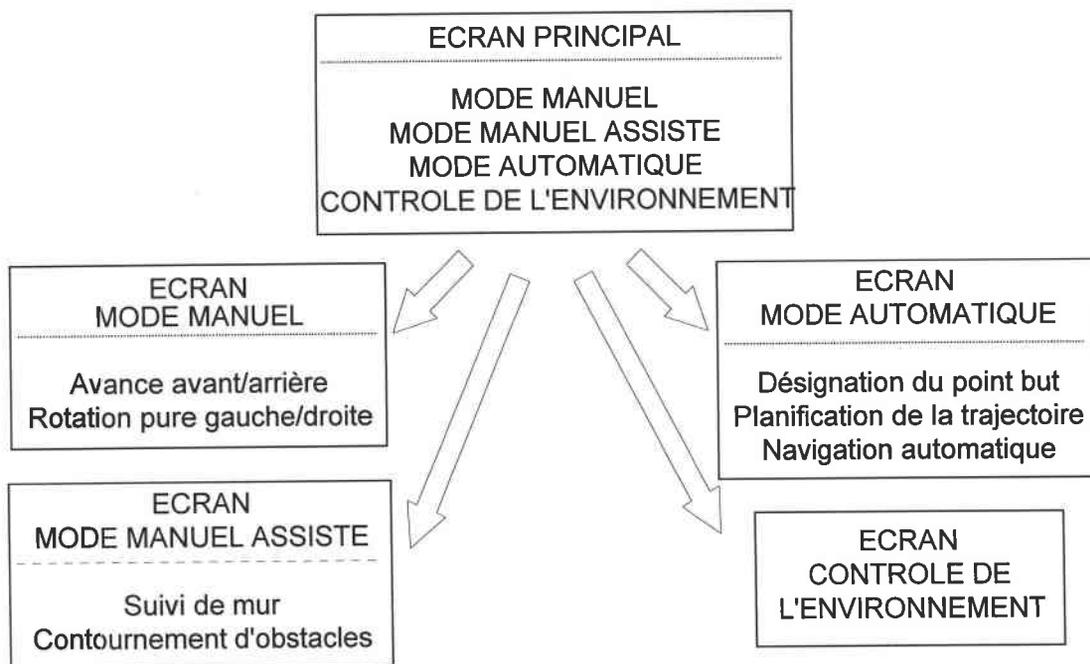


Figure I.24 : synoptique de l'interface homme/machine du projet V.A.H.M..

Le mode automatique

Ce mode de fonctionnement n'est utilisable que dans les environnements préalablement modélisés. La personne ayant désigné le point d'arrivée via l'interface, une trajectoire est planifiée et exécutée de manière automatique. Au cours de la navigation un module d'évitement d'obstacles est activé afin de contrecarrer les erreurs de glissements du fauteuil ou l'imprécision de modélisation de l'environnement.

Le système de détection par capteurs à ultrasons ne peut détecter de façon fiable tous les obstacles. Dans certains cas comme la détection de barreaux verticaux (pieds de tables ou de chaises) le problème - non résolu actuellement sur la base mobile - est soluble [BORE 92]. Dans d'autres (table avec pied central, ...) le fait de donner à l'utilisateur la possibilité d'intervenir pendant un mouvement automatique, pour compenser les erreurs éventuelles d'interprétation des capteurs de détection, est une solution intéressante du point de vue économique et peut être même psychologique.

La personne peut donc intervenir préventivement dans le contrôle de la base, en amorçant une déviation momentanée de la trajectoire dans la direction droite où gauche requise si elle estime que l'objet sera difficilement perçu par les capteurs (fig. I.25). Si elle n'intervient pas et qu'effectivement l'obstacle est non perçu par la base, la collision actionne un capteur de contact d'urgence qui stoppe le robot.

Sans que cela soit indispensable, d'autres cas de figures peuvent susciter une intervention humaine: lors du contournement automatique d'un obstacle repéré par les capteurs ultrasonores la direction d'évitement est choisie en fonction de la position relative du fauteuil et de l'obstacle comme il sera montré plus loin. Il se peut cependant que ce parti-pris aboutisse à un choix erroné du fait de la configuration de l'environnement (fig. I.25). Le pilote de la base peut donc sélectionner une direction plus appropriée.

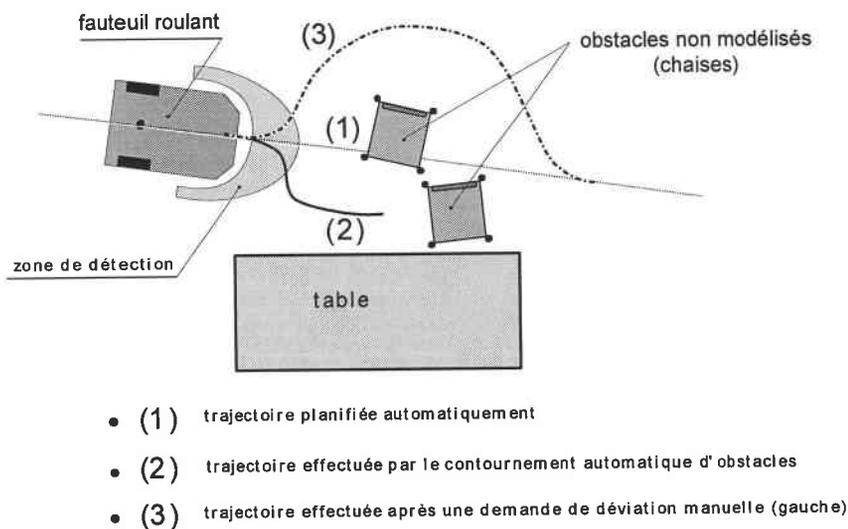


Figure I.25 : exemple où l'intervention de la personne est nécessaire en mode automatique.

Le mode manuel et le mode manuel assisté

Une trajectoire planifiée globalement n'est pas toujours la solution optimale pour une tâche de déplacement, même dans les cas les plus difficiles où le pilote ne peut actionner qu'un capteur à commande tout ou rien. Si le déplacement envisagé est de distance trop réduite, ou si le fauteuil se trouve dans

un environnement encombré de nombreux obstacles non modélisés, il peut être plus intéressant de commander les déplacements du fauteuil à travers le mode manuel ou le mode manuel assisté.

D'autre part, en situation réelle, nous ne pouvons envisager d'enregistrer que les environnements les plus familiers, qu'ils soient hospitaliers ou domestiques. En dehors de ces zones, le fauteuil doit tout de même être capable d'évoluer en n'utilisant qu'une partie des ressources du système. Enfin, un dernier argument permet de justifier l'utilité d'un mode mixte de fonctionnement, automatique ou manuel assisté, que la personne sélectionne à l'arrêt. En effet, le fait d'avoir introduit une dose de réactivité dans le processus planifié (évitement automatique d'obstacles) empêche la base de s'approcher des obstacles potentiels, mais aussi de ceux que l'utilisateur souhaite atteindre.

En mode manuel, la commande de la base mobile ne diffère pas de celle d'un fauteuil électrique classique. Pour sélectionner une direction la personne peut utiliser un capteur à commande proportionnel, ou alors valider une des différentes possibilités de mouvements proposées si elle dispose d'un capteur à commande tout ou rien (marche avant ou arrière et rotation pure à droite ou à gauche).

Il est également possible de faire appel aux macrocommandes d'assistance au pilotage (suivi de mur, contournement d'obstacles, ...) disponibles dans le mode manuel assisté. Ainsi, dans des locaux publics, un centre de rééducation par exemple, il peut être plus confortable pour la personne handicapée d'asservir le robot mobile à suivre un mur pour se déplacer le long d'un couloir.

Le mode contrôle de l'environnement

Ce mode est présent dans l'architecture du projet V.A.H.M., bien qu'il n'ait pas directement de lien avec l'aide à la navigation. Son implantation pourra servir simplement à étudier sa place et son utilisation dans un tel système robotisé. Nous pensons en effet que le développement d'un projet d'aide à la mobilité uniquement destiné à "se déplacer pour se déplacer" n'est pas le but primordial d'une personne handicapée. Une interface graphique permet donc un accès simple à des systèmes classiques de contrôle de l'environnement par infrarouges.

IV.2.3 Niveau contrôleur

La place du niveau de contrôle dans l'architecture du projet est celle d'un aiguilleur de données entre le niveau intelligent et le niveau exécution.

Suivant le mode de fonctionnement choisi par la personne, ce niveau reçoit des ordres d'exécutions de trajectoires ou éventuellement des ordres de contrôle de l'environnement. Les ordres d'exécutions de trajectoires proviennent soit directement de l'utilisateur qui alors a choisi le mode manuel ou le mode manuel assisté, soit du module de planification si le mode automatique est sélectionné.

Dans tous les cas, le niveau contrôleur veille à l'accomplissement d'une tâche ainsi définie en commandant les modules adéquats du niveau exécution. Son rôle consiste également à informer l'utilisateur du déroulement de l'action, et éventuellement, à capter et à faire transiter en cours de mouvements une commande provenant de celui-ci.

IV.2.4 Niveau d'exécution

La couche d'exécution intervient dans les deux modes de commande principaux du projet qui sont le mode automatique et le mode manuel assisté. Ce niveau utilise directement les informations des capteurs de détection de l'environnement et de localisation pour réaliser des asservissements locaux. Cette couche comprend les fonctionnalités de bas niveau telles que :

- la navigation (suivi de trajectoire planifiée par le module de planification),
- le suivi de mur,
- le contournement automatique d'obstacles,
- le passage de portes,
- le suivi de personne.

Les modules passage de portes et suivi de personne ne sont pas implantés sur la base pour l'instant. Du fait du caractère modulaire de l'architecture choisie pour le projet V.A.H.M., l'intégration future de ces modules ne remet pas en cause le fonctionnement global du fauteuil.

En mode manuel assisté, les différents modules d'aide à la navigation sont commandés directement par l'utilisateur du fauteuil. Par contre, en mode automatique, le module de navigation transpose une trajectoire planifiée au niveau intelligent en une commande des moteurs en tenant compte localement des obstacles inconnus ou modélisés de façon imprécise, ainsi que des ordres émanants du pilote.

• Le module de navigation

Le module de navigation doit permettre à la base de suivre une trajectoire transmise par le module de planification sous la forme d'un tableau des points constituant une ligne brisée de la position initiale du fauteuil jusqu'au point but désigné par la personne handicapée.

En cours de route l'utilisateur peut infléchir le suivi de la trajectoire à droite ou à gauche. La méthode de suivi de chemin doit donc être capable de suivre la ligne brisée en tenant compte (fig. I.26) :

- de la cinématique du fauteuil (rayon de braquage, contrainte de non holonomie),
- du confort de la personne (lissage de la trajectoire, mouvements doux, ...),
- des obstacles imprécisément modélisés ou non modélisés à contourner,
- de la déviation momentanée demandée par l'utilisateur.

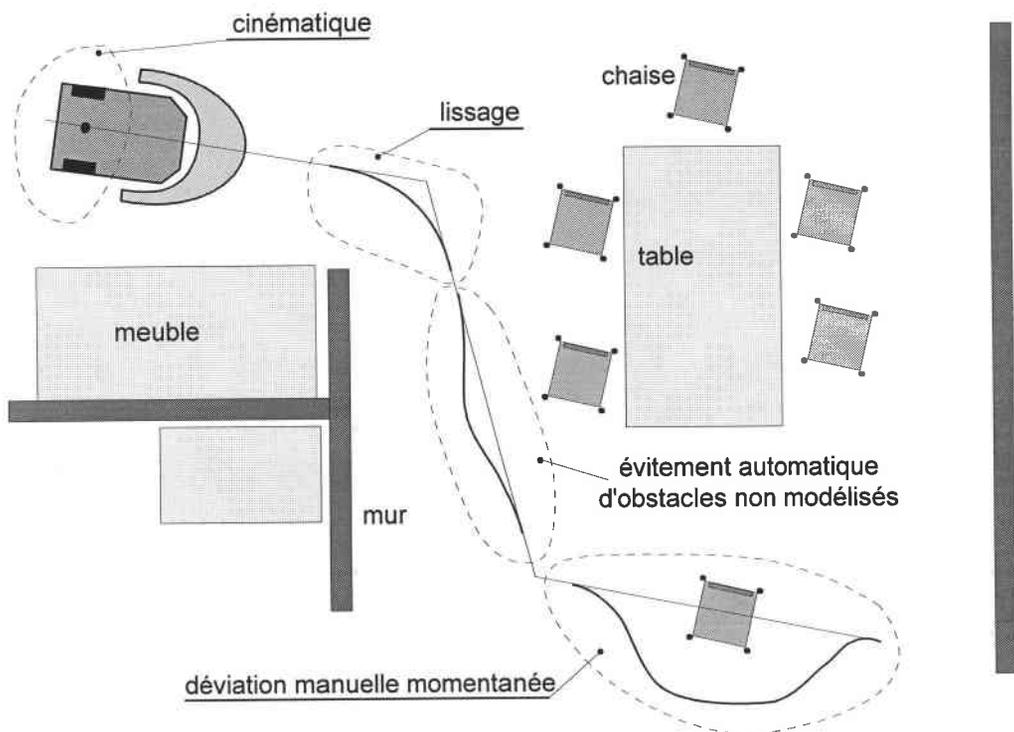


Figure I.26 : contraintes de suivi de ligne brisée.

Pour valider l'utilisation du mode automatique en situation réelle, nous avons implanté trois méthodes de suivi de chemin [PINO 92], respectant au mieux les contraintes citées ci-dessus :

- suivi de la trajectoire en exécutant une succession de mouvements linéaires et de rotation pure, ce qui donne un mouvement analogue à celui obtenu en commandant un fauteuil par capteur tout ou rien,

- lissage par arcs de cercle de la ligne brisée, le fauteuil suivant alors une succession de lignes droites et d'arcs de cercle,
- lissage par arc de clothoïde afin de suivre au mieux cinématiquement et géométriquement la trajectoire, la base suivant alors une succession de lignes droites et d'arcs de clothoïde.

Ces méthodes demandent un dialogue entre le niveau intelligent et le module de navigation pour calculer des sous-trajectoires. Leur implantation a été réalisée en tenant compte des possibilités de commande de haut niveau de la base mobile ROBUTER. Celle-ci est en effet munie de macrocommandes telle que, par exemple "aller tout droit", "tourner sur place", "suivre un rayon de courbure",

L'exploitation de ces commandes de haut niveau a l'inconvénient de nécessiter l'arrêt de la base en cours de route pour permettre un évitement automatique d'obstacles ou/et une demande de déviation momentanée. Cela nous a conduit à utiliser la méthode de MOUMEN [MOUM 94, 94a] pour gérer les déplacements de la base mobile. La méthode ainsi implantée est 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 alors comme des perturbations volontaires (fig. I.27).

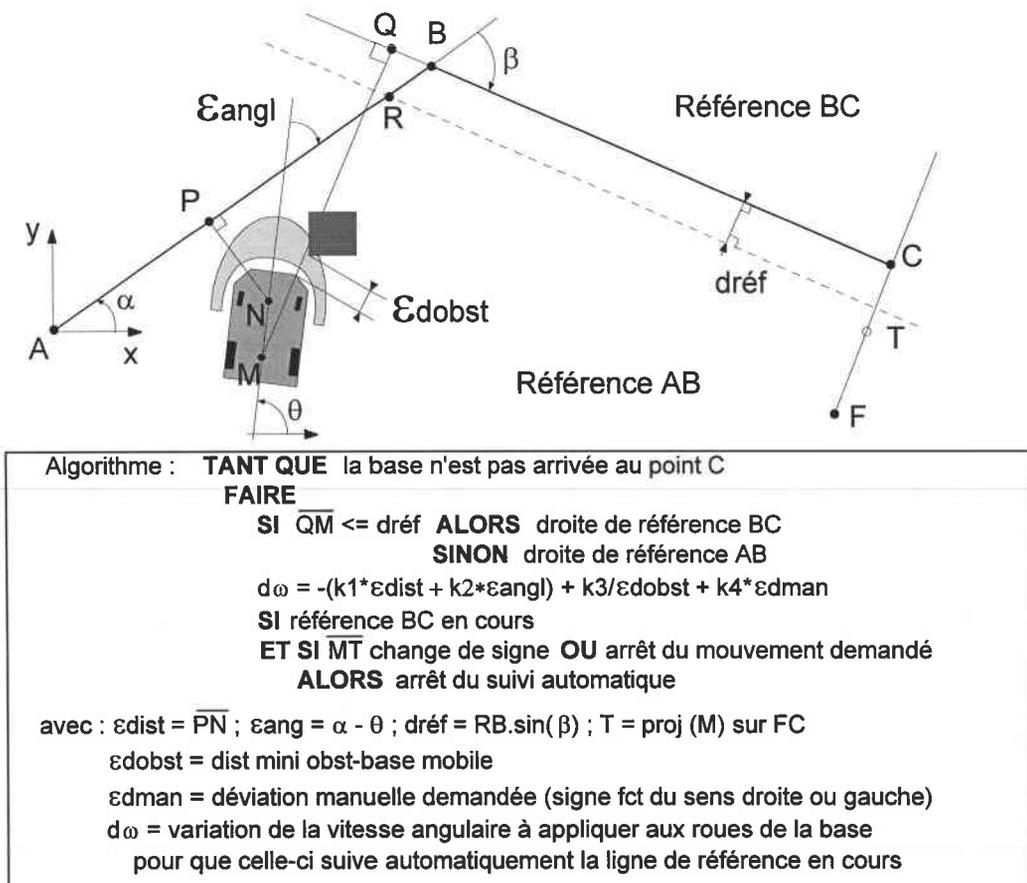


Figure I.27 : méthode de suivi de ligne de MOUMEN [MOUM 94].

- **Le module de contournement automatique d'obstacle**

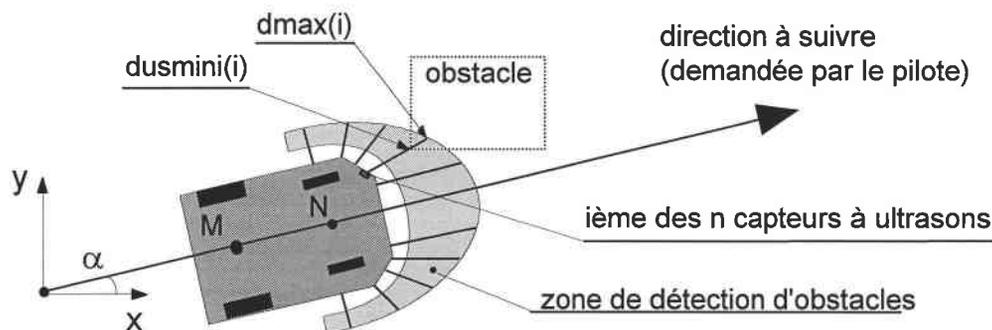
Ce module, commandé directement par l'utilisateur du fauteuil, permet d'éviter les obstacles qui se trouvent sur le passage de ce dernier, sans nécessiter l'arrêt de la base mobile. La méthode d'évitement automatique d'obstacles diffère suivant le type de capteur de commande, tout ou rien ou proportionnel.

Pour une aide à la navigation avec une commande tout ou rien, un évitement d'obstacle est implanté en marche avant. Cette méthode de contournement d'obstacles est dérivée de la méthode de suivi de trajectoire décrite plus haut. Dans ce cas, la trajectoire à suivre est une ligne droite portée par la droite perpendiculaire au train moteur. Le fauteuil cherche à suivre cette ligne et se recale sur celle-ci après avoir contourné les obstacles éventuels.

Il est nécessaire que l'utilisateur positionne l'orientation de la base mobile de manière à ce que la direction de la ligne à suivre permette un évitement d'obstacles acceptable. Ces informations de haut niveau provenant de la personne évitent l'appel à un module d'évitement d'obstacles intelligent qui devrait prendre la décision de contourner l'obstacle par la droite ou par la gauche. Avec ce mode la personne embarquée sait par avance ce que le fauteuil va faire, puisque c'est elle qui est responsable du déroulement de l'opération. Le module d'évitement est donc largement réactif vis-à-vis de l'environnement proche, étant donné qu'il n'y a pas de dialogue avec un module de prise de décision.

Compte tenu de la ceinture de capteurs à ultrasons montée sur la base nous avons défini une zone à deux niveaux de contournement pour la détection des obstacles à éviter. La première permet d'éviter les obstacles sans changer la vitesse de déplacement (20 cm/s) du fauteuil, la seconde réduit cette vitesse à 10 cm/s afin de permettre à la base mobile d'éviter les obstacles trop proches (fig. I.28). Outre les considérations de sécurité ceci pallie au manque de rapidité actuel du système : le temps de cycle correspondant à la lecture des données ultrasonores, odométriques, au dialogue via la liaison série entre la base et le PC et à l'envoi de la commande en vitesse des roues est d'environ de 650 à 700 ms.

Avec une commande de type proportionnel pour le déplacement du fauteuil, la zone de détection dans laquelle la base va éviter les obstacles est à un niveau. Contrôlant la vitesse d'avance du fauteuil, la personne ralentit la vitesse de celui-ci à l'approche d'un obstacle. Le mouvement d'évitement du fauteuil est alors proportionnel à sa vitesse et à la position de l'obstacle dans la zone qui est transposée en une force répulsive par rapport au mouvement demandé.



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

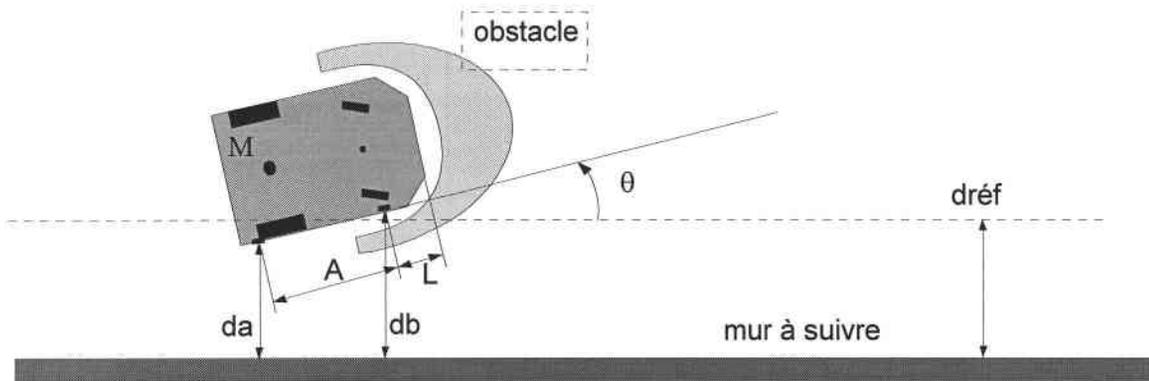
avec : $\varepsilon_{obst} = \inf (d_{usmini(i)} / d_{max(i)})$ pour $i=1$ à n (force de répulsion)
 si pas d'obstacle dans la zone de détection alors $\varepsilon_{obst} = 0$
 mini = valeur minimale de la force de répulsion à partir de laquelle
 il faut réduire la vitesse d'avance pour pouvoir contourner 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 I.28 : zone de contournement à deux niveaux de vitesse.

• Le module de suivi automatique de mur

Ce module, tout comme le module de contournement automatique d'obstacles, est commandé directement par le pilote du fauteuil. Cette fonctionnalité est destinée à être utilisée indifféremment en environnement modélisé ou en zone non modélisée. Dans ce dernier cas le fauteuil ne pouvant discriminer un mur d'un obstacle quelconque, le choix du côté à suivre (mur droit/mur gauche) est laissé à l'utilisateur.

La méthode employée pour suivre automatiquement le mur fait appel à celle de suivi de ligne décrite auparavant, mais avec la différence que ce n'est que le traitement des données ultrasonores et non pas des données odométriques qui donne la position cartésienne et angulaire de la base mobile par rapport au mur. Une fois la position et l'orientation du fauteuil connues, le module corrige le mouvement du robot afin de suivre le mur à une certaine distance d (fig. I.29). Là aussi, un module d'évitement d'obstacles, calqué sur le principe du module de contournement automatique d'obstacles, est activé en permanence pour contourner les obstacles accolés au mur ou pour stopper la base en cas d'impossibilité d'avance.



Algorithme : **TANT QUE** l'arrêt du mode suivi de mur n'est pas demandé
FAIRE
SI $dobst > mini$ **ALORS** vitesse d'avance = 10cm/s
SINON vitesse d'avance = 40cm/s
 $d\omega = -(k1 * \varepsilon_{dist} + k2 * \varepsilon_{angl}) + k3 / \varepsilon_{dobst} * sens$

avec : $\varepsilon_{dist} = (db + L * \sin(\theta)) - dréf$; $\varepsilon_{angl} = \theta = \arcsin((db - da) / A)$

ε_{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 I.29 : suivi de mur avec évitement d'obstacles.

IV.2.5 Niveau physique

L'architecture du projet V.A.H.M. est constituée de quatre couches. Au niveau le plus bas, le niveau physique, sont intégrés les capteurs de détection de l'environnement, les capteurs de localisation et les effecteurs du robot mobile. Le capteur de commande tout ou rien ou proportionnel est lui intégré au niveau de l'interface homme/machine.

Ce niveau physique est implanté sur une base mobile ROBUTER™ [ROBO 92]. Les dimensions et la mécanique de cette base sont similaires à celles d'un fauteuil électrique standard. Les roues avant étant folles, les effecteurs se réduisent dans notre application à deux moteurs à courant continu entraînant les roues arrières du robot mobile. Les déplacements possibles avec cette configuration cinématique respectent les déplacements non holonomes des fauteuils roulants. Cette contrainte cinématique de non holonomie complique la planification de trajectoire dans un environnement encombré tel qu'un appartement.

Le choix des capteurs de perception et de localisation est un élément fondamental dans le contrôle et l'autonomie du fauteuil. La fiabilité de l'ensemble robotisé en dépend aussi, comme nous l'avons vu précédemment. Cela explique la diversité des capteurs disponibles sur le marché [BIDE 92] :

- capteurs de contacts, à ultrasons, à infrarouges,
- vision tridimensionnelle par caméras,
- télémètre laser,
- magnétomètre,
- etc ...

Pour notre application, nous disposons d'une ceinture de capteurs de contact, de quatorze capteurs à ultrasons et d'un capteur odométrique (fig. I.30). Deux capteurs à infrarouges ont été développés au laboratoire L.A.E.I. [PINO 91] pour suppléer aux carences des ultrasons à faible distance. Leur implantation étant en cours, leur utilisation ne sera pas discutée dans ce mémoire.

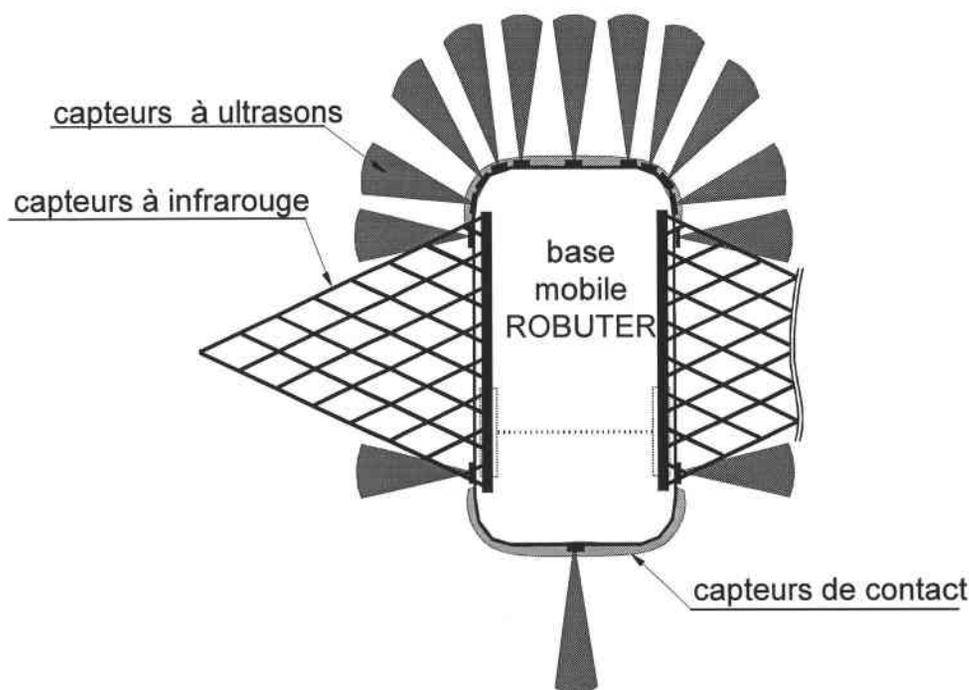


Figure I.30 : capteurs implantés sur la base mobile du projet V.A.H.M..

Chaque module de traitement est piloté par un processeur indépendant, un microprocesseur 68000 pour le traitement des données ultrasonores et un 68020 pour la gestion de l'odomètre et la commande en vitesse des roues arrière. Une liaison série relie la base mobile à l'ordinateur portable où est implantée l'architecture software du projet. Cette configuration du prototype est rapidement adaptable sur un fauteuil électrique classique.

Les capteurs implantés sur la base ne peuvent délivrer des informations parfaitement fiables, en raison de la faible résolution angulaire, du phénomène de spécularité et des problèmes d'échos parasites (crosstalk) pour les capteurs à ultrasons, ainsi que des glissements des roues inhérents aux contraintes mécaniques (adhérence, dynamique du mouvement, ...) pour les capteurs odométriques.

Des méthodes permettant de compenser les erreurs d'interprétation des données ultrasonores ont été décrites dans la littérature [PERE 93] [BORE 92]. A l'heure actuelle une méthode de fusion de données ultrasonores et odométriques est en cours de développement dans le cadre du projet V.A.H.M. [HORN 94].

En outre, un des postulats de base du projet est d'admettre que les imperfections inhérentes au choix des capteurs, l'absence de système de vision en particulier, seront compensées par des informations de haut niveau provenant de l'utilisateur du fauteuil électrique.

V CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les objectifs et les originalités du projet V.A.H.M. qui essaye de répondre aux besoins d'aide à la navigation des personnes ayant un fort déficit moteur.

Après avoir décrit brièvement le fauteuil roulant électrique, nous avons mis l'accent non pas sur la conception technique de ce dernier mais sur les différents moyens de le piloter en définissant deux types de commandes s'adaptant aux besoins des personnes handicapées : la commande par capteur de type tout ou rien et la commande par capteur de type proportionnel.

Nous avons ensuite présenté les différentes applications de robotique mobile médicale décrites dans la littérature spécialisée. Bien qu'en nombre croissant depuis quelques années ces applications n'ont pas abouti à un retour d'évaluation clinique. La description de ces aides concerne le plus souvent uniquement leur aspect technique, le problème de la place de l'homme dans le système robotisé n'étant que peu abordé. Par ailleurs, dans la plupart des applications décrites dans la littérature seul un mode de fonctionnement est accessible (suivi de ligne au sol, suivi de personnes, évitement automatique d'obstacles, ...).

Nous avons ensuite analysé les besoins de l'utilisateur en matière d'aide à la navigation, ainsi que les contraintes inhérentes à une telle application de la robotique mobile. Ces considérations nous ont amené à établir le postulat de base de la conception du projet V.A.H.M. : pour optimiser le rapport coût/performance du robot nous réalisons un système modulaire qui adapte au mieux la répartition des tâches entre

l'homme et la machine suivant le degré de handicap de l'utilisateur et la complexité de l'environnement. Cette coopération homme/machine présente en outre des avantages d'ordre psychologiques en intégrant la présence de la personne dans la boucle de commande du robot semi-autonome.

Dans cet objectif nous avons intégré deux modes principaux de commande, un mode automatique et un mode manuel assisté. Leur évaluation basée sur l'étude de la charge de travail de l'utilisateur du fauteuil "intelligent" est développée aux chapitres suivants.

CHAPITRE II

METHODOLOGIE D'EVALUATION DU SYSTEME HOMME/MACHINE

I INTRODUCTION

**II CONCEPTION ET EVALUATION DE L'INTERFACE
H/M DU PROJET V.A.H.M.**

III LA CHARGE DE TRAVAIL

**IV LES METHODES D'EVALUATION DE LA CHARGE
DE TRAVAIL**

V CONCLUSION

I INTRODUCTION

Un des objectifs principaux du projet V.A.H.M. est de construire un outil à même de préciser les besoins de personnes handicapées en terme d'aide à la mobilité. Dans cette optique la problématique évoquée dans ce second chapitre consiste à définir une méthodologie d'évaluation du système homme/machine.

Comme nous l'avons vu précédemment, le rôle du pilote du fauteuil est fonction du degré d'autonomie de la machine : selon le mode de commande sélectionné, automatique, manuel assisté ou manuel, l'utilisateur est plus ou moins impliqué dans la boucle de commande du système via l'interface. L'évaluation du système homme/machine devra donc prendre en compte à la fois les performances techniques de la machine, la charge de travail de la personne ainsi que la qualité de la communication entre les deux entités.

Ces trois aspects sont cependant fortement liés. En effet, si la personne n'a pas les moyens de commander efficacement les différentes fonctionnalités implantées sur le robot mobile, les performances techniques quelles qu'elles soient, seront masquées par les carences de l'interface. De plus, s'il est bien souvent possible d'estimer les caractéristiques techniques de la tâche à effectuer, il est beaucoup moins évident de déterminer exactement les procédures adoptées par l'utilisateur pour la réaliser. L'évaluation de l'interface consiste alors à estimer au cours de la réalisation de la tâche la charge de travail physique et mentale de la personne.

La première partie de ce chapitre décrit les différentes étapes de la conception et de l'évaluation de l'interface homme/machine du projet V.A.H.M., par une transposition de la méthodologie employée habituellement par les ergonomes.

La seconde partie tente de définir le concept de la charge de travail et décrit les méthodes les plus utilisées pour la quantifier. De cette étude nous pourrons déduire les critères permettant son estimation objective dans le contexte du pilotage d'un fauteuil "intelligent".

II CONCEPTION ET EVALUATION DE L'INTERFACE H/M DU PROJET V.A.H.M.

La conception de l'interface comporte deux étapes, une phase de conception et une phase d'évaluation (fig. II.1) [MILL 90] [KOLS 94].

La première phase débute par une analyse du système homme/machine et des différentes tâches à effectuer. L'analyse doit permettre de faire ressortir les besoins informationnels de l'utilisateur qui déboucheront sur la définition des informations à lui présenter en fonction de la tâche donnée. A ce niveau de conception, les fonctions de contrôle/commande doivent donc être explicitées. Un prototype d'interface homme/machine respectant les critères ergonomiques est alors réalisé et évalué statiquement.

La seconde étape a pour objectif d'évaluer l'interface homme/machine par une implantation sur site réel ou simulé. L'analyse des activités réelles de l'utilisateur et de la performance du système doivent alors démontrer la validité du système homme/machine.

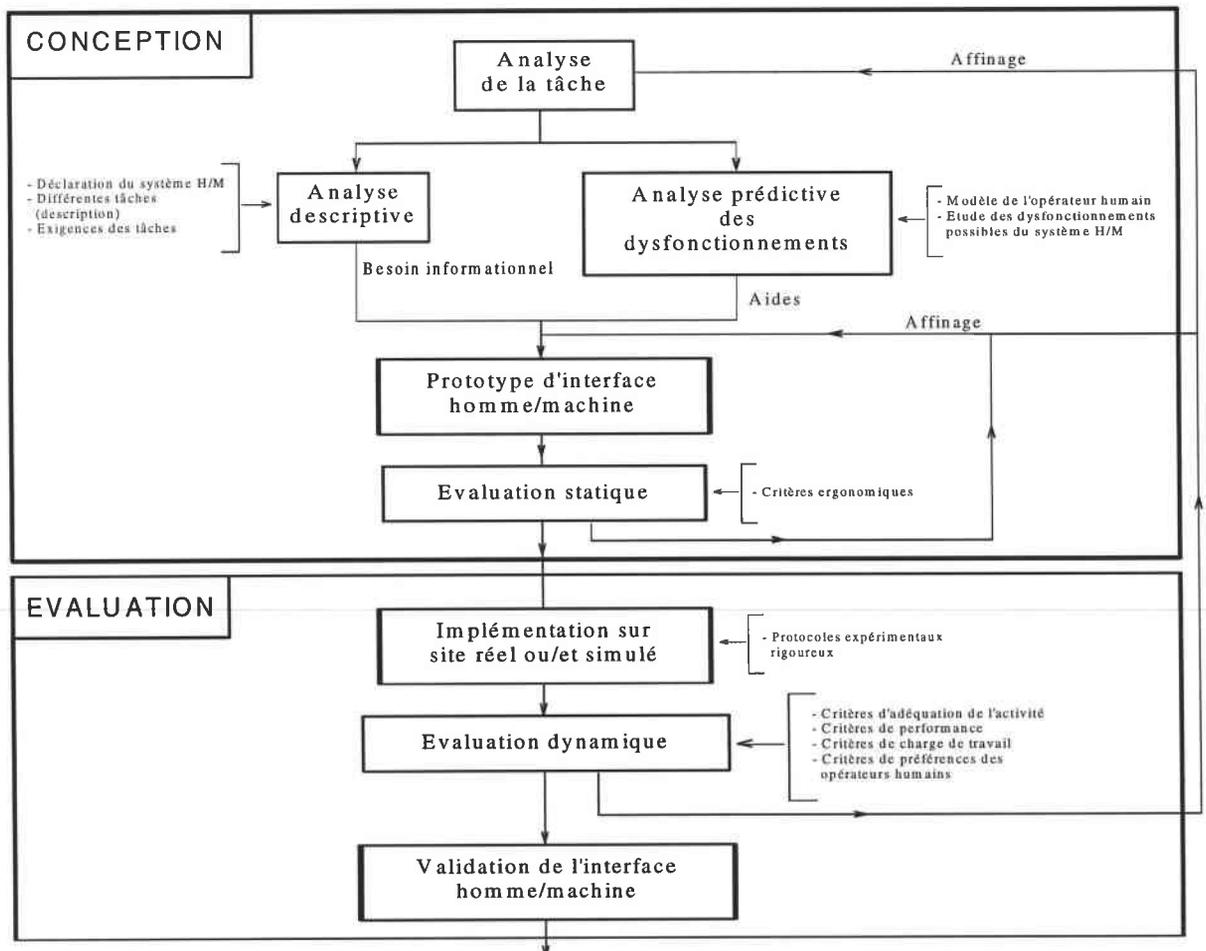


Figure II.1 : méthodologie de conception et d'évaluation des interfaces h/m d'après [SPER 88] et [MILL 90].

II.1 CONCEPTION DE L'INTERFACE HOMME/MACHINE

La démarche de conception d'interface homme/machine dépend de son domaine d'application (bureautique, milieu industriel, ...) et surtout des tâches à effectuer. Connaître précisément celles-ci est donc essentiel. De nombreuses méthodes sont disponibles dans la littérature pour étudier et décrire les tâches, avec comme objectif d'établir les exigences liées à ces dernières [BRAN 90] [SPER 88] [BERG 92]. Les tâches étant connues et souvent finalisées, ces méthodes sont généralement utilisables directement. LEPLAT dans [LEPL 82] cite LEONTIEF qui donne la définition suivante de la tâche : "une tâche est un objectif à atteindre dans des conditions déterminées", où l'objectif caractérise l'état final dans lequel le système doit se trouver.

Dans ce mémoire, nous entendons par tâche : "Aller à un lieu pour effectuer une action donnée (par exemple : aller téléphoner), cette action étant définie par le pilote ou par une tierce personne". Pour ce faire, le pilote utilise les différentes fonctionnalités implantées sur le fauteuil roulant électrique, fonctionnalités dont l'utilité devra être confirmée ou infirmée par l'évaluation technique puis clinique du système.

II.1.1 Analyse de la tâche

L'objectif de l'analyse de la tâche du point de vue du concepteur de l'interface est de déterminer la manière dont la personne va utiliser et enchaîner les fonctionnalités pour réaliser une tâche assignée. Cette analyse peut se scinder en deux phases distinctes (fig. II.1) [NEBO 90] :

- une phase descriptive qui doit amener le concepteur à définir l'ensemble des futures conditions de travail de l'utilisateur. Il doit pour cela :
 - délimiter le système homme/machine en y recensant l'ensemble de ses caractéristiques,
 - décrire les différentes fonctionnalités implantées dans le système,
 - schématiser le fonctionnement logique et temporel de l'ensemble des fonctionnalités pour réaliser la tâche,
 - définir en termes de contraintes physiques et mentales les exigences de la tâche.

- une phase de prédiction des dysfonctionnements éventuels du système homme/machine. Cette phase n'est pas étudiée dans ce mémoire, mais est abordée dans une autre thèse développée au laboratoire L.A.E.I. [BOUR 94].

La phase descriptive :

- La limite d'utilisation du système robotisé V.A.H.M. n'est pas définie totalement, car c'est l'évaluation clinique qui la précisera en fonction du handicap de la personne embarquée. Nous avons donc prévu un système général qui regroupe toutes les principales fonctionnalités demandées par l'analyse des besoins d'une aide à la navigation pour fauteuil roulant électrique (voir chapitre précédent).

L'étude de la base mobile en environnement extérieur n'est pas prévue pour le moment, la conception mécanique du robot devant être revue pour une telle application. Le projet V.A.H.M. est conçu pour des personnes à fort déficit moteur. Les caractéristiques des utilisateurs potentiels font que le système, via l'interface, est limité dans ses moyens de dialogue avec la personne handicapée. Nous devons donc développer deux interfaces qui correspondent aux types de commande exécutables par les utilisateurs :

- interface de commande tout ou rien (dialogue avec un simple interrupteur),
- interface de commande proportionnelle (dialogue avec un joystick).

- Le fauteuil automatisé doit pouvoir automatiquement transporter la personne d'un point à un autre, être capable d'exécuter des primitives comme un suivi de mur ou un contournement d'obstacle et de contrôler son environnement proche. L'utilisateur aura donc à commander ces fonctionnalités.

- Les différentes primitives implantées sur le fauteuil doivent être regroupées selon leur type de fonction, afin de permettre à la personne d'utiliser une démarche logique pour accéder à leur validation. Pour éviter la fatigue et/ou le découragement de l'utilisateur, ce n'est pas le temps d'accès aux fonctionnalités qui doit être minimisé mais plutôt le nombre de manoeuvres à effectuer sur le capteur de commande.

• La définition en contrainte des exigences des tâches découle du type d'information dont les fonctionnalités ont besoin pour être exécutées :

- le mode automatique doit avoir connaissance de la position d'arrivée du fauteuil dans le modèle de l'environnement. Ceci impose deux contraintes : la première est d'établir la possibilité de désigner un point dans un environnement à deux dimensions alors que la personne n'a dans le pire des cas qu'un degré de liberté (commande tout ou rien). D'autre part, pour désigner son objectif, il faut que la personne soit à même de se représenter mentalement le modèle de l'environnement dans lequel elle se situe [BRAN 94]. De plus, pour des raisons économiques et psychologiques, le système robotisé laisse la possibilité à la personne d'intervenir pendant l'exécution d'un mouvement automatique, ceci pour pallier aux éventuelles carences des capteurs de détection de l'environnement. La personne est donc liée au bon fonctionnement du système par cette possibilité de créer une déviation momentanée du fauteuil par rapport à la trajectoire à suivre et/ou de stopper le mouvement en cours.
- Les modes de suivi de mur et de contournement d'obstacle, conçus de manière à avoir une réactivité élevée, ont besoin que la base soit positionnée en orientation, plus ou moins correctement, avant d'être activée.
- Le mode manuel et le mode contrôle de l'environnement doivent être activés simplement en validant un choix d'une direction ou de l'utilisation d'un appareil.

II.1.2 Critères ergonomiques de conception de l'interface du projet V.A.H.M.

La conception ergonomique de l'interface a alors été faite en suivant les exigences de l'analyse de la tâche et en transposant les grandes lignes directrices des critères de conception proposés par SCAPIN [SCAP 86]. Le logiciel a été développé avec deux types d'interface : une pour la commande de type tout ou rien et l'autre pour une commande de type proportionnel.

Seul le moyen de dialogue avec la machine est différent, la gestion des différents modes de commande proposés reste identique. L'adaptation personnalisée d'un capteur de commande ne doit donc pas poser de problème, car c'est le type d'information reçu, tout ou rien ou proportionnel, qui est important.

Le principe du dialogue homme/machine repose sur l'activation de choix proposés représentés sous la forme de boutons dessinés sur des écrans graphiques. L'accès au bouton est différent suivant le type de l'interface. Pour l'interface tout ou rien, un balayage des choix est proposé en analogie avec les systèmes de désigneurs développés pour ce type de handicap ; pour l'interface de type proportionnel, la personne "appuie" sur les boutons avec un joystick virtuel tel un pantographe de graveur (fig. II.2).

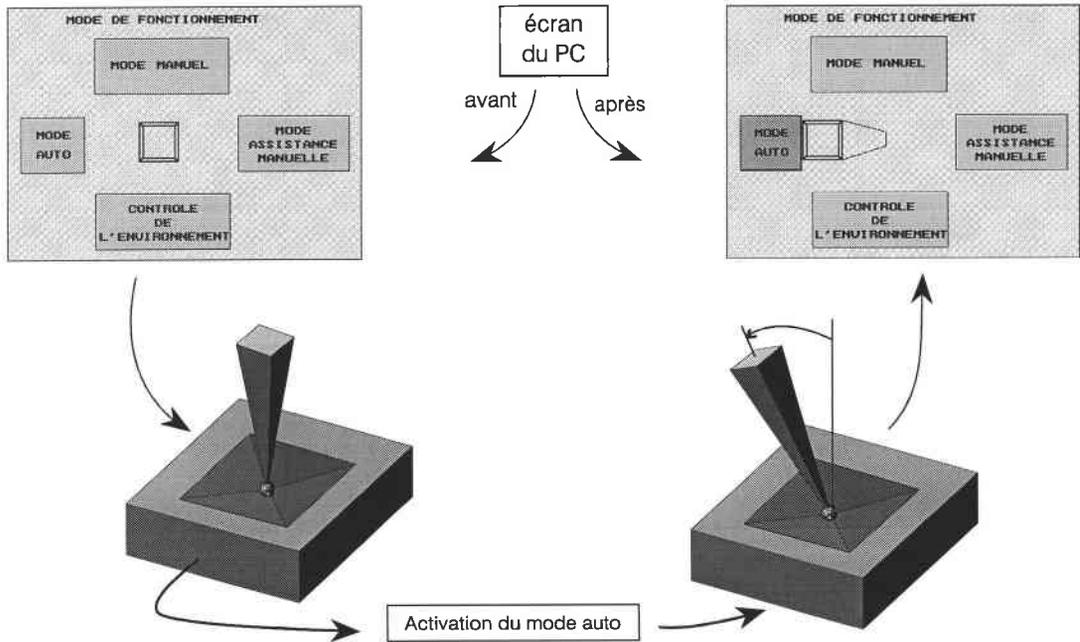


Figure II.2 : validation des choix avec l'interface de type proportionnel.

Les utilisateurs n'étant pas a priori des informaticiens, il est impératif que l'interface suive les règles ergonomiques habituellement édictées pour la conception d'écran de dialogue avec la machine [SCAP 86] [KOLS 94] qui doit entre autres respecter :

- la présence d'un feed-back, où chaque action de l'utilisateur est indiquée à l'écran (fig. II.3) :
 - soit par le changement de l'écran graphique si un sous-menu était demandé,
 - soit par la réalisation du mouvement si un déplacement physique du fauteuil était choisi ; dans ce cas la boîte active de l'écran change de couleur.
- la minimisation du nombre d'actions : afin de ne pas surcharger les écrans graphiques et pour éviter un temps trop long de défilement nous avons limité le nombre de choix à cinq par écran dans le cas d'une interface de type tout ou rien.

Pour l'interface de type proportionnel, le nombre de choix est limité par la taille de l'écran de l'ordinateur embarqué qui ne doit pas obstruer la vue et par la dextérité du pilote à manier son joystick (précision dans le geste).

- les positions identiques d'affichages des boutons : les boutons de même action sont positionnées au même endroit quelque soit l'écran graphique présenté.
- les stéréotypes des couleurs : lorsque la base est en mouvement le choix validé est représenté en vert, il devient rouge quand la base est à l'arrêt et que le défilement des choix reprend.
- la présence d'un titre explicite par écran, ceci pour permettre à l'utilisateur de se retrouver parmi les différents menus.

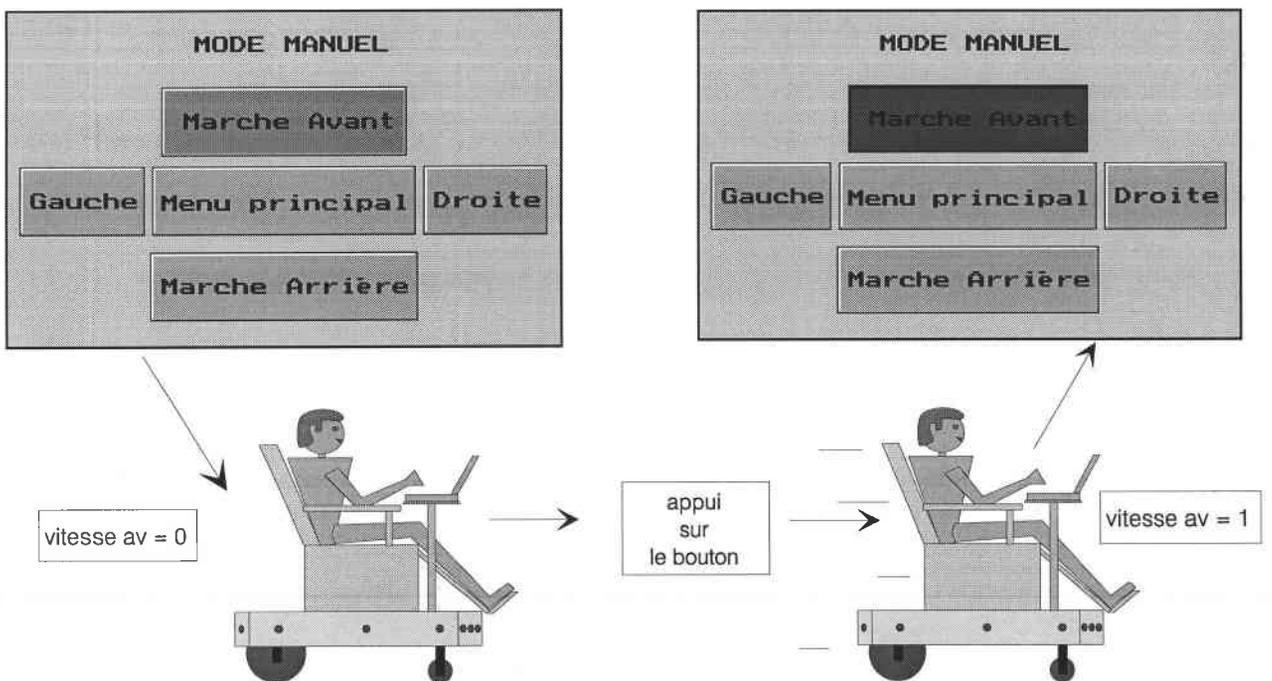


Figure II.3 : exemple de feed-back sur l'action d'un bouton.

II.1.3 Problèmes spécifiques de conception de l'interface du mode automatique

Afin de pouvoir planifier et suivre automatiquement une trajectoire dans le mode automatique, la personne doit d'abord désigner un point d'arrivée dans le modèle géométrique de l'environnement modélisé.

Une solution serait d'enregistrer la position géométrique des endroits vers lesquels le pilote serait susceptible d'aller et de les lui proposer sous la forme d'un défilement de choix de lieux

d'arrivée (lit, télé, chaîne hi-fi, ...). Ceci est sans doute un moyen intéressant de gestion du mode de désignation du point but, mais ne permet pas à la personne d'aller où elle le désire, en particulier dans des endroits ne correspondant pas à une fonctionnalité précise du type "milieu de la pièce". De plus, la validation du choix des lieux peut vite devenir fastidieuse en fonction du handicap de la personne. Certaines personnes n'utilisant qu'une commande tout ou rien ont besoin d'un temps pouvant aller jusqu'à 5s pour valider un choix. De ce fait, nous avons implanté une désignation géométrique par "radar" de la position d'arrivée dans le modèle.

Désignation de l'objectif :

Après avoir choisi le mode automatique, la personne se trouve devant un écran où l'environnement modélisé est dessiné en vue de dessus à la manière d'un plan d'architecte. L'orientation des pièces est fixe, le dessin du fauteuil se positionnant par rapport à cet environnement. Il s'agit d'une approche local-centrée par opposition à une vision ego-centrée où le fauteuil serait fixe, en bas de l'écran par exemple, et l'environnement mobile (fig. II.4). Ce choix nous paraît a priori celui autorisant l'apprentissage le plus aisé et permet de désigner n'importe quel point d'arrivée dans l'environnement.

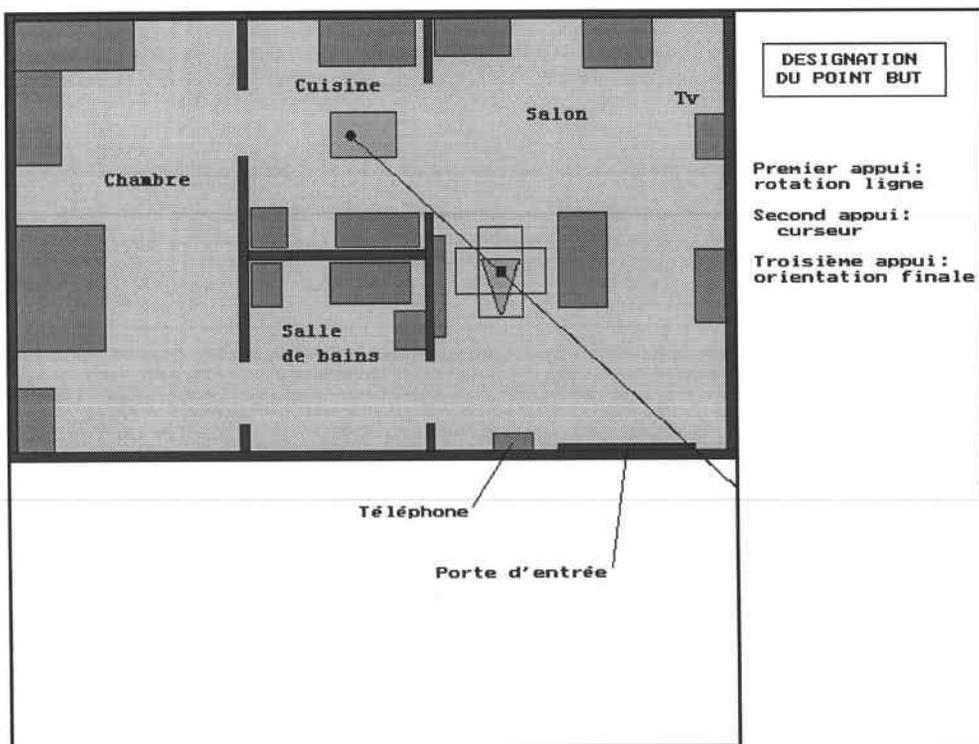


Figure II.4 : désignation de l'objectif avec une interface de type tout ou rien.

La méthode de désignation de la position d'arrivée du fauteuil dans l'environnement ne dépend pas du type de l'interface tout ou rien ou proportionnel. Elle se déroule en trois étapes : la première consiste à balayer l'écran par une ligne centrée sur le fauteuil. La deuxième permet de donner en coordonnées cartésiennes la position du point d'arrivée selon l'axe de la ligne. La dernière indique le choix de l'orientation finale du fauteuil. Par contre, les moyens de validation de ces trois étapes sont fonction du type de capteur utilisé.

Pour une commande de type tout ou rien la seule validation proposée concerne le passage d'une étape à l'autre. Le sens de rotation de la ligne, le déplacement du curseur et la rotation du triangle d'orientation sont fixés à l'avance pour éviter de surcharger l'écran graphique et minimiser le nombre d'actions sur le capteur. Pour permettre à la personne de corriger sa position, nous proposons une validation de celle-ci permettant de recommencer ou de quitter le mode automatique après les trois étapes.

Par contre, avec une commande de type proportionnel la personne peut à chaque étape choisir le sens de variation des mouvements (rotations droite ou gauche de la ligne et du triangle d'orientation, déplacements avant et arrière du curseur).

De plus, nous avons vu que la personne pouvait en cours de mouvement automatique créer une déviation momentanée du fauteuil par rapport à la trajectoire planifiée qui ne tient pas compte des obstacles non modélisés comme les chaises par exemple. Ainsi la stratégie adoptée lors de la réalisation du mouvement automatique est la suivante : durant le déplacement nous affichons à l'écran de façon permanente les boutons intitulés "droite", "gauche" et "stop" (fig. II.5). Comme pour la désignation du point but le choix s'effectue soit par un capteur proportionnel, soit après balayage par un capteur tout ou rien.

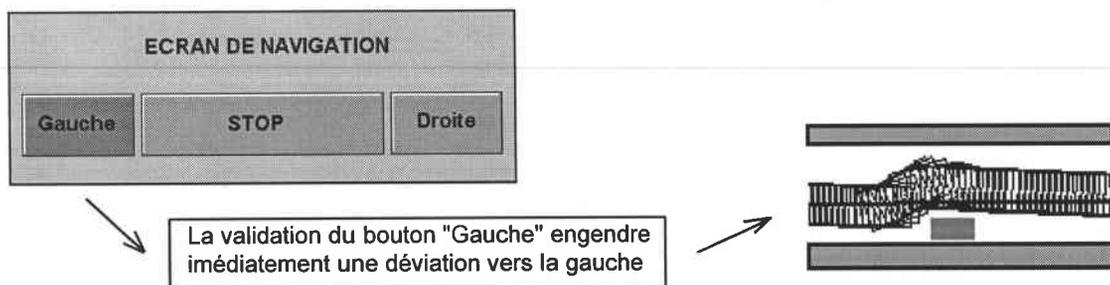


Figure II.5 : exemple d'écran de navigation et ses conséquences.

II.1.4 Conclusion sur la conception de l'interface du projet V.A.H.M.

Les interfaces ont été conçues de façon la plus modulaire possible, c'est-à-dire que l'ajout ou le retrait de fonctionnalités ne modifie pas le fonctionnement global du système (fig. II.6). De plus, les intitulés des boutons, les titres des écrans, les vitesses de déplacements, sont paramétrables pour permettre une personnalisation souple et rapide de l'interface.

Il est évident que seule une évaluation dynamique de l'interface et du système homme/machine va permettre d'affiner celle-ci en fonction des besoins des personnes handicapées. L'évaluation statique effectuée ne permet pas de mettre à jour certains problèmes de conception inhérents à la mobilité du système.

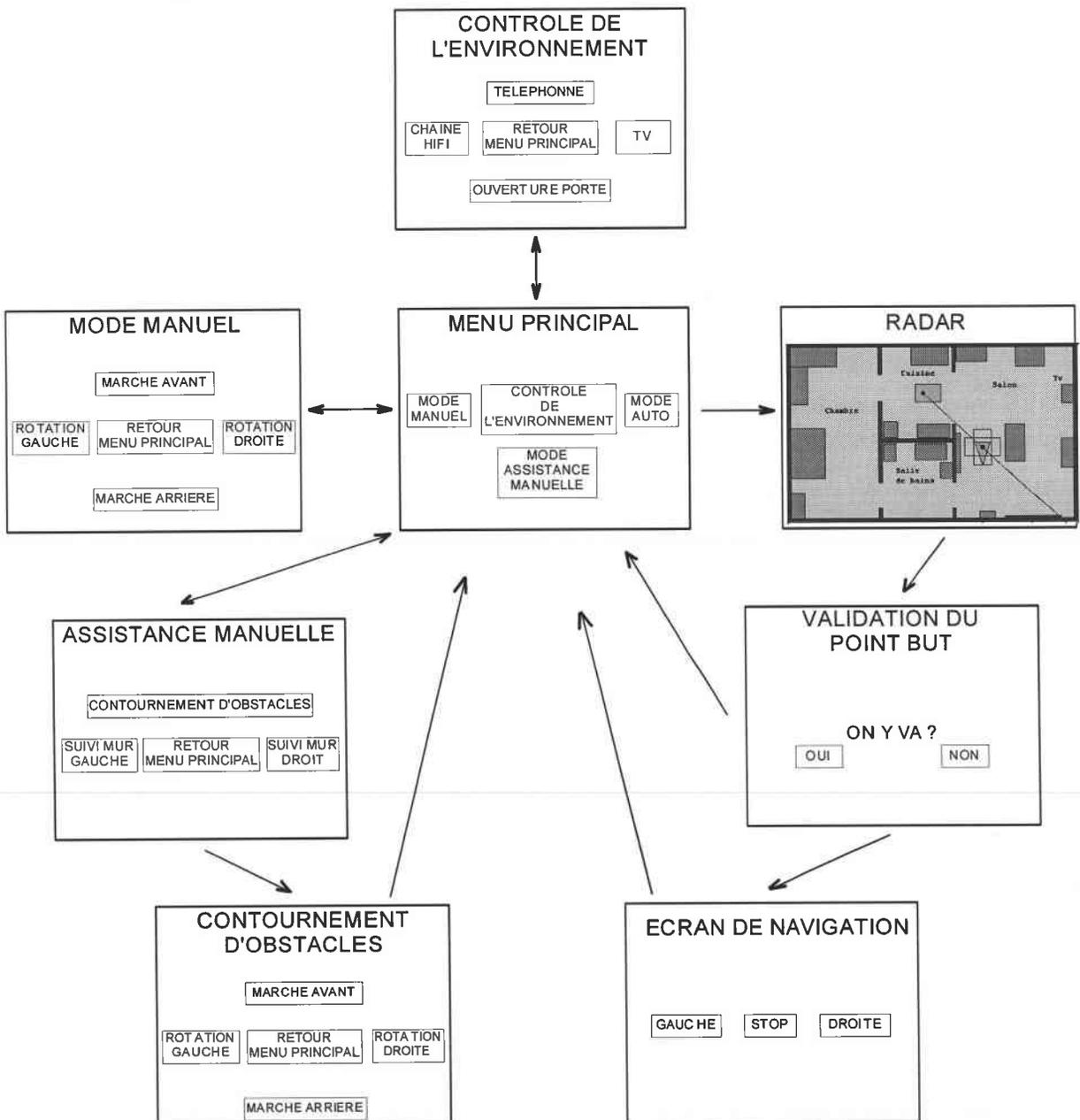


Figure II.6 : synoptique détaillé de l'interface de type tout ou rien du projet V.A.H.M.

II.2 EVALUATION DE L'INTERFACE HOMME/MACHINE

Actuellement, il existe de nombreuses méthodes provenant de l'ingénierie, de l'ergonomie et de la psychologie, permettant d'évaluer une interface homme/machine. SENACH d'après [KOLS 94] les classe selon deux approches (fig. II.7) :

- l'approche analytique qui prend en compte les modèles de l'interface et de l'interaction homme/machine. L'évaluation est faite en comparant l'interface à un modèle de référence décrivant les qualités d'une "bonne interface" selon plusieurs critères ergonomiques. Ce modèle peut être soit informel, soit formel. Pour de plus amples renseignements sur cette approche, le lecteur pourra se référer à [SENA 90].
- l'approche empirique : celle-ci permet d'évaluer l'ergonomie de l'interface à partir du recueil et de l'analyse de données comportementales provenant de son utilisation par des opérateurs représentatifs de la population finale, et ceci, dans un environnement d'évaluation le plus proche de celui de son utilisation. L'approche empirique peut être menée suivant deux méthodes, l'une appelée "diagnostic d'usage" dont nous nous sommes inspirés pour l'évaluation du système, et l'autre appelée "tests de conception" qui évalue le système sans que les expérimentateurs aient une expérience de son utilisation.

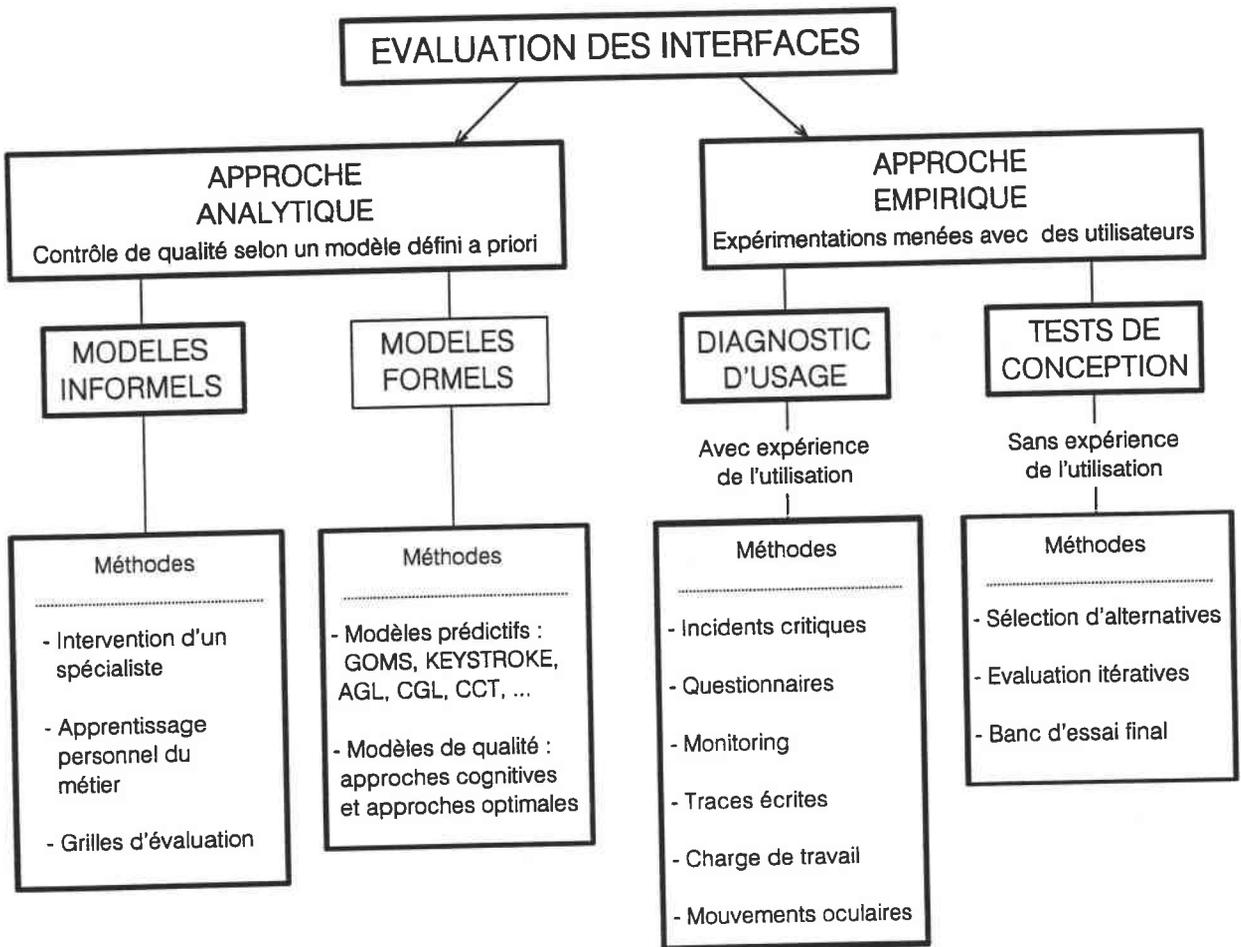


Figure II.7 : synthèse des méthodes d'évaluation établie par SENACH d'après [KOLS 94]

II.2.1 L'approche empirique : le diagnostic d'usage

Un des objectifs du projet étant de développer un outil d'évaluation des besoins en aide à la mobilité, l'approche empirique apparaît bien convenir à notre application. Cette méthode tenant compte réellement des utilisateurs potentiels, permet aux concepteurs de valider le système développé en fonction des "a priori" tant sur les besoins de mobilité automatique de ces personnes que sur leurs comportements face à l'apport d'un tel système.

De manière générale, ce type d'évaluation empirique ne peut être effectué que lorsqu'il existe une expérience d'utilisation possible du système dans sa globalité. Son utilisation permet, à partir de techniques différentes, de déterminer les fonctions ou les modes de dialogue défailants, inutiles, voire difficiles à exploiter, ...

Inspirés de la démarche générale, nous avons donc transposé les différentes techniques de la méthode "du diagnostic d'usage" pour notre application. Le cadre de notre étude ne permet pas

d'utiliser toutes les techniques proposées. Ainsi, les techniques de l'incident critique, de l'enregistrement des traces écrites et de l'étude des mouvements oculaires de l'utilisateur ne peuvent être utilisées pour les raisons suivantes :

- L'incident critique : seule une expérimentation à long terme peut faire apparaître des incidents critiques sur le fonctionnement du système. Actuellement nous ne sommes pas en mesure de le faire, étant dans la phase finale préparatoire aux essais réels avec des personnes handicapées.
- Les traces écrites : elles ne sont pas présentes dans ce type d'application. Cette technique est spécifique aux applications où une trace écrite des événements survenant au cours de l'utilisation du système homme/machine est notée pour surveillance ou pour archivage. C'est essentiellement le cas dans les systèmes homme/machine industriels.
- Mouvements oculaires : cette technique enregistre le regard de la personne afin d'étudier la manière dont elle se comporte face au système en fonction des différentes situations (recherche, localisation des informations utiles, ...). L'appareillage permettant ceci, étant généralement un casque fixé sur la tête de l'utilisateur, est très souvent encombrant. De ce fait, nous ne pouvons pas nous permettre d'utiliser ce type d'appareil et de surcharger physiquement la personne déjà fortement handicapée.

Les questionnaires d'utilisation :

Le questionnaire d'utilisation est un outil permettant au concepteur de recueillir après coup des informations subjectives de la personne par rapport à l'utilisation de la machine. Cet outil demande au questionné de travailler à "tête reposée", même si l'utilisateur n'est pas toujours en mesure de se souvenir des difficultés rencontrées lors des différentes situations d'utilisation du système. La personne est ainsi susceptible d'analyser de manière plus réfléchie le système proposé, et de définir plus précisément ses besoins.

Cette technique complète les entretiens, les observations et les techniques objectives d'évaluation du système homme/machine que nous détaillerons ci-après. Nous trouvons dans la littérature spécialisée [SINC 90] des travaux consacrés à la manière de réaliser un questionnaire.

Le monitoring :

La technique appelée “monitoring” ou “mouchard électronique”, permet d’enregistrer automatiquement des données objectives à l’aide de l’ordinateur. Elle est généralement conçue pour effectuer une analyse a posteriori du fonctionnement du système. Le monitoring peut renseigner le concepteur de manière fiable sur les activités et les performances de l’utilisateur pendant l’utilisation du système, que se soit en situation réelle ou en simulation.

L’intérêt de cette technique réside dans le fait qu’elle ne perturbe pas la personne lors de la réalisation des tâches, n’apportant pas de biais dans les données recueillies. De plus, elle permet l’enregistrement de variables temporelles donnant pour l’analyse la possibilité de remonter au cours du temps en utilisant le passé proche .

Les données enregistrées sont généralement traitées automatiquement afin d’obtenir des informations variées. MILLOT dans [MILL 88] se sert de cette technique pour évaluer en ligne la charge de travail objective de l’opérateur. Après analyse de ces données, nous pouvons déduire les stratégies utilisées, le séquençement réel des tâches, la fréquence d’utilisation des fonctions de l’interface, les performances obtenues par l’opérateur, etc... [SENA 90].

Le choix des données à enregistrer dépend de leur utilisation finale. Elles peuvent être dédiées à l’estimation de la performance technique ou à l’évaluation de la charge de travail objective de l’utilisateur pour établir une évaluation globale du système homme/machine. Le détail de ce choix est explicité ci-après dans la partie évaluation expérimentale.

La charge de travail :

L’estimation de la charge de travail de la personne effectuant une tâche est une grandeur significative pour évaluer le système homme/machine. En effet, le contenu des écrans graphiques, ainsi que la manière de présenter les informations et les différents choix (boutons virtuels pour notre application) influent directement sur la charge de travail de l’utilisateur. Plusieurs méthodes ont été développées pour évaluer la charge de travail, que nous décrivons ci-après dans la partie charge de travail.

II.2.2 Conclusion sur l'évaluation de l'interface homme/machine

Nous avons vu que l'évaluation de l'interface permet, grâce aux informations recueillies (questionnaires, ...), d'évaluer le système homme/machine. La méthode d'évaluation alors employée, découlant d'une approche empirique, a fait apparaître deux techniques importantes qui se prêtent bien à notre type d'application d'aide à la mobilité pour personne handicapée en fauteuil électrique. L'utilisation de la technique du monitoring et de l'estimation de la charge de travail de l'utilisateur du fauteuil permet, après analyse des informations enregistrées, d'évaluer objectivement le système dans sa globalité.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons donc détailler le concept de la charge de travail, ses méthodes d'évaluation, ainsi que le type des données à enregistrer pour estimer les performances techniques de la machine.

III LA CHARGE DE TRAVAIL

III.1 LE CONCEPT DE LA CHARGE DE TRAVAIL

Le concept général de la charge de travail de l'opérateur, le pilote du fauteuil en l'occurrence, est équivoque : il se réfère aussi bien à la tâche à exécuter, qu'à l'opérateur (ce qui lui en coûte pour réaliser la tâche [LEPL 77]). Selon SPERANDIO [SPER 88], le terme de charge de travail regroupe deux significations :

- "la contrainte" qui caractérise les conditions de travail et qui s'exerce sur l'opérateur,
- "l'astreinte" qui est la conséquence pour l'opérateur, c'est-à-dire le coût résultant de la contrainte.

SPERANDIO définit alors la charge de travail comme le niveau d'activité mentale, sensorimotrice et physiologique nécessaire pour accomplir une tâche. De cette définition, deux composantes de la charge de travail sont à distinguer : la charge de travail physique et la charge de travail mentale. Cette distinction se réfère aux activités que l'opérateur met en jeu lors de l'exécution d'un

travail. Ces activités peuvent être regroupées en trois classes principales, les deux premières sont à l'origine du travail mental et la dernière du travail physique [GAWR 89] :

- la perception : ces activités concernent la recherche, la détection, l'acquisition et l'identification de l'information,
- l'interprétation : ces activités concernent le traitement d'informations, la résolution de problèmes et la prise de décision,
- les actions : elles englobent l'ensemble des activités motrices de l'opérateur.

III.2 LA CHARGE DE TRAVAIL PHYSIQUE

Elle concerne les sollicitations du corps humain se traduisant par un effort musculaire, pour réaliser un travail physique quel qu'il soit (manutention, manipulation d'un joystick, ...). Un des domaines d'application de l'ergonomie est alors l'étude du travail musculaire en vue de rendre compatibles les capacités physiques de l'homme avec son environnement [SANT 87]. Connaissant la puissance musculaire nécessaire pour effectuer la tâche, il faut la mettre en relation avec les capacités de la personne. Il est alors possible de déterminer s'il y a surcharge ou non. L'étude de la charge de travail physique peut être faite, soit avec un opérateur standard, soit directement avec celui qui va utiliser le système.

Dans le premier cas, le travail physique ayant été décrit par l'analyse de la tâche, la puissance à fournir ayant été évaluée, l'ergonome se réfère à des tableaux qui permettent de classer le travail en pénible, fatigant, ...

Dans la seconde approche, qui concerne comme notre application, l'étude de la charge intéresse directement les ergonomes spécialisés en réadaptation (ergothérapeutes). Ils adaptent, au mieux, suivant le degré de mobilité de la personne handicapée, le capteur de commande avec lequel elle va piloter son fauteuil électrique et/ou commander son appareil de contrôle de l'environnement [MATH 86] [AUBR 89]. Des études concernant cette personnalisation du capteur de commande sont abondamment évoquées dans la littérature. Elles ne seront pas abordées dans ce mémoire. Néanmoins, lors de la conception du système homme/machine, nous avons veillé à respecter le fait que le nombre de manoeuvres soit minimal pour commander les modes de fonctionnement automatiques du fauteuil.

III.3 LA CHARGE DE TRAVAIL MENTALE

L'étude de la charge de travail mentale a pour but d'estimer, en vue de l'adapter, la charge imposée par les activités de traitement de l'information [KANT 87]. C'est-à-dire qu'elle exprime le degré de mobilisation mentale de la personne au travail. De ce fait, l'estimation de la charge mentale mesure l'interaction homme/machine du point de vue de l'homme.

La charge de travail mentale dépend de deux composantes principales [SPER 88] :

- la première est fonction des exigences de la tâche définie en termes de rapidité, précision, simultanéité, difficulté de traitement, etc...
- la seconde dépend de l'individu, donc de son état mental et physiologique, de sa formation, de sa perception du danger, etc...

Un estimateur de la charge doit tenir compte de ces deux composantes.

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles les chercheurs tentent d'évaluer la charge de travail. Nous ne décrivons que celle concernant notre application, les autres étant généralement liées à des problèmes économiques ou de sécurité. La productivité des travailleurs est alors améliorée par une meilleure organisation du travail mental, comme cela été fait pour le travail à forte composante physique. Dans le cadre de notre étude, l'estimation de la charge va nous permettre d'estimer l'état mental ou encore le degré de "stress" dans lequel se trouve le pilote du fauteuil, ceci afin d'évaluer le système homme/machine du point de vue de l'homme.

Actuellement, la notion de stress n'est pas clairement définie, mais tout le monde s'accorde pour dire qu'elle semble être dépendante d'une charge de travail trop élevée, qu'elle soit instantanée ou non. D'autre part, un individu sous-chargé peut être sujet à des baisses de vigilance qui doivent être évitées. En effet, dans notre application, d'aide à la navigation en fauteuil électrique, la personne participe pleinement au bon déroulement de l'exécution de la tâche en cours en palliant aux déficiences des capteurs de détection de l'environnement ou aux carences de raisonnement de la machine.

Une évaluation parfaite de la charge de travail de la personne, exprimée par une valeur objective, doit respecter plusieurs conditions [WIER 88] :

- une condition "d'objectivité" : celle-ci garantit une fiabilité du résultat de la

valeur de la charge de travail en évitant les problèmes inhérents à la subjectivité des individus testés.

- une condition “en ligne” : elle permet d’estimer en temps réel la valeur de la charge pour connaître les changements opératoires de la personne.
- une condition “de discrétion” : l’estimation ne doit pas être perturbante pour la personne, afin de ne pas influencer son comportement lors de la réalisation de la tâche.
- une condition “de sensibilité” : la valeur doit être sensible à toutes les composantes de la charge (fatigue, confort d’utilisation du système, stress, etc...) pour que son évaluation tienne compte des différences inter et intra-individuelles.

IV LES METHODES D’EVALUATION DE LA CHARGE DE TRAVAIL MENTALE

Depuis les années 50 de nombreuses méthodes d’évaluation de la charge de travail ont été mises au point par différentes écoles de chercheurs : les physiologistes, les psychologues du travail, les automaticiens humains [MILL 88]. Quatre types de méthodes peuvent être distingués :

- les méthodes physiologiques,
- les méthodes comportementales,
- les méthodes subjectives,
- les méthodes temporelles.

IV.1 LES METHODES PHYSIOLOGIQUES

La démarche des physiologistes, pour l’étude de la charge de travail, part de l’hypothèse selon laquelle une personne engagée dans des activités cognitives, peut être évaluée indirectement en quantifiant les modifications intervenant au niveau de certaines fonctions physiologiques. Aussi, de nombreuses recherches ont été développées pour identifier les indicateurs physiologiques de la

charge de travail. Nous ne citerons que les techniques les plus utilisées basées sur l'analyse :

- de l'activité électrique des muscles,
- de l'activité électrique du cerveau,
- de l'activité oculaire : position du regard, clignements de l'oeil, diamètre de la pupille,
- de la fréquence cardiaque ainsi que de sa variation,
- de la température du conduit auditif,
- de la fréquence de la respiration,
- des dosages biochimiques,
- etc...

L'inconvénient majeur de ces méthodes d'analyse est que l'indicateur physiologique mesuré ne varie pas seulement en fonction de la charge mentale de la personne, mais également en fonction d'autres facteurs comme l'émotion ou l'effort physique. Le problème est alors d'extraire un signal utile parmi les "bruits physiologiques" prélevés pour l'évaluation de la charge.

IV.2 LES METHODES COMPORTEMENTALES

Développées par les psychologues du travail, ces méthodes sont basées sur les modifications du comportement de l'individu en tant que critère de charge de travail. L'ensemble de ces techniques s'appuie sur la relation généralement admise entre le niveau de satisfaction de la personne et la charge de travail. Cette relation montrée dans [JOHA 79] est une courbe en "U" inversé (fig. II.8).

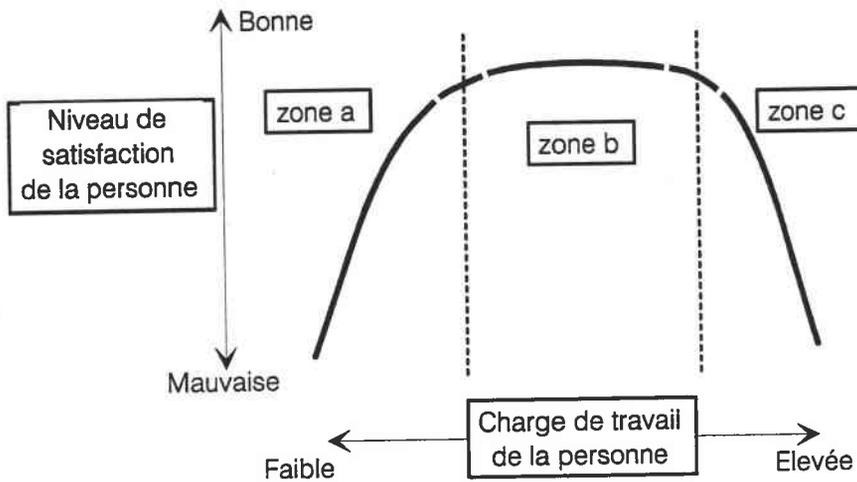


Figure II.8 : courbe illustrant le niveau de satisfaction de l'individu au travail en fonction de sa charge de travail.

Trois zones caractéristiques sont représentées sur cette courbe :

- la zone **a** correspond à une activité faible de la personne due à un traitement très réduit de l'information. Des baisses de vigilances peuvent alors apparaître pendant le travail.
- la zone **b** correspond à une activité optimale, où l'efficacité (performance de la personne) est maintenue constante.
- la zone **c** correspond, quant à elle, à une activité intense. Les informations à traiter sont trop nombreuses, cela engendre une saturation de l'individu qui voit alors sa performance chuter.

Plusieurs méthodes ont alors été mises au point comme celles de l'estimation de la charge à partir des performances de l'homme, ainsi que la méthode de la tâche ajoutée, plus communément appelée la méthode de la double tâche.

IV.2.1 Estimation de la charge de travail à partir des performances

En se référant à la courbe en "U" inversé, cette méthode d'évaluation juge la performance de la personne face à la tâche à accomplir [SANT 87]. La méthode est valable pour les zones **a** et **c**, alors que pour la zone **b**, la surcharge de travail ne modifie pas la performance de l'individu.

L'évaluation des performances en fonction de la charge de travail a donc des limites évidentes, car seules les surcharges ou les sous-charges seront estimées. De plus, l'allure de la courbe étant établie à partir d'une abaque fonction du travail à effectuer, les variations de ce dernier ne peuvent être prises en compte.

Cette méthode doit donc être utilisée avec beaucoup de précaution et ne doit pas être la seule source de mesures.

IV.2.2 Estimation de la charge de travail par la méthode de la double tâche

La méthode de la double tâche a pour but de produire une performance mesurable : pour cela il faut saturer la capacité de travail de la personne en ajoutant à la tâche étudiée, une tâche secondaire. Cette méthode repose sur l'hypothèse de fonctionnement de l'individu qui se comporterait comme un canal à capacité limitée [BROW 77]. C'est-à-dire qu'il peut y avoir une dégradation mesurable des performances si une tâche secondaire entre en concurrence avec la tâche principale.

Pour ce faire, les exigences de la tâche principale doivent être connues et relativement constantes au cours du temps. De plus, l'ajout de la tâche secondaire ne doit pas engendrer de conflit sensori-moteur avec la tâche principale [SPER 88].

Plusieurs variantes d'utilisation de la méthode existent. Il est possible de présenter la tâche additionnelle à l'individu de trois manières différentes :

- en une tâche de première importance,
- en une tâche de seconde importance,
- en une tâche d'égale importance.

La difficulté majeure de cette méthode se trouve dans l'exploitation des résultats, l'ajout d'une tâche additionnelle pendant le travail pouvant modifier le comportement opératoire de l'individu sans pour autant engendrer une baisse de la performance. D'après BROWN [BROW 77] cette méthode ne doit être utilisée que pour l'étude des différences interindividuelles de capacité de traitement susceptibles d'influer sur la charge de travail.

IV.3 LES METHODES SUBJECTIVES

Les méthodes d'évaluation subjective reposent sur le principe que le sujet est conscient de son niveau de charge mentale. Les psychologues du travail ont alors développé des techniques pour interroger la personne sur l'auto-évaluation de sa charge de travail. Celles-ci apparaissent sous la forme d'un questionnaire en ligne ou hors ligne, dont les réponses seront analysées après le travail effectué.

Pour ce faire, il faut présenter au cours de la tâche, une "échelle métrique à composante subjective" à l'individu qui doit y répondre en estimant son sentiment de charge. Nous ne présentons ici que les plus connues et les plus utilisées pour évaluer subjectivement la charge de travail [RIER 93] [BERG 92].

IV.3.1 Echelle de COOPER-HARPER

L'échelle de COOPER-HARPER a été conçue initialement pour étudier la difficulté du pilotage des avions. Elle a été modifiée pour estimer plus directement la charge de travail ce qui a donné lieu à "l'échelle de COOPER-HARPER modifiée" développée par SKIPPER et al. [SKIP 86]. Cette échelle d'évaluation est organisée en un arbre de décision comprenant des mots clés adaptés au type de travail qui cheminent vers un noeud terminal estimant ainsi la "valeur" de la charge (fig. II.9). Les noeuds terminaux de l'arbre sont numérotés de 1 à 10, où 1 représente une charge de travail très faible et 10 une charge de travail trop élevée.

Sur cette échelle d'évaluation les décisions de la personne sont orientées sur la charge de travail mental, les probabilités d'erreurs, les difficultés perçues et sur l'effort exigé lors de la tâche. De ce fait, le résultat ainsi obtenu est une évaluation implicitement multidimensionnelle.

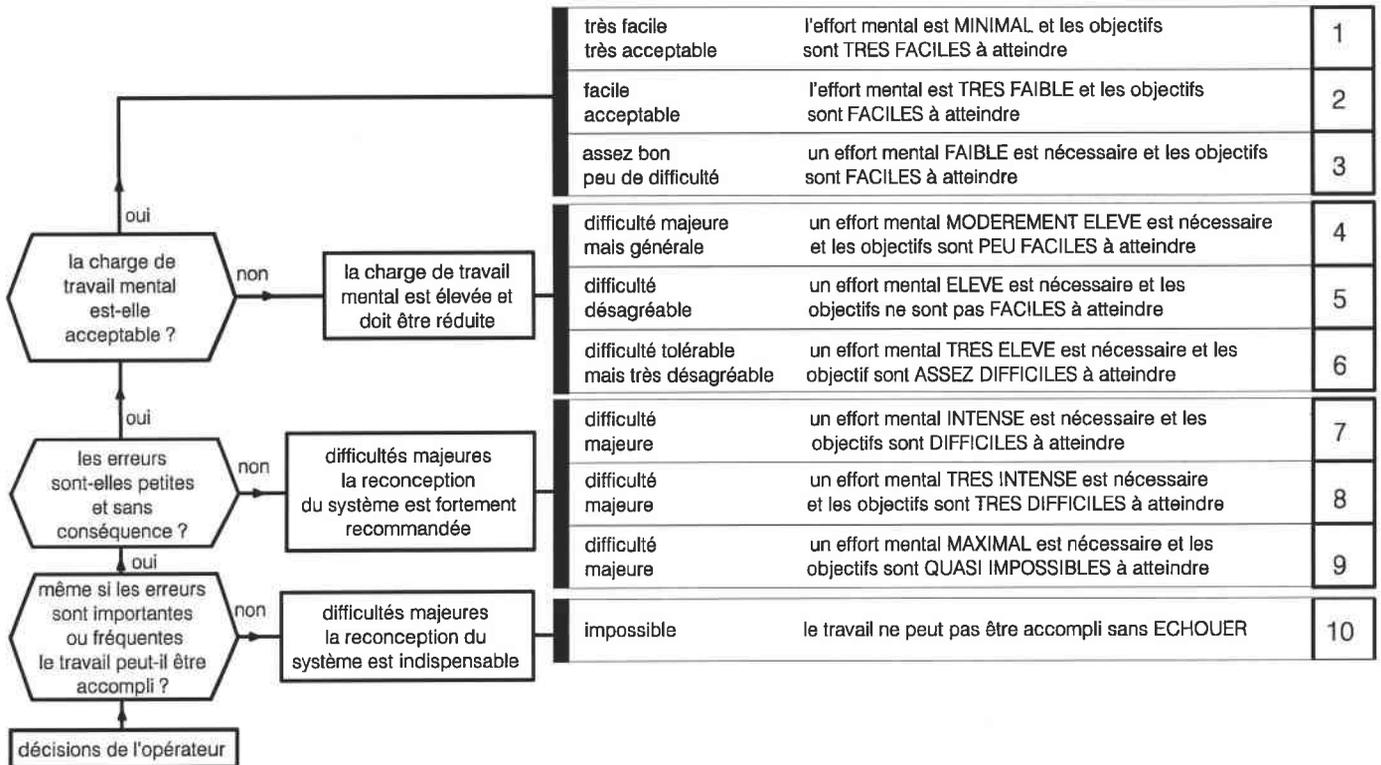


Figure II.9 : échelle de COOPER-HARPER MODIFIE générale repris dans [RIER 93].

IV.3.2 Méthode SWAT

Les concepteurs de la méthode d'évaluation SWAT (Subjective Workload Assessment Technique) estiment que la charge de travail est définie selon trois notions explicites : la notion d'exigence temporelle, la notion d'exigence de l'effort mental et la notion d'exigence du stress (tension nerveuse). Chacune de ces trois notions sont quantifiées par une échelle subjective composée de trois niveaux : "faible", "moyen" et "élevé", définis de la façon suivante :

- La notion d'exigence temporelle correspond au temps pendant lequel la personne est occupée par la réalisation de la tâche. Les trois niveaux sont alors :
 - niveau faible : il existe beaucoup de temps "morts". Des interruptions ou des chevauchements entre les activités sont quasiment inexistantes.
 - niveau moyen : dans ce cas, les temps "morts" sont occasionnels, l'individu est relativement pris par son travail. Ici, les chevauchements ou les interruptions entre les activités sont fréquents.
 - niveau élevé : les temps "morts" ont pratiquement disparu, l'exécution de la tâche exige une attention soutenue de la part de la personne.

-
- La notion d'exigence de l'effort mental (effort intellectuel) se réfère à la quantité d'attention et de concentration que demande la tâche. Les niveaux de l'effort intellectuel sont alors définis comme :
 - niveau faible : très peu d'effort mental ou de concentration est nécessaire. L'activité est machinale.
 - niveau moyen : un effort mental ou une concentration modérée est nécessaire. La complexité de la tâche est modérément élevée à cause de l'incertitude, de l'impossibilité d'anticiper ou du caractère inhabituel de la situation. Une attention soutenue est exigée.
 - niveau élevé : un effort mental et une concentration extrêmes sont nécessaires. La réalisation de la tâche est très complexe et demande une attention totale.

 - La notion d'exigence du stress ou encore de la tension nerveuse se réfère à l'influence de certains paramètres comme l'anxiété ou la crainte (risque, danger) sur la charge de travail. Cette anxiété peut être due à la peur de ne pas pouvoir réaliser la tâche, ou à la crainte des conséquences de cette incapacité. Les trois niveaux sont ainsi définis :
 - niveau faible : il y a peu de risque de confusion ou d'anxiété lors de la réalisation de la tâche.
 - niveau moyen : un stress moyen est ressenti, dû à la déception, la confusion, ou l'anxiété. Il est nécessaire de compenser ce stress pour maintenir le contrôle du système.
 - niveau élevé : un stress très élevé est ressenti, dû à la déception, la confusion ou l'anxiété. Une grande détermination et un bon contrôle de soi sont nécessaires pour garder le contrôle du système.

27 "états" possibles du sujet à évaluer sont alors constitués à partir des trois notions combinées aux trois niveaux. Ces 27 "états" se traduisent par 27 "cartes" que l'individu doit en premier lieu classer, selon ses propres critères, par ordre croissant de la charge de travail la plus faible à la charge la plus élevée (fig. II.10). Une échelle métrique de référence de la charge de travail est alors

construite pour ce sujet en fonction de son classement.

Dans un second temps, il est demandé à l'individu d'estimer la difficulté du travail venant d'être réalisé en quantifiant par "faible", "moyen" ou "élevé" les trois notions explicites. Un état subjectif de difficulté global est alors défini, donnant une "carte" parmi les 27 possibles. L'estimation de la charge de travail est alors connue en positionnant cette carte sur l'échelle métrique individuelle de référence. Cette estimation repose sur le fait que l'échelle définie avant la réalisation du travail est stable durant le temps de le réaliser.

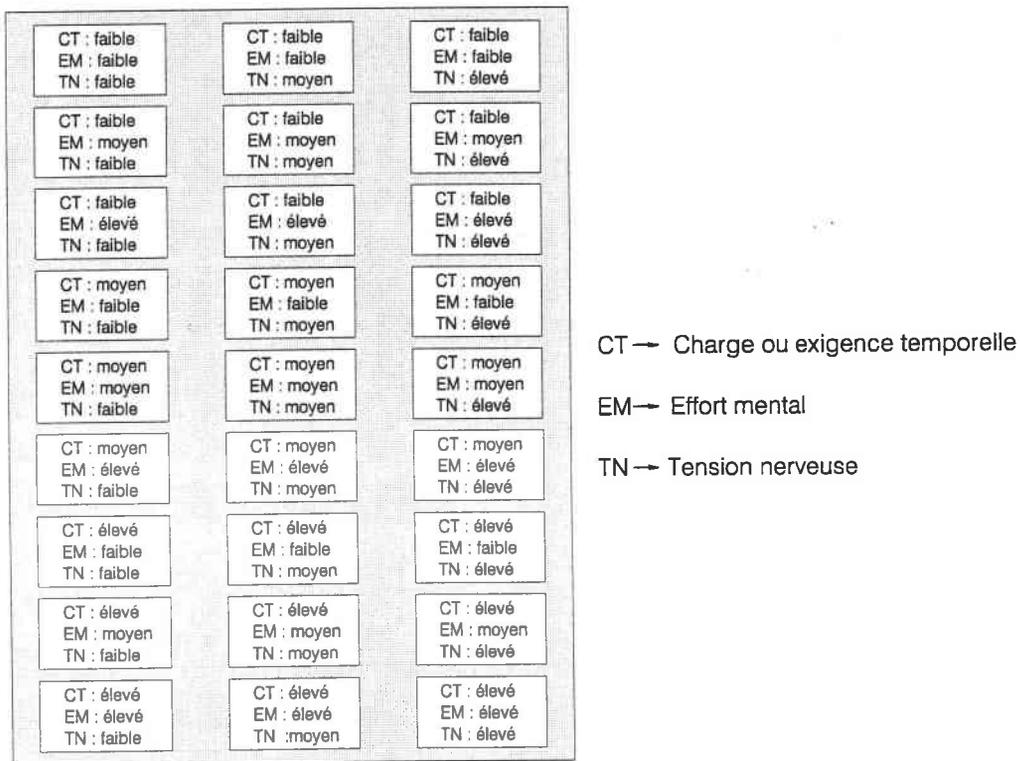


Figure II.10 : les 27 "cartes" possibles de la méthode SWAT.

IV.3.3 Méthode TLX

Cette méthode TLX (Task Load index) a été développée par le groupe d'étude sur la performance humaine à la NASA [HART 88]. Cette estimation de la charge de travail est déduite à partir d'échelles utilisant six différenciateurs sémantiques (descripteurs) définis de la manière suivante :

- exigence mentale : ce descripteur sert à évaluer le niveau d'exigence des activités de perception et des activités mentales. La personne doit quantifier les difficultés dues aux activités de recherche de l'information, de traitement de cette information et de prise de décision.

- exigence physique : la personne doit évaluer le niveau d'exigence musculaire requis pour effectuer la tâche.
- exigence temporelle : ce descripteur permet d'évaluer la "pression temporelle" à laquelle est soumis l'individu, c'est-à-dire si le temps alloué pour réaliser la tâche est suffisant.
- performance : vis à vis des objectifs à atteindre définis par l'expérimentateur, la personne doit quantifier sa propre performance en rendant compte de son degré de satisfaction par rapport au but fixé.
- effort : la personne doit estimer l'effort mental et l'effort physique investis dans la tâche.
- stress : ce descripteur rend compte de la perception de la situation de travail en termes d'insécurité, de découragement, de tension nerveuse et de contraintes psychologiques.

Après l'exécution de la tâche, la personne marque pour chaque descripteur son estimation sur une échelle continue d'évaluation (fig. II.11).

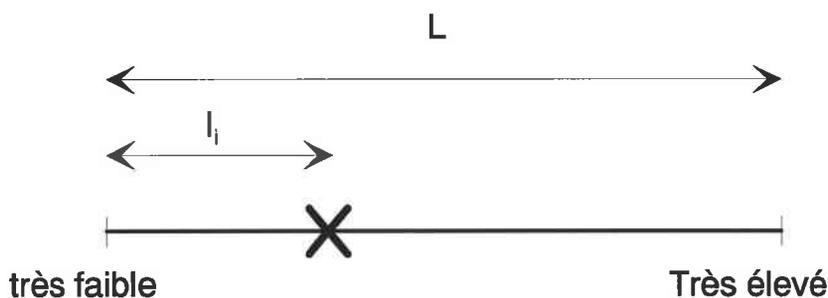


Figure II.11 : descripteur marqué par la personne

Ainsi, le segment étant de longueur L et la marque se trouvant à la position I_i , la composante de la charge de travail qui correspond au $i^{\text{ème}}$ descripteur (R_i) vaut : $R_i = I_i / L$, sauf pour le descripteur de la performance (R_p) où $R_p = (L - I_p) / L$. Les descripteurs n'ayant peut-être pas tous la même importance pour l'individu, le principe de la méthode consiste alors à pondérer chaque composante de la charge par un coefficient α_i en une valeur de charge globale. L'estimation de la charge WL devient alors :

$$WL = \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot R_i$$

Le calcul des coefficients α_i s'effectue en demandant à la personne de quantifier les importances relatives qu'elle accorde à chaque descripteur (composante de charge). Pour cela, les descripteurs sont regroupés par paires dans un tableau (fig. II.12) :

| | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------------|
| Effort Performance | Exigence temporelle Stress | Performance Exigence mentale |
| Exigence temporelle Effort | Exigence physique Stress | Exigence mentale Effort |
| Performance Stress | Exigence physique Exigence temporelle | Exigence physique Effort |
| Exigence physique Performance | Exigence temporelle Exigence mentale | Stress Effort |
| Exigence mentale Exigence physique | Performance Exigence temporelle | Stress Exigence mentale |

Figure II.12 : paires de descripteur de la méthode TLX.

Chaque paire de descripteur est présentée à la personne afin qu'elle choisisse celui des deux qui lui semble le plus influencer sa charge de travail. Les coefficients de pondération α_i sont alors calculés de la façon suivante : $\alpha_i = C_i / 15$, où C_i représente le nombre de fois que le descripteur a été choisi par la personne, un refus de choix valant 1/2 pour les deux descripteurs.

IV.4 LES METHODES TEMPORELLES

Développées par les automaticiens humains, ces méthodes essaient d'évaluer la charge de travail uniquement au moyen de critères temporels. Elles postulent que l'obligation de réaliser une tâche dans un temps déterminé est le paramètre essentiel induisant la charge de travail.

Deux paramètres sont alors définis : **TD** le temps disponible pour réaliser une tâche et **TR** le temps requis par l'individu pour ce travail. Ce temps requis **TR** se décompose en trois types d'activité temporelle :

$$\mathbf{TR = TR\ perception + TR\ cognition + TR\ action}$$

La charge de travail varie suivant le temps disponible pour réaliser la tâche : plus le temps est court, plus la difficulté du travail est grande et donc plus la charge augmente. De plus, si la tâche est difficile, le temps requis par la personne augmente et donc la charge de travail s'élève. TULGA et SHERIDAN [TULG 80] ont défini alors la charge de travail **WL** comme :

$$WL = \frac{TR}{TD}$$

Ce formalisme permet donc d'estimer une valeur de la charge après la mesure du temps requis **TR** pour l'effectuer, mais il n'en autorise pas une estimation en ligne. Une méthode appelée "Time line" a été mise au point par les chercheurs de la NASA [BOY 81] qui échantillonne le temps disponible et évalue pour chaque échantillon **i** de durée Δt , la durée **TR_i** pendant laquelle l'opérateur est réellement occupé. Leur estimation de la charge de travail échantillonnée **WL_i**, assimilable à un taux d'occupation s'écrit alors :

$$WL_i = \frac{TR_i}{\Delta t}$$

L'équipe de chercheurs en automatique humaine du laboratoire LAIH de Valenciennes a développé une méthode qui s'inspire de critères temporels pour l'étude de la charge de travail [MILL 88]. Cette méthode permet de donner en ligne la charge de la personne au travail et ce de façon objective et non perturbante. Elle se base sur une observation par du flux de l'information entre la machine et l'utilisateur par l'intermédiaire d'un modèle observateur (fig. II.13).

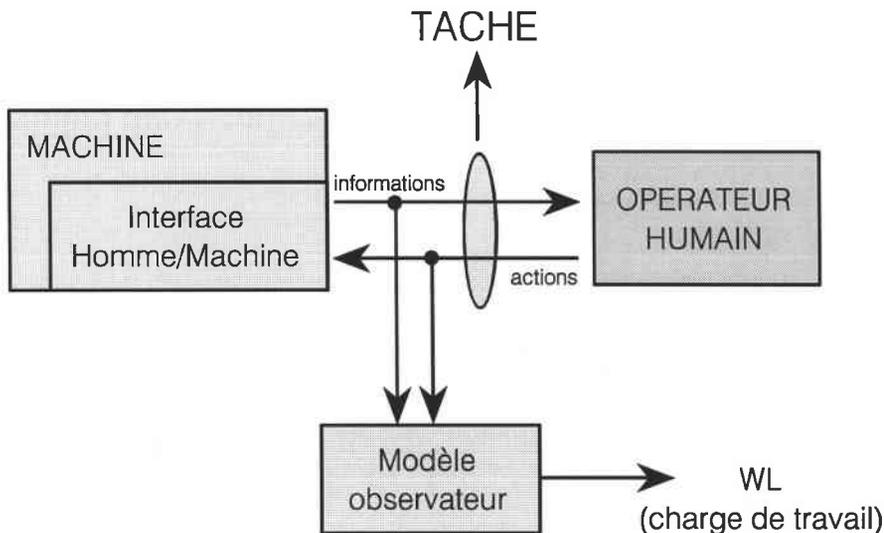


Figure II.13 : mesure de la charge de travail à l'aide d'un modèle observateur [RIER 93].

La méthode proposée repose sur deux idées de base. La première définit la charge de travail comme le niveau d'activité nécessaire à la personne pour faire face aux exigences de la tâche. MILLOT a donc défini les exigences **exig(t)** comme étant le produit des exigences temporelles $1/TD(t)$ par une fonction représentative de la difficulté intrinsèque de la tâche **G(t)**.

$$\text{exig}(t) = \frac{G(t)}{TD(t)}$$

où :

- **exig(t)** correspond aux exigences de la tâche au cours du temps.
- **G(t)** est la gravité de la situation qui rend compte des exigences fonctionnelles ($G(t) \in [0,1]$) et pondère ainsi les exigences fonctionnelles.
- **TD(t)** est le temps disponible à la personne à l'instant **t**.

La seconde idée consiste à faire une analogie avec les concepts physiques de puissance et d'énergie, la personne doit fournir à chaque instant une "puissance de travail" au moins égale à **exig(t)** pour faire face aux exigences de la tâche. La puissance alors fournie durant un temps très court **dt** induit une charge de travail instantanée **dWL(t)** analogue à l'énergie mobilisée pendant **dt**:

$$dWL(t) = \text{exig}(t) \cdot dt$$

La charge de travail totale est obtenue en intégrant la charge instantanée depuis l'instant **t_d** d'apparition de la tâche à exécuter jusqu'à ce que l'instant **t_d + TR** où ce travail est achevé :

$$WL = \int_{t_d}^{t_d + TR} \text{exig}(t) \cdot dt$$

Cette méthode a été développée dans des contextes monotâches et multitâches ainsi que dans les cas de tâches discrètes ou continues [RIER 93] [BERG 92].

V CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les différentes étapes de la conception et de l'évaluation de l'interface du système homme/machine. Cela nous a amené à introduire, ainsi qu'à tenter de définir, le concept de charge de travail. Nous avons ensuite présenté une synthèse des nombreuses méthodes décrites dans la littérature concernant son évaluation. Le concept et la valeur de la charge diffèrent en fonction de l'école à laquelle appartient le concepteur. Il n'existe pas à proprement parler de méthode universelle.

La plupart de ces méthodes ont été conçues pour évaluer la charge de travail des personnes travaillant avec des systèmes homme/machine complexes, comme la surveillance d'une centrale nucléaire, le contrôle de procédés industriels, le pilotage d'avions. Dans ces types d'applications, le nombre de tâches peut vite devenir impossible à gérer pour l'opérateur (pics de charges).

La complexité de notre application ne se situe pas dans le nombre de manoeuvres que doit effectuer la personne pour remédier à un quelconque défaut. C'est lorsqu'il s'agit d'assister le pilote du fauteuil au cours de ses déplacements que le système devient complexe puisque nous ne savons pas, a priori, ce qu'il veut faire et où il veut aller. D'autre part du fait de son handicap, il est important que la méthode choisie pour l'évaluation de la charge de travail soit non perturbante pour le pilote. Le contexte d'un mouvement en environnement intérieur pouvant évoluer rapidement, il est également essentiel de connaître en ligne la charge de travail afin d'en détecter les pics. Une méthode hors ligne (questionnaire) pourra simplement compléter ou confirmer certaines informations obtenues en temps réel.

Pour évaluer notre système homme/machine, nous proposons alors une méthodologie d'évaluation de la charge de travail qui regroupe en ligne sous forme de critères pertinents l'état dans lequel se situe physiquement et mentalement le pilote du fauteuil. La définition de ces critères fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

DEFINITION DES CRITERES D'EVALUATION DU SYSTEME HOMME/MACHINE

I INTRODUCTION

**II INTERFACE HOMME/MACHINE : EMULATION DU
HANDICAP**

III DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

IV ANALYSE DES RESULTATS

V ESTIMATION DES CRITERES D'EVALUATION

VI CONCLUSION

I INTRODUCTION

Les essais en situation expérimentale vont permettre de valider techniquement le prototype du V.A.H.M. et également d'analyser le flux des données échangées entre la personne et la machine (monitoring), afin d'évaluer le système homme/machine. Il s'agit donc de se définir des critères d'évaluation pertinents en nous rapprochant au mieux des conditions réelles d'utilisation d'un fauteuil roulant électrique.

La charge de travail du pilote du fauteuil dépend de l'exigence de la tâche de conduite, des performances techniques du robot et de l'ergonomie de l'interface homme/machine. Elle comporte une composante mentale et une composante physique. Cette dernière, négligeable dans le cas de personnes valides peut être importante pour des utilisateurs lourdement handicapés qui en général se fatiguent rapidement. L'effort physique pour commander le système est ici essentiellement fonction du nombre d'actions sur le capteur de commande de l'interface que l'on peut compter explicitement pour une action donnée. Il est également possible de le mesurer implicitement sous la forme d'un critère "d'efficacité temporelle" qui évalue le temps global d'exécution d'une action, sélection de l'ordre compris. Cette seconde option a été préférée à la première car elle pondère naturellement l'effort accompli par la durée de la mesure.

Un autre paramètre intervient également comme une composante de la charge de travail physique : le confort de navigation est une notion subjective qu'il nous faudra donc quantifier à partir de l'étude expérimentale.

La charge de travail mentale est une notion plus difficile à évaluer objectivement. Deux critères apparaissent concourir fortement à cette charge. Le premier, le critère de "performance du pilote", résulte d'une utilisation erronée de l'interface qui entraîne un certain énervement voire un découragement de l'utilisateur. Le second critère est dérivé des méthodes d'estimation temporelle de la charge de travail (voir chapitre précédent) bien adaptées à des tâches de conduite de véhicule. Il mesure le stress du pilote proche d'un obstacle ou, plus précisément, sa confiance envers la machine.

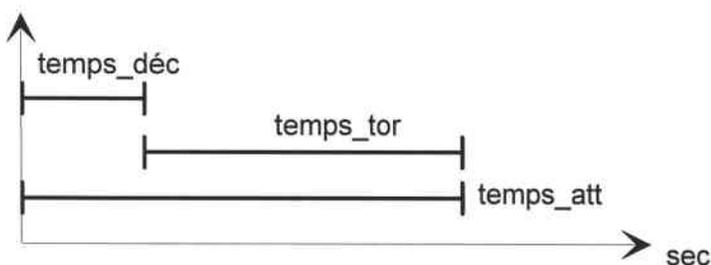
La suite de ce chapitre va décrire la méthode d'émulation du handicap des personnes concernées, les dispositifs et les protocoles expérimentaux utilisés pour les essais, et enfin, la méthode de calcul des différents critères cités ci-dessus.

II INTERFACE H/M : EMULATION DU HANDICAP

Afin de valider, de façon préliminaire, les différents modules de commande de la base mobile et de tester les performances du système homme/machine, ce sont en premier lieu des personnes valides qui vont se servir du prototype de fauteuil automatisé. Il faut néanmoins que l'expérimentation se rapproche le plus possible de la réalité.

Nous avons vu auparavant que deux interfaces homme/machine ont été développées pour commander la base mobile, l'une pour les handicaps de type tout ou rien et l'autre pour les handicaps de type proportionnel. Nous ne nous attacherons qu'à l'émulation des handicaps de type tout ou rien, celle-ci ne gênant pas le fonctionnement opératoire de la personne qui va piloter le fauteuil automatisé. Par contre émuler le handicap de type proportionnel demande à la personne valide de dégrader elle-même la maniabilité de son capteur de commande (dans notre cas, un joystick), ce qui influencerait le déroulement de l'expérience. De plus, une généralisation serait difficile.

Pour émuler le handicap de type tout ou rien nous définissons un "temps variable de la décision à l'action" appelé : **temps_tor**. En effet, dans toutes les aides techniques dont est amenée à se servir une personne souffrant d'un tel handicap, il existe un réglage du temps d'attente du défilement des différents choix possibles qu'elle veut valider. Cela lui permet, à partir du moment où elle prend la décision d'actionner son capteur de commande, d'avoir le temps de valider son choix. Ce temps d'attente, appelé **temps_att**, intègre donc le **temps_tor** qui peut varier en moyenne de 0.1 s à 4s, ainsi que le temps nécessaire à la personne pour se décider à actionner son capteur appelé **temps_déc** (fig. III.1).



$$\text{temps_att(s)} = \text{temps_déc(s)} + \text{temps_tor(s)}$$

après essais de mise au point de l'émulation :

$$\text{temps_att (s)} = 7/6 * \text{temps_tor(s)} + 2/3$$

Figure III.1 : émulation du handicap de type tout ou rien.

Ainsi, pour l'émulation, la personne appuie et maintient l'appui jusqu'à un changement d'état du système (changement de mode (écran graphique) ou mise en marche de l'action choisie). L'ordre de validation ne sera pris en compte qu'après le **temps_tor(émulé)**, car le temps_tor d'une personne valide est presque nul (fig. III.2). Ensuite, la personne maintient validé son capteur de commande tant que le mouvement engendré lui convient.

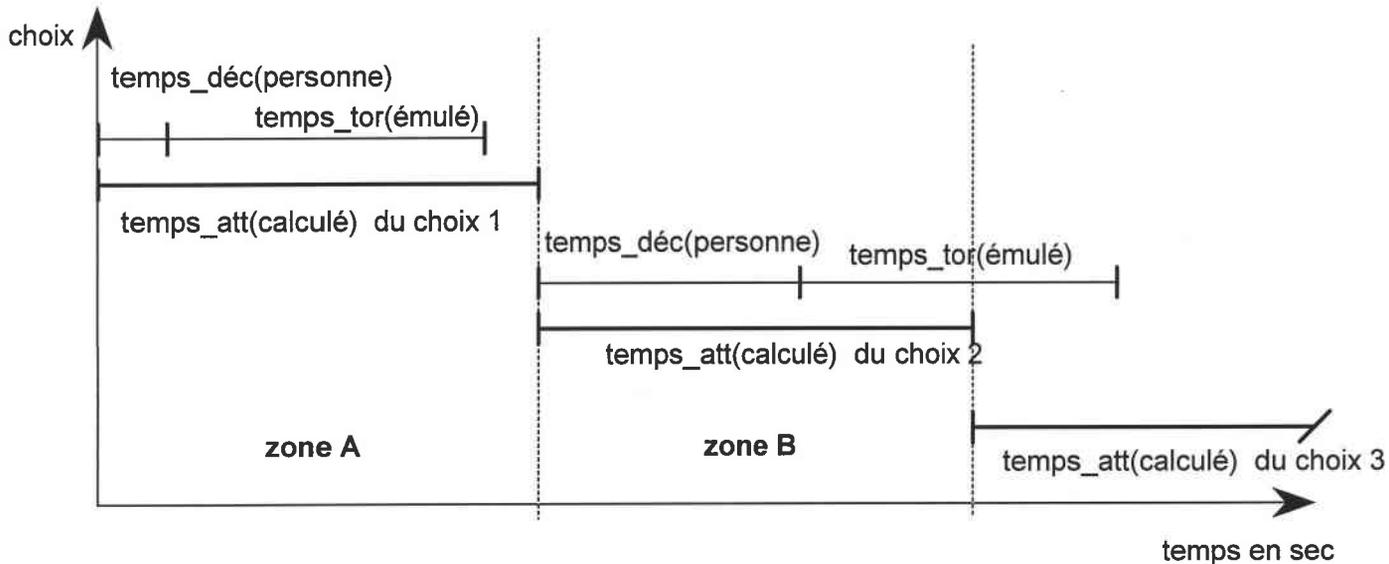


Figure III.2 : exemples de validation (personne valide).

Description :

- *zone A* : Dans ce cas la personne valide bien le choix 1, la somme des **temps_déc(personne)** et **temps_tor(émulé)** est bien inférieure au **temps_foc(calculé)**.
- *zone B* : Ici, la personne a dépassé le **temps_déc(octroyé)** pour l'émulation de ce **temps_tor(émulé)**, le choix qu'elle valide par erreur est alors le choix suivant 3.

Lors des essais avec des personnes valides, le fait d'émuler le handicap de type tout ou rien nous permet de simuler le comportement d'un panel de personnes handicapées ayant respectivement un temps_tor de 0.1s, 1.5s, 3.s. Ces essais avec des temps_tor différents vont permettre de faire la comparaison des modes de commande du fauteuil en fonction du temps_tor de la personne handicapée.

Lors des essais, les sujets se mettront donc à la place d'une personne à handicap de type proportionnel (commande via un joystick du système homme/machine) et de trois personnes à handicaps de type tout ou rien qu'ils émuleront via un temps_tor.

III DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

III.1 LE PROTOTYPE DU FAUTEUIL

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, notre prototype de fauteuil roulant électrique est composé d'une base ROBUTER sur laquelle est fixé un siège de fauteuil pour personne handicapée. L'ordinateur portable (486DX33) avec son écran couleur TFT est positionné sur une tablette qui permet de voir l'écran sans obstruer la vue d'ensemble du pilote (fig. I.20 du chapitre I). Le capteur de commande est connecté via le port parallèle du portable, la liaison série étant exploitée pour communiquer avec la base mobile (9600bds).

Le capteur de commande de l'interface de type tout ou rien est un interrupteur électrique habituellement utilisé en centre de réadaptation ; pour l'interface de type proportionnel le capteur utilisé est un joystick.

Pour les essais, ce sont les premières interfaces développées pour le projet V.A.H.M., évaluées statiquement, qui sont implantées sur le portable (fig. III.3). Elles vont donc être testées dynamiquement. Les modifications éventuelles seront appliquées à la série d'essais suivante.

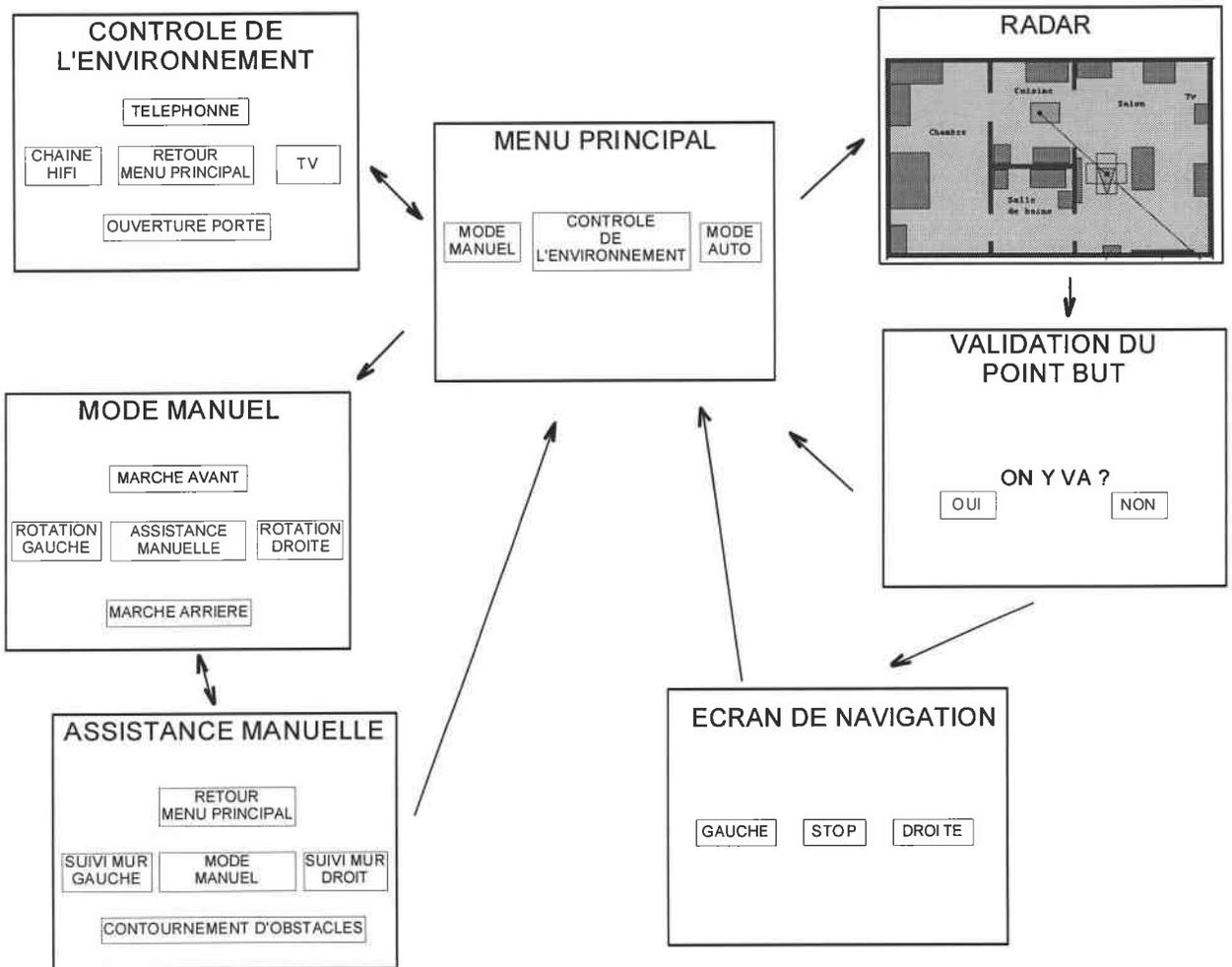


Figure III.3 : synoptique de l'interface graphique utilisée pour la première série d'essais.

III.2 L'APPARTEMENT D'ESSAI

La première série d'essais est donc réalisée avec des personnes valides dans un appartement reconstitué. Celui-ci, entièrement modulaire, a été agencé à partir de plans d'architectes conçus pour personnes handicapées. Ainsi, nous disposons en permanence pour nos essais, d'un appartement réaliste de grandeur nature (fig. III.4). Pour simplifier la maquette de construction de l'appartement, les murs ont une hauteur juste suffisante pour que les capteurs de perception de l'environnement les détectent, l'expérimentateur pouvant toujours observer le pilote et la base mobile sans les perturber.

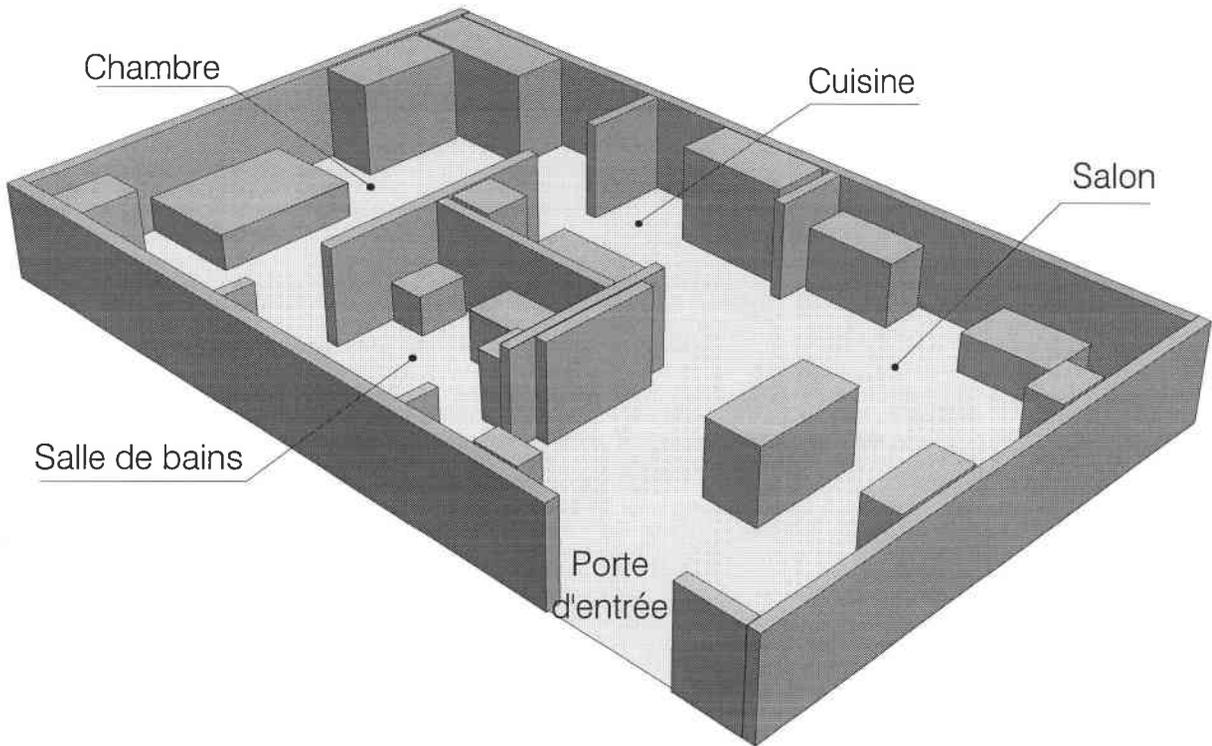


Figure III.4 : plan de l'appartement d'essais (6.33m*11.20m).

III.3 PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Quatre personnes valides ont effectué durant 5 semaines les essais sur le fauteuil V.A.H.M.. Trois d'entre elles travaillant dans l'équipe C.M.I. sont au fait des travaux de cette thèse. Une période d'apprentissage à peu près identique a cependant été nécessaire pour tous les sujets : la stratégie de déplacement en fauteuil roulant électrique est très différente de celle adoptée en conduite de voiture.

Le déroulement chronologique des essais a été le suivant :

- 1^{ère} semaine : apprentissage du système homme/machine,
- 2^{ème} semaine : essais avec l'interface tout ou rien avec un temps_{tor} de 0.1s,
- 3^{ème} semaine : essais avec l'interface tout ou rien avec un temps_{tor} de 3s,
- 4^{ème} semaine : essais avec l'interface tout ou rien avec un temps_{tor} de 1.5s,
- 5^{ème} semaine : essais avec l'interface proportionnelle.

Au cours des différents essais réalisés nous enregistrons le flux d'échange des données entre la personne et la machine par mode de fonctionnement (mode automatique, mode assisté, mode manuel) en fonction d'un type de handicap (tout ou rien ou proportionnel).

III.3.1 Apprentissage

Dans un premier temps, les expérimentateurs ont fait visuellement connaissance avec le système robotisé : explication du fonctionnement global du fauteuil (synoptique de l'interface) et visite de l'appartement. Les différentes étapes de l'apprentissage se sont ensuite déroulées de la façon suivante :

- Le 1^{er} jour, chaque pilote commande toutes les fonctionnalités du système, le fauteuil étant à l'arrêt, roues débrayées, ceci afin d'acquérir un modèle mental de l'interface pour éviter des problèmes de recherche de l'information durant les essais. La manipulation, sans mouvement de la base, dure jusqu'à ce que la personne soit capable de citer oralement le parcours (enchaînement d'écran graphique) d'un choix (bouton virtuel) à l'autre. Les questions que nous posons alors sont du type : "A partir du menu principal, comment fait-on pour aller ouvrir la porte, puis activer la marche avant du mode contournement d'obstacle ?" et "Citez les différents étapes du mode automatique". Ensuite, via un capteur tout ou rien de temps_{tor} égal à 0.1s, le sujet pilote librement le fauteuil dans l'appartement afin de se mettre en confiance. Les lieux à atteindre et les modes de commande sont au choix du pilote.
- les 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} jours servent à amener tous les pilotes à un niveau d'apprentissage identique aussi bien pour l'utilisation du fauteuil (dextérité de commande) que pour la prise de conscience de ses possibilités techniques. Pour ce faire, ils doivent chaque jour effectuer un parcours prédéterminé (fig. III.5) pendant lequel ils n'utilisent qu'une façon de commander la base mobile, le mode manuel, puis le mode automatique et en dernier lieu le mode manuel assisté.
- Le 5^{ème} jour, les pilotes refont les manipulations de la semaine en n'utilisant que l'interface de type proportionnel.

Pour ne pas influencer l'apprentissage du système homme/machine en émulant de façon trop marquée le handicap de type tout ou rien, seul un temps_{tor} de 0.1s a été utilisé pendant les manipulations.

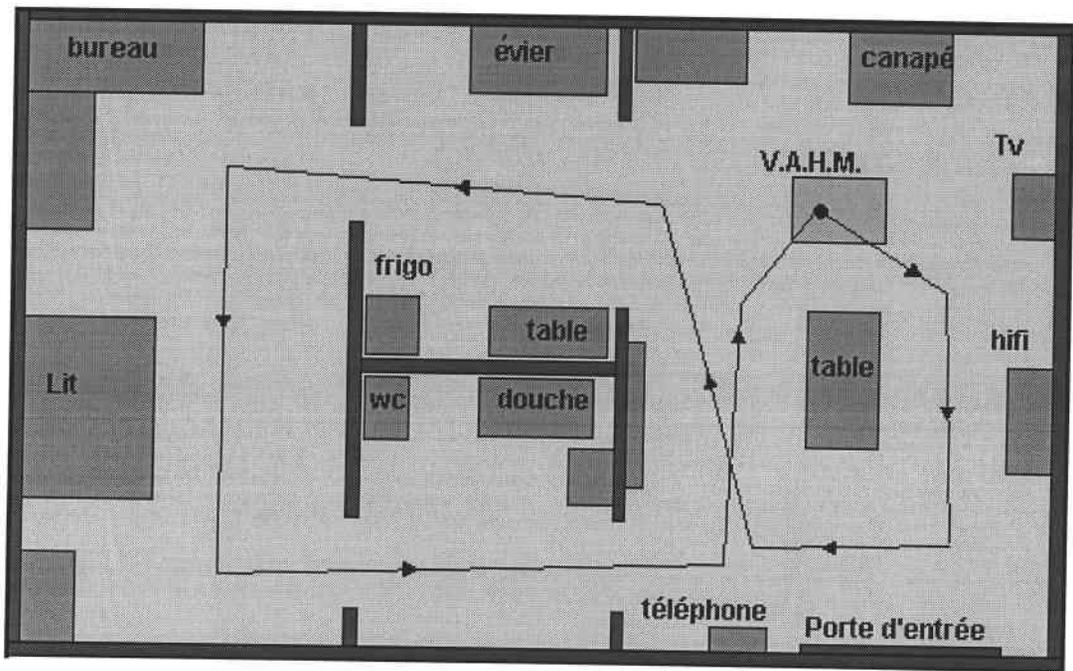


Figure III.5 : parcours prédéterminé pour les étapes de l'apprentissage.

III.3.2 Scénarios d'évaluation

Le protocole expérimental doit faire intervenir toutes les fonctionnalités implantées sur le fauteuil ainsi que les différents cas d'utilisation. C'est pourquoi nous avons établi des scénarios types en fonction des modes de commande. Par ailleurs, pour ne pas limiter le lieu d'évolution de la base mobile à une zone modélisée, la géométrie du bâtiment nous a permis d'associer à l'appartement d'essai un couloir et une pièce annexe, tous deux non-modélisés (fig. III.6). Nous pourrions ainsi comparer l'utilisation du mode manuel assisté et du mode manuel classique dans un environnement non modélisé.

Scénarios :

Pour établir une comparaison objective des modes de commande du fauteuil et évaluer le comportement du système homme/machine sur un même type de trajet avec des modes de commande différents, les différents essais doivent avoir une base commune : le point de départ, les points intermédiaires et le point d'arrivée de la manipulation doivent être identiques.

Un trajet a été établi comportant des points de passage obligés et permettant d'intégrer aux mieux les déplacements possibles d'une personne en fauteuil dans un appartement, un couloir et une pièce annexe (fig. III.6). Ce trajet tient compte des capacités techniques actuelles du fauteuil : le module passage de porte n'est pas implanté et le mode automatique ne permet pas encore de traverser des passages trop étroits.

Le trajet comporte deux phases distinctes à évaluer qui sont la navigation en zone modélisée et la navigation en zone non-modélisée. La distinction de ces phases est transparente pour le pilote. Il doit simplement répondre aux questions de la méthode subjective TLX : une première fois lorsqu'il arrive au téléphone (4) et une seconde fois à la fin de la manipulation (11). La méthode TLX a été modifiée au niveau de certains descripteurs pour s'adapter à notre application (voir annexe A).

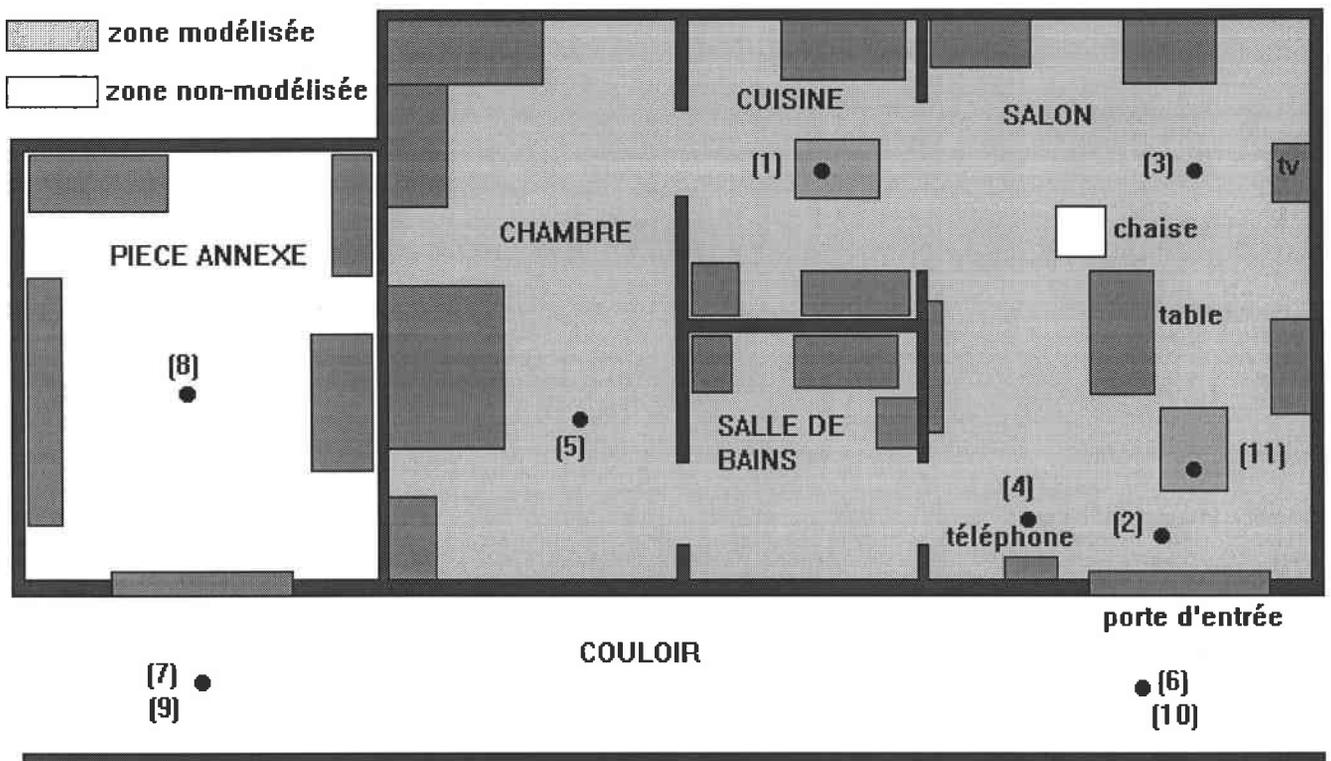


Figure III.6 : points de passage à respecter lors des essais.

Les performances de certains modules implantés sur le fauteuil, comme le suivi de mur, nous ont amené à impliquer dans les scénarios un changement, effectué par le pilote, de la vitesse de déplacement en mode manuel classique. Il s'agit d'égaliser la vitesse de déplacement du mobile en mode manuel avec celle utilisée pour le module suivi de mur.

Lors des essais, le comportement des expérimentateurs est important, puisqu'il va contribuer à l'évaluation temporelle de l'utilisation des modes de commande. Ils doivent donc connaître parfaitement l'enchaînement du parcours, évitant ainsi les temps d'attente irréguliers qui influencent négativement la durée de la manipulation.

Les quatre personnes vont effectuer pendant une même semaine, avec un même type d'interface, les trois scénarios suivants (le texte entre guillemets correspond à une commande d'appareil via l'écran graphique intitulé "contrôle de l'environnement") :

- 1^{er} scénario : parcourir en mode manuel classique sans appel aux autres modes de fonctionnement les étapes suivantes :
 - cuisine (1) à porte d'entrée (2) => "ouvrir la porte",
 - porte d'entrée (2) à télévision (3) => "télévision",
 - télévision (3) à téléphone (4) => "téléphone" + TLX,
 - téléphone (4) à chambre (5) => "validation",
 - chambre (5) à couloir (6) => "vitesse rapide",
 - couloir (6) à pièce annexe (8) via (7) => "validation",
 - pièce annexe (8) à arrivée (11) via (9) et (10) => TLX.
- 2^{ème} scénario : suivre les étapes de (1) à (4) comme décrites ci-dessus en se servant exclusivement du mode automatique. Par contre, le module suivi de mur est utilisé dans les déplacements de (6) à (7) et de (9) à (10) (le choix du mur à suivre est à la charge du pilote).
- 3^{ème} scénario : l'ensemble du parcours est effectué en faisant appel uniquement au mode manuel assisté, c'est-à-dire le module contournement d'obstacle, et, dans le couloir, le module suivi de mur.

L'exécution du scénario se faisant de façon autonome, nous avons demandé au pilote, à des fins d'analyse ultérieure, de signaler par un artifice "validation" à quel moment elle se trouve aux points intermédiaires (5) et (8).

La phase de monitoring :

Pendant le déroulement des essais l'ordinateur stocke, de façon transparente pour l'utilisateur, le flux d'échange des données entre ce dernier et la machine (technique du monitoring). L'enregistrement des données se fait chronologiquement dans un fichier texte **espion.esp**. Un fichier binaire **espion.val** est également créé, pour le stockage des données numériques du mode automatique et du mode manuel assisté. La méthode de calcul des critères d'évaluation du système homme/machine est alors basée sur l'analyse, étape par étape, du déroulement des essais.

Les différentes données enregistrées pour l'analyse sont :

- données de type temporel (stockées dans le fichier texte (fig. III.7a)) :
 - le temps total de l'essai (le temps pendant lequel la personne répond aux questions TLX aux étapes (4) et (11) n'est pas pris en compte),
 - le temps d'utilisation de chaque mode de fonctionnement,
 - le temps de validation de chaque choix (pendant lequel le pilote valide et maintient son capteur de commande),
 - le temps écoulé entre deux validations,
 - le temps pendant lequel le fauteuil ralentit en raison de la présence d'obstacles trop proches.
- données de type choix (incorporées dans le fichier texte (fig. III.7a)) : tous les choix validés (bouton virtuel) sont enregistrés en ligne et regroupés en fonction du mode de commande choisi par le pilote.
- données numériques (stockées dans le fichier binaire (fig. III.7b)). Dans ce fichier nous trouvons les trois principales valeurs numériques qui permettent aux modes automatique et manuel assisté de contrôler le déplacement de la base mobile :
 - dw : elle correspond à la différence de vitesse calculée (voir fig. I.28) qu'il faut appliquer aux roues de manière à respecter la consigne en cours comme par exemple suivre un mur, suivre une trajectoire, ...
 - us : donnée exprimant la "force répulsive" venant la détection par un capteur ultrasons d'un obstacle se situant à l'intérieur de la zone d'évitement automatique définie autour de la base (voir fig. I.29).

- vit_linéaire : donnée indiquant la vitesse linéaire du fauteuil en mouvement.

```

-pilote1-24/5/1994-17H18-temps_déf=2.42-temps_tor=1.50

-mode manu-MODE MANUEL
-mav-MAV-t_mav=5.05-rd-RD-t_rd=5.54-mav-MAV-t_mav=10.21-rd-RD-t_rd=2.42
-mav-MAV-t_mav=14.61-rg-RG-t_rg=5.33
-mav-MAV-t_mav=4.29-rd-RD-t_rd=7.20-mav-MAV-t_mav=2.91-as-AS-t_manu=120.89
-mm_mp-MM_MP-t_assi=17.03
-t_manuel=138.46-nb appui=12

-crt_env-CONTROL ENV
-porte-PORTE-ce_mp-CE_MP
-t_control=15.21-nb appui=3

-mode manu-MODE MANUEL
-rd-RD-t_rd=24.72-mav-MAV-t_mav=6.31-rg-RG-t_rg=6.10-mav-MAV-t_mav=3.46
-rg-RG-t_rg=5.49-mav-MAV-t_mav=36.36-rg-RG-t_rg=1.82-mav-MAV-t_mav=10.93
-rg-RG-t_rg=10.11-mav-MAV-t_mav=6.26-as-AS-t_manu=190.04-mm_mp-MM_MP-t_assi=4.78
-t_manuel=195.37-nb appui=13

-crt_env-CONTROL ENV
-WI=0.20
-t_control=78.76-nb appui=0

-t_total=1362.37

```

Figure III.7a : exemple de fichier "espion.esp".

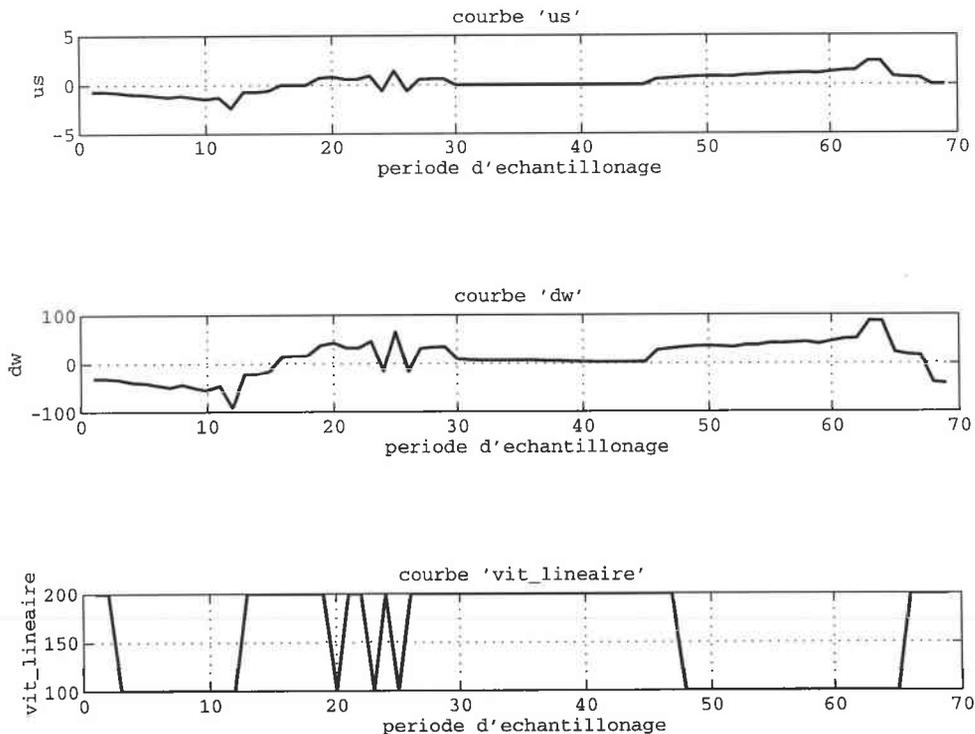


Figure III.7b : tracés des courbes dw, us et vit_linéaire du fichier binaire. Courbes extraites d'un fichier espion.val provenant de l'exécution d'un suivi de mur.

IV ANALYSE DES RESULTATS : OBSERVATIONS D'ORDRE GENERAL

D'une manière générale, les scénarios proposés ont été accomplis avec succès, c'est-à-dire sans collision du fauteuil avec son environnement proche. La complexité des deux types d'interface proposés n'a pas posé de problème de recherche de l'information (enchaînement d'écrans graphiques). Cependant des erreurs de manipulation dues à l'émulation du handicap de type tout ou rien sont apparues, ce qui montre bien la limite de l'expérimentation avec des personnes non handicapées. Par contre, l'utilisation du joystick comme capteur de commande a moins perturbé les pilotes qui ont acquis rapidement ce mode de dialogue.

IV.1 LE MODE AUTOMATIQUE

La désignation du point but en mode automatique à l'aide du radar nécessite, sauf erreur de manipulation, un nombre de validations constant du capteur de commande alors qu'en mode manuel, ce nombre dépend fortement de la stratégie de déplacement adoptée. Seule une étude des fichiers espions peut nous dire quel est le mode de fonctionnement le plus rapide pour arriver au but. Les observations qualitatives ne permettent de juger que du confort de l'utilisation du mode automatique, qui semble a priori plus agréable que le mode manuel. Il permet en effet de suivre une trajectoire lissée sans s'arrêter, ce qui n'est pas le cas en mode manuel, surtout avec l'utilisation de l'interface de type tout ou rien (choix de manoeuvres restreints (marche avant/arrière et rotation pure gauche/droite)).

Par ailleurs, en mode automatique, lorsque le point but à atteindre était trop proche d'un obstacle, la zone d'évitement d'obstacle ne permettait pas de s'en approcher déviant ainsi la position d'arrivée demandée par le pilote (fig. III.8). Ce problème devra être géré par les modules de planification et/ou de navigation.

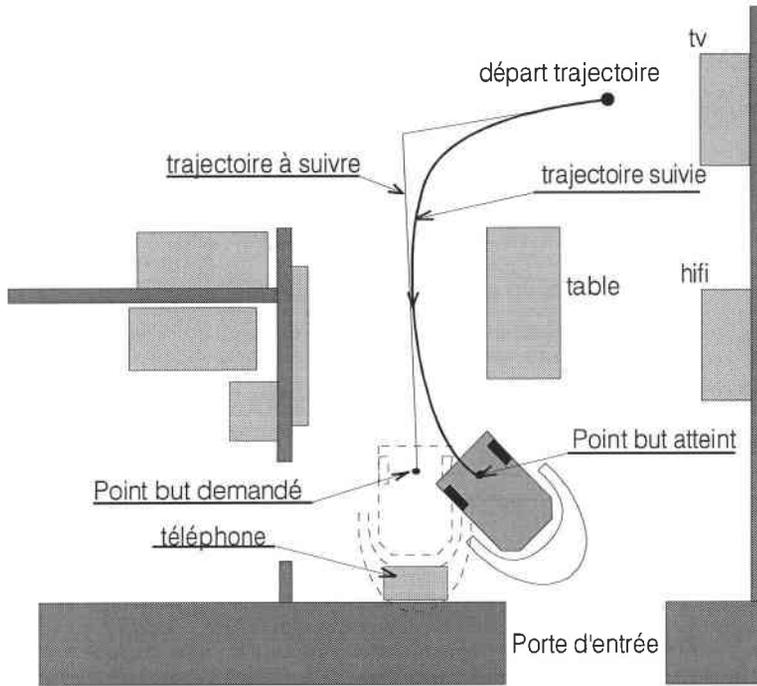


Figure III.8 : cas où le point but désigné n'est pas atteint correctement.

Avec l'utilisation de l'interface de type tout ou rien, la chaise non modélisée qui se trouve sur le trajet porte (2) - télévision (3) n'a pu être évitée en mode automatique, bien qu'il soit possible d'intervenir en cours de mouvement pour créer une déviation manuelle. En effet, la commande avec un simple interrupteur ne permet pas d'amorcer la déviation à temps lorsque le défilement des choix est trop lent ($\text{temps}_{\text{tor}} > 0.1\text{s}$). La possibilité d'actionner une déviation manuelle étant alors trop complexe à exécuter, celle-ci a été retirée de l'interface, ne laissant qu'une simple commande d'arrêt du déplacement.

IV.2 LA PRIMITIVE SUIVI DE MUR

Du fait de la longueur du couloir (17m), quelque soit le type de capteurs utilisés, le mode "suivi de mur" s'est avéré à l'usage plus confortable et pratique à utiliser qu'une commande manuelle du fauteuil. Dans la plupart des essais, un ou plusieurs recalages ont été nécessaires : il est difficile de maintenir un cap rectiligne sur toute la longueur du couloir (fig. III.9).

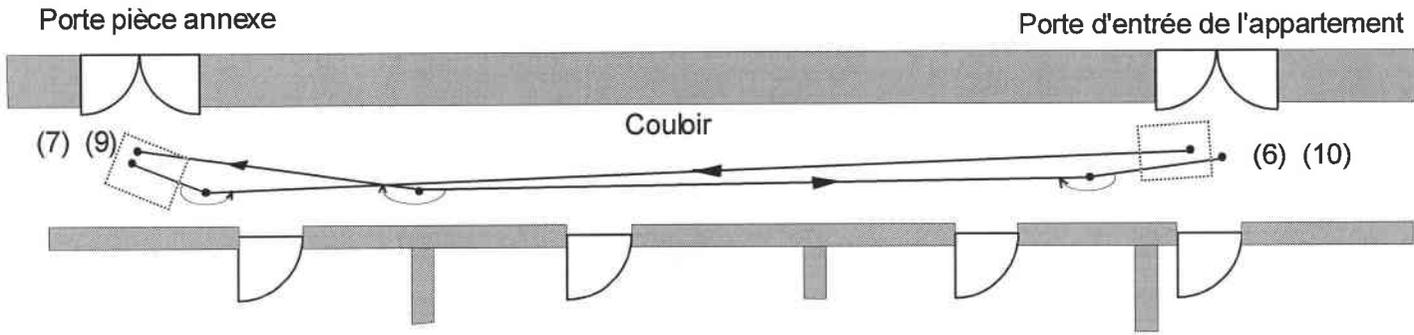


Figure III.9 : recalage de la direction sur le parcours du couloir en mode manuel classique (tout ou rien). Figure tirée des données fichier espion.esp (temps_tor = 0.1s).

IV.3 LA PRIMITIVE DE CONTOURNEMENT D'OBSTACLES

Lors de l'utilisation de ce mode, la précision du positionnement de la base mobile indiquant la direction à suivre s'est avérée importante pour éviter au fauteuil de se placer dans des culs de sac. Il ne se déplace en effet qu'en fonction de son environnement proche (Fig. III.10). Par contre, une fois bien positionné, le fauteuil peut aussi passer les portes de l'appartement sans encombre.

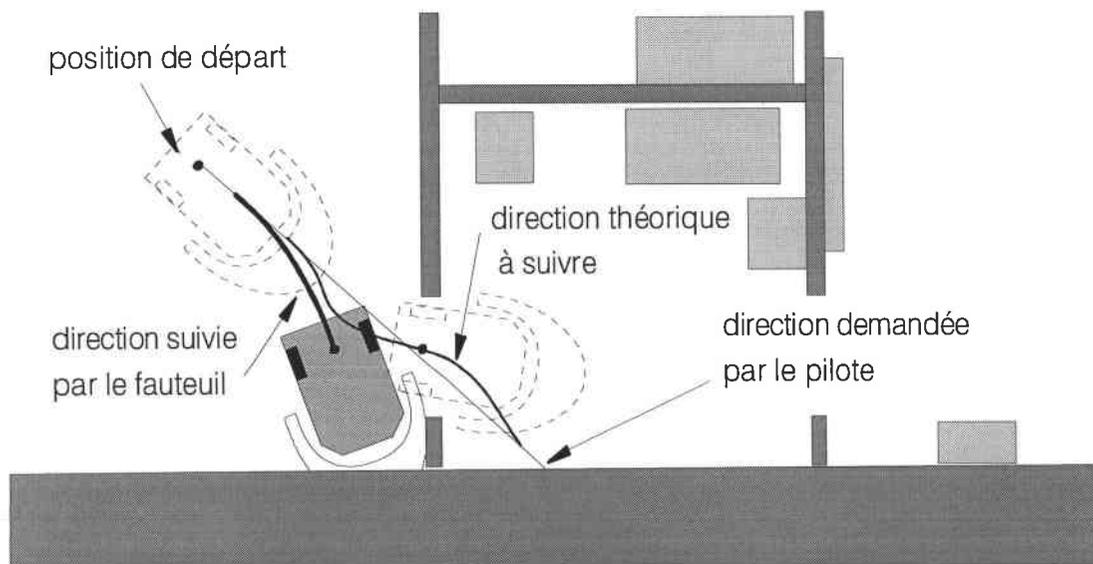


Figure III.10 : mauvaise orientation de départ pour passer la porte, engendrant l'arrivée de celui-ci dans un cul de sac.

V ESTIMATION DES CRITERES D'EVALUATION

Les méthodes d'estimation des différents critères d'évaluation du système homme/machine sont obtenues par l'analyse des fichiers espions. Ces critères, au nombre de quatre, sont représentatifs de la charge de travail physique et mentale de la personne pilotant le fauteuil :

- efficacité temporelle des modes de fonctionnement,
- performance du pilote (gestion des incohérences de commandes du système homme/machine),
- confort de navigation,
- confiance de l'utilisateur envers la machine.

Pour orienter notre analyse des fichiers espions, nous nous sommes inspirés dans nos réflexions, des résultats de l'estimation subjective de la charge de travail calculée avec la méthode TLX modifiée et des observations relevées au cours des essais. Ces données complémentaires nous ont apporté concrètement un appui pour l'établissement des critères retenus pour l'évaluation du système homme/machine. Suivant l'essai en cours, nous avons alors pu confirmer quels étaient les points importants à retenir dans l'analyse de ces critères.

V.1 CRITERE D'EFFICACITE TEMPORELLE

Ce critère évalue les différences de temps d'exécution des trajets parcourus en fonction des modes de fonctionnement et nous donne donc une échelle d'efficacité temporelle des différents modes. Nous aurions pu déduire cette échelle par simulation en définissant pour un trajet donné un parcours optimisé en temps, en fonction des différents modes, mais la présence de l'homme en situation expérimentale permet de tenir compte de son aptitude à gérer le système proposé.

Le temps total d'exécution d'un parcours intègre non seulement les capacités techniques du robot, mais aussi l'habileté du pilote qui, en choisissant sa stratégie de déplacement, va influencer son temps de parcours. Afin de comparer rigoureusement les modes entre eux, nous avons seulement utilisé les données temporelles des fichiers espions lorsque le pilote utilise un mode de fonctionnement de déplacement. Nous excluons donc toutes les manoeuvres de validation du module

de contrôle de l'environnement. Tous les modes de déplacement ont des vitesses identiques, basées sur 0.2m/s en zone modélisée et 0.4m/s en environnement non modélisé.

Par des regroupement en zone d'évolution, en type d'interface, et en modes, nous avons pu établir des tableaux indiquant les temps moyens d'efficacité temporelle :

- zone modélisée :

- interface de type tout ou rien : pour les temps_tor de 0.1s, 1.5s et 3s, nous avons comparé les trois modes de commandes entre eux (mode manuel (manuel), mode automatique (auto), mode manuel assisté (assisté)),
- interface de type proportionnel : les mêmes comparaisons que ci-dessus, mais avec un seul mode de commande proportionnelle, le joystick.

- zone non modélisée : nous comparons l'utilisation du mode manuel classique au mode manuel assisté qui permet d'évoluer par rapport à son environnement proche (suivi de mur, contournement automatique d'obstacle).

V.1.1 Zone modélisée

- Interface de type tout ou rien :

Dans la zone d'évolution modélisée, nous avons calculé l'efficacité temporelle des modes de déplacement en fonction de trois trajets du scénario qui sont :

- trajet 1 : de la cuisine (1) à la porte d'entrée (2),
- trajet 2 : de la porte d'entrée (2) à la télévision (3),
- trajet 3 : de la télévision (3) au téléphone (4).

Le tableau III.1 donne les moyennes des temps de parcours **temps_par** en fonction des modes de fonctionnement et du temps_tor utilisé :

$$\text{Moyenne}_{\text{mode}} = \frac{1}{\text{Nb}_{\text{trajet}}} \cdot \sum_{i=1}^{\text{Nb}_{\text{trajet}}} \left(\frac{1}{\text{Nb}_{\text{pilote}}} \cdot \sum_{j=1}^{\text{Nb}_{\text{pilote}}} \text{temps_par}_{ij} \right)$$

avec mode = [manuel, auto, assisté]

Les tableaux b1 donnant les **temps_par** en fonction des trajets, des temps_tor et des pilotes, sont présentés à l'annexe B.

| Temps_tor | Mode manuel classique (sec) | Mode manuel assisté (sec) | Mode automatique (sec) |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 0.1 sec | 83.75 | 86.75 | 74.42 |
| 1.5 sec | 120.1 | 126.92 | 76.25 |
| 3 sec | 153.2 | 162.75 | 85.75 |

Tableau III.1 : efficacité temporelle des modes en zone modélisée.

A partir de ces moyennes des temps de parcours, nous pouvons déduire une échelle d'efficacité temporelle du mode le plus rapide au mode le plus lent :

- mode automatique,
- mode manuel,
- mode manuel assisté.

L'échelle d'efficacité temporelle montre que le mode manuel assisté est moins performant que le mode manuel classique : 3, 6, 9 secondes d'écart pour les temps_tor respectifs de 0.1, 1.5, 3 secondes, alors que la présence d'une assistance au pilotage est sensée améliorer le système homme/machine classique. Cette différence provient des repositionnements en orientation pendant le parcours, occasionnant une perte de temps par le changement des écrans graphiques (passage de l'écran "mode manuel assisté" à l'écran "mode manuel" pour atteindre les rotations "gauche" ou "droite").

Ce premier résultat nous a amené à modifier l'interface homme/machine pour optimiser l'utilisation du mode manuel assisté ; le synoptique de cette nouvelle interface est présenté à la figure II.6. Cette amélioration de l'interface modifie l'échelle de l'efficacité temporelle du mode manuel et du mode manuel assisté. En effet, l'intégration d'un quatrième choix "mode manuel assisté" dans la fenêtre intitulée "menu principal" permet :

- au mode manuel de pouvoir revenir directement à l'écran du "menu principal" sans passer par le choix "retour au menu principal" de l'écran "mode manuel assisté" comme cela était le cas. Par contre, à partir de l'écran "menu principal", il faut attendre le temps d'attente supplémentaire du quatrième choix pour passer en "mode manuel", puisque l'ordre de défilement des choix se fait de la façon suivante : "contrôle de l'environnement" suivi de "mode automatique", "mode manuel assisté", et "mode manuel", etc...
- de donner la possibilité d'accéder directement à l'écran "mode manuel assisté" via l'écran du "menu principal" et de passer à un écran spécifique pour la primitive contournement d'obstacle où les choix de repositionnements sont inclus.

A partir de ces modifications, nous avons pu calculer des nouveaux temps de parcours, en reprenant les données temporelles adéquates des fichiers espions, en incluant les temps de focus des défilements supplémentaires, correspondant théoriquement à la nouvelle interface (voir les tableaux b2 de l'annexe B). Ces calculs permettent d'établir alors une nouvelle échelle d'efficacité temporelle en fonction de la nouvelle interface homme/machine. Les moyennes de temps de parcours calculées de la même manière que ci-dessus sont présentées au tableau III.2 :

| Temps_tor | Mode manuel classique (sec) | Mode manuel assisté (sec) | Mode automatique (sec) |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 0.1 sec | 82 | 76 | 74.42 |
| 1.5 sec | 117.25 | 99 | 76.25 |
| 3 sec | 148.5 | 134.3 | 85.75 |

Tableau III.2 : nouvelle efficacité temporelle des modes en zone modélisée.

L'échelle d'efficacité temporelle des modes de commande s'établit alors de la manière suivante :

- mode automatique,
- mode manuel assisté,
- mode manuel.

Ces échelles d'efficacité sont valables quelque soit la valeur du temps_{tor}, mais ne s'appliquent pas à tous les types de trajets. En effet, l'efficacité du mode automatique s'explique ainsi : quelque soit le déplacement automatique à demander à la machine, il faut valider cinq fois le capteur de commande ("mode automatique", "radar ligne", "radar curseur", "radar orientation", "validation du mouvement"). Par contre, dans les deux autres modes de fonctionnement, c'est la personne qui est directement responsable du nombre de validation de par la stratégie de déplacement adoptée. Dans les trajets réalisés pour les essais, le nombre minimal d'appuis sur le capteur était supérieur à cinq.

En outre, la sensibilité temporelle est différente suivant le mode de déplacement utilisé. Il suffit d'une erreur de validation en mode automatique, entraînant une série de cinq validations minimum obligatoires, pour que l'efficacité de ce dernier se rapproche de celle des autres modes, alors qu'une erreur de validation dans le mode manuel ou le mode manuel assisté se corrige plus rapidement puisqu'elle n'entraîne pas de validation obligatoire de choix.

Par ailleurs, suivant le type de trajet à réaliser, le fait de devoir valider un nombre fixe de choix pour atteindre la primitive contournement d'obstacle ou désigner un point but en mode automatique, peut devenir une contrainte temporelle si le trajet à faire est simple (deux rotations et une translation). C'est-à-dire que si le trajet peut se réaliser en mode manuel en un nombre de manoeuvres maximum inférieur à trois validations du capteur de commande (choix du mode de fonctionnement compris), alors ce mode est le plus rapide. Pour quatre manoeuvres effectives, c'est l'habileté du pilote et le type de trajet (nombre de repositionnements à faire) qui font la différence entre le mode manuel assisté et le mode manuel. Par contre, à partir du moment où le fauteuil a connaissance du point d'arrivée voulu par le pilote, c'est le mode automatique qui est le plus rapide quelque soit le trajet.

- Interface de type proportionnel :

Pour évaluer l'échelle d'efficacité temporelle en fonction des modes de déplacements avec l'utilisation d'une interface de type proportionnel, nous avons appliqué la même démarche de calcul que celle décrite précédemment. L'interface utilisée (voir figure III.3) est basée sur le même synoptique que l'interface de type tout ou rien. Par contre, pour valider un choix affiché dans les différentes fenêtres graphiques, il suffit de le toucher avec le joystick virtuel. De plus pour quitter l'écran du mode manuel et pour revenir à l'écran principal, il suffit d'attendre cinq secondes en position arrêtée. Le tableau III.3 montre alors les différents temps de parcours des trois premiers trajets du scénario suivi par les pilotes en n'utilisant pour chaque essai qu'un seul mode de déplacement à la fois. La figure 3.11 montre les écarts types de ces moyennes en fonction des trajets.

| Joystick | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|-------------------|---------------------------|------|---------|---------------------------|-------|---------|---------------------------|-------|---------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 51 | 67 | 82 | 58 | 70 | 96 | 51 | 67 | 64 |
| Pilote 2 | 52 | 74 | 82 | 60 | 81 | 87 | 47 | 76 | 60 |
| Pilote 3 | 48 | 72 | 84 | 82 | 75 | 106 | 47 | 73 | 80 |
| Pilote 4 | 50 | 71 | 83 | 74 | 81 | 102 | 58 | 73 | 78 |
| Moyenne | 50.25 | 71 | 82.75 | 68.5 | 76.75 | 97.75 | 50.75 | 72.25 | 70.5 |
| Ecart type | 1.47 | 2.55 | 0.83 | 9.93 | 4.6 | 7.15 | 4.59 | 3.27 | 8.64 |

Tableau III.3 : temps de parcours des trois trajets réalisés en zone modélisée (interface de type proportionnel).

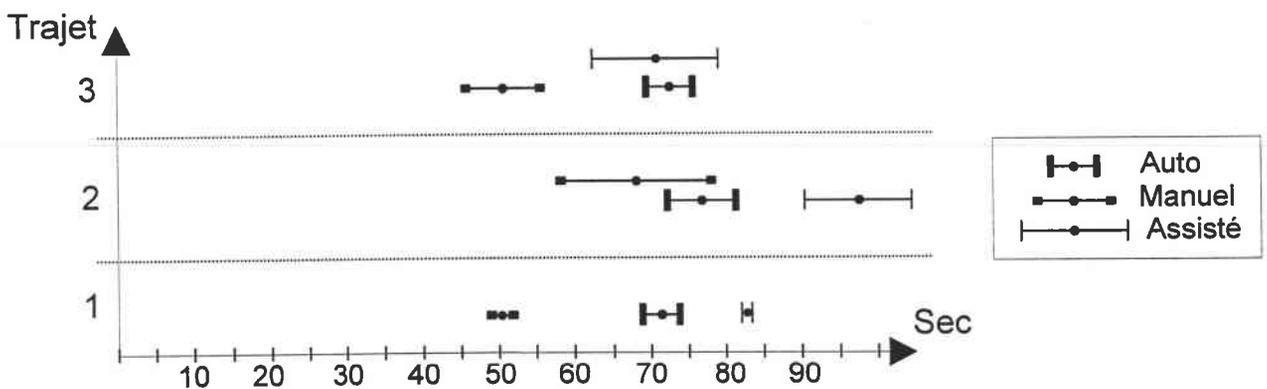


Figure 3.11 : moyennes +/- les écarts types en fonction des trajets et des modes

Nous en déduisons les moyennes des temps de parcours suivants (tableau III.4) :

| | Mode manuel classique (sec) | Mode manuel assisté (sec) | Mode automatique (sec) |
|-----------------|--|--|---------------------------------------|
| Joystick | 56.47 | 83.66 | 73.3 |

Tableau III.4 : tableau de l'efficacité temporelle des modes en zone modélisée (joystick).

Nous pouvons donc établir l'échelle d'efficacité temporelle du mode le plus rapide au mode le plus lent :

- mode manuel,
- mode automatique,
- mode manuel assisté.

Nous remarquons que le mode manuel assisté et le mode automatique ne sont pas performants en temps devant un pilotage classique du fauteuil. Deux causes en sont responsables :

- L'interface homme/machine proposée pour le mode manuel assisté n'est pas adaptée, les passages d'un écran à l'autre pour repositionner le fauteuil en orientation sont trop lourds à gérer.
- Pour le mode automatique, le fait de devoir désigner à la machine un point but (quelle que soit la façon de le désigner : "radar" ou choix de lieux "prédéterminé") occasionne une perte de temps qui pour le pilote 4, par exemple, avec la désignation "radar" prend 35% (78s) du temps total d'exécution des trois trajets de 225s. Alors qu'en mode manuel classique le fauteuil peut être déjà près du but dans ce même laps de temps.

Rappelons d'autre part que la difficulté pour certains utilisateurs handicapés à utiliser un joystick n'a pas été émulée. Une amélioration des performances temporelles du mode automatique consisterait à présenter des choix d'arrivée prédéterminés, ce qui limiterait cependant le nombre de déplacements autorisés.

Par contre, pour le mode manuel assisté, une modification de l'interface peut amener son efficacité temporelle à égaler celle du mode manuel. Elle ne peut la dépasser qu'en cas de stratégie de conduite déficiente de la part du pilote. La justification des primitives locales n'est d'ailleurs pas initialement d'ordre temporelle mais concerne plutôt des paramètres comme le confort ou la sécurité.

La modification de l'interface de type proportionnel dépend des besoins spécifiques de la personne. Deux modifications peuvent être prévues :

- la première est du même ordre que celle apportée à l'interface de type tout ou rien pour le mode manuel assisté où le pilote peut directement commander un repositionnement sans passer en "mode manuel". L'utilisation de la primitive contournement d'obstacles se fait toujours en positionnant l'orientation de la base par rapport à la direction à suivre et en validant le choix "marche avant" pour lancer la primitive de contournement.
- la deuxième permet de contrôler le fauteuil comme dans le mode manuel tout en intégrant une zone d'évitement d'obstacles automatique autour de celui-ci, obligeant la base à rechercher systématiquement un espace libre.

Nous pouvons déduire des remarques ci-dessus que, après la modification de l'interface, le classement de l'efficacité temporelle des modes automatique et manuel assisté sera alors inversé et l'écart temporel entre le mode manuel et le mode manuel assisté se réduira. Ces constatations dépendent bien sûr du handicap de la personne qui aura tendance à faire tendre, selon sa façon de piloter, l'efficacité temporelle du mode automatique vers l'efficacité des deux autres modes.

V.1.2 Zone non modélisée

L'échelle de l'efficacité temporelle est calculée en comparant l'utilisation du mode manuel à celle du mode manuel assisté. Cette comparaison s'effectue en deux phases qui correspondent aux deux primitives utilisables en environnement non modélisé.

La première échelle d'efficacité compare l'utilisation du mode manuel avec la primitive suivi de mur. Elle a été établie à partir des données de fichiers espions extraites des trajets effectués dans

le couloir (17m) : étapes “aller” (6) à (7) et “retour” de (9) à (10) de la figure III.6.

La seconde échelle compare le mode manuel et la primitive contournement d’obstacles. Elle est identique à celle calculée dans la zone d’évolution modélisée décrite auparavant. Le fait d’évoluer dans une zone modélisée ou non ne change pas les conditions du mouvement.

- Interface de type tout ou rien :

Pour estimer cette échelle d’efficacité, nous avons tenu compte des modifications apportées à l’interface de type tout ou rien (voir paragraphe V.1.1). Celle-ci permet d’accéder aux choix des boutons virtuels “suivi de mur” dès que le choix “mode manuel assisté” est validé. Les tableaux regroupant les nouveaux temps de parcours, en fonction des trajets, des pilotes et des temps_{tor}, se trouvent à l’annexe b3. Les moyennes de ces temps, présentées au tableau III.5, sont calculées de la même manière que précédemment.

| Temps _{tor} | Pilotage manuel | Suivi de mur |
|----------------------|-----------------|--------------|
| 0.1 sec | 62.9 | 55.9 |
| 1.5 sec | 90.5 | 72.75 |
| 3 sec | 134.75 | 90 |

Tableau III.5 : efficacité temporelle en zone non modélisée : déplacement dans le couloir (interface de type tout ou rien).

Nous constatons que, du point de vue de l’efficacité temporelle, la primitive suivi de mur est plus performante que le mode manuel. Ceci vient du fait qu’en mode manuel, le pilote doit repositionner le fauteuil pour maintenir son cap dans le couloir.

Quelques soient le temps_{tor} et la dextérité du pilote, la primitive sera toujours plus rapide que le pilotage manuel pour peu que la distance à parcourir soit assez importante (> 3-4m).

- Interface de type proportionnel :

Le choix de la primitive suivi de mur s’effectue en passant du “menu principal” au menu “mode manuel assisté” (voir paragraphe V.1.1). Le tableau III.6 présente les temps de parcours en fonction des différents pilotes :

| Joystick | Trajet "aller" de (6) à (7) | | Trajet "retour" de (9) à (10) | |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| | Pilotage manuel | Suivi de mur | Pilotage manuel | Suivi de mur |
| Pilote 1 | 52 | 51 | 49 | 50 |
| Pilote 2 | 52 | 51 | 51 | 48 |
| Pilote 3 | 50 | 52 | 52 | 49 |
| Pilote 4 | 52 | 50 | 51 | 50 |
| Moyenne | 51.5 | 51 | 50.75 | 49.25 |

Tableau III.6 : temps de parcours en zone non modélisée des déplacements dans le couloir en fonction des modes de fonctionnement et des pilotes (interface de type proportionnel).

Nous ne sommes pas en mesure de donner une échelle d'efficacité temporelle entre ces deux modes avec la série d'essais menée, les différences de temps n'étant pas significatives. Cela vient du fait que la trajectoire parcourue est à peu près la même dans les deux cas (en distance) pour peu que le pilote manie correctement son capteur de commande.

Nous pouvons cependant avancer l'hypothèse suivante : si le pilote adopte une bonne stratégie de déplacement, le pilotage manuel est plus performant temporellement car la personne a un champ de vision plus grand que celui de la machine. En effet, elle peut optimiser plus tôt sa trajectoire, contrairement à la primitive de suivi de mur qui ne réagit qu'en fonction des obstacles proches. L'efficacité temporelle entre ces deux modes de fonctionnement, serait donc fortement dépendante de la dextérité de la personne à piloter son fauteuil.

V.2 CRITERE DES PERFORMANCES DE LA PERSONNE

Ce critère, regroupant deux sous-critères, évalue la performance de la personne dans sa gestion de l'interface homme/machine et de son habileté à établir et à gérer une stratégie de déplacement.

Ces deux sous-critères sont intitulés :

- critère d'incohérence du déplacement,
- critère d'incohérence de validation.

Le calcul de ces critères est exclusivement basé sur une analyse des données de type choix et de type temporel enregistrées en ligne dans le fichier espion. Nous rappelons que ces données comprennent l'historique des choix validés, le temps d'utilisation de chaque choix, le temps d'attente entre la validation des choix et le temps total de l'utilisation du mode de déplacement choisi par le pilote (mode manuel ou mode manuel assisté). Les méthodes de calcul de ces critères sont différentes suivant le type de l'interface utilisé.

V.2.1 Interface de type tout ou rien

Le critère d'incohérence du déplacement :

Ce critère concerne la stratégie adoptée par la personne dans l'enchaînement de ses déplacements. Il regroupe deux estimations, l'une dépend de l'incohérence du type du déplacement ("MAV-MAR") et l'autre de l'incohérence temporelle du déplacement. A partir du fichier espion, nous définissons une valeur instantanée et une valeur globale de ces deux estimations.

L'estimation de *l'incohérence du type du déplacement* est la suivante :

- méthode : nous établissons une liste de couples de déplacements consécutifs incohérents. Nous admettons que si la personne exécute un de ces couples dans un temps minimum, alors la stratégie de déplacement est incohérente. L'estimation instantanée est fonction des deux derniers déplacements. L'estimation globale intègre, quant à elle, l'ensemble des incohérences effectuées.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - A_n : intitulé de l'action de déplacement n venant d'être validée,
 - n : nombre de A_n depuis l'utilisation du mode,

- **Liste** : liste qui contient les intitulés de deux actions consécutives incohérentes : $Liste = \{“MAV MAV”, “MAR MAR”, “RG RG”, “RD RD”, “MAV MAR”, “MAR MAV”, “RG RD”, “RD RG”\}$,
- **Te_n** : temps écoulé entre deux actions consécutives ($n-1, n$),
- **Tinc** : temps entre deux actions consécutives incohérentes :

$$Tinc = nb_choix * temps_déf * coef$$
 avec : **nb_choix** : nombre de choix disponibles dans le mode utilisé,
temps_déf : temps de défilement,
coef : nombre maximum de cycles de défilement (normalement égal à 1) nécessaires à la sélection d'un choix pour une personne donnée.
- **somme** : somme des estimations instantanées.

A chaque nouvelle action A_n faire :

Si $n \geq 2$

estimation instantanée = 0

Si le couple (A_{n-1}, A_n) = un couple de *Liste*

Alors Si $Te_n < Tinc$

Alors *estimation instantanée* = 1

somme = *somme* + *estimation instantanée*

estimation globale = *somme* / ($n-1$)

Exemple de détermination de ces deux estimations sur des données extraites d'un fichier espion : le temps_att = 2.42s (temps_tor de 1.5s) et le nombre d'actions de déplacement dans le mode est de 7.

L'intitulé des 7 actions validées est : “MAV - RD - RD - MAV - RG - MAV - MAV”.

$Tinc = 5 * 2.42 = 12.1 \text{sec.}$

A l'action $n=3$, le couple $(A_{n-1}, A_n) = (RD - RD) \in Liste$, Te_3 étant égal à 10.5 sec est inférieur à $Tinc$, l'estimation instantanée prend la valeur 1 et l'estimation globale = 1/2.

A l'action $n=7$, le couple $(A_{n-1}, A_n) = (MAV - MAV) \in Liste$, Te_7 étant égal à 35.1sec est supérieur à $Tinc$, l'estimation instantanée prend la valeur 0 et l'estimation globale = 1/7.

L'estimation de l'*incohérence temporelle du déplacement* est la suivante :

- méthode : Nous partons de l'hypothèse que si la personne a tendance à piloter son fauteuil par une succession de petits déplacements, alors elle commence à adopter une stratégie de déplacement incohérente. Un cas typique apparaît lorsque le passage est étroit (type passage de porte) et que la gestion du fauteuil avec une commande de type tout ou rien devient difficile. L'estimation se calcule alors sur le temps de validation de l'action.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - A_n : intitulé de l'action de déplacement venant d'être validée,
 - Ta_n : temps pendant lequel une action A_n est validée,
 - n : nombre de A_n depuis l'utilisation du mode,
 - $Tmini$: temps de validation minimum au dessous duquel il y a incohérence temporelle du déplacement. Expérimentalement ce temps a été fixé à 1.5s,
 - **somme** : somme des estimations instantanées.

A chaque nouvelle action A_n faire :

estimation instantanée = 0

Si $Ta_n \leq Tmini$

Alors *critère instantané = 1*

somme = somme + estimation instantanée

estimation globale = somme/n

Prenons, par exemple, l'extrait d'un fichier espion ou un pilote passe du téléphone (4) à la chambre (5), deux portes étant à franchir. La liste ci-dessous décrit les manoeuvres réalisées, associées à leurs temps de validation respectifs (temps_{tor} de 3sec) :

Liste = "MAV(0.88) - MAR(0.82) - RD(8.62) - MAV(6.21) - RD(3.73) - RG(0.82) - MAV(22.69) - RD(9.39) - MAV(8.24)".

A l'action $n=1$: estimation instantanée = 1, estimation globale = 1/1,
 $n=2$: estimation instantanée = 1, estimation globale = 2/2,
 $n=6$: estimation instantanée = 1, estimation globale = 3/6,
 $n=9$: estimation instantanée = 0, estimation globale = 3/9.

Le critère d'incohérence de validation :

Ce critère mesure le nombre d'incohérences probables lors de l'utilisation de l'interface. Du fait par exemple d'un temps d'attente mal adapté, certaines validations de choix peuvent en effet résulter d'une action trop tardive sur le capteur de type tout ou rien. D'autre part le pilote peut anticiper trop rapidement le passage d'un choix à l'autre (mauvaise évaluation du temps d'attente écoulé).

Le principe de l'estimation de l'incohérence de validation est valable quelque soit le type de commande, actions de déplacement, de contrôle de l'environnement ou changement de menu. La figure III.11 présente l'ordre de défilement des choix d'une page écran type.

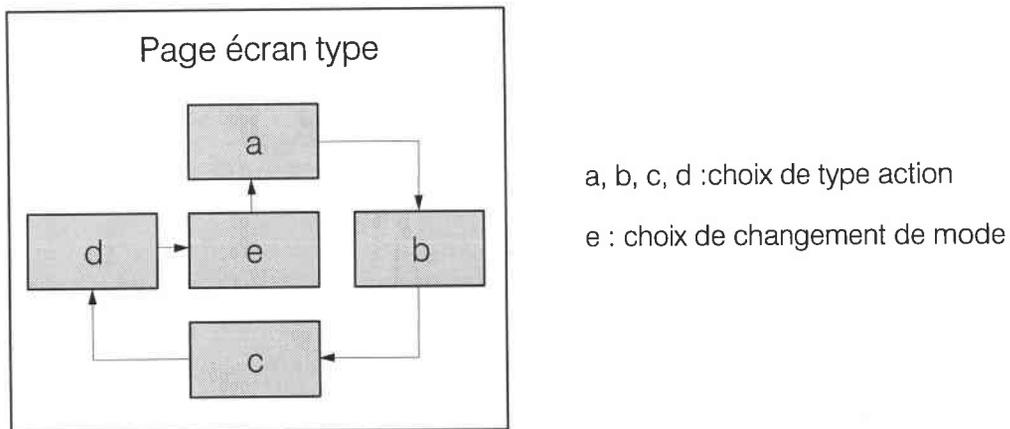


Figure III.11 : cycle de défilement des choix dans les écrans de l'interface de type tout ou rien.

L'estimation de *l'incohérence de validation d'un choix* est la suivante :

- **méthode** : si le temps de validation du choix en cours, par exemple **b**, est inférieur à un temps minimum, nous vérifions que le choix suivant n'est pas le choix **a** précédant ou **c** succédant le choix **b**. L'estimation est alors fonction de cette vérification.

- algorithme : soient les variables suivantes :
 - V_n : intitulé du choix n validé,
 - Tv_n : temps de validation de V_n ,
 - V_{n+1} : intitulé du choix validé après V_n ,
 - $V_{pré}$: intitulé du choix précédant V_n dans le cycle de défilement,
 - V_{suc} : intitulé du choix succédant à V_n dans le cycle de défilement,
 - Tv_{mini} : temps de validation, fixé expérimentalement à une seconde, au dessous duquel il y a incohérence temporelle,
 - n : nombre de V_n depuis l'utilisation de la machine,
 - **somme** : somme des estimations instantanées.

A chaque nouveau V_n faire :

estimation instantanée = 0

Si $Tv_n \leq Tv_{mini}$

Alors Si $V_{n+1} = V_{pré}$ **OU** $V_{n+1} = V_{suc}$

Alors *estimation instantanée = 1*

somme = somme + estimation instantanée

estimation globale = somme/n

Sachant que les choix défilent dans l'ordre suivant : "...MAV - RD - MAR -RG...", un exemple d'incohérence de validation d'un choix est : "RD(0.80) - MAV(19.27)".

En outre, lorsque le pilote valide un choix de changement de mode, ceci engendre l'obligation de valider un ou plusieurs autres choix de changement de mode, pour retourner au mode de départ si besoin est. L'estimation de l'incohérence de validation des modes se détecte lorsque la personne passe dans un mode et que seule la validation qui permet de revenir au mode précédant est choisie. Cela signifie en général que le modèle mental de l'interface n'est pas encore assimilé d'où des problèmes de recherche de l'information (choix adéquat), ou bien que l'intitulé de ces boutons virtuels prête à confusion.

L'estimation de l'*incohérence de validation des modes* est la suivante :

- méthode : vérifier que le choix validé permet de changer de mode, que le choix validé suivant du mode alors sélectionné est celui qui fait revenir au mode de départ, et que nous ne sommes pas dans le cas de l'estimation de l'incohérence de validation définie ci-dessus. L'estimation sera fonction de cette vérification et du temps écoulé pour faire "l'aller-retour".
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - C_v : intitulé du choix de changement de mode validé,
 - $C_{pré}$: intitulé du choix précédant C_v dans le cycle de défilement,
 - C_{suc} : intitulé du choix succédant à C_v dans le cycle de défilement,
 - C_{v+1} : intitulé du choix suivant validé dans le mode choisi par C_v ,
 - C_{vv} : intitulé du choix à valider dans le mode de C_{v+1} permettant d'aller dans le mode de C_v ,
 - C_{vd} : intitulé du choix validé dans le mode C_v après que C_{v+1} ait été validé,
 - T_{cv+1} : temps écoulé depuis l'arrivée dans le mode C_{v+1} , jusqu'à sa validation,
 - **Temps_cycle** : temps de cycle du mode de C_{v+1} ,

$$\text{Temps_cycle} = (\text{nb choix dans le mode de } C_{v+1}) * \text{temps_foc},$$
 - **somme** : somme des estimations instantanées,
 - **n** : le nombre total de choix C_v depuis le début de l'utilisation du système,

A chaque validation de C_v faire :

estimation instantanée = 0

Si $C_{v+1} = C_{vv}$

Si $T_{cv+1} \leq \text{Temps_cycle}$

Si $C_{vd} \neq C_{pré}$ **ET** $C_{vd} \neq C_{suc}$

Alors *estimation instantanée* = 1

somme = *somme* + *estimation instantanée*

estimation globale = *somme*/n

V.2.2 Interface de type proportionnel

Le critère d'incohérence du déplacement :

Ce critère regroupe également deux estimations, la première dépendant de l'incohérence du type du déplacement et la seconde de l'incohérence temporelle du déplacement. Par contre le paramètre temps de défilement n'apparaît plus ici.

De même au cours de l'utilisation du mode manuel et du mode manuel assisté nous ne pouvons plus parler de choix à valider pour se déplacer puisque la personne pilote proportionnellement son fauteuil. Nous avons donc quadrillé la zone d'évolution du joystick virtuel afin d'enregistrer dans le fichier espion l'intitulé de l'enchaînement des mouvements ainsi que leurs temps de validation (fig. III.12).

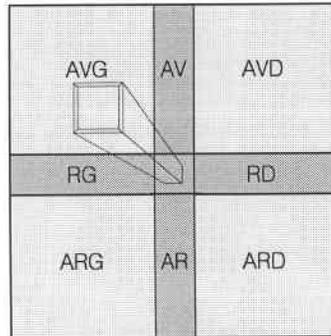


Figure III.12 : quadrillage en zones d'évolutions.

L'estimation des deux *incohérences du déplacement* est la suivante :

- méthode : nous établissons une liste des couples d'actions de déplacement consécutifs incohérents. Nous seuillons ensuite le temps de validation des zones pour ne pas prendre en compte les passages rapides, par exemple le passage dans la zone **RD** pour aller de **AVD** à **ARD**. L'estimation de l'incohérence temporelle du déplacement sera uniquement fonction du temps de validation de la zone, alors que celle de l'incohérence du type du déplacement intègre en plus le résultat de la mise en correspondance d'un couple d'actions avec ceux de la liste.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - **Liste** : la liste de couples d'actions consécutives incohérentes : $Liste = \{AV-AR, AR-AV, RG-RD, RD-RG, AVG-AVD, AVD-AVG, ARD-ARG, ARG-ARD,$

AVG-ARG, ARG-AVG, AVD-ARD, ARD-AVD, AVG-ARG, ARD-AVG, ARG-AVD, AVD-ARG},

- n : nombre d'actions validées depuis l'utilisation du mode de déplacement,
- V_n : intitulé de l'action de déplacement venant d'être validée,
- V_{n-1} : intitulé de l'action validée après V_n ,
- T_{vn} : temps pendant lequel V_n est validé,
- T_{vn-1} : temps pendant lequel V_{n-1} a été validé,
- T_v : temps minimum au dessous duquel a lieu une incohérence temporelle du déplacement,
- TE_Est_i : estimation instantanée d'incohérence temporelle du déplacement,
- TE_Est_g : estimation globale d'incohérence temporelle du déplacement,
- TY_Est_i : estimation instantanée d'incohérence du type du déplacement,
- TY_Est_g : estimation globale d'incohérence du type du déplacement,
- $Stype$: somme des TY_Est_i ,
- $Stemp$: somme des TE_Est_i .

A chaque nouvelle action V_n faire :

$TE_Est_i = 0$

$TY_Est_i = 0$

Si $T_{vn} \leq T_v$

Alors $TE_Est_i = 1$

Si $n \geq 2$

Si $T_{vn-1} \leq T_v$

Alors Si le couple d'intitulé (V_{n-1}, V_n) = un couple de la Liste

Alors $TY_Est_i = 1$

$Stemps = Stemps + TE_Est_i$

$Stype = Stype + TY_Est_i$

$TE_Est_g = Stemps/n$

$TYEst_g = Stype/n-1$

Le critère d'incohérence de validation :

La signification de ce critère n'est pas la même que celle définie avec l'interface de type tout ou rien. En effet, le pilote n'est pas limité pour valider son choix. Par contre, à partir du moment où il ne valide qu'un court instant un choix, nous pouvons estimer qu'il a fait une erreur de manipulation. Celle-ci peut être causée soit par un oubli du résultat de la validation du bouton, soit par une erreur de stratégie qu'il corrige au plus vite (validation du suivi du mur gauche alors qu'il voulait suivre le mur droit).

- méthode : comparer le temps de validation du choix avec un temps qui définit une incohérence temporelle de validation de ce dernier.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - V_n : intitulé du choix venant d'être validé,
 - T_{vn} : temps de validation de V_n ,
 - T_{vb} : temps au dessous duquel il est décidé que la validation d'un bouton virtuel est temporellement incohérente,
 - n : nombre de choix V_n depuis le début de l'utilisation du système,
 - **somme** : somme des critères instantanés

A chaque nouveau choix V_n faire :
critère instantané de validation = 0
Si $T_{vn} \leq T_{vb}$
 Alors critère instantané de validation = 1
somme = somme + critère instantané de validation
critère global de validation = somme/n

La méthode d'estimation de l'incohérence de validation des modes est identique à celle décrite pour une interface de type tout ou rien. Les changements se situent au niveau du temps_cycle et du test tenant compte du cycle du défilement des choix, qui n'existent pas avec l'interface de type proportionnel. La valeur de ce temps est donc définie en fonction de la rapidité de la personne à manipuler son capteur de commande (une estimation expérimentale nous donne 1.8 seconde).

V.3 CRITERE DE CONFIANCE

L'utilisation du fauteuil robotisé peut engendrer un stress dû à l'impression de ne pas être maître de la machine, impression d'autant plus renforcée que le pilote est lourdement handicapé donc très dépendant. Ce stress apparaît essentiellement lors de mouvements autonomes lorsque la base mobile s'approche des obstacles. Une première idée serait donc de le modéliser par une méthode similaire à l'estimation temporelle de la charge de travail développée par MILLOT (voir le paragraphe IV.4.1 du chapitre II) et appliquée dans [RIER 93] à la conduite automobile : l'exigence instantanée de la tâche de guidage est donnée par : $V_s(t) / D_s(t)$ où $V_s(t)$ est la vitesse du véhicule et $D_s(t)$ la distance à parcourir avant collision ou sortie de route. L'analogie entre le pilotage d'une voiture et de la base mobile V.A.H.M. n'est cependant justifiée qu'en mode manuel. Dans ce cas, du fait de la faible vitesse du fauteuil, l'effet de la commande d'arrêt est pratiquement instantané. Nous pouvons donc supposer a priori qu'en mode manuel, le stress dû au sentiment d'insécurité est négligeable. Par contre, lors d'un mouvement autonome, l'inquiétude qu'engendre la proximité d'un obstacle est fortement dépendante de la confiance qu'accorde le pilote à la machine pour éviter une collision. C'est donc ce critère de confiance que nous allons tenter d'estimer lors des mouvements en mode automatique ou manuel assisté où seule la commande "arrêt" est accessible en cours d'exécution. Celle-ci peut en particulier être actionnée par un réflexe d'appréhension lorsque la machine contourne de trop près un obstacle (passage étroit). Nous supposons alors que le degré de confiance est dépendant :

- de la distance à laquelle le pilote laisse en général la machine s'approcher des obstacles,
- du nombre de fois où le fauteuil s'est approché d'une distance de proximité critique. Ce nombre permet de renforcer l'estimation du critère en tenant compte du comportement du pilote à ne pas demander d'arrêts intempestifs du fauteuil à l'approche des obstacles.

L'estimation du *critère de confiance* au cours d'un mouvement autonome s'effectue de la façon suivante :

- méthode : à partir des données espion de type numérique, nous calculons en ligne la valeur de la distance minimale des obstacles par rapport au fauteuil sur l'échelle définie par les valeurs maximale et minimale de la zone de détection du module de perception (fig. III.13). Nous la pondérons par le nombre de fois où le fauteuil s'est approché de la distance de proximité critique. L'estimation du critère de confiance est fonction de la valeur maximale calculée au cours du mouvement.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - $D_{us_{mini}}$: distance minimale obstacle-fauteuil détectée,
 - D_{max} : distance maximale de détection d'un obstacle pour activer le module d'évitement automatique, associée au capteur définissant $D_{us_{mini}}$,
 - D_{mini} : distance minimale de détection d'un obstacle avant l'arrêt automatique du fauteuil (fonction de la technologie du capteur de détection employé),
 - nb_z : nombre de fois où le fauteuil est rentré dans la zone critique. Cette zone est définie par la distance de proximité critique D_{crit} (zone= $[D_{mini}, D_{crit} + \Delta]$). D_{crit} a été établie expérimentalement : $D_{crit} = 30$ cm,
 - **valeur crit** : valeur de la position de $D_{us_{mini}}$ sur l'échelle $[D_{max}, D_{mini}]$, pondérée par nb_z ,

$$nb_z = 0$$

$$valeur\ crit = 0$$

Au cours d'un mouvement autonome faire :

$$\text{Si } D_{us_{mini}} > D_{max}$$

Alors valeur crit indéterminée

$$\text{Si } D_{us_{mini}} \leq D_{max}$$

$$\text{Alors } valeur\ crit = 1 - \frac{1}{nb_z + 1} \cdot \left(\frac{D_{us_{mini}} - D_{mini}}{D_{max} - D_{mini}} \right)$$

$$critère\ de\ confiance = \max(valeur\ crit)$$

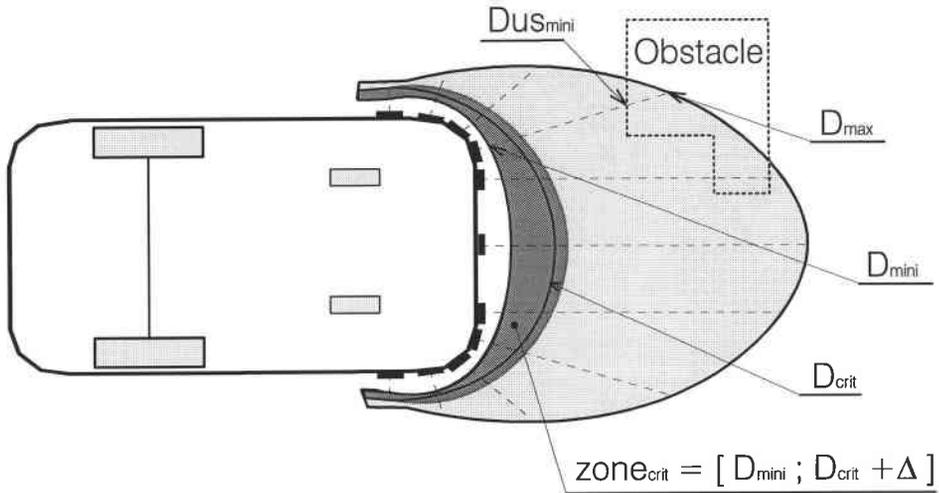


Figure III.13 : zone de détection des obstacles déclenchant un évitement automatique.

Cette méthode de calcul fournit un critère compris entre 0 et 100% (fig. III.14). Nous partons du postulat que, si la personne arrête le fauteuil dès qu'un obstacle est dans la zone de détection, nous pouvons supposer qu'elle n'a pas confiance, le critère tend alors vers 0%. Par contre, si le pilote a laissé le fauteuil pénétrer dans sa zone critique de proximité un certain nombre de fois, nous estimons qu'il a plutôt confiance, le critère tend alors vers 100%, ceci est renforcé quand l'arrêt se fait à proximité de l'obstacle ($D_{us_{\min}}$ petite). Notons enfin que le critère de confiance ainsi défini devra être manié avec précaution. Sa fiabilité dépend en effet fortement de l'environnement d'évolution du robot : en zone très faiblement contrainte il sera probablement proche de 0% sans que nous puissions déduire quoi que ce soit. Si nous devons l'agréger dans une fonction multicritère par exemple, il devra donc être pondéré par un coefficient fonction de l'environnement.

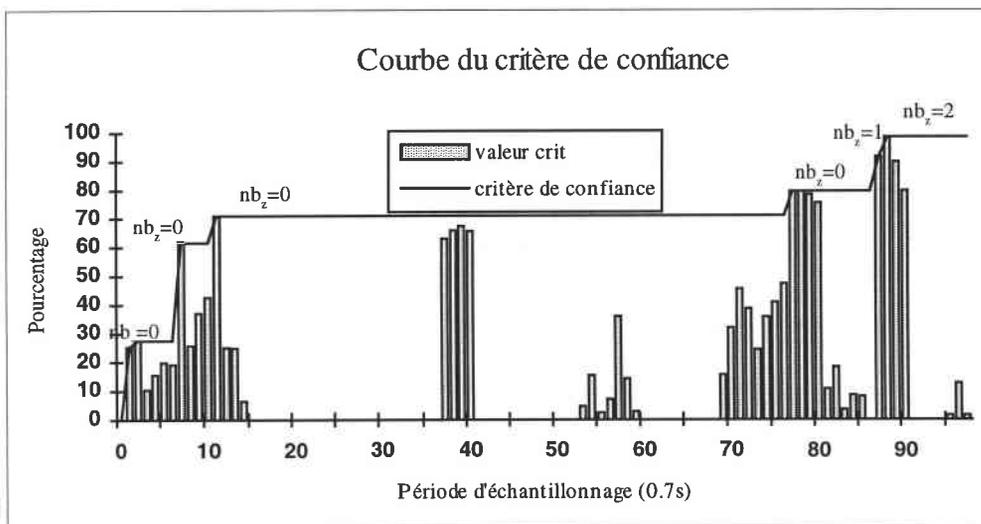
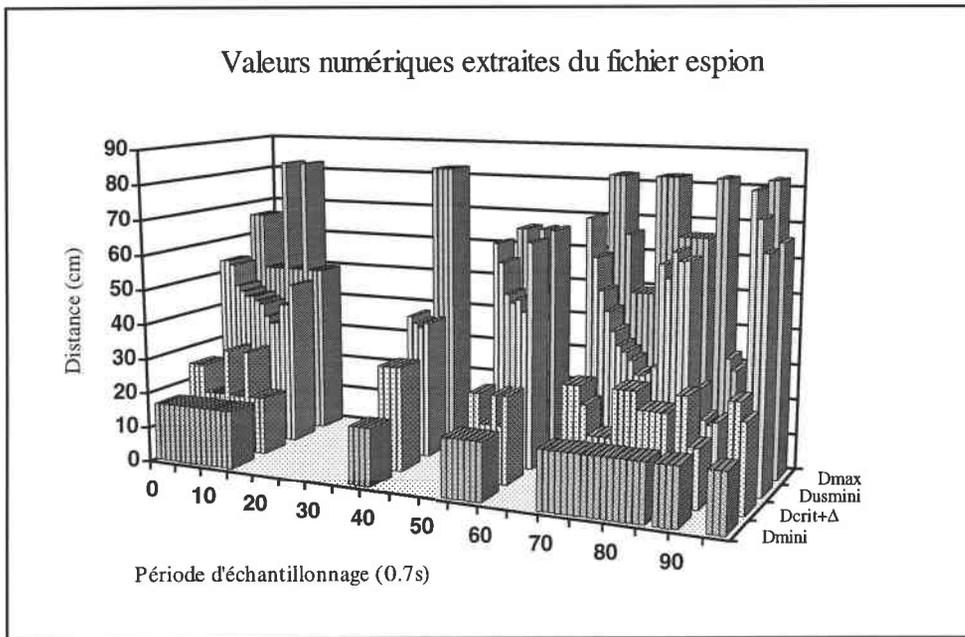


Figure III.14 : exemple d'estimation du critère de confiance à partir d'un fichier espion.

V.4 CRITERE DU CONFORT DE NAVIGATION

Ce critère donne une estimation en ligne du confort de navigation lorsque le pilote utilise le mode automatique ou le mode manuel assisté. A partir des données numériques enregistrées dans le fichier espion, le critère du confort de navigation tient compte :

- des variations de vitesse linéaire du fauteuil occasionnées par la présence proche d'un obstacle. En effet, les successions de décélérations et d'accélé-rations nuisent au confort de navigation de la personne embarquée en la projetant d'avant en arrière et, à plus forte raison, quand elle n'est pas en mesure de contrôler musculairement ces variations.

- des variations de vitesse angulaire qui permettent de diriger le fauteuil dans la direction voulue par la machine. Cette variation angulaire est fonction de la proximité des obstacles proches (répulsion) et du mode de fonctionnement utilisé par le pilote (suivi de trajectoire, de mur ou d'une direction).

L'estimation en ligne du *critère du confort de navigation* au cours du mouvement est la suivante :

- méthode : nous calculons les variations de la différence de vitesse angulaire appliquée aux roues du fauteuil, en intégrant les changements de signe (rotation droite gauche de la base) ainsi que leurs différentes grandeurs. Nous différencions les variations de la vitesse linéaire afin de faire apparaître les décélérations par rapport aux accélérations moins désagréables pour le pilote qui est retenu par le dossier du fauteuil. L'estimation instantanée du critère est une somme pondérée des variations angulaires et linéaires, le critère global étant la moyenne cumulative de ces estimations.
- algorithme : soient les variables suivantes :
 - dw_n : variation angulaire appliquée aux roues du fauteuil,
 - Cdw_n : valeur intégrant les variations en signe et en grandeurs de dw_n ,
 - Cvl_n : valeur affectée au type de la variation de la vitesse linéaire. Elle est fonction de l'accélération ou de la décélération. Nous privilégions dans cette étude les décélérations (Cvl_n décélération est égale à 2 fois Cvl_n accélération),
 - K_v : coefficient de pondération appliqué à Cvl_n ,
 - K_{dw} : coefficient de pondération appliqué à Cdw_n ,
 - $C_{inst_{confort}}$: critère instantané du confort de navigation,
 - **somme** : somme des $C_{inst_{confort}}$,
 - **n** : nombre total de dw envoyée aux roues depuis le début du mouvement.

A chaque dw_n faire :

$$Cdw_n = (dw_{n-1} - dw_{n-2}) - (dw_n - dw_{n-1})$$

$$C_{inst}_{confort} = K_v * Cvl_n + K_{dw} * Cdw_n$$

$$somme = somme + C_{inst}_{confort}$$

$$Critère\ global\ du\ confort\ de\ navigation = somme/n$$

La figure III.15 donne un exemple de la courbe du critère de confort calculée à partir des données d'un fichier espion numérique au cours d'une utilisation de la primitive de contournement d'obstacle. La valeur des coefficients K_v et K_w a été fixée empiriquement à partir des essais.

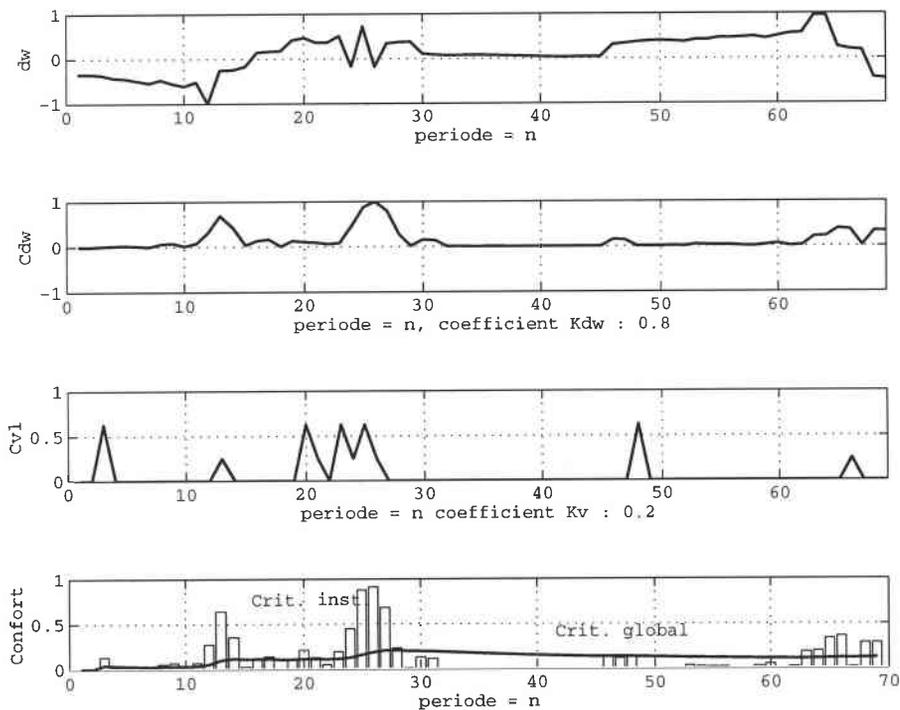


Figure III.15 : courbes montrant l'estimation du critère de confort.

VI CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la première évaluation de notre application, réalisée dans un appartement reconstitué au sein du laboratoire. Cette expérimentation nous a permis, outre l'amélioration et la mise au point des différents modules implantés sur le fauteuil, de définir une méthodologie de calcul de critères servant à évaluer le système homme/machine.

Nous avons tout d'abord défini un protocole expérimental de manière à pouvoir étudier l'utilisation du fauteuil robotisé en fonction du type de capteur de commande utilisé (capteur de type tout ou rien et proportionnel), du mode de fonctionnement du fauteuil (mode manuel, manuel assisté et mode automatique) et du lieu d'évolution du système homme/machine (zone modélisée ou non). Les expérimentateurs étant des personnes valides, nous avons dû développer une méthode d'émulation du handicap de type tout ou rien pour que les essais se rapprochent le plus possible de la réalité.

Nous avons ensuite utilisé les données espions, enregistrées au cours des essais, pour établir les méthodes de calcul des différents critères d'évaluation du système homme/machine. Ces critères évaluent les composantes de la charge de travail de la personne pilotant le fauteuil ainsi que les capacités techniques du robot :

- efficacité temporelle (classification de l'efficacité des modes entre eux)
- performance du pilote : (sa capacité à utiliser le système robotisé)
 - critère de l'incohérence du déplacement :
 - estimation de l'incohérence du type du déplacement
 - estimation de l'incohérence temporelle du déplacement
 - critère de l'incohérence de validation :
 - estimation de l'incohérence de validation du choix
 - estimation de l'incohérence de validation du mode
- critère de confiance (dans la capacité de la machine à contourner les obstacles)
- critère du confort de navigation

Dans l'évaluation clinique du robot V.A.H.M. présentée au chapitre suivant ces critères vont être utilisés en tant que mesures objectives des performances du système homme/machine.

CHAPITRE 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX

I INTRODUCTION

II RESULTATS EN CENTRE DE READAPTATION

III DISCUSSION

**IV CHOIX OPTIMAL DES MODES DE FONCTION-
NEMENT**

V CONCLUSION

I INTRODUCTION

Le chapitre précédent nous a permis d'établir des critères d'évaluation du système V.A.H.M.. Le fait de travailler sur des personnes valides en laboratoire assurait des conditions de répétabilité aux diverses manipulations. Par contre les problèmes inhérents aux conditions réelles d'utilisation ainsi qu'au handicap du pilote ne pouvaient apparaître clairement. Pour y pallier une série d'essais en situation réelle concernant trois personnes handicapées dans un centre de réadaptation a été effectuée.

La première partie de ce chapitre présente le scénario réalisé par les expérimentateurs. Nous détaillons ensuite les résultats qualitatifs et quantitatifs de chaque essai.

Les observations menées pendant la mise au point et le déroulement effectif des essais ont fait apparaître un certain nombre de besoins. Ces améliorations à apporter au système robotisé sont présentées dans la deuxième partie du chapitre en différenciant l'aspect technique de l'aspect conceptuel.

En fonction de la situation et des capacités physiques de l'utilisateur certains modes de fonctionnement de la base mobile sont apparus plus appropriés que d'autres. Le choix de ces modes est actuellement entièrement dévolu au pilote du fauteuil. Dans la troisième et dernière partie nous tentons alors de définir une approche permettant l'implantation d'une aide à la décision connaissant l'état du système homme/machine et de son environnement.

II RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais ont été réalisés au centre de réadaptation fonctionnelle de Lay-Saint-Christophe (54). En relation avec le personnel médical, nous avons mis au point des scénarios s'intégrant au mieux dans la vie du centre qui tiennent compte des besoins de déplacement en fauteuil des personnes handicapées. Trois personnes handicapées, deux utilisant un capteur de type proportionnel et une un capteur de type tout ou rien, ont participé à la première évaluation clinique du fauteuil robotisé [PINO 95].

Une prise de contact avec les pilotes a été établie pour leur expliquer ce que nous attendions d'eux, en insistant sur le fait que nous évaluons le système face à leur handicap et non le contraire.

Le déroulement des essais s'est établi de la façon suivante :

- prise de contact avec le centre et les personnes qui vont piloter le fauteuil.
Personnalisation et mise au point du déroulement des essais (définition des scénarios),
- adaptation du système pour le premier pilote ; apprentissage et essai du fauteuil durant une après-midi,
- même manipulation pour le deuxième pilote,
- même manipulation pour le troisième pilote.

II.1 PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Dans cette partie, nous décrivons les différentes modifications apportées au système homme/machine et le déroulement des essais effectués par les trois pilotes.

II.1.2 Personnalisation du V.A.H.M.

Nous avons tout d'abord personnalisé le fauteuil et l'interface homme/machine aux trois expérimentateurs. Ces personnalisations sont :

- des adaptations physiques :
 - des capteurs de commande : joysticks et capteur tout ou rien,
 - du fauteuil pour que la personne retrouve son confort habituel (implantation d'un siège plus adapté).
- des adaptations logicielles de l'interface homme/machine pour :
 - la désignation par radar du point d'arrivée en mode automatique. Le fonctionnement de celle-ci étant trop complexe à assimiler dans un court laps de temps, seul le premier pilote ayant une formation technique a pu l'utiliser. Pour les deux autres pilotes, en mode automatique, il s'agit de choisir une des positions d'arrivées prédéterminées inscrites sur les boutons virtuels.
 - la méthode de validation des choix proposés avec l'interface de type tout

ou rien. En effet, le handicap du troisième pilote ne lui permet pas de maintenir actif son capteur de commande pendant l'exécution d'un mouvement. L'interface a donc été adaptée : deux actions sur le capteur de commande sont nécessaires, l'une pour le démarrage du mouvement et l'autre pour son arrêt.

II.1.3 Déroulement des essais

Les essais ont été établis pour que les pilotes puissent comparer l'apport d'une aide à la navigation par rapport à l'utilisation classique de leur fauteuil roulant électrique. Ainsi avons-nous intégré des déplacements habituels réalisés dans le centre : dans leur chambre, de leur chambre à une salle de soins (kinésithérapie, gymnastique, ...) et dans les couloirs du centre. Les essais comportent deux phases : une phase d'évolution en zone modélisée (le studio et une partie du couloir) et une autre en zone non-modélisée (fig. IV.1).

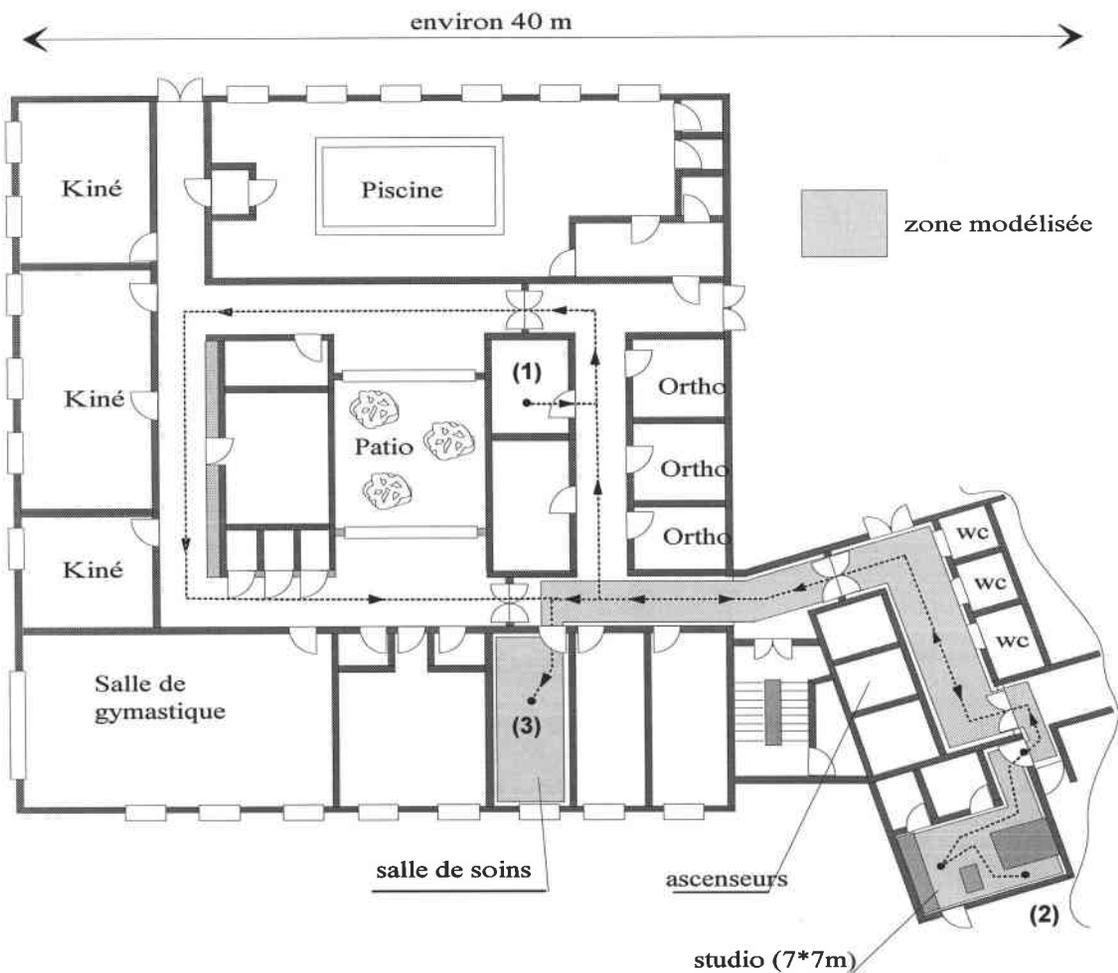


Figure IV.1 : plan du centre de réadaptation de Lay-Saint-Christophe (2^{ème} étage).

Les pilotes ont essayé le fauteuil automatisé en suivant les étapes ci-dessous :

- *Apprentissage* : les moteurs de la base mobile étant débrayés, chaque essai a débuté par une période d'apprentissage pour se familiariser avec le système et plus particulièrement avec l'interface graphique (simulation de l'utilisation de tous les modes de fonctionnement implantés). L'apprentissage statique se réalise à la pièce (1) et dure le temps que la personne handicapée se sente en confiance. Elle utilise ensuite le fauteuil, moteurs enclenchés, dans le couloir de la piscine en se servant du mode manuel classique et du mode manuel assisté. Le fonctionnement du système étant assimilé, il lui est demandé d'aller au studio (2) en faisant le tour du patio et en utilisant le plus possible le mode manuel assisté.
- *scénario* : en n'utilisant que le mode automatique, le fauteuil étant positionné près du lit (a), la personne doit aller à la cuisine (b) et de celle-ci à la porte d'entrée (c) du studio (fig. IV.2).

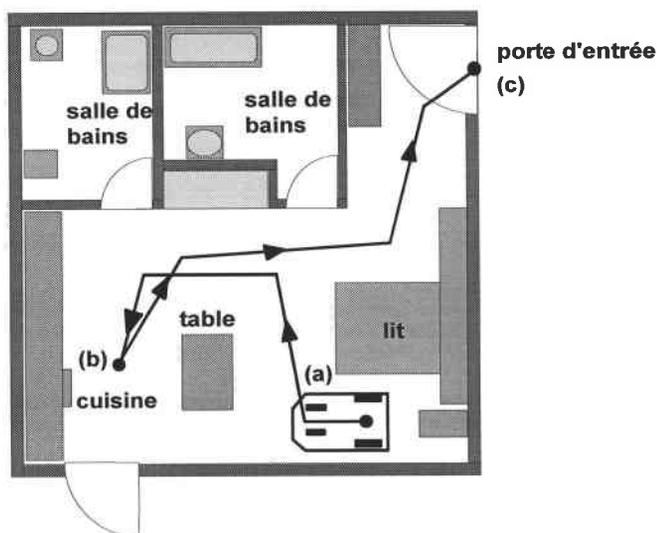


Figure IV.2 : déplacements automatisés réalisés dans le studio (2) durant les essais.

Une fois arrivée à la porte (c), elle utilise le mode automatique pour aller à la salle de soin (3). Il lui est ensuite demandé de retourner à la cuisine (b) du studio (2) avec le mode de fonctionnement de son choix. Le scénario se termine en utilisant la primitive contournement d'obstacles pour sortir du studio (2) et en retournant à la pièce (1) en mode de fonctionnement libre.

- *questionnaire* : une série de questions sur le déroulement de l'essai sont posées au pilote qui va ainsi nous donner son avis subjectif sur le fonctionnement et l'utilité du fauteuil. Les questions sont du type : "Pour chacun des modes de fonctionnement employés, donnez leur utilité en centre et la maison.", "L'écran gêne-t-il la vue ?", "l'enchaînement des écrans graphiques vous convient-il ?", ...

A des fins d'analyse ultérieure, deux observateurs ont noté par écrit le déroulement des essais (comportement du pilote, dialogues en cours de mouvement, ...). Nous avons exclu l'utilisation de systèmes vidéo afin de ne pas modifier le comportement opératoire des pilotes durant les essais. Par ailleurs des données sont enregistrées en permanence par des fichiers espions comme il a été décrit au chapitre précédent.

II.2 OBSERVATIONS SUR LE DEROULEMENT DES ESSAIS

Cette partie décrit pour chaque pilote les observations résultant des différentes notes prises au cours des essais et des réponses aux questionnaires. Ces observations vont nous permettre de valider les choix qui ont précédés à la conception du fauteuil robotisé et d'orienter les travaux futurs. Nous étayerons ces observations par des exemples de critères d'évaluation calculés hors-ligne à partir des fichiers espions.

II.2.1 Essais : premier pilote

Le premier pilote est un homme qui contrôle son fauteuil roulant électrique avec un joystick standard ; son handicap lui permet de commander sans peine les appareils d'aide technique. L'apprentissage (gestion de l'interface) et l'utilisation du fauteuil automatisé ne lui a pas posé de problème, si ce n'est ceux inhérents à l'apprentissage d'un nouveau type de fauteuil.

D'après les observations relevées au cours de l'utilisation du fauteuil, le comportement du pilote montre qu'il avait confiance quand le système contrôlait les mouvements du fauteuil (mode automatique et mode manuel assisté). En effet, à aucun moment il ne les a arrêtés alors que dans certains cas les obstacles étaient proches. Nous pouvons le constater en examinant une courbe du "critère de confiance dans la capacité de la machine à éviter les obstacles" (figure IV.3). A ce moment de l'essai, le pilote utilisait la primitive contournement d'obstacles dans un couloir en-

combré.

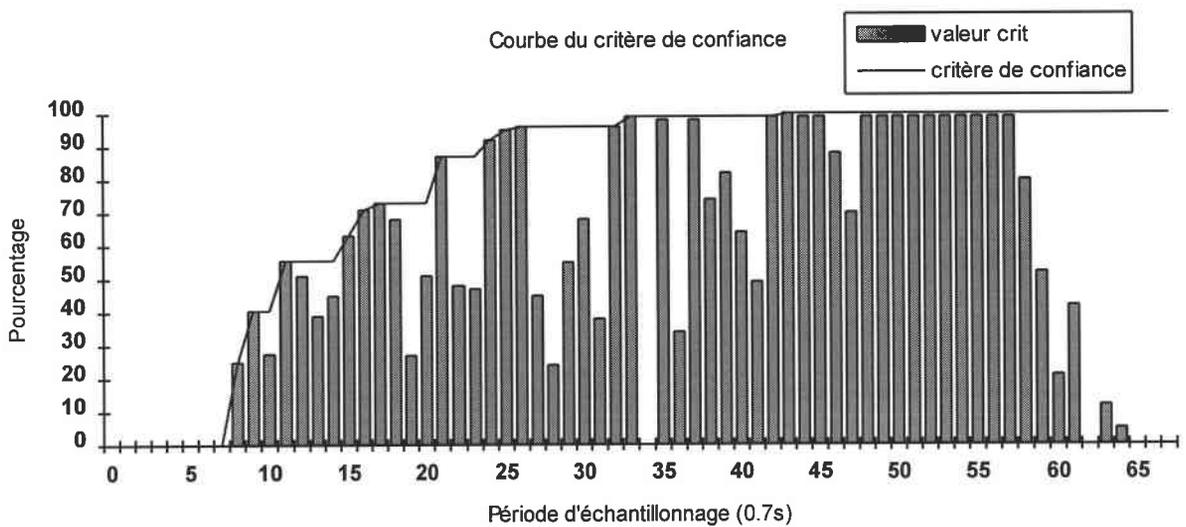


Figure IV.3 : exemple d'une courbe du critère de confiance du premier pilote.

D'une façon générale, cette personne pilote facilement son fauteuil électrique. Elle adopte dans la plupart des cas une bonne stratégie de déplacement tant temporelle (pas de succession de petits mouvements) que dans la façon de se déplacer (enchaînement logique de déplacements). Par contre, au cours de la phase d'apprentissage, l'estimateur de validation du choix des modes a relevé deux incohérences. Ceci provient sans doute du fait que la personne n'avait pas encore enregistré un modèle mental fiable de l'interface. Cela s'est confirmé par la suite, les différentes estimations du critère de performance (incohérence du déplacement et de validation) n'ayant plus relevé d'incohérence.

En réponse aux questions, le confort de navigation a été jugé convenable par le pilote. Par contre, il aurait aimé que le fauteuil se déplace plus rapidement quitte à dégrader ce critère. Cette réponse nous permet d'avoir une idée de la base de référence dans l'échelle de l'évaluation du critère de confort pour une personne avec ce type de handicap (fig. IV.4).

L'utilisation du mode automatique (planification de trajectoire) ne présente aucun intérêt pour cet utilisateur : il maîtrise bien son capteur de commande et son handicap ne le fatigue pas assez pour nécessiter l'appel à ce mode. Par contre, l'utilisation des primitives du mode manuel assisté peut lui apporter un certain confort de conduite, sa préférence allant au mode "contournement d'obstacles". Il n'est toutefois pas certain de vouloir les utiliser du fait de leurs vitesses de déplacement trop réduites par rapport à ses capacités de pilotage.

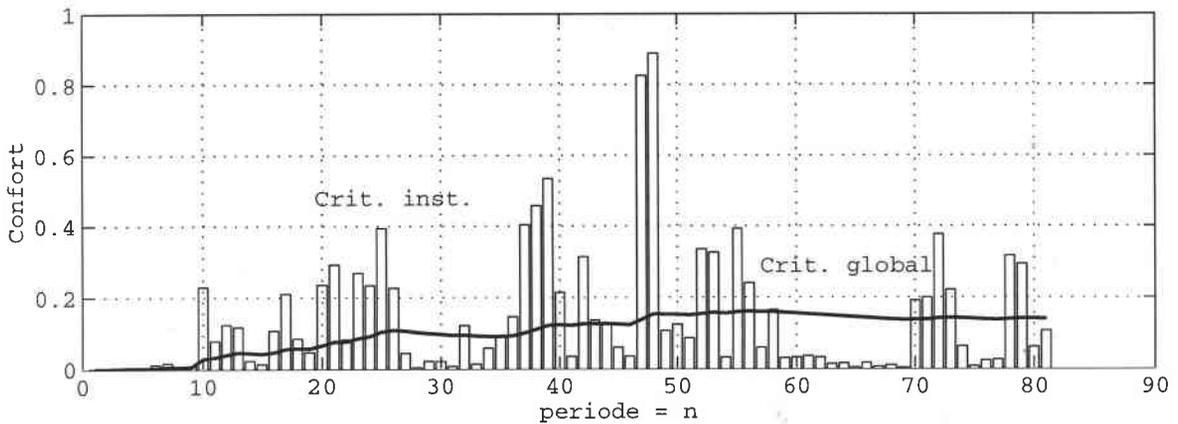


Figure IV.4 : exemple d'évaluation du critère de confort au cours d'un mouvement automatique de la cuisine (b) à la porte d'entrée (c).

En résumé, nous pouvons estimer que ce type de personne n'utilisera l'aide à la navigation que si elle lui permet d'aller plus vite qu'un pilotage manuel classique. Seule une primitive "passage de porte", non implantée pour l'instant, semble utilisable en lui apportant un certain confort de conduite pour les manoeuvres délicates.

II.2.2 Essais : deuxième pilote

La deuxième personne handicapée à avoir utilisé le fauteuil robotisé est un tétraplégique. Il contrôle proportionnellement son fauteuil avec un capteur de commande adapté (gestion du joystick avec le dos de la main). La compréhension de l'utilisation de la machine n'a pas soulevé de problèmes, hormis quelques confusions initiales pour la primitive contournement d'obstacles concernant le besoin de positionner en orientation le fauteuil avant de lancer l'exécution de la primitive. Ces confusions se sont estompées après la phase d'apprentissage.

Les différentes observations montrent que contrairement au pilote précédent, il ne laissait pas au système le temps d'engager la procédure d'évitement d'obstacles. Le pilote avait tendance à demander l'arrêt du mouvement en cours dès qu'il lui semblait que le fauteuil s'approchait trop près des obstacles. Ceci se constate en examinant par exemple une des courbes mesurant le critère de confiance (fig. IV.5). A ce moment, le pilote utilisait la primitive suivi de mur. Lorsque la base mobile a entamé le contournement d'un fauteuil roulant électrique en se rapprochant du mur, il a stoppé la manoeuvre en cours.

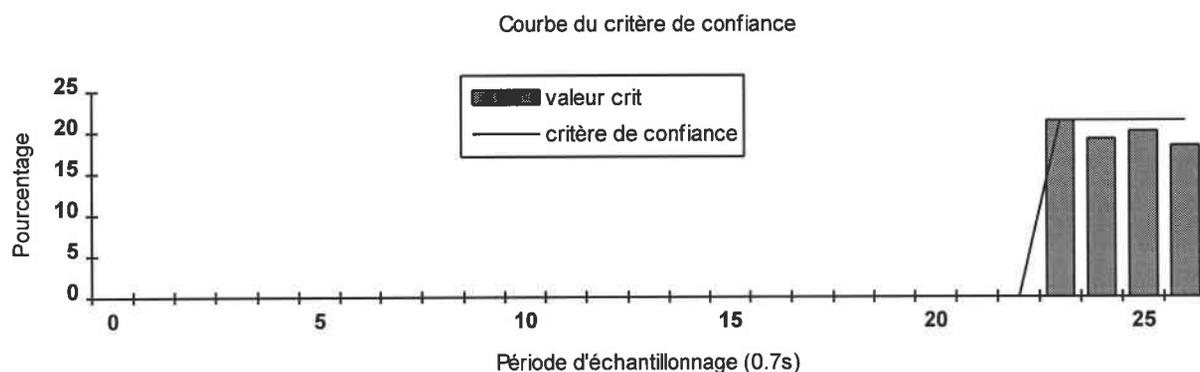


Figure IV.5 : exemple de mesure du critère de confiance du deuxième pilote.

Cette personne contrôle habituellement son fauteuil sans trop de problèmes, les manoeuvres délicates comme les passages étroits (chicanes, portes, ...) lui sont laborieuses sans lui être impossibles. Son handicap l'empêche de contrôler précisément et de façon soutenue son joystick. Sa stratégie de déplacement en mode manuel n'est pas incohérente. Seules deux incohérences ont été relevées dans le choix des modes pendant la phase d'apprentissage.

Pour ce pilote, le confort de navigation était acceptable hormis les arrêts un peu brusques du fauteuil, cette personne étant très sensible aux chocs. Il a apprécié la présence d'un mode automatique qui lui permet de minimiser la difficulté de gestion de son capteur de commande et de pouvoir atteindre la destination de son choix sans se préoccuper de la stratégie de déplacement du fauteuil. Ces remarques sont aussi valables pour l'utilisation des primitives du mode manuel assisté. Par ailleurs, le fait que la base mobile soit capable d'éviter les obstacles automatiquement a été souligné de manière positive, bien qu'il ait plutôt eu tendance à stopper les procédures d'évitements lorsque les obstacles étaient trop proches.

En conclusion, l'introduction d'une aide à la navigation d'un fauteuil roulant électrique est apparue justifiée pour cette personne. La gestion de l'interface n'est pas pour lui un frein si cela peut l'aider à diminuer la fatigue engendrée par le contrôle de son joystick. Contrairement au pilote précédent, pour lui, la rapidité de déplacement n'est pas primordiale alors que les aspects de sécurité et de simplicité de conduite sont essentiels.

II.2.3 Essais : troisième pilote

La troisième personne concernée par ces essais ne dispose que de possibilités motrices très réduites : seul un mouvement latéral de la tête lui permet de contrôler un interrupteur tout ou rien pour commander un désigneuse (fig. IV.6). Nous avons donc personnalisé l'interface de type tout ou rien pour qu'elle puisse la contrôler de la même façon. Il faut noter que cette personne se fatigue très vite et que ne pouvant piloter un fauteuil roulant électrique classique, elle est entièrement dépendante pour ses déplacements.

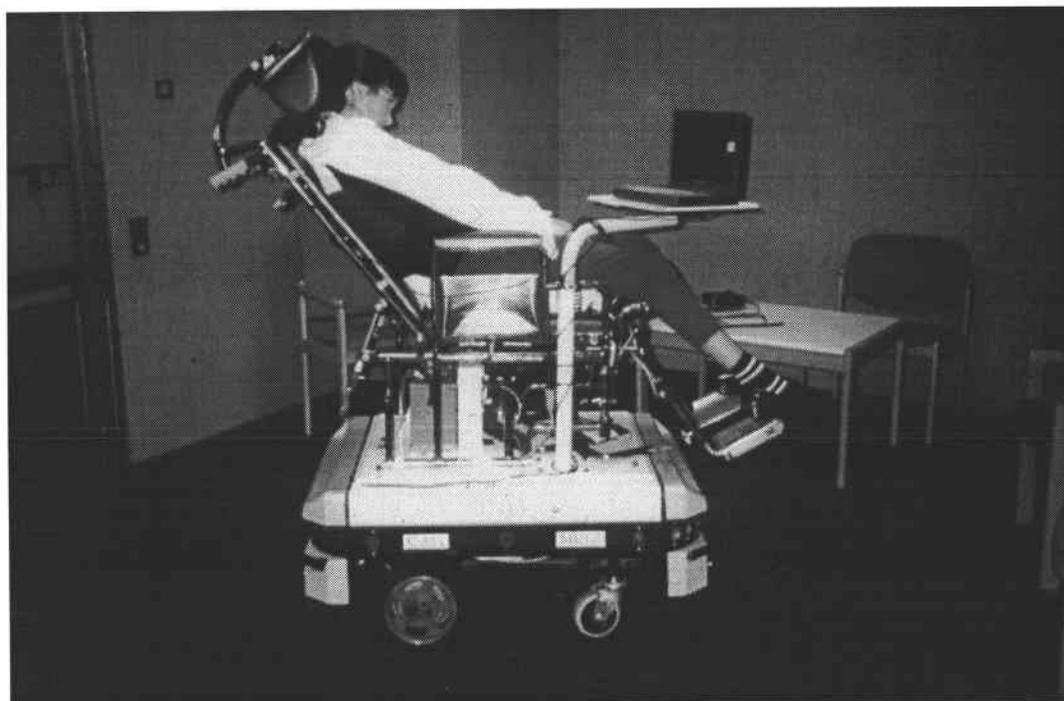


Figure IV.6 : troisième expérimentatrice du fauteuil robotisé.

Etant donné qu'elle allait contrôler ses déplacements en fauteuil pour la première fois, nous avons dû modifier le mode manuel en implantant une zone d'évitement de contact qui stoppait le mouvement en cours si un obstacle s'y introduisait (zone d'environ 25cm autour de la base).

La phase d'apprentissage étant nécessairement plus longue que les précédentes, le scénario a été quelque peu modifié : pour tenir compte de la fatigabilité de ce pilote, nous avons raccourci les distances à parcourir (plus de tour du patio) de manière à lui permettre d'essayer tous les modes de fonctionnement en un minimum de temps.

La commande du mode manuel s'est avérée laborieuse et lourde à gérer dans les lieux encombrés comme il y en a beaucoup dans un centre (appareillages divers placés à côté du mur, différentes personnes en fauteuil, voire à pieds, faisant des exercices de réadaptation, ...). Nous pouvons le constater en examinant les résultats des calculs des estimateurs du critère de performance sur un exemple de déplacement dans un couloir (fig IV.7) :

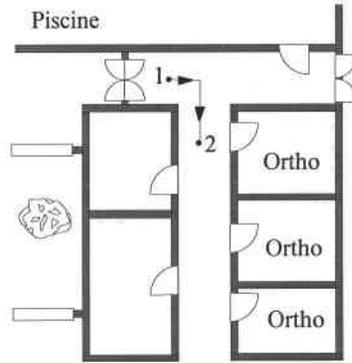


Figure IV.7 : déplacement du couloir "piscine" au couloir "ortho".

- le temps_{tor} est de 2 secondes,
- le fichier espion des manoeuvres effectuées par le pilote est :

-MODE MANUEL

```
-RD-t_rd=3.40-t_int=10.60-MAR-t_mar=15.82-t_int=2.24-RD-t_rd=5.98-t_int=5.36-RG-t_rg=2.92
-t_int=5.78-MAV-t_mav=4.17-t_int=25.16-MAV-t_mav=30.98-t_int=4.92-MAR-t_mar=3.02
-t_int=7.75-MAV-t_mav=1.65-t_int=2.80-RD-t_rd=4.39-t_int=15.74-MAR-t_mar=3.02
-t_int=2.43-RG-t_rg=8.02-t_int=4.71-MAV-t_mav=4.01-t_int=2.60-RD-t_rd=3.57
-t_int=14.12-RD-t_rd=4.39-t_int=8.21-MM_MP
-t_manu=207.76
-t_manuel=220.06
-nb appui=14
```

avec : RD => Rotation droite, RG => Rotation gauche,
 MAV => Marche avant, MAR => Marche arrière,
 t_{rd}, t_{rg}, t_{mav}, t_{mar} => temps de validation du mouvement,
 t_{int} => temps entre deux validations de mouvement,
 t_{manu} => temps d'utilisation du mode manuel,
 nb appui => nombre d'appui sur le capteur faisant déplacer le fauteuil.

- les résultats des calculs des estimateurs sont :
 - estimateur incohérence du type du déplacement : 4/14,
 - estimateur incohérence temporelle du déplacement : 4/14,
 - estimateur incohérence de validation du choix : 1/14.

L'analyse des courbes d'évolution du critère de confiance tirées du fichier espion donne une impression globale de confiance envers la machine ce qui est corroboré par l'observation directe de l'essai. Le pilote laissait le robot s'approcher des obstacles sans crainte apparente à l'exception notable du passage délicat en chicane dans le studio (2).

En conclusion, l'utilité d'une aide à la navigation apparaît dans ce cas indispensable pour rendre à cette personne son autonomie de déplacement. La présence d'une interface graphique pour gérer les fonctionnalités du fauteuil ne lui pose aucun problème : des trois expérimentateurs du système robotisé, elle est la seule à utiliser des désigneurs pour communiquer avec le monde extérieur. Du fait de l'importance de son handicap, le facteur essentiel est ici la minimisation de l'intervention humaine pour la commande d'un mouvement. En ce sens le mode automatique devrait être en général le mode le plus intéressant à l'usage, les autres modes étant réservés à l'évolution en zone non modélisée.

III DISCUSSION

Cette discussion est menée à partir des observations qualitatives et quantitatives relevées pendant la mise au point des essais et durant leur déroulement dans le centre de réadaptation. Nous pouvons en distinguer deux aspects :

- discussion d'ordre technique,
- discussion d'ordre conceptuel.

III.1 DISCUSSION D'ORDRE TECHNIQUE

D'un point de vue technique, la mise au point et le déroulement des essais ont été effectués avec succès. Cependant, cette première phase d'évaluation nous a montré que des progrès sont nécessaires sur plusieurs points.

L'acquisition et le traitement des données ultrasonores doivent en particulier être améliorés. Il s'agit d'une part, d'introduire des algorithmes de traitement des informations erronées du fait de phénomènes divers comme la spécularité ou les échos multiples et d'autre part, d'augmenter la fréquence de lecture des capteurs. Ce dernier point affecte en effet directement les performances en

vitesse du robot. Deux facteurs limitent actuellement la fréquence d'échantillonnage : la lenteur de la liaison série reliant la base au PC portable et le fait de ne pas pouvoir commander simultanément tous les capteurs (phénomène de "crosstalk").

De plus, il serait intéressant d'augmenter la profondeur de vision du robot pour permettre au module d'évitement d'obstacle de préparer sa stratégie de contournement plus tôt qu'il ne le fait actuellement. Ceci permettrait d'obtenir des trajectoires plus confortables (fig. IV.8).

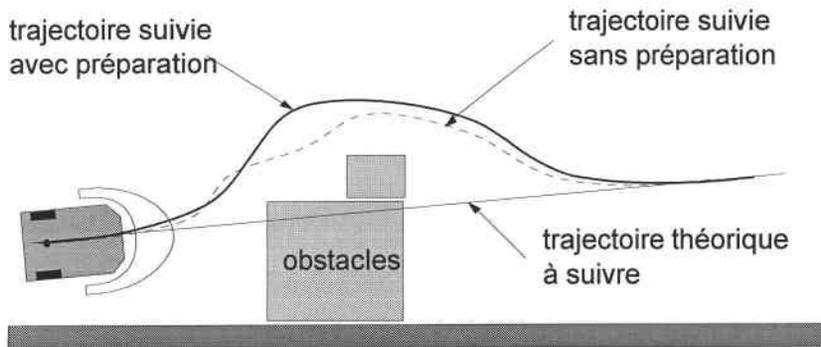


Figure IV.8 : préparation d'une stratégie d'évitement d'obstacles.

Lors de la planification d'une trajectoire passant d'une pièce à l'autre, il faut veiller à intégrer des routines de "comportement" qui permettent de naviguer le plus naturellement possible : l'utilisateur ne doit pas être surpris du comportement du fauteuil pour une bonne acceptabilité de celui-ci. Par exemple dans la configuration de la figure IV.9, une trajectoire couramment observée passe par les points A B' C' D. Dans ce contexte une planification imposant les points de passage A B C D n'est pas acceptable.

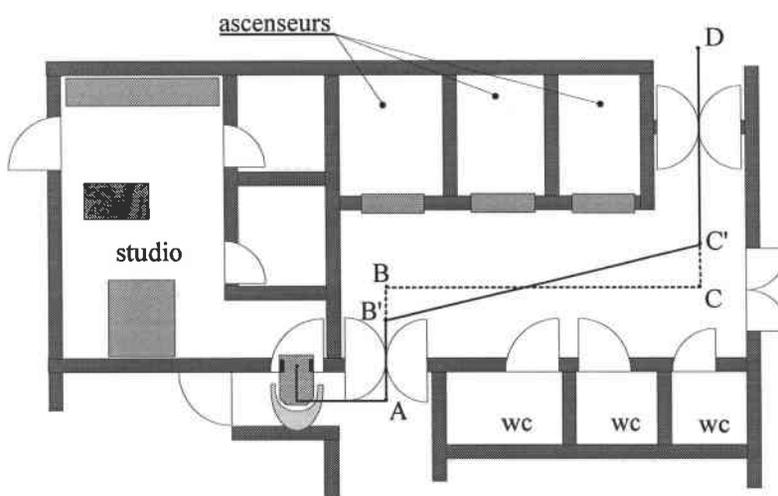


Figure IV.9 : routine de comportement à intégrer dans la planification de trajectoires.

Toujours dans l'idée de rendre plus naturel le mouvement du robot, l'apparition d'obstacles non modélisés sur une trajectoire planifiée devrait pouvoir éventuellement modifier la planification globale : dans l'exemple de la figure IV.10, après avoir contourné l'obstacle non modélisé, le fauteuil génère une manoeuvre inutile en voulant se rapprocher d'un point de passage p_i de la trajectoire. Cette manoeuvre peut être évitée si le point de rattachement p_i devient le point suivant p_{i+1} .

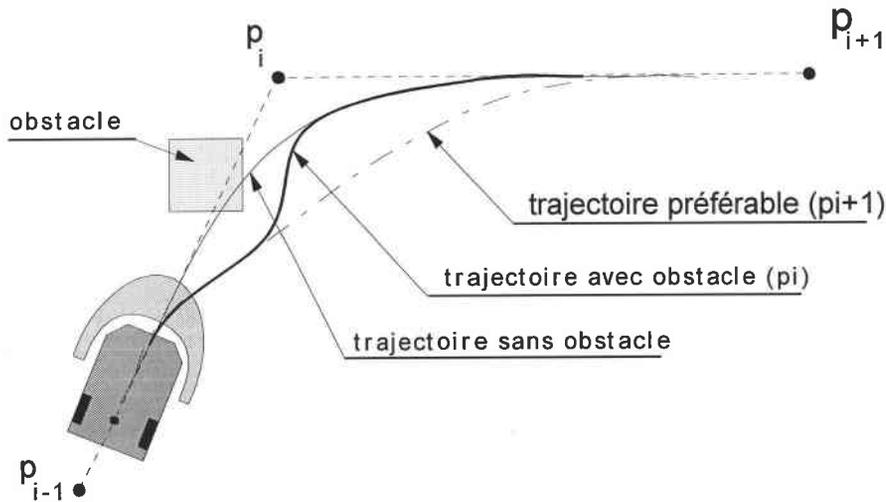


Figure IV.10 : changement du point de rattachement en fonction de l'environnement proche.

Enfin, les algorithmes de localisation implantés actuellement sur le système nécessitent une modélisation géométrique de l'environnement, ce qui pour les essais était uniquement le cas dans le studio. Pour les déplacements automatiques dans le couloir, seules les données odométriques ont été utilisées. De nouvelles procédures plus efficaces dans ce dernier cas, comme la recherche systématique de portes et d'intersections devraient être développées.

III.2 DISCUSSION D'ORDRE CONCEPTUEL

Nous pouvons remarquer que la conception modulaire de l'ensemble du système robotisé s'est avérée en adéquation avec l'application d'aide à la navigation envisagée. En effet l'adaptation du robot à chacune des trois personnes s'est effectué rapidement et sans problème. D'autre part, en fonction du handicap de l'utilisateur et de la situation, certains modes de fonctionnement sont apparus plus appropriés que d'autres. Ainsi dans le studio, la génération automatique de trajectoire semble indispensable si le pilote n'a accès qu'à une commande de type tout ou rien, alors que s'il

maîtrise bien son joystick, la primitive contournement d'obstacle s'avère plus pratique et plus rapide pour se déplacer. Dans le couloir, la primitive suivi de mur est plus confortable à l'emploi que le "contournement d'obstacle" du fait d'une meilleure définition implicite de la trajectoire à exécuter. Nous pouvons également noter que dans certaines situations le choix du mode de fonctionnement par le pilote était manifestement erroné. Par exemple, dans la configuration de la figure IV.11, il a été demandé un suivi de mur droit alors que le gauche était beaucoup plus judicieux. Pour peu que nous disposions d'un modèle de l'environnement même sommaire, un choix automatique du meilleur mur à suivre ou une aide à la décision du pilote peut être intéressant dans de tels cas de figure.

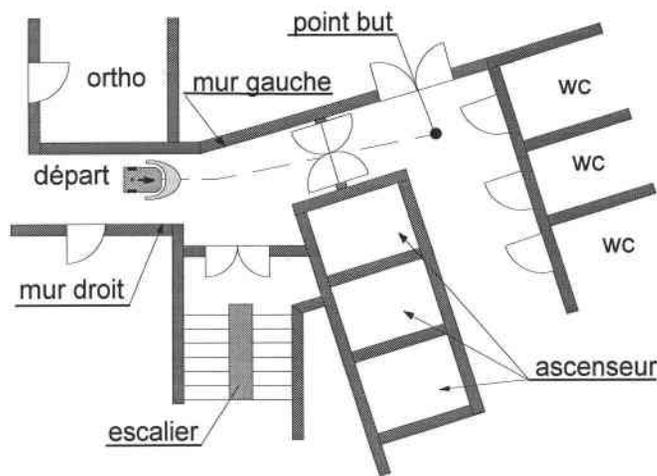


Figure IV.11 : exemple de choix non optimal du mur à suivre.

D'autres situations nécessitent d'introduire certaines facultés de raisonnement dans la machine. Dans le cas de la figure IV.12 par exemple, en tentant de suivre la trajectoire planifiée $p_i p_{i+1}$, la base mobile s'arrête automatiquement en A face au fauteuil roulant (1) en mouvement obstruant le passage de porte. Elle bloque ainsi complètement le couloir. Comme dans l'exemple précédent le choix de la meilleure stratégie, l'arrêt au point B en l'occurrence, pourrait faire l'objet soit d'une décision automatique, soit d'une aide à la décision du pilote.

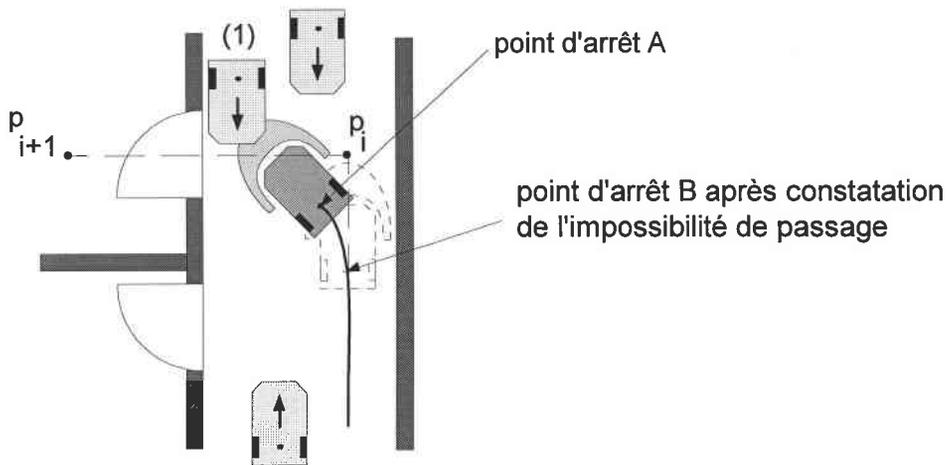


Figure IV.12 : blocage de la situation causé par un arrêt trop tardif du fauteuil.

IV CHOIX OPTIMAL DU MODE DE FONCTIONNEMENT

Cette première série d'essais nous a permis de démontrer l'utilité du mode automatique et du mode manuel assisté face un pilotage classique d'un fauteuil roulant électrique. Il ressort en particulier qu'en fonction de la tâche à réaliser, de la situation et des capacités physiques voire cognitives de l'utilisateur, certains modes de fonctionnement sont plus intéressants que d'autres en regard des différents critères participant à sa charge de travail mentale et physique. Le choix de ce mode est actuellement de la seule compétence de l'utilisateur. Une amélioration de la coopération homme/machine dans la conduite du robot pourrait alors passer par une prise de décision conjointe à ces deux entités. Des méthodes de résolution de ce type de problèmes d'aide à la décision ou de prise de décision multicritère sont abondamment décrites dans la littérature [BANA 90]. Il s'agit dans un premier temps de se définir des critères, si possibles indépendants, représentatifs de la tâche à accomplir des performances de la machine et de l'homme ainsi que de la charge de travail de ce dernier. La deuxième étape consiste à agréger les évaluations de ces critères pour une situation donnée.

Dans le contexte de notre étude, une méthode d'aide à la décision doit donc permettre, à partir d'un certain état du système, de proposer parmi les différents modes de fonctionnement possibles, les meilleurs modes utilisables à un instant donné. Pour cela, il faut connaître l'ensemble des modes que nous voulons classer, l'ensemble des critères qui évaluent les modes, le système et la personne.

Dans notre application, nous avons en permanence connaissance :

- des capacités physiques et cognitives de la personne,
- des différents modes de fonctionnement. Un classement a été effectué au chapitre précédant par rapport à leurs efficacités temporelles d'évolution respectives. Celui-ci dépend du type du capteur de commande et du lieu d'évolution du fauteuil,
- de la position du fauteuil dans l'environnement. Le système, via le module de localisation connaît précisément ou partiellement la position du robot si celui-ci est dans une zone modélisée, sinon il indique que la base se situe dans une zone non modélisée,
- des critères d'évaluation du système et du pilote. Ceux-ci, calculés en ligne, nous renseignent sur le comportement du système (critère de navigation), sur l'utilisation du robot par la personne (critère de performance) et sur le degré de confiance du pilote dans la capacité du robot à éviter les obstacles (critère de confiance).

A partir de cette connaissance de l'état du système, les différentes méthodes d'aide à la décision que nous trouvons dans la littérature spécialisée [JOLL 91] [SIMP 94] sont essentiellement basées sur des règles de préférences. Celles-ci définissent une base de raisonnement pour générer automatiquement une décision. Ces règles sont établies généralement par un expert du domaine qui détermine au mieux le choix des modes à proposer en fonction de l'état du système. Nous pouvons les trouver sous la forme de règles d'inférence, comme :

***SI le pilote a un handicap de type proportionnel
et SI son handicap le fatigue assez vite
et SI le fauteuil évolue en zone modélisée
ALORS lui proposer d'utiliser le mode automatique***

Dans le cadre de ce mémoire, nous donnerons une liste non exhaustive de règles de préférences qui serviront de base de raisonnement pour le développement du module d'aide à la décision. Nous pouvons distinguer dans cette liste deux groupes de règles : le premier dépend de l'estimation en ligne des critères d'évaluation (le fauteuil est en mouvement) et le second, de la position du fauteuil dans son environnement (le fauteuil est à l'arrêt).

Ces règles peuvent être alors :

1^{er} GROUPE

- **SI** *l'estimateur d'incohérence du type du déplacement est élevé*
ALORS proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *l'estimateur d'incohérence temporelle du déplacement est élevé*
ALORS proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *l'estimateur d'incohérence validation du choix est élevé*
ALORS augmenter le temps d'attente (*temps_att*)
ET proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *l'estimateur d'incohérence validation du mode est élevé*
ALORS proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *le critère du confort de navigation n'est pas acceptable*
et SI *le critère de confiance n'est pas acceptable*
ALORS diminuer la vitesse de déplacement, éviter les virages brusques
et l'approche trop près des obstacles
ET proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *le critère du confort de navigation est acceptable*
et SI *le critère de confiance n'est pas acceptable*
ALORS éviter l'approche trop près des obstacles
ET proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)
- **SI** *le critère du confort de navigation n'est pas acceptable*
et SI *le critère de confiance est acceptable*
ALORS diminuer la vitesse de déplacement, éviter les virages brusques
ET proposer le meilleur mode en fonction du lieu (voir groupe 2)

2^{ème} GROUPE

- Le fauteuil est en zone modélisée :

Dans cette zone, le fauteuil peut être localisé à des positions particulières : proche d'une porte, d'un mur, d'un appareil reconnu par l'appareil de contrôle de l'environnement embarqué sur le fauteuil ou situé dans un couloir.

- **SI** *le fauteuil n'est pas en mouvement*
et SI *il est proche d'un appareil connu par le contrôle de l'environnement*
ALORS proposer le mode "contrôle de l'environnement"
- **SI** *le fauteuil est proche d'une porte*
ALORS proposer le mode "contournement d'obstacle" (ou le mode "passage de porte" s'il est implanté)
- **SI** *le fauteuil n'est pas à une position particulière*
et SI *le pilote a un handicap de "type proportionnel"*
et SI *son handicap ne le fatigue pas*
ALORS proposer le mode "contournement d'obstacle"
- **SI** *le fauteuil n'est pas à une position particulière*
et SI *le pilote a un handicap de "type proportionnel"*
et SI *son handicap le fatigue assez vite*
ALORS proposer le mode "automatique"
- **SI** *le fauteuil n'est pas à une position particulière*
et SI *le pilote a un handicap de "type tout ou rien"*
ALORS proposer le mode "automatique"
- **SI** *le fauteuil est dans le couloir*
et SI *le système connaît le meilleur mur à suivre : $M =$ gauche ou droit*
ALORS proposer le mode "suivi de mur M"

2ème GROUPE

- Le fauteuil est en zone non modélisée :

Nous supposons dans ce cas que nous sommes à même de reconnaître une porte ou un mur par simple traitement des données ultrasonores.

- **SI** *le fauteuil est proche d'une porte*

ALORS proposer le mode "contournement d'obstacles" (ou le mode "passage de porte" s'il est implanté)

- **SI** *le fauteuil est proche d'un mur*

ALORS proposer le mode "suivi de mur"

- **SI** *le fauteuil n'est pas proche d'un mur OU d'une porte*

ALORS proposer le mode "contournement d'obstacles"

Comme nous pouvons le constater, les prémisses des règles ont une valeur de vérité floue ("est élevé", "est acceptable", ...). Cela permet de gérer implicitement deux notions difficilement chiffrables : le degré d'assistance proposé dans les modes ainsi que les incertitudes dans la signification de la valeur chiffrée des différents estimateurs.

En outre, certaines règles nécessitent plusieurs prémisses pour arriver au choix du mode optimal. L'utilisation d'une méthode d'agrégation de critères semble donc nécessaire. Le choix d'une méthode parmi celles décrites dans la littérature [ZIMM 90] [PEYR 94] [POME 93] doit se faire en tenant compte des deux notions citées ci-dessus et de la rapidité de traitement des critères. La proposition du meilleur mode doit être pratiquement instantanée pour le pilote.

En résumé, la méthode d'aide à la décision à implanter dans l'architecture du projet V.A.H.M. doit être capable d'intégrer une gestion aisée des règles de préférences en sachant qu'elles sont obtenues par une agrégation de faits observables dotés d'une incertitude quant à leur signification instantanée.

V CONCLUSION

Ce chapitre a présenté une première évaluation clinique du projet V.A.H.M.. Celle-ci, s'est déroulée dans un centre de réadaptation sur une population de trois personnes ayant des handicaps moteurs différents.

Après une description succincte de l'élaboration du scénario des essais, nous avons retracé leurs déroulements en distinguant chaque pilote. Les remarques qui en découlent sont basées sur les notes relevées par deux observateurs extérieurs à l'essai, les réponses de la personne handicapée au questionnaire à chaud après l'essai et par une analyse hors ligne des fichiers espions.

De ces observations, nous avons déduit une série d'améliorations d'ordre technique à apporter au prototype du fauteuil robotisé existant. Il a été mis en particulier en évidence certaines spécificités d'une telle application de la robotique mobile. La présence d'un homme sur la base impose par exemple de tenir compte de critères comme le confort de navigation. Nous avons d'autre part ébauché une méthode permettant la mise au point d'un module d'aide à la décision quant à la proposition en ligne du meilleur mode de fonctionnement. Ce besoin d'une aide à la décision est apparu clairement lors des deux derniers essais. En effet, une répartition statique des modes ne permettait pas aux pilotes d'utiliser pleinement les capacités d'aide à la navigation implantées sur le fauteuil.

CONCLUSION

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté les objectifs et les originalités du projet V.A.H.M. qui répond aux besoins des personnes à fort handicap moteur en matière d'aide à la navigation. Par ailleurs, nous avons défini une méthodologie d'évaluation en ligne de cette application qui ne perturbe pas le pilote du fauteuil roulant électrique. Nous avons tenu compte aussi bien des possibilités techniques de la machine que des capacités de la personne.

Le premier chapitre a décrit le fauteuil roulant électrique et, plus particulièrement, les différents moyens de le piloter. Il s'est poursuivi par un état de l'art en robotique mobile médicale qui, comme nous avons pu le noter élude très souvent le problème du rôle de l'homme dans les systèmes réalisés. De ce fait, nous avons tenté d'analyser les besoins en matière d'aide à la mobilité pour des personnes à fort handicap moteur en mettant l'accent sur la commande du système robotisé et sur la nécessité d'une coopération entre le pilote et la machine. Nous avons ensuite présenté le projet V.A.H.M. en décrivant les différents modules automatiques qui le composent et proposé un synoptique de l'interface homme/machine permettant la commande des différentes fonctionnalités implantées sur le prototype du fauteuil "intelligent".

Le deuxième chapitre s'est attaché plus particulièrement aux étapes de conception et d'évaluation de l'interface du fauteuil robotisé. Nous avons tout d'abord transposé à notre application les méthodes de conception généralement employées par les ergonomes. Nous avons ensuite établi une synthèse des différentes méthodes d'évaluation des systèmes homme/machine qui font apparaître le concept de charge de travail comme le paramètre essentiel à mesurer pour évaluer l'interface et le système global. Nous avons alors tenté de définir cette notion de charge de travail dans le cadre d'une application d'aide à la navigation et choisi d'appliquer une méthode transparente à l'utilisateur pour l'estimer.

Le troisième chapitre a présenté la méthode d'estimation en ligne de la charge de travail que nous avons développée. A partir des composantes pertinentes de cette charge retenues pour l'évaluer, nous avons défini des critères d'évaluation du système robotisé. Ces critères ont pour base de calcul des "fichiers espions" qui contiennent les données d'échange entre l'homme et la machine enregistrées au cours de l'utilisation du fauteuil. Ils ont été obtenus à partir d'une première série d'essais sur des personnes valides.

Le chapitre quatre a décrit la première évaluation clinique du robot V.A.H.M. qui nous a permis de valider l'intérêt d'une aide à la navigation pour des personnes présentant un fort handicap moteur. Nous avons pour cela défini un scénario composé de plusieurs déplacements types effectués habituellement par les expérimentateurs dans leur évolution quotidienne, en centre de réadaptation où se sont déroulés les essais. L'évaluation du système homme/machine s'est effectuée par le calcul des critères définis précédemment associé aux diverses observations menées au cours de l'expérimentation. En outre, ces observations nous ont montré que, pour certains expérimentateurs, la présence d'une aide à la décision relative au choix du meilleur mode de fonctionnement semble nécessaire pour utiliser pleinement les capacités autonomes du fauteuil robotisé. Nous avons donc ébauché une base de réflexion pour établir un module d'aide à la décision.

Les perspectives essentielles des travaux énoncés résident, d'une part dans l'intégration du module d'aide à la décision dans l'architecture générale du projet V.A.H.M., d'autre part dans l'amélioration de l'interface homme/machine, qui doit se rapprocher d'un dialogue de type naturel pour être plus conviviale. Enfin, un transfert technologique de notre application robotisée sur un fauteuil roulant électrique s'avèrera indispensable à court terme pour valider cliniquement le système homme/machine dans des conditions se rapprochant de l'utilisation finale de cette application.

ANNEXE A

METHODE TLX MODIFIEE

METHODE TLX MODIFIEE : Nous avons transposé la méthode TLX pour l'adapter à notre application. Les descripteurs efforts et exigence physique ont alors été enlevés et remplacés par le descripteur confort. Les expérimentateurs évaluent en premier lieu les descripteurs affichés un par un à l'écran en validant l'une des touches du clavier prévues à cet effet. Ensuite, ils choisissent parmi les couples de descripteurs proposés, celui qui induit le plus leur charge de travail.

Descripteur EXIGENCE MENTALE :

Quantifier les difficultés dues aux prises de décisions

FAIBLE

ELEVÉE

Descripteur CONFORT :

Evaluer le confort de navigation en termes de douceur de conduite (mvts de rotation brusque d'accélération et de décélération intempestifs)

FAIBLE

ELEVÉE

Descripteur EXIGENCE TEMPORELLE :

Evaluer la "pression temporelle"

FAIBLE

ELEVÉE

Descripteur PERFORMANCE :

Evaluer sa propre performance en rendant compte de son degré de satisfaction par rapport au but fixé

FAIBLE

ELEVÉE

Descripteur STRESS :

Evaluer la perception de la situation en termes d'insécurité, de découragement, de contraintes psychologiques et d'état de tension

FAIBLE

ELEVÉE

Page écran graphique proposée pour choisir un des descripteurs parmi deux.

Choisir parmi ces deux descripteurs celui qui induit le plus votre charge de travail.

Descripteurs :

| | |
|---|---|
| [0] Exigence Temporelle [1] Stress [2] Pas de préférence Réponse : | [0] Performance [1] Exigence mentale [2] Pas de préférence Réponse : |
| [0] Confort [1] Stress [2] Pas de préférence Réponse : | [0] Performance [1] Stress [2] Pas de préférence Réponse : |
| [0] Confort [1] Exigence Temporelle [2] Pas de préférence Réponse : | [0] Performance [1] Confort [2] Pas de préférence Réponse : |
| [0] Exigence Mentale [1] Exigence Temporelle [2] Pas de préférence Réponse : | [0] Exigence Mentale [1] Confort [2] Pas de préférence Réponse : |
| [0] Performance [1] Exigence Temporelle [2] Pas de préférence Réponse : | [0] Exigence Mentale [1] Stress [2] Pas de préférence Réponse : |

Tableaux donnant les valeurs de la charges de travail subjectives en fonction des pilotes et du type de l'essai effectué. Le premier tableau correspond à la phase d'essai en zone modélisée et le second à la phase d'essai en zone non modélisée.

| | Essai : temps_tor = 0.1s | | | Essai : temps_tor = 1.5s | | | Essai : temps_tor = 3s | | | Essai : joystick | | |
|----------|--------------------------|-----------|---------------------|--------------------------|-----------|---------------------|------------------------|-----------|---------------------|------------------|-----------|---------------------|
| | Mode manuel | Mode auto | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode auto | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode auto | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode auto | Mode manuel assisté |
| Pilote 1 | 0.11 | 0.10 | 0.36 | 0.29 | 0.09 | 0.22 | 0.27 | 0.12 | 0.32 | 0.15 | 0.20 | 0.54 |
| Pilote 2 | 0.11 | 0.09 | 0.35 | 0.13 | 0.10 | 0.38 | 0.18 | 0.13 | 0.42 | 0.17 | 0.18 | 0.52 |
| Pilote 3 | 0.12 | 0.10 | 0.32 | 0.15 | 0.21 | 0.48 | 0.29 | 0.24 | 0.4 | 0.14 | 0.23 | 0.58 |
| Pilote 4 | 0.32 | 0.27 | 0.30 | 0.25 | 0.53 | 0.26 | 0.44 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.12 | 0.64 |

| | Essai : temps_tor = 0.1s | | Essai : temps_tor = 1.5s | | Essai : temps_tor = 3s | | Essai : joystick | |
|----------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | Mode manuel | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode manuel assisté | Mode manuel | Mode manuel assisté |
| Pilote 1 | 0.15 | 0.30 | 0.18 | 0.32 | 0.24 | 0.53 | 0.24 | 0.45 |
| Pilote 2 | 0.21 | 0.29 | 0.23 | 0.29 | 0.21 | 0.55 | 0.21 | 0.26 |
| Pilote 3 | 0.18 | 0.23 | 0.20 | 0.65 | 0.27 | 0.17 | 0.24 | 0.44 |
| Pilote 4 | 0.20 | 0.14 | 0.15 | 0.1 | 0.71 | 0.54 | 0.18 | 0.12 |

ANNEXE B

TABLEAUX DES TEMPS DE PARCOURS DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Annexe b1 : tableaux des temps de parcours **temps_par** des série d'essais expérimentaux en fonction des **temps_tor** (données extraites des fichiers espions).

| Temps_tor 0.1 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 96 | 72 | 76 | 95 | 82 | 113 | 68 | 55 | 66 |
| Pilote 2 | 86 | 74 | 81 | 87 | 84 | 95 | 66 | 60 | 71 |
| Pilote 3 | 81 | 72 | 96 | 98 | 84 | 137 | 63 | 73 | 69 |
| Pilote 4 | 89 | 73 | 69 | 106 | 81 | 99 | 70 | 83 | 71 |
| Moyenne | 88 | 75.75 | 80 | 96.5 | 82.75 | 111 | 66.75 | 67.75 | 69.25 |

| Temps_tor 1.5 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 136 | 69 | 116 | 161 | 87 | 156 | 113 | 66 | 110 |
| Pilote 2 | 114 | 74 | 109 | 129 | 84 | 133 | 93 | 61 | 110 |
| Pilote 3 | 138 | 74 | 138 | 135 | 94 | 196 | 91 | 73 | 107 |
| Pilote 4 | 124 | 72 | 146 | 113 | 86 | 138 | 94 | 74 | 73 |
| Moyenne | 128 | 72.25 | 127.25 | 134.5 | 88 | 155.75 | 97.75 | 68.5 | 97.75 |

| Temps_tor 3 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|----------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 163 | 80 | 163 | 164 | 94 | 180 | 133 | 76 | 151 |
| Pilote 2 | 162 | 83 | 191 | 164 | 96 | 174 | 119 | 79 | 101 |
| Pilote 3 | 133 | 85 | 184 | 160 | 95 | 190 | 164 | 76 | 153 |
| Pilote 4 | 153 | 81 | 164 | 179 | 102 | 173 | 144 | 82 | 129 |
| Moyenne | 152.75 | 82.25 | 175.5 | 166.75 | 96.75 | 179.25 | 140 | 78.25 | 133.5 |

Annexe b2 : tableaux des nouveaux temps de parcours **temps_par** déduit à partir des fichiers espions et de la modification de l'interface, en fonction du **temps_tor**.

| Temps_tor 0.1 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 96 | 72 | 71 | 93 | 82 | 107 | 67 | 55 | 61 |
| Pilote 2 | 83 | 74 | 75 | 86 | 84 | 80 | 65 | 60 | 61 |
| Pilote 3 | 80 | 72 | 75 | 92 | 84 | 83 | 62 | 73 | 59 |
| Pilote 4 | 88 | 73 | 77 | 104 | 81 | 99 | 69 | 83 | 64 |
| Moyenne | 86.5 | 75.75 | 74.5 | 93.75 | 82.75 | 92.25 | 65.75 | 67.75 | 61.25 |

| Temps_tor 1.5 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 133 | 69 | 103 | 159 | 87 | 122 | 110 | 66 | 73 |
| Pilote 2 | 111 | 74 | 95 | 126 | 84 | 114 | 91 | 61 | 83 |
| Pilote 3 | 123 | 74 | 100 | 132 | 94 | 117 | 88 | 73 | 75 |
| Pilote 4 | 121 | 72 | 107 | 121 | 86 | 119 | 92 | 74 | 81 |
| Moyenne | 122 | 72.25 | 101.25 | 134.5 | 88 | 118 | 95.25 | 68.5 | 78 |

| Temps_tor 3 sec | Trajet n°1 (temps en sec) | | | Trajet n°2 (temps en sec) | | | Trajet n°3 (temps en sec) | | |
|---------------------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté | Manuel | Auto | Assisté |
| Pilote 1 | 158 | 80 | 114 | 159 | 94 | 157 | 129 | 76 | 128 |
| Pilote 2 | 157 | 83 | 147 | 160 | 96 | 149 | 114 | 79 | 109 |
| Pilote 3 | 128 | 85 | 124 | 155 | 95 | 153 | 160 | 76 | 121 |
| Pilote 4 | 149 | 81 | 120 | 174 | 102 | 160 | 139 | 82 | 130 |
| Moyenne | 148 | 82.25 | 126.25 | 162 | 96.75 | 154.75 | 135.5 | 78.25 | 122 |

Annexe b3 : tableaux des nouveaux temps de parcours **temps_par** déduit à partir des fichiers espions et de la modification de l'interface, en fonction du **temps_tor**, pour les trajet "aller" et "retour" dans le couloir (zone non modélisée).

| Temps_tor 0.1 s | Trajet "aller" de (6) à (7) (s) | | Trajet "retour" de (9) à (10) (s) | |
|---------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | Pilotage manuel | Suivi de mur | Pilotage manuel | Suivi de mur |
| Pilote 1 | 67 | 58 | 61 | 53 |
| Pilote 2 | 64 | 57 | 60 | 54 |
| Pilote 3 | 66 | 53 | 59 | 59 |
| Pilote 4 | 66 | 55 | 60 | 56 |
| Moyenne | 65.75 | 55.75 | 60 | 56 |

| Temps_tor 1.5 s | Trajet "aller" de (6) à (7) (s) | | Trajet "retour" de (9) à (10) (s) | |
|---------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | Pilotage manuel | Suivi de mur | Pilotage manuel | Suivi de mur |
| Pilote 1 | 89 | 77 | 84 | 81 |
| Pilote 2 | 90 | 79 | 99 | 68 |
| Pilote 3 | 86 | 74 | 87 | 70 |
| Pilote 4 | 110 | 66 | 79 | 67 |
| Moyenne | 93.75 | 74 | 87.25 | 71.25 |

| Temps_tor 3 s | Trajet "aller" de (6) à (7) (s) | | Trajet "retour" de (9) à (10) (s) | |
|-------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | Pilotage manuel | Suivi de mur | Pilotage manuel | Suivi de mur |
| Pilote 1 | 123 | 92 | 128 | 103 |
| Pilote 2 | 130 | 94 | 147 | 82 |
| Pilote 3 | 127 | 89 | 131 | 84 |
| Pilote 4 | 134 | 96 | 158 | 80 |
| Moyenne | 128.5 | 92.75 | 141 | 87.25 |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AMOR 92] AMORI R.D.**
 “*VOCOMOTION - An intelligent voice-control system for powered wheelchairs*”, RESNA Int., 6-11 Juin 1992, pp. 421-423.
- [ANTT 91] ANTTCAZAK J., TEMEN AL., BALFOUR L., NAUMAN S.**
 “*The development of a heavy duty joystick*”, RESNA 14th Annual Conf., Kansas City, 1991, pp. 154-156.
- [AUBR 89] AUBRY M.J.**
 “*Ergothérapie et technologie : illustration par une étude de cas*”, Jour. d’Ergothérapie, Masson, Paris, 1989, vol. 11, pp. 2-8.
- [BANA 90] BANA E COSTA C.A.**
 “*Multiple criteria decision aid : an overview*”, Reading in multicriteria decision aids, C.A. Bana e Costa, Springer-Verlag, 1990, pp. 3-14.
- [BELL 93] BELL D.A., LEVINE S. L., KOREN Y., JAROS A., BORENSTEIN J.**
 “*Shared control of the navchair obstacle avoiding wheelchair*”, RESNA, 12-17 Juin 1993, pp.370-372.
- [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, 1994, pp. 2018-2022.
- [BERG 92] BERGERT T.**
 “*Contribution à l’étude de l’activité cognitive de l’opérateur, et à l’évaluation de sa charge de travail*”. Thèse de l’Université de Valenciennes, 1992.
- [BIDE 92] BIDEAUX E., BAPTISTE P.**
 “*State of the art of autonomous guided vehicles : sensors and guidances system*”, Franco-Japanese Conf. on Mechatronic, Besançon, France, 1992.
- [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, June 1991, pp.278-288.

- [BORE 92] BORENSTEIN J., KOREN Y.**
 “*Noise rejection for ultrasonic sensors in mobile robot applications*”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992, pp. 1727-1732.
- [BOUR 85] BOURHIS G.**
 “*Conception et automatisations d’un designer polyvalent géré par microprocesseur, application aux grands handicapés moteurs présentant des troubles de la communication verbale*”. Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSEM, Nancy, 1985.
- [BOUR 86] BOURHIS G., ANDRE J.M., YVROUD E.**
 “*Versatile control system of an electrical wheelchair for severely motor handicapped persons*”, 6th Congresso Brasileiro de Automatica, Belo Horizonte Brasil, 1986.
- [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, May 26-28, 1993, Stockholm, Suède, pp. 13.2.
- [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., Nov 93, Le Touquet, France.
- [BOUR 94] BOURHIS G., HORN O., AGOSTINI Y.**
 “*Location and high level planning for a powered wheelchair*”, IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. proc., San Antonio, oct. 1994.
- [BOY 81] BOY G.**
 “*Etude de la charge de travail dans une cabine de pilotage. Etude bibliographique*”, Rapport CERT DERA/AIRBUS Ind., n°1/7275, jan. 1981.
- [BRAN 90] BRANGIER E.**
 “*Ergonomie des logiciels : Approche psycho-ergonomique de l’interaction homme-ordinateur (étude bibliographique)*”, INRS, Cahiers de notes documentaires n° 139, 2^{ème} trimestre 1990, pp. 391-404.
- [BRAN 94] BRANGIER E.**
 “*Ergonomie des logiciels*”, Cours DESS Ingénierie de la communication, Université de Metz, 1994.

- [BROO 86] **BROOKS R.A.**
“*A robot layered control system for mobile robot*”, IEEE Jour. of Robotics and Automation, vol. RA-2, n°1, march 1986, pp. 14-23.
- [BROW 77] **BROWN I.**
“*Les méthodes de la double tâche pour l'évaluation de la charge de travail*”, Le Travail Humain, tome 40, n°2, 1977, pp. 233-238.
- [BUHL 93] **BUHLER C., HUMANN W.**
“*Smart wheelchair with high manoeuvrability*”, 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, May-Juin 1993, Sockholm, Sweden, pp. P.1.
- [BUSN 92] **BUSNEL**
“*La prescription de l'aide technique*”. Jour. de réadaptation, 1992, n° 387, pp. 7-9.
- [CAHI 92] **CAHIER**
“*Cahier des charges*”, CERAH 1992 (Centre d'Etude et de Recherche D'appareillage des Handicapés).
- [CONN 90] **CONNELL J., VIOLA P.**
“*Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot*”, IEEE Conf. on Robotics and Automation Proc., 1990, pp. 1118-1121.
- [CRAI 93] **CRAIG I., NISBET P.**
“*The smart wheelchair : an augmentative mobility toolkit*”, 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, Stockholm, 1993, Sweden, pp. 13.1.
- [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, 11-12 octobre 1991, Lannion, pp. 123-126.
- [DETR 92] **DETRICHE J.M., GELIN R., PLOIX C.**
“*Assisted guidance device for electric wheelchair*”. Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, 1992.
- [DUPO 84] **DUPOURQUE V.**
“*Panorama des capteurs de commande pour fauteuils roulants électriques*”, Jour. de Réadaptation Médicale, 1984, n°1, pp.18-21.

[GAWR 89] GAWRON V.J.

"A taxonomie of independant variables affecting human performance", Int. Jour. Man-Machine Studies, 1989, vol. 31, pp. 643-672.

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

"The Sprint of COACH", IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., Nov 93, Le Touquet, France.

[GUIL 79] GUILBERT J.

"Etude des mouvements céphaliques, application à la commande d'engin", Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université des sciences et technique de Lille, 14 Mai 1979.

[GUIT 88] GUITTET

"La robotique médicale", Hermès Edition, 1988.

[HART 88] HART S.G., STAVELAND L.E.

"Development of nasa-tlx (task load index) : results of empirical and theoretical research", P.A. Hancock & Meshkati (Eds), Human mental workload, North-Holland, Advances in psychology, 1988, pp. 139-185.

[HEND 91] HENDRIKS J.L., ROSEN M.J., BERUBE N., AISEN M.

"A Second-Generation Joystick for People Disabled by Tremor", RESNA 14th annual conf., Kansas City, 1991, pp. 248-250.

[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, 1994, France.

[JAFF 90] JAFFE D., HARRIS H.L., LEUNG S.K.

"Ultrasonic head controlled wheelchair interface : a case study in development and technology transfert", RESNA 13th Annual Conf., Washington DC, 1990, pp. 23-24.

[JARO 91] JAROS L.A., RASCHKE U., LEVINE S. L., BORENSTEIN J.

"Mobile Robotic Platform Capable of Following a Human Companion", RESNA 14th Conf., Kansas City, 1991, pp. 10-12.

[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, 1990, pp. 379-381.

- [JOHA 79] **JOHANNSEN G.**
“*Workload and workload measurement*”, N. MORAY (Eds), *Mental workload : its theory and measurement*, NATO Conf. Serie III, Human Factor, vol. 8, New-York, 1979, pp. 3-11.
- [JOLL 91] **JOLLY D., DESODT A.M., WAWAK F.**
“*Choix de modes de conduite en téléopération*”, *Revue d’Automatique et productique appliquées*, vol. 4, n°4, 1991, pp. 435-445.
- [KANT 87] **KANTOWITZ B.H.**
“*Mental workload*”, *Human Factors Psychology*, P.A. Hancock (Eds), North-Holland, 1987, pp. 81-121.
- [KOLS 94] **KOLSKI C.**
“*Ingénierie des interfaces homme-machine*”, Hermès Edition, *Traité des nouvelles technologie*, série automatique, 1994.
- [KOME 93] **KOMEDA W.**
“*Mobile Robot system to aid the daily life of bedridden persons in the private house*”, 2nd European Conf. on the Advancement of Rehabilitation Technology, May 26-28, 1993, Stockholm, Suède, pp. 24.1.
- [LEE 93] **LEE S.**
“*Intelligent sensing and control for advanced teleoperation*”, *IEEE Trans. on Control Systems*, June 1993, pp. 19-28.
- [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.
- [LEPL 77] **LEPLAT J.**
“*Les facteurs déterminant la charge de travail, rapport introductif*”, *Le travail Humain*, tome 40, n°2, 1977, pp. 195-202.
- [LEPL 82] **LEPLAT J.**
“*Les questions méthodologiques de bases applicables à tous les types de tâches*”, *Le travail Humain*, Tome 45, No. 2, 1982, pp. 347-355.

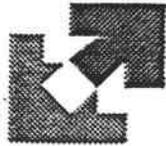
- [LEVI 89] **LEVINE S.P., BORENSTEIN J., PILUTTI T.E., RASCHKE U.**
 “*Semi-autonomous mobile robot platform for rehabilitation and other applications*”,
 2nd Workshop on Medical and Healthcare Robotics, Newcastle-upon-Tyne, 1989,
 pp. 15-18.
- [LEVI 90] **LEVINE S. P., BORENSTEIN J., HOREN Y.**
 “*The navchair control system for automatic assistive wheelchair navigation*”, RESNA
 13th Annual Conf., Washington DC, 1990, pp. 193-194.
- [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, sept. 1986, vol. RA-2, n°3, pp.117-126.
- [MATA 92] **MATARIC M.J.**
 “*Integration of representation into goal-driven behavior-based robots*”, IEEE Jour.
 of Robotics and Automation, vol. 8, n°3, 1992, pp. 304-312.
- [MATH 86] **MATHIEU P.A.**
 “*Accès au micro-ordinateur pour la personne handicapée : méthode d'évaluation
 d'interfaces simples*”, Jour. de Réadaptation Médicale, Masson, Paris, vol. 6, pp.
 187-192.
- [MILL 88] **MILLOT P.**
 “*Supervision des procédés automatisés et ergonomie*”, Hermès Edition, Traité des
 nouvelles technologie, série automatique, 1988.
- [MILL 90] **MILLOT P.**
 “*Coopération homme-machine dans les procédés automatisés*”, Les facteurs humains
 de la fiabilité dans les systèmes complexes, LEPLAT J. et TERSSAC G. (Eds), Octarès,
 entreprises, 1990, pp. 331-354.
- [MOUM 94] **MOUMEN K., PINO P.**
 “*Unknown obstacle avoidance and planned or deduced trajectories following*”,
 European Robotics and Intelligent System Conf., August 22-25 1994, Malaga, Espa-
 gne, pp. 1829-1840.
- [MOUM 94a] **MOUMEN K.**
 “*Projet V.A.H.M. : commande de la mobilité*”, Rapport interne du laboratoire L.A.E.I.,
 Université de Metz, nov. 1994.

- [NAPP 89] **NAPPER S.T. , SEAMAN R.L.**
“*Application of robots in rehabilitation*”, Robotics and Autonomous System, 1989, pp. 227-239.
- [NEBO 90] **NEBOIT M., GUILLERMAIN H., FADIER E.**
“*De l’analyse de système à l’analyse de l’interaction opérateur/tâche : proposition méthodologique*”, Les Facteurs Humain de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, LEPLAT J. et DE TERSSAC G. (Eds), Octarès, Entreprise, 1990, pp. 241-265.
- [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, 1990, pp. 307-308.
- [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, 1991, pp. 1510-1517.
- [PANG 90] **PANG G.K.H., SHEN H.C.**
“*Intelligent control of an autonomous mobile robot in a hazardous material spill accident - a blackboard structure approach*”, Jour. of Robotics and Automation System, n°6, 1990, pp. 351-365.
- [PAYT 86] **PAYTON D.W.**
“*An architecture for reflexive autonomous vehicle control*”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, 1986, pp. 1838-1845.
- [PERE 93] **PEREMANS H., AUDENAERT K., VAN CAMPENHOUT J.M.**
“*A high-resolution sensors based on tri-aural perception*”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, n°1, 1993, pp. 36-48.
- [PEYR 94] **PEYRODIE L., DESODT A.M., JOLLY D.**
“*Utilisation des sous-ensembles approximatifs pour résoudre les problèmes de décision en téléopération*”, Revue d’Automatique et productique appliquées, vol. 7, n°6, 1994, pp. 729-748.

- [PINO 91] **PINO P.**
“*Mise au point et interfaçage d’un capteur de proximité à infrarouge*”, Rapport de D.E.A, Laboratoire L.A.E.I., 1991, Université de Metz.
- [PINO 95] **PINO P., AGOSTINI Y., BOURHIS G., ANDRE J.M., BRUGEROLLE B., H. DE BARMON**
“*The V.A.H.M. project (Autonomous Vehicle for Disabled Persons) : First Results*”, acceptée dans RESNA’95, Vancouver, Canada, Juin 9-14 1995.
- [POWE 92] **POWELL F., INIGO R.M.**
“*Pressure Sensitive Joystick and Controller for Front Wheel Steering Wheelchairs*”, RESNA Int., 6-11 Juin 1992, pp. 304-306.
- [POME 93] **POMEROL J. Ch.**
“*From aggregating by rules to the integration of expert system in multicriteria DSSs*”, IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., pp. 483-488.
- [PRUS 91] **PRUSKI A., BOURHIS G.**
“*Le projet V.A.H.M. (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs : mobilité et stratégie*”, Innovation and Technology in Biology and Medecine, 1991, pp. 694-705.
- [PRUS 92] **PRUSKI A.**
“*Multivalued Coding : Application to autonomous robots*”, Robotica, vol. 10, 1992, pp. 125-133.
- [RASM 83] **RASMUSSEN J.**
“*Skills, rules and knowledge ; signals and symbols, and other distinctions in human performance models*”, IEEE Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., May-June 1983, vol. SMC-13, n°3, pp. 257-266.
- [REGA 89] **REGALBUTO M.A., CHEATHAM J.B., KROUSKOP T.A.**
“*A model-based graphics interface for controlling a semi-autonomous mobile robot*”, IEEE Engineering in Medecine and Biology Society, 1989.
- [REGA 92] **REGALBUTO M.A., KROUSKOP T.A., CHEATHAM J.B.**
“*Toward a practical mobile robotic aid system for people with severe physical disabilities*”, Journal of Rehabilitation Research and Development, vol. 29, n°1, 1992, pp. 19-26.

- [RIER 93] **RIERA B.**
“*Méthodologie d'évaluation des interfaces homme/véhicule automobile*”, Thèse de l'Université de Valenciennes, 26 Jan. 1993.
- [ROBO 92] **ROBOSOFT**
“*Documentation sur la base mobile ROBUTER*”, Société Robosoft, Bayonne, France.
- [ROHM 93] **ROHMER S.**
“*Modélisation d'environnement par nombre multivaleurs*”, Thèse de l'Université de Nancy I, Nov 1993.
- [SANT 87] **SANTUCCI G.**
“*Evaluation de la charge de travail en aéronautique (2^{ème} partie)*”, Médecine aéronautique et spatiale, 1987, tome XXVI, n°102, pp. 146-152.
- [SCAP 86] **SCAPIN D.L**
“*Guide ergonomique de conception des interfaces homme-machine*”, Rapport INRIA n°77, 1986.
- [SENA 90] **SENACH B.**
“*Evaluation des interfaces homme-machine : une revue de la littérature*”, Rapport de Recherche, INRIA, Sophia Antipolis, n° 1180, Mars 1990, 70p.
- [SHIR 87] **SHIRE B.**
“*Microcomputer-based scanning interface for powered wheelchair*”, RESNA 10th Annual Conf., San Jose, California, 1987, pp. 541-543.
- [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., 1994, pp. 578-580.
- [SINC 90] **SINCLAIR M.A.**
“*Subjective assessment. in : Evaluation of human works : a practical ergonomics methodology*”, Wilson J.R. and Corlett E.N. (Eds), Taylor & Francis , 1990, pp. 890.
- [SKIP 86] **SKIPPER J.H., RIEGER C.A., WIERWILLE W.W.**
“*Evaluation of decision-tree rating scales for mental workload estimation*”, Ergonomics, 1986, n°4, pp. 585-599.

-
- [SPER 88] **SPERENDIO**
“*L’ergonomie du travail mental*”, Masson (Eds), 1988.
- [TIDE 94] **TIDE**
Commission of the European Communities Technology Initiative for the Disabled and Erderly People, 1993-1994 Workplan, pp. 43-44.
- [TULG 80] **TULGA M.K., SHERIDAN T.B.**
“*Dynamic decisions and workload in multitask supervisory control*”, IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics Conf. Proc., May 1980, vol. SMC-10, pp. 217-232.
- [VAND 86] **VAN DER LOOS H.F.M., MICHALOWKI S.J., LEIFER L.J.**
“*Design of an omnidirectional mobile robot as a manipulating device for the severely disabled*”, RESNA 9th Annual Conf., Minneapolis, 1986.
- [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, pp. 9.2.
- [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, 1992, pp. 27-34.
- [WHIT 91] **WHITE P.A.**
“*Power mobility : a parent view*”, RESNA 14th annual conf., Kansas City, 1991, pp. 136-137.
- [WIER 88] **WIERWILLE W.W.**
“*Important remaining issues in mental workload estimation*”, P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds), Human mental workload, North-Holland, Advances in Psychology , 1988, pp. 315-329.
- [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, 1994, pp. 2012-2017.
- [ZIMM 90] **ZIMMERMANN H.J.**
“*Decision making in ill-structured environments and with multiple criteria*”, Reading in multicriteria decision aids, C.A. Bana e Costa, Springer-Verlag, 1990, pp. 119-151.



UNIVERSITE DE METZ

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

1) Nom et prénom de l'auteur :Monsieur PINO Pierre.....

2) Titre de la thèse : " ROBOT MOBILE POUR HANDICAPES MOTEURS : EVALUATION DU SYSTEME HOMME/MACHINE. "

3) Date de la soutenance :le 6 juin 1995.....

4) Président du Jury :P. COIFFET.....

5) Membres du Jury :M.M. ANDRE, BOURHIS, CHAVAND, COIFFET, MILLOT, PRUSKI.....

6) Reproduction de la thèse soutenue :

thèse pouvant être reproduite en l'état

thèse ne pouvant être reproduite

thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées au cours de la soutenance.

Signature du Président du Jury :

RESUME

Ce mémoire présente en première partie les objectifs et les originalités du robot V.A.H.M. (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs). Ce projet répond aux besoins des personnes handicapées physiques en matière d'aide à la navigation en fauteuil roulant électrique. En effet, les fauteuils usuels sont difficiles voire impossibles à piloter pour certaines d'entre elles du fait de leurs handicaps moteurs : capteur de commande mal adapté, rapide fatigabilité, ... Nous avons essentiellement basé notre étude sur l'importance du besoin de coopération entre l'homme et la machine.

Par ailleurs, nous avons défini une méthodologie d'évaluation en ligne du système homme/machine non perturbante pour le pilote du fauteuil. Cette méthode est basée sur le calcul de critères d'évaluation qui intègrent les capacités techniques du robot ainsi que des composantes physique et mentale de la charge de travail du pilote, notion essentielle pour l'évaluation d'un système homme/machine. Ces critères ont été obtenus à partir de fichiers espions enregistrés pendant une série d'essais réalisée sur des personnes valides.

Nous terminons notre étude en validant l'intérêt d'une aide à la navigation pour des personnes handicapées en nous basant sur les observations qualitatives et quantitatives menées au cours de la première évaluation clinique du robot V.A.H.M.. Celle-ci nous a, en outre, permis d'ébaucher une base de réflexion pour établir un module d'aide à la décision quant au choix du meilleur mode de fonctionnement de la base mobile, en fonction de l'état du système homme/machine et de l'environnement d'évolution.

MOTS CLES : robot mobile, handicapés moteurs, coopération homme/machine, évaluation, charge de travail.

ABSTRACT :

In this report you'll first find the goals and specific characteristics of the V.A.H.M. project. This project meets the needs of motor impaired people as far as aid for navigation is concerned. Indeed it's very difficult, not to say impossible for some motor impaired people to pilot usual wheelchair because of ill-suited sensors, because motor impaired people get tired very quickly... Our studies are mainly based on the importance of the man/machine cooperation.

Furthermore we have defined a online evaluation method of the man/machine system which won't impede the pilot of the wheelchair. This method is based on the calculation of evaluation criteria including the robot technical capacities as well as physical and mental elements of the pilot workload, an essential notion to evaluate the man/machine system. We obtained these criteria from spy files recorded during tests made on able-bodied people.

Finally our studies underline the usefulness of helping navigation for impaired people, using the qualitative and quantitative observations we made during the first clinical evaluation of the V.A.H.M.. From then on we started thinking of a way to create a module to help the wheelchair user to choose the best control mode of the mobile base according to the environment and the man/machine system.

KEY WORD : mobile robot, disabled, man/machine cooperation, evaluation, workload.