

Thèse de doctorat

Conception de fonctionnalités d'assistance robotisée à la mobilité sous contraintes d'acceptabilité et d'adaptabilité

Sous la direction de Mr Guy Bourhis et la codirection de Mme Odile Horn au Laboratoire d'Automatique humaine et de Sciences Comportementales L.A.S.C,

Présentée à l'école doctorale d'Informatique, Automatique, Electronique – Electrotechnique et Mathématique, I.A.E.M. Lorraine, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'université de Lorraine spécialité Automatique, Traitement du signal et des images, Génie informatique, par :

Frédéric Leishman

Soutenue publiquement le 15/03/2012, devant la commission d'examen :

Rapporteurs :

Mr Philippe Hoppenot

Mr Laurent Delahoche

Examineurs :

Mr Philippe Bidaud

Mr Guy Bourhis

Mme Odile Horn

Mr Vincent Monfort

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART	3
1.1. Introduction	4
1.2. Fauteuils Roulants Electriques Intelligents	4
1.2.1. Structure Générale	4
1.2.2. Capteurs	5
1.2.2.1. Capteurs proprioceptifs	6
1.2.2.2. Capteurs extéroceptifs	6
1.2.2.3. Association et choix des capteurs	8
1.2.3. Fonctionnalités d'aide à la mobilité	9
1.2.3.1. Evitement d'obstacle	9
1.2.3.2. Suivi de mur et de personne	10
1.2.3.3. Franchissement automatique de porte	11
1.2.3.4. «Back-tracking»	11
1.2.3.5. Positionnement sur un objectif	11
1.2.3.6. Conclusion	12
1.2.4. Interactions homme machine	12
1.2.4.1. Joysticks	12
1.2.4.2. Commandes de type Tout-ou-Rien	13
1.2.4.3. Commandes basées sur l'analyse des signaux physiologiques	14
1.2.4.4. Commandes basées sur l'analyse de la gestuelle ou du regard	17
1.2.4.5. Commandes par reconnaissance vocale	17
1.2.4.6. Commandes par la langue	18
1.2.5. Niveau d'autonomie de l'assistance à la mobilité	19
1.2.6. Les Prototypes Vahm	19
1.2.7. Conclusion	21
1.3. Approche déictique	22
1.3.1. Introduction	22
1.3.2. Approche déictique dans les applications robotiques	23
1.3.2.1. Robotique mobile	23
1.3.2.2. Réalité augmentée	25
1.3.3. Approche déictique pour les assistances robotisées aux personnes handicapées	27
1.3.3.1. Bras robotisés	27
1.3.3.2. Fauteuils roulants électriques intelligents	29
1.3.4. Conclusion	30
1.4. Conclusion	30
CHAPITRE 2 : FAUTEUIL INTELLIGENT, ARCHITECTURE MATERIELLE ET	
LOGICIELLE	33
2.1. Introduction	34
2.2. Structure du fauteuil	34
2.2.1. Architecture matérielle	34
2.2.2. Architecture logicielle	36

2.3. Perception laser.....	37
2.3.1. Capteur laser à balayage	38
2.3.1.1. Présentation	38
2.3.1.2. Caractéristiques des mesures	39
2.3.2. Perception de l'environnement sur 360° avec trois capteurs laser à balayage	42
2.3.2.1. Conditionnement des mesures lasers	43
2.3.2.2. Changement de repère et étalonnage	43
2.3.2.3. Triage des données lasers	46
2.3.2.4. Recherche de cohérence des données lasers	47
2.4. Mode de déplacement du fauteuil.....	49
2.4.1. Introduction	49
2.4.2. Principe de l'asservissement	50
2.4.3. Mode de contrôle du fauteuil	51
2.4.4. Simulation du joystick par logique floue	52
2.4.4.1. Introduction	52
2.4.4.2. Structure	53
2.4.4.3. Normalisation	54
2.4.4.4. Fuzzification	54
2.4.4.5. Inférence	57
2.4.4.6. Défuzzification	58
2.4.4.7. Fonctionnement arrière	59
2.4.4.8. Essais en simulation du module de logique floue	60
2.4.4.9. Conditionnement des tensions	61
2.4.5. Régulation	61
2.4.5.1. Introduction	61
2.4.5.2. Détermination de l'amplitude de la position simulée du joystick	61
2.4.5.3. Détermination de l'orientation de la position simulée du joystick	62
2.4.5.4. Résultats	64
2.5. Conclusion	64
CHAPITRE 3 : FONCTIONNALITES AUTONOMES	65
3.1. Introduction	66
3.2. Franchissement automatique de passage étroit.....	66
3.2.1. Principe	66
3.2.2. Méthodes de détection des passages étroits	67
3.2.2.1. Méthode des demi-cercles	67
3.2.2.2. Méthode de regroupement en ensembles	69
3.2.2.3. Contrôle de la validité des ensembles	71
3.2.2.4. Détermination du sens de passage	74
3.2.3. Choix et suivi d'un passage étroit	75
3.2.4. Méthode de génération de trajectoire	76
3.2.4.1. Détermination des points cibles	77
3.2.4.2. Détermination des zones	78
3.2.4.3. Position et orientation des zones	79
3.2.5. Résultats	80
3.3. Suivi de mur	82
3.3.1. Principe	82
3.3.2. Analyse de l'environnement	83

3.3.3. Détermination du point cible	84
3.3.3.1. Distance de sécurité	85
3.3.3.2. Direction du suivi	85
3.3.3.3. Vitesse d'avance du fauteuil	86
3.3.4. Choix de l'utilisateur	86
3.3.5. Résultats	86
3.3.6. Amélioration de la trajectoire	88
3.4. Conclusion	90
CHAPITRE 4 : COMMANDE DEICTIQUE	91
4.1. Introduction	92
4.2. Conception de l'interface	92
4.2.1. Modalités de l'interaction humain-machine	92
4.2.2. Caméra vidéo	93
4.2.3. Organe de commande	94
4.2.4. Structures de l'affichage	94
4.2.4.1. Affichage avec menu des tâches	94
4.2.4.2. Affichage synthétique	95
4.2.4.3. Priorité entre les modes	97
4.3. Projection des points de l'image vidéo dans le repère du fauteuil	97
4.3.1. Analyse de la zone observée par la caméra	97
4.3.2. Correspondance par approximation linéaire	100
4.3.3. Correspondance entre deux plans	103
4.3.4. Conversion d'une localisation en point de l'image vidéo	105
4.4. Affichage des éléments sur l'écran	106
4.4.1. Représentation d'un passage étroit dans l'image vidéo	106
4.4.1.1. Introduction	106
4.4.1.2. Analyse du contexte de perspective	107
4.4.1.3. Effet de profondeur dans l'image vidéo	108
4.4.1.4. Effets de la vue en plongée	110
4.4.1.5. Représentation finale du passage étroit dans l'image vidéo	111
4.4.2. Représentation du suivi de mur dans l'image vidéo	112
4.5. Conclusion	113
CHAPITRE 5 : EVALUATION	115
5.1. Introduction	116
5.2. Présentation de l'assistance à des utilisateurs potentiels	117
5.3. Evaluation des performances de l'association Humain Machine	119
5.3.1. Introduction	119
5.3.2. Protocole expérimental	119
5.3.3. Critères de performance	120
5.3.3.1. Analyse temporelle	120
5.3.3.2. Fréquence d'utilisation des modalités	121
5.3.3.3. Indice d'inconfort	121
5.3.4. Charge de travail	121

5.3.5. Résultats	123
5.3.5.1. Durée et fréquence des modes de commande	123
5.3.5.2. Critère d'inconfort	124
5.3.5.3. Critère de charge de travail	125
5.3.6. Conclusion	126
5.4. Evaluation de la charge cognitive de l'utilisateur	127
5.4.1. Introduction	127
5.4.2. Protocole expérimental	127
5.4.3. Tâches secondaires	129
5.4.4. Résultats	129
5.4.4.1. Charge attentionnelle	129
5.4.4.2. Capacité décisionnelle	132
5.5. Discussion	135
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	137
ANNEXE A : MODE DE CHANGEMENT DE REPERE	141
ANNEXE B : FORMAT DES TENSIONS DU JOYSTICK	142
REFERENCES	145

Tables des Figures

Fig. 1.1 : Mister Ed (a), NavChair (b), Tao-2 (c).	4
Fig. 1.2 : SWCS (a), Architecture IntellWheels (b).....	5
Fig. 1.3 : Exemple de codeur optique (a) avec son schéma de principe (b).	6
Fig. 1.4 : Capteur de contact, type « Bumper ».	6
Fig. 1.5 : Télémètre Infrarouge IR (a), Télémètre Ultrason (b).	7
Fig. 1.6 : Télémètre laser à balayage (a) et un exemple de mesures obtenues (b).	7
Fig. 1.7 : Exemples de Caméras.	7
Fig. 1.8 : RobChair (a), GRASP (b).	8
Fig. 1.9 : Exemple de champs de force utilisés dans la méthode des champs de potentiel, d'après (Filliat 2004).....	9
Fig. 1.10 : Méthode VFH, Carte locale.	10
Fig. 1.11 : Méthode VFH, Histogramme.	10
Fig. 1.12 : Structure utilisée pour localiser le fauteuil dans l'environnement, d'après (Stefanov, Avtanski, et Zenn Bien 2004).	12
Fig. 1.13 : Joystick standard (a), Joystick au menton (b).	13
Fig. 1.14 : Interface du prototype WAD commandé à partir d'un joystick, (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006).....	13
Fig. 1.15 : Capteur appui tête.	14
Fig. 1.16 : Capteur de souffle.	14
Fig. 1.17 : Interface du prototype Wheelesley utilisant un capteur tout ou rien, (Yanco 1998).	14
Fig. 1.18 : Interface (EOG) du prototype Wheelesley (Yanco 1998) (a), et du prototype SIAMO (Barea et al. 2002) (b).	15
Fig. 1.19 : Prototype RoboChair (Tsui et al. 2007) (a), avec le capteur EOG - EMG intégré à un bandeau (b).	15
Fig. 1.20 : Prototype BCW (a), avec son capteur BCI (b), et son interface (c).	16
Fig. 1.21 : Prototype LURCH (a), avec son interface (b).	16
Fig. 1.22 : Prototype Watson (Matsumoto, Ino, et Ogasawara 2001).....	17
Fig. 1.23 : Principe de la reconnaissance vocale du prototype ezGo (Coelho et Braga 2009).	18
Fig. 1.24 : Prototype TDS-PWC.....	18
Fig. 1.25 : Prototype Vahm-1(a), Prototype Vahm-2 (b).....	20
Fig. 1.26 : Prototype Vahm-3.	20
Fig. 1.27 : Plateforme mobile, (P. E. Trahanias et al. 1997).....	23
Fig. 1.28 : Principe de fonctionnement de l'interface proposée dans (Sekimoto, Tsubouchi, et Yuta 1997).	24
Fig. 1.29 : Robot mobile et marqueurs vus par la caméra (a), Correspondance entre un point de l'écran en position de l'environnement (b).	24
Fig. 1.30 : Interface de pilotage, (Nadrag 2011).....	25

Fig. 1.31 : Séquence de déplacement du bras robotisé (X. Gao et al. 2011).....	26
Fig. 1.32 : Bras robotisé (a), avec un aperçu de l'interface (b).	26
Fig. 1.33 : Visiocasque (a), avec une représentation virtuelle de l'environnement (b).	27
Fig. 1.34 : Système AVISO, (Leroux et al. 2007).	27
Fig. 1.35 : Projet KARES II, (Bien et al. 2004).	28
Fig. 1.36 : Casquette permettant d'analyser le regard de l'utilisateur.	28
Fig. 1.37 : Interface de pilotage du projet KARES II, (Bien et al. 2004).....	29
Fig. 1.38 : Panel permettant à l'utilisateur d'établir son ordre.....	29
Fig. 1.39 : Principe de l'interface projetée (a), avec un aperçu de l'interface (b).	30
Fig. 2.1 : Structure matérielle de l'assistance à la conduite sur le prototype Vahm-3.	34
Fig. 2.2 : Prototype Vahm-3.	35
Fig. 2.3 : Architecture logicielle : structure multi-agent.	36
Fig. 2.4 : Les capteurs lasers à balayage URG04LXUG01 et URG04LX.	38
Fig. 2.5 : Répartition des points de mesure pour un capteur laser.	38
Fig. 2.6 : Aperçu des mesures laser sur une cartographie.	39
Fig. 2.7 : Aperçu de la zone contenant les obstacles avec la cartographie laser associée.	40
Fig. 2.8 : Perception de la poubelle noire réfléchissante par le capteur laser.	40
Fig. 2.9 : En haut, les trois couloirs tests, et en bas les cartographies laser associées.	41
Fig. 2.10 : Test sur la résolution du capteur laser.	42
Fig. 2.11 : Positionnement des repères des capteurs laser sur le fauteuil.....	43
Fig. 2.12 : Transformations des changements de repère.	44
Fig. 2.13 : Cartographie après le changement de repère avec les premières estimations.	45
Fig. 2.14 : Disposition des planches de bois pour effectuer l'étalonnage des capteurs.	45
Fig. 2.15 : Données lasers superposées après étalonnage.	46
Fig. 2.16 : Structure de mémorisation des données lasers.	46
Fig. 2.17 : Chevauchement des visions des capteurs lasers.	47
Fig. 2.18 : Illustration du problème des points pics.	48
Fig. 2.19 : Méthode de filtrage des points pics.	48
Fig. 2.20 : Mesures laser exprimées dans le repère global après filtrage.	49
Fig. 2.21 : Architecture de l'asservissement du fauteuil.	50
Fig. 2.22 : Interface de la commande manuelle reproduit par notre application.	52
Fig. 2.23 : Structure de la logique floue.....	53
Fig. 2.24 : Ensemble flou associé à l'amplitude ρuN	54
Fig. 2.25 : Correspondance des fonctions d'appartenance liées à l'amplitude avec une position simulée d'un joystick.	55
Fig. 2.26 : Ensemble flou associé à l'orientation θuN	55

Fig. 2.27 : Correspondance des fonctions d'appartenance liées à l'orientation avec une position simulée d'un joystick.	56
Fig. 2.28 : Conditionnement de l'orientation de la position simulée du joystick.	59
Fig. 2.29 : Essai en simulation du module de logique floue.	60
Fig. 2.30 : Détermination de la commande en amplitude à partir de ρe	62
Fig. 2.31 : Trajectoire du fauteuil à $K = K_{osc}$	63
Fig. 2.32 : Trajectoire obtenue avec $K_i=0$, $K_p=4$ et $K_d=11$ (Angle de départ de 40°).	64
Fig. 3.1 : Méthode de détection des points frontières par demi-cercles.....	68
Fig. 3.2 : Affichage des points frontières avec la méthode des demi-cercles.	68
Fig. 3.3 : Détection des passages étroits avec la méthode des demi-cercles.....	69
Fig. 3.4 : Répartition des points en ensembles.	70
Fig. 3.5 : Détection des passages étroits avec la méthode de regroupements en ensembles.....	70
Fig. 3.6 : Exemple de détection de passage étroit avec la méthode des demi-cercles (a et b) et avec la méthode de regroupement en ensembles (c et d).	71
Fig. 3.7 : Détection des passages dans l'environnement par 3 télémètres laser : détection des ensembles (a); recherche des passages étroits(b).....	72
Fig. 3.8 : Détection des passages après modifications : détection des ensembles (a), recherche des passages étroits (b).	72
Fig. 3.9 : Aperçu de l'environnement complexe.	73
Fig. 3.10 : Recherche de passages étroits dans un environnement complexe sans validation.	73
Fig. 3.11 : Recherche de passages étroits dans un environnement complexe avec validation.....	73
Fig. 3.12: Caractérisation d'un passage étroit.	74
Fig. 3.13 : Configuration dans laquelle le sens de franchissement est incorrect.	74
Fig. 3.14 : Méthode pour déterminer le sens de franchissement d'un passage étroit.	75
Fig. 3.15 : Contrôle de distance lors du suivi d'un passage étroit.	76
Fig. 3.16 : Position des points cibles par rapport au passage étroit visé (en mm).	77
Fig. 3.17 : Gabarit des zones avec leurs points cibles (en mm).....	78
Fig. 3.18 : Transformation des zones en fonction du centre du passage étroit.	79
Fig. 3.19 : Affichage des zones et points cibles lors d'un franchissement automatique.	80
Fig. 3.20 : Franchissement automatique de passage étroit présentant la vision de départ (à gauche) associée à la trajectoire effectuée (à droite).....	81
Fig. 3.21 : Détermination des distances significatives du suivi de mur.....	84
Fig. 3.22 : Exemple de parcours type avec le suivi de mur.	87
Fig. 3.23 : Première situation mettant en échec le suivi de mur.	87
Fig. 3.24 : Deuxième configuration où le suivi de mur peut entraîner une collision.	88
Fig. 3.25 : Ajout des points de contrôle.....	89
Fig. 3.26 : Trajectoire obtenue avec deux points de contrôle (en pointillés) comparée à la trajectoire obtenue précédemment (en trait plein).	90

Fig. 4.1 : Interaction humain-machine	93
Fig. 4.2 : Caméra VX-7000 avec son image vidéo.	93
Fig. 4.3 : Inclinaison de la caméra.	94
Fig. 4.4 : Première interface réalisée mettant en œuvre l'approche déictique.	95
Fig. 4.5 : Deuxième interface réalisée mettant en œuvre l'approche déictique.	96
Fig. 4.6 : Zones de l'image vidéo.	97
Fig. 4.7 : Projection de la zone basse dans le repère global.	98
Fig. 4.8 : Périmètre de vision en pratique.	99
Fig. 4.9 : Estimation de la projection de la zone basse dans le repère global.	99
Fig. 4.10 : Correspondance de la zone haute de l'image vidéo dans le repère global.	100
Fig. 4.11: Mesure des angles A_h et A_v à partir de la position en pixel $\{i, j\}$ de l'image vidéo.	100
Fig. 4.12 : Correspondance entre un point à l'écran et son emplacement dans le repère global.	101
Fig. 4.13: Distance limite de la zone projetée dans l'environnement.	102
Fig. 4.14 : Schéma de la conversion Image Vidéo/Environnement, vues sur l'axe y-z et x-y.	103
Fig. 4.15 : Conversion Image Vidéo/Environnement.	103
Fig. 4.16 : Visualisation des passages sur l'image vidéo.	106
Fig. 4.17 : Projection des points de la structure dans le repère global, vue 3D.	107
Fig. 4.18 : Points de fuite de l'image vidéo.	108
Fig. 4.19 : Projection des points définissant un passage étroit dans le repère global, plan y-z.	109
Fig. 4.20 : Représentation de passages étroits en tenant compte uniquement de l'effet de profondeur.	110
Fig. 4.21 : Projection sur l'axe des x des points du passage étroit dans le repère global.	110
Fig. 4.22 : Représentation de passages étroits en tenant compte uniquement de la vue en plongée.	111
Fig. 4.23 : Représentation finale des passages étroits dans l'image vidéo.	112
Fig. 4.24 : Affichage sur l'interface des éléments significatifs.	112
Fig. 5.1 : Essai à l'AFM.	118
Fig. 5.2 : Parcours à effectuer avec les fonctionnalités automatiques lors de la première série d'essais.	120
Fig. 5.3 : Questionnaire TLX : évaluation des critères caractérisant la charge de travail.	122
Fig. 5.4 : Questionnaire TLX : établissement du profil du sujet.	122
Fig. 5.5 Parcours à effectuer avec les fonctionnalités automatiques.	128
Fig. 5.6 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite avec assistance (session 1).	129
Fig. 5.7 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite manuelle (session 1).	130
Fig. 5.8 : Moyennes des temps de réaction et pourcentages d'erreurs de l'ensemble des sujets pour chaque mode de conduite (session 1).	130
Fig. 5.9 : Moyennes des temps de réaction (en ms) de l'ensemble des sujets pour chaque condition en conduite avec assistance (session 1).	132
Fig. 5.10 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite avec assistance (session 2).	133
Fig. 5.11 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite manuelle (session 2).	133

Fig. 5.12 : Moyennes des temps de réaction et pourcentage d'erreurs de l'ensemble des sujets pour chaque mode de conduite (session 2).	134
Fig. 5.13 : Moyennes des temps de réaction (en ms) de l'ensemble des sujets pour chaque condition en conduite avec assistance (session 2).	135

Tables des Tableaux

Tableau 2.1 : Première estimation des emplacements des capteurs laser dans le repère global.	44
Tableau 2.2 : Paramètres affinés des changements de repère.	46
Tableau 2.3 : Matrice d'inférence.	58
Tableau 5.1 : Analyse temporelle ; les temps sont en secondes.	123
Tableau 5.2 : Analyse des actions effectuées.	124
Tableau 5.3 : Analyse de l'indice d'inconfort.	125
Tableau 5.4 : Analyse de la charge de travail.	126
Tableau 5.5 : Protocole expérimental pour chaque groupe.	128
Tableau 5.6 : Légende des actions de la chronologie	130
Tableau 5.7 : Test de Kruskal-Wallis, différence des moyennes de temps de réactions et des erreurs entre les modes de conduite (session 1).	131
Tableau 5.8 : Test de Kruskal-Wallis, différences entre les conditions de conduite avec assistance (session 1).	132
Tableau 5.9 : Test de Kruskal-Wallis, différences des moyennes de temps de réactions et des erreurs entre les modes de conduite (session 2).	134
Tableau 5.10 : Test de Kruskal-Wallis, différence entre les conditions en conduite avec assistance (session 2).	134

Tout d'abord, je tiens à remercier Mr Guy Bourhis, directeur du laboratoire d'automatique humaine et de sciences comportementales (LASC), et mon directeur de thèse, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et sans qui je n'aurais pu mener à bien mes travaux de recherche.

J'exprime mes sincères remerciements à Mme Odile Horn, ma co-directrice de thèse, pour son soutien tout au long de mes travaux par ses conseils éclairés et sa rigueur.

Ensuite, je remercie également Mr Philippe Hoppenot, Professeur à l'université d'Evry Val d'Essonne et Mr Laurent Delahoche, Maître de Conférences HDR à l'université de Picardie Jules Verne, pour avoir accepté d'être mes rapporteurs.

J'adresse mes remerciement à Mr Philippe Bidaud, Professeur à l'université Pierre et Marie Curie, pour avoir accepté d'examiner mes travaux de thèse.

Je tiens à remercier Mr Vincent Monfort, Maître de Conférences au LASC, pour avoir avec accepté d'examiner mes travaux de thèse et pour ses conseils en matière d'évaluation cognitive.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes m'ayant apporté conseils au cours de ces années, notamment, Mr Sylvain Van Wassenhove et toute l'équipe de l'association française contre la myopathie (AFM) pour m'avoir reçu chaleureusement et permis de présenter notre fauteuil.

Je remercie Mr Régis Grasse, ingénieur au LASC, pour son aide et ses conseils techniques avisés.

INTRODUCTION

Aujourd'hui, beaucoup de personnes handicapées ont des difficultés à conduire leur fauteuil électrique avec un joystick standard. En France, une étude menée auprès de personnes tétraplégiques (Brochard et al. 2007) montre que l'usage des fauteuils roulants électriques est très restreint malgré une forte demande, et nécessite une grande personnalisation du fauteuil, notamment en adaptant les organes de commande à la personne, comme par exemple avec un joystick au menton, au pied, ou un mini-joystick hyper-sensible. Aux Etats-Unis, une étude clinique, présentée dans (Fehr, Langbein, et Skaar 2000), montre que de 9 à 10% des personnes lourdement handicapées ont de grandes difficultés à utiliser un fauteuil électrique standard. Une étude approfondie auprès des médecins prescripteurs (R. C. Simpson, LoPresti, et Cooper 2008) chiffre entre 1,4 et 2,1 millions les personnes étant dans ce cas. Dans l'objectif de rendre la mobilité à ces personnes, de nombreuses recherches ont été menées depuis la fin des années 80 sur le développement de fauteuils intelligents (R. C. Simpson 2005). Celles-ci proposent différentes approches dans la conception d'aide à la mobilité à partir de différents types de commande.

Malheureusement très peu de ces prototypes, et uniquement pour des fonctionnalités simples, ont abouti à de réels progrès pour les utilisateurs via un transfert technologique. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment les contraintes d'acceptabilité, de fiabilité, de sécurité et de coût. Dans ce contexte, notre objectif est de concevoir une assistance à la mobilité pour fauteuil roulant électrique proposant des fonctionnalités de navigation semi-automatiques en respectant ces contraintes. Pour cela, nos fonctionnalités sont développées à partir d'une structure légère pouvant s'adapter à tout type de fauteuil roulant électrique standard et d'une interface humain-machine ergonomique. Pour établir cette dernière, nous implémentons une commande « déictique » qui consiste à fournir un aperçu de l'environnement sur lequel l'utilisateur montre ses objectifs, le fauteuil réalisant automatiquement les actions correspondantes. La conduite devient alors séquentielle : l'utilisateur peut conduire en mode manuel lors de déplacements simples et utilise les fonctionnalités en indiquant l'élément correspondant sur l'interface lorsqu'il en a besoin, ainsi le pilotage se compose d'une alternance de commandes manuelles et d'indications sur l'interface. Par ailleurs, tout contact sur le joystick rend immédiatement le contrôle du fauteuil à l'utilisateur afin qu'il ne se sente pas prisonnier de l'assistance.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres. Le premier présente un état de l'art sur le développement des fauteuils roulants électriques intelligents en décrivant les technologies, les interactions humain-machine et les fonctionnalités autonomes employées. Puis, dans une seconde partie, nous détaillons le concept de l'approche déictique et ses applications dans plusieurs domaines afin de comprendre les avantages à utiliser cette approche pour la commande d'un fauteuil roulant intelligent. Le deuxième chapitre présente la structure matérielle et logicielle de notre prototype, le Vahm-3, son système de perception et la manière dont nous contrôlons le fauteuil en déplacement. Les fonctionnalités autonomes que nous proposons, le franchissement automatique de passage étroit et le suivi de mur

automatique, sont détaillées dans le troisième chapitre. Dans le quatrième, nous décrivons l'interface avec l'utilisateur par l'approche déictique et, plus particulièrement, les méthodes utilisées pour établir la commande de l'utilisateur et le retour d'information sur l'interface. Enfin, l'évaluation de notre assistance à la conduite est détaillée dans le cinquième chapitre. Elle s'est déroulée en trois étapes. La première, qualitative, a consisté à présenter et à faire essayer le système à des utilisateurs potentiels. Dans un second temps, on a comparé quantitativement les performances de la conduite assistée avec celles d'une conduite manuelle sur un panel de sujets valides (temps de parcours, nombre d'actions réalisées, indice d'inconfort...). La troisième étape a consisté à évaluer la charge cognitive des utilisateurs dans les deux modes de conduite en mesurant la charge attentionnelle et la capacité décisionnelle à partir d'une méthode de double tâche.

Chapitre 1 : ETAT DE L'ART

1.1. Introduction	4
1.2. Fauteuils Roulants Electriques Intelligents	4
1.2.1. Structure Générale	4
1.2.2. Capteurs	5
1.2.2.1. Capteurs proprioceptifs	6
1.2.2.2. Capteurs extéroceptifs	6
1.2.2.3. Association et choix des capteurs	8
1.2.3. Fonctionnalités d'aide à la mobilité	9
1.2.3.1. Evitement d'obstacle	9
1.2.3.2. Suivi de mur et de personne	10
1.2.3.3. Franchissement automatique de porte	11
1.2.3.4. «Back-tracking»	11
1.2.3.5. Positionnement sur un objectif	11
1.2.3.6. Conclusion	12
1.2.4. Interactions homme machine	12
1.2.4.1. Joysticks	12
1.2.4.2. Commandes de type Tout-ou-Rien	13
1.2.4.3. Commandes basées sur l'analyse des signaux physiologiques	14
1.2.4.4. Commandes basées sur l'analyse de la gestuelle ou du regard	17
1.2.4.5. Commandes par reconnaissance vocale	17
1.2.4.6. Commandes par la langue	18
1.2.5. Niveau d'autonomie de l'assistance à la mobilité	19
1.2.6. Les Prototypes Vahm	19
1.2.7. Conclusion	21
1.3. Approche déictique	22
1.3.1. Introduction	22
1.3.2. Approche déictique dans les applications robotiques	23
1.3.2.1. Robotique mobile	23
1.3.2.2. Réalité augmentée	25
1.3.3. Approche déictique pour les assistances robotisées aux personnes handicapées	27
1.3.3.1. Bras robotisés	27
1.3.3.2. Fauteuils roulants électriques intelligents	29
1.3.4. Conclusion	30
1.4. Conclusion	30

1.1. INTRODUCTION

Dans cet état de l'art, nous présentons dans une première partie les fauteuils roulants électriques intelligents (FREI) en détaillant les structures des prototypes existants, les capteurs utilisés, les fonctionnalités autonomes proposées, les interfaces de commande et les interactions humain-machine. Ensuite, dans une deuxième partie, nous décrivons l'approche déictique en présentant son concept ainsi que ses différentes utilisations dans plusieurs domaines.

1.2. FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES INTELLIGENTS

1.2.1. STRUCTURE GENERALE

Les fauteuils roulants électriques intelligents ont pour rôle de fournir une assistance à la mobilité à partir d'une perception de l'environnement et d'une cognition leur étant propre. Cette assistance s'effectue en parallèle et/ou de manière partagée avec la commande de l'utilisateur dans l'objectif d'adapter au mieux la tâche de conduite aux capacités de celui-ci. Au cours de leur développement, les différents prototypes de FREI ont connu de nombreuses évolutions, notamment dans leur conception et dans leur approche de l'assistance à la mobilité. Ces améliorations sont souvent liées aux progrès et à l'accessibilité technologique. Les premiers prototypes développés étaient basés sur une plateforme mobile robotisée équipée de différents capteurs comme des télémètres ultrasonores (US) ou infrarouges (IR) ou de l'odométrie, ainsi que d'une assise pour recevoir la personne. L'assistance à la mobilité fournie, issue de la robotique mobile, proposait des fonctionnalités autonomes de déplacement comme le suivi de mur ou l'évitement d'obstacle. Par exemple, le prototype Mister Ed est composé d'une plateforme robotisée équipée de capteurs ultrasons et d'une assise (Connell et Viola 1990) (Fig. 1.1-a).



Fig. 1.1 : Mister Ed (a), NavChair (b), Tao-2 (c).

Par la suite de nombreux projets ont été développés autour de fauteuils électriques du commerce équipés d'un ordinateur et de différents capteurs s'intégrant dans leur structure.

Leur avantage est d'être conçu à partir d'un fauteuil déjà adapté à l'humain. Par exemple, le NavChair (Levine et al. 1999) est un prototype conçu à partir du modèle Lancer™ équipé de capteurs ultrasons et d'un ordinateur (Fig. 1.1-b). Ou encore, le prototype Tao-2 (Gomi et Griffith 1998) est conçu à partir du fauteuil MC-13P de Suzuki et équipé de bumpers, de capteurs ultrasons, d'un système de vision par caméra, et d'un ordinateur (Fig. 1.1-c). De nombreux autres prototypes ont été établis qui diffèrent par les commandes possibles, les modes de navigation choisis, la nature des environnements envisagés et les méthodes de traitement des données (Stefanov, Avtanski, et Zenn Bien 2004).

Certains travaux plus récents se tournent vers la conception de structures indépendantes plus légères, susceptibles de s'adapter à tous types de fauteuils électriques et fournissant des fonctionnalités intelligentes spécifiées. Ainsi le SWCS (R. C. Simpson et al. 2004) propose une assistance à la navigation à partir d'un système constitué de capteur US, IR et Bumper commandé par un ordinateur (Fig. 1.2-a). Ou encore, dans (Braga et al. 2008) une architecture modulaire est proposée, l'IntellWheels (Fig. 1.2-b), composée d'une carte électronique gérant des capteurs ultrasons. Elle permet le contrôle du fauteuil en se connectant au matériel existant d'un fauteuil du commerce, et communique avec un ordinateur qui sert d'interface avec l'utilisateur. L'architecture a été conçue de manière à accepter différents types d'organes de contrôle. Par ailleurs, les progrès récents en termes de miniaturisation et de coût rendent certains types de capteur, comme les capteurs lasers à balayage ou les caméras, particulièrement adaptés à ce type de structure.

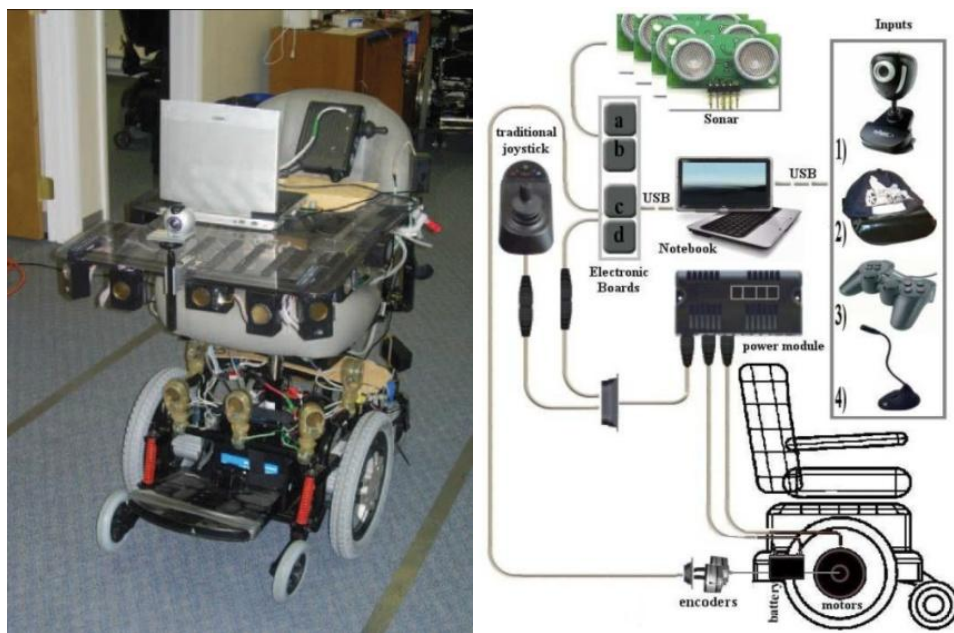


Fig. 1.2 : SWCS (a), Architecture IntellWheels (b).

1.2.2. CAPTEURS

Un fauteuil roulant électrique intelligent doit disposer d'un ensemble de capteurs lui permettant d'analyser l'environnement, ainsi que de mesurer son propre état. On distingue en la matière, les capteurs proprioceptifs et les capteurs extéroceptifs. Les premiers fournissent

des informations internes au fauteuil, comme l'évolution dynamique de ses organes (par exemple la vitesse des roues), et les seconds fournissent des informations externes au fauteuil, comme par exemple la mesure de distance séparant le capteur d'un obstacle de l'environnement.

1.2.2.1. CAPTEURS PROPRIOCEPTIFS

Le capteur proprioceptif le plus utilisé sur les FREI est le codeur optique qui équipe généralement les arbres moteurs fournissant ainsi des informations sur la position et la vitesse angulaire des roues du fauteuil (Fig. 1.3). Comme tout système odométrique, il est utilisé pour estimer la trajectoire du fauteuil lors de ses déplacements.



Fig. 1.3 : Exemple de codeur optique (a) avec son schéma de principe (b).

1.2.2.2. CAPTEURS EXTEROCEPTIFS

De nombreux types de capteurs extéroceptifs existent, et beaucoup d'entre eux ont été utilisés sur des prototypes de FREI. On peut les classer en plusieurs catégories, tout d'abord les capteurs de type contact, comme par exemple les « Bumpers » (Fig. 1.4). Ils fournissent une information tout ou rien lors d'un contact avec l'environnement et permettent de détecter une collision.



Fig. 1.4 : Capteur de contact, type « Bumper ».

Ensuite, les capteurs de type télémètre mesurent les distances entre des éléments de l'environnement et le capteur. Il existe principalement trois technologies de télémètres ayant été utilisées sur les FREI, le télémètre infrarouge (Fig. 1.5-a) le télémètre ultrason (Fig. 1.5-b) et le télémètre laser.



Fig. 1.5 : Télémètre Infrarouge IR (a), Télémètre Ultrason (b).

Plus récemment, les télémètres laser à balayage permettent d'obtenir un ensemble de mesures de distance tout autour du capteur (Fig. 1.6). Ce type de capteur que nous utilisons sera décrit de manière plus approfondie dans une partie suivante (cf. &2.3).

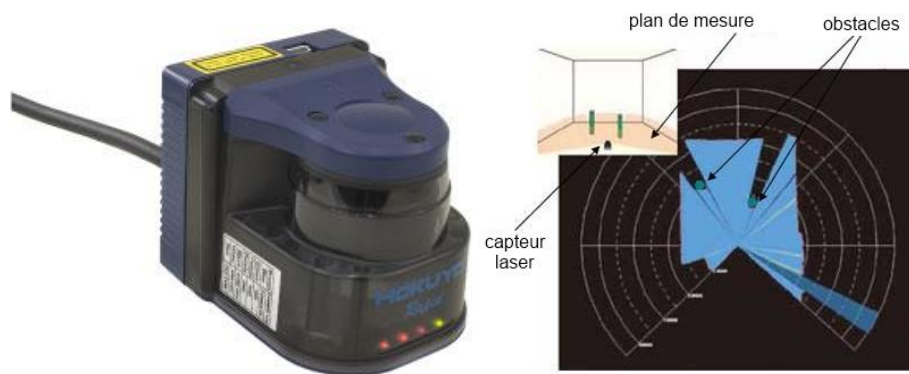


Fig. 1.6 : Télémètre laser à balayage (a) et un exemple de mesures obtenues (b).

Chaque technologie possède ses avantages et inconvénients, par exemple, les télémètres IR sont peu chers mais sont vulnérables aux variations de lumière et leur portée est relativement limitée. Les télémètres US ont, quant à eux, l'avantage de pouvoir mesurer une distance significative dans l'ensemble de leur cône d'émission. Enfin, les télémètres laser à balayage fournissent une excellente précision sur une grande quantité de données, l'inconvénient principal est que ce type de capteur est encore cher bien qu'il soit de plus en plus accessible.

Enfin, les capteurs vidéo fournissent une image de l'environnement très proche de celle que perçoit l'homme et contient un très grand nombre d'information, cependant de lourds traitements sont généralement requis pour les extraire (Fig. 1.7).



Fig. 1.7 : Exemples de Caméras.

1.2.2.3. ASSOCIATION ET CHOIX DES CAPTEURS

Il est fréquent d'employer la complémentarité de chaque capteur pour obtenir une perception enrichie. La plupart des développements de FREI associent plusieurs types de capteurs afin d'obtenir une perception adéquate à leur problématique. Ainsi, des prototypes peuvent associer une perception extéroceptive, permettant l'analyse de l'environnement, à une perception proprioceptive, facilitant le contrôle en déplacement du fauteuil. Par exemple, le NavChair (Levine et al. 1999) et le Vahm (Horn et Riemer 1994) sont équipés de capteurs ultrasons associés avec un système odométrique. D'autres prototypes utilisent la complémentarité de différents capteurs extéroceptifs afin d'extraire des informations de distance d'un objet identifié sur une image vidéo. L'utilisation de capteurs de type télémètre se révèle être un bon complément à la vision. En effet, l'image vidéo permet d'identifier l'objet et la direction où il se situe, et le télémètre précise à quelle distance. Ainsi, le prototype TAO (Gomi 1996) utilise un ensemble de capteurs infrarouges associé à plusieurs caméras vidéo, ou encore le GRASP (Fig. 1.8-b) est équipé d'un capteur laser à balayage, de capteurs infrarouges et de caméras (Parikh et al. 2004). D'autres associations permettent également de combler les faiblesses d'un type de capteur avec les avantages d'un autre. Par exemple, l'utilisation de télémètres ultrasons a pour avantage une perception des obstacles dans un large cône d'émission ce qui est efficace pour effectuer un évitement d'obstacle. Cependant, ils ne permettent pas de situer les obstacles avec précision, ce qui peut être gênant pour réaliser certaines tâches de navigation. Ainsi, compléter la perception à l'aide d'un télémètre ayant un cône d'émission restreint peut combler cet inconvénient. C'est le cas par exemple sur le RobChair (Fig. 1.8-a) qui associe une perception ultrasonore avec un ensemble de capteurs infrarouge, ainsi qu'un « Bumper » (Pires et Nunes 2002).

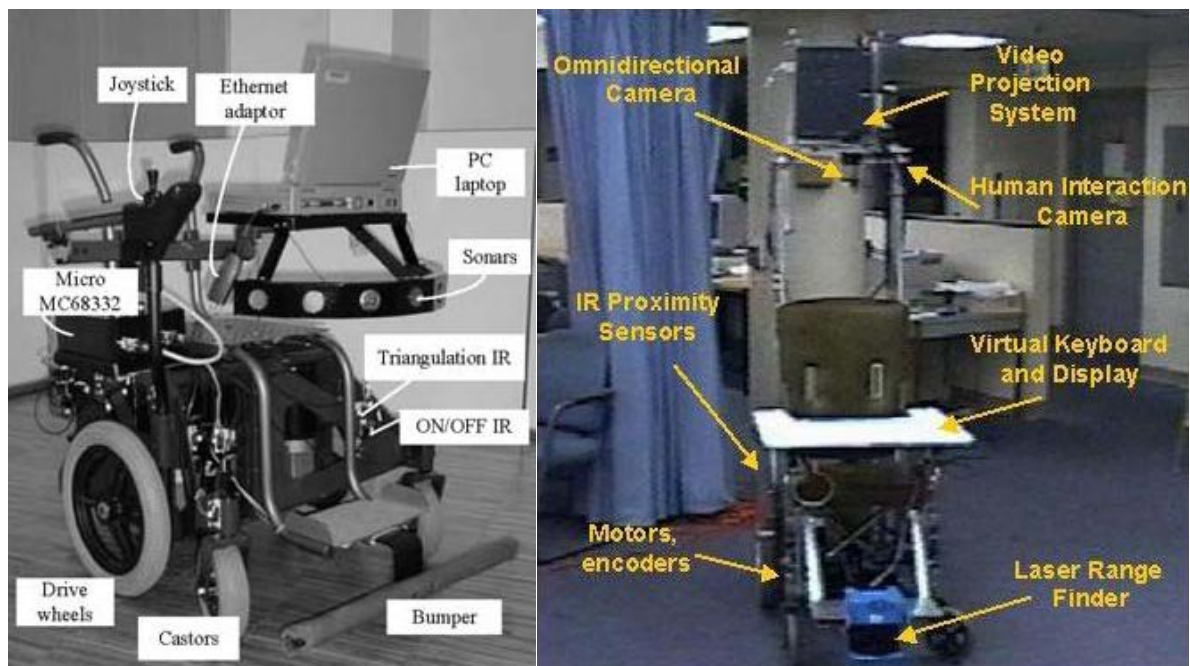


Fig. 1.8 : RobChair (a), GRASP (b).

1.2.3. FONCTIONNALITES D'AIDE A LA MOBILITE

L'objectif de ces fonctionnalités est de se substituer à la personne conduisant le fauteuil dans des situations particulières. Tout d'abord, les fonctionnalités peuvent aider l'utilisateur lors de manœuvres difficiles nécessitant un effort et une grande précision sur le joystick. Par exemple, la fonctionnalité d'évitement d'obstacle peut être employée pour garantir une navigation sans collision, une fonctionnalité de franchissement automatique de passage étroit assiste l'utilisateur lorsqu'il emprunte une porte étroite, ou encore, une fonctionnalité de Backtracking, permettant de revenir en arrière automatiquement sans avoir besoin de manœuvrer, peut être employée pour s'extraire d'une petite pièce. Ensuite, d'autres fonctionnalités peuvent alléger l'utilisateur dans des tâches simples mais longues et fastidieuses. Pour cela, la fonctionnalité de suivi de mur peut être employée pour longer un mur ou un couloir sur de longues distances sans fatigue, et la fonctionnalité de suivi de personne peut être utile à l'utilisateur comme à la tierce personne pour guider le fauteuil sans effort. Enfin, d'autres fonctionnalités d'assistance à la navigation permettent de manière globale de gérer un déplacement vers une position ciblée sur une interface en suivant une trajectoire prédéterminée ou en utilisant de manière autonome d'autres fonctionnalités.

1.2.3.1. EVITEMENT D'OBSTACLE

La fonctionnalité la plus proposée sur les FREI est l'évitement d'obstacle. Son rôle est de dévier le fauteuil de sa trajectoire pour éviter les collisions avec l'environnement. Il a été conçu à partir de différentes méthodologies, par exemple, la méthode des champs de potentiel (Pires et al. 1998) et (Urdiales et al. 2008) dont le principe est d'établir des champs de force répulsifs dans les zones obstruées et des champs de force attractifs dans les zones libres d'obstacles. La force résultante influe sur la direction que prend le fauteuil (Fig. 1.9).

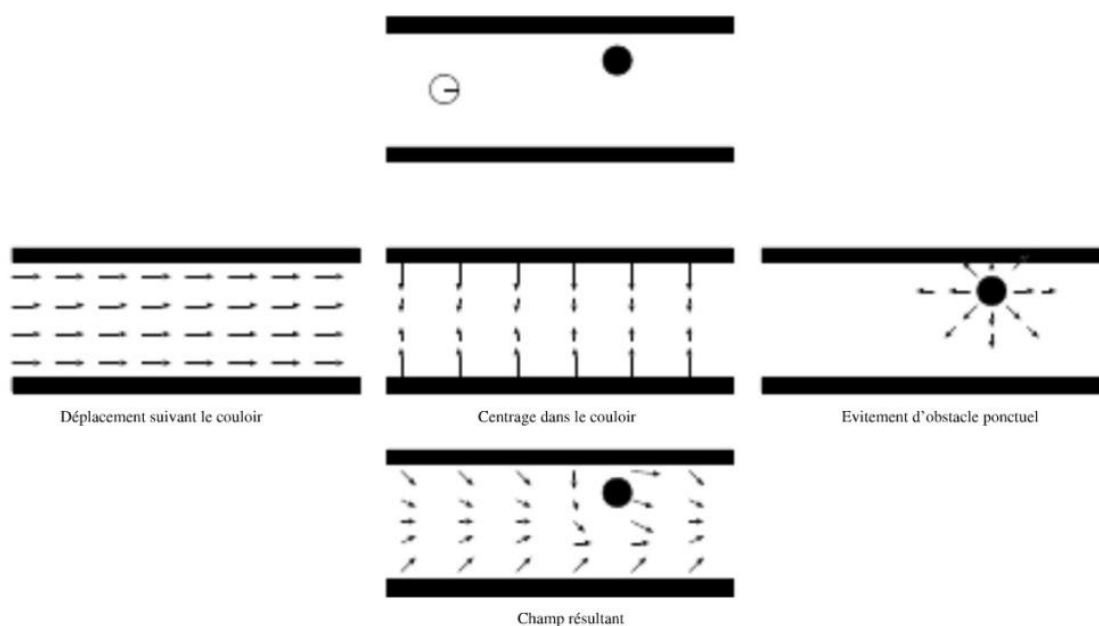


Fig. 1.9 : Exemple de champs de force utilisés dans la méthode des champs de potentiel, d'après (Filliat 2004).

Une autre méthode, le VFH (Vector Field Histogram) (Levine et al. 1999), (Borenstein et Koren 1991), utilise les données issues de capteurs ultrasons pour construire une grille locale de l'environnement. Lorsqu'un obstacle est perçu dans une case de la grille, celle-ci est incrémentée (Fig. 1.10). Les cases représentant un obstacle possèdent donc des valeurs importantes et les cases représentant un espace vide ont des valeurs nulles. Ensuite, la grille est découpée en secteurs angulaires, puis un histogramme est réalisé comptabilisant le nombre d'obstacles perçus pour chaque secteur angulaire (Fig. 1.11). Enfin, les secteurs angulaires ayant une valeur faible représentent les directions possibles que peut emprunter le fauteuil sans danger. La direction choisie correspond au secteur angulaire de ce type le plus proche de celle choisie par l'utilisateur.

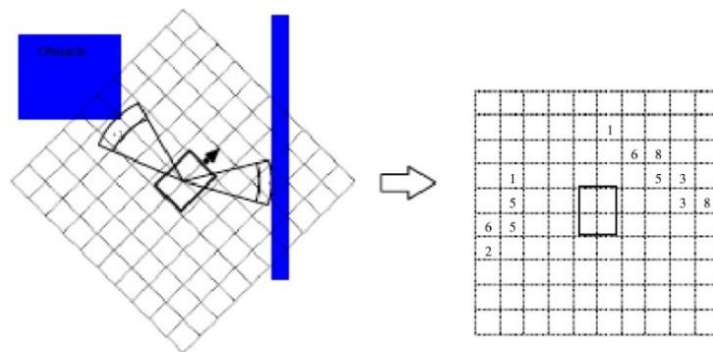


Fig. 1.10 : Méthode VFH, Carte locale.

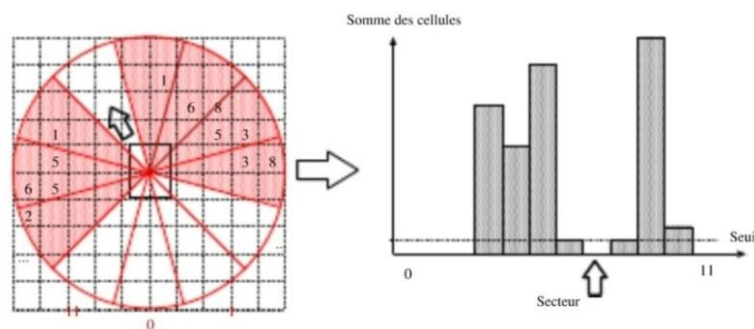


Fig. 1.11 : Méthode VFH, Histogramme.

Enfin, d'autres méthodes utilisent directement les distances des obstacles mesurées autour du fauteuil de manière réactive en respectant certaines règles simples (Bourhis et al. 2001), (Gomi et Griffith 1998). Par exemple, la vitesse d'avance du fauteuil est diminuée de manière proportionnelle à l'approche d'un obstacle en face, ou encore, le fauteuil est dévié vers la droite de manière proportionnelle à une distance d'un obstacle mesurée à gauche.

1.2.3.2. SUIVI DE MUR ET DE PERSONNE

Le suivi de mur et le suivi de personne sont dédiés à soulager l'utilisateur dans sa tâche de conduite sur de longs parcours. Dans le cas du suivi de mur, le fauteuil avance de manière à garder constante la distance le séparant du mur. Ainsi, dans (D. P. Miller et Slack 1995), les mesures issues de capteurs infrarouges sont utilisées pour maintenir le fauteuil à une distance de sécurité d'un mur indiqué par l'utilisateur. Dans le cas d'un suivi de personne, le fauteuil

doit maintenir une distance sensiblement constante entre le fauteuil et la personne suivie. Par exemple, dans (Argyros et al. 2002), la personne ciblée par l'utilisateur est identifiée sur l'image vidéo fournie par un système de vision panoramique. Le fauteuil est asservi en orientation de manière à centrer la personne sur l'image vidéo. Puis des mesures issues de capteur ultrasons sont utilisées pour adapter la vitesse d'avance du fauteuil de manière à rester à distance constante de la personne.

1.2.3.3. FRANCHISSEMENT AUTOMATIQUE DE PORTE

L'utilisateur peut souhaiter une assistance lors de passages délicats. C'est ce que procure le franchissement automatique de porte. Celui-ci peut être réalisé en tant qu'extension d'une autre fonctionnalité, comme sur le NavChair (Levine et al. 1999), où l'évitement d'obstacle permet d'orienter le fauteuil vers le centre de la porte quand l'utilisateur se dirige vers elle. Cette méthodologie est efficace tant qu'il n'y a pas de manœuvres complexes à effectuer. On trouve d'autres approches, plus autonomes, dans lesquelles l'utilisateur doit indiquer la porte sur une image vidéo en pointant sur les deux verticales de celle-ci (Rao et al. 2002). Une trajectoire est ensuite calculée et suivie avec un système d'odométrie afin de franchir la porte.

1.2.3.4. «BACK-TRACKING»

Lorsque le fauteuil se trouve face à un mur et dans l'impossibilité de faire demi-tour, le retour en arrière représente le seul moyen de se dégager. Il peut être réalisé automatiquement à partir des données odométriques qui permettent de mémoriser la trajectoire du fauteuil en continu. Lorsque l'utilisateur le demande, le fauteuil peut suivre la trajectoire inverse à celle mémorisée (D. P. Miller et Slack 1995).

1.2.3.5. POSITIONNEMENT SUR UN OBJECTIF

Cette fonctionnalité permet d'amener le fauteuil automatiquement dans la position qu'a choisie l'utilisateur via son interface. Certaines approches utilisent des techniques de localisation du fauteuil. Par exemple, dans (Stefanov, Avtanski, et Zenn Bien 2004), des caméras sont placées dans un environnement intérieur connu et observent le fauteuil équipé d'un marqueur (Fig. 1.12). La position et l'orientation du marqueur dans les images vidéo permettent de localiser le fauteuil dans l'environnement à partir d'un traitement d'image. Ensuite, l'utilisateur indique un emplacement à atteindre via son interface. Une trajectoire est déterminée à partir d'une cartographie contenant l'emplacement des obstacles, des murs et des portes et est suivie à partir des données odométriques.

Ce type de méthode nécessite généralement une base de connaissance de l'environnement et de nombreux capteurs ce qui la rend difficile à exploiter. Une deuxième approche consiste à reconnaître des éléments précis de l'environnement et à planifier une trajectoire par rapport à ce repère. Par exemple, dans (Crisman et Cleary 1998), on détecte un mur ou un coin, puis l'utilisateur choisit d'effectuer plusieurs actions via son interface comme « tourner autour de », « suivre », « aller à », etc., ce qui permet d'effectuer un ensemble de déplacements élémentaires de manière assistée.

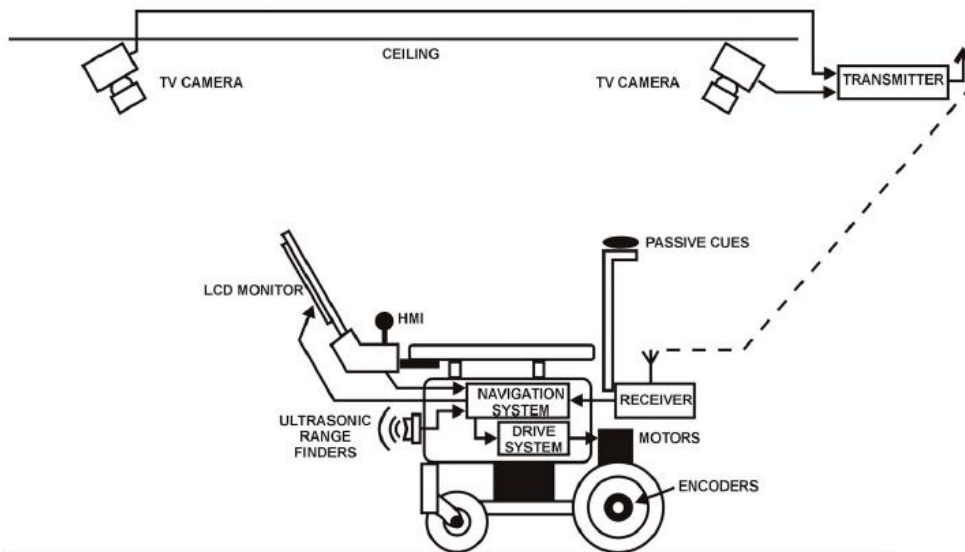


Fig. 1.12 : Structure utilisée pour localiser le fauteuil dans l'environnement, d'après (Stefanov, Avtanski, et Zenn Bien 2004).

1.2.3.6. CONCLUSION

Se substituant à l'homme pour réaliser une tâche de conduite de manière autonome, les fonctionnalités proposées sont susceptibles de soulager l'utilisateur dans différentes situations, notamment lors de manœuvres qui demanderaient une bonne précision en conduite manuelle ou pour de longs parcours qui nécessitent des efforts soutenus. Toutefois, même si les déplacements autonomes sont efficaces, l'utilisabilité de l'aide proposée dépend essentiellement de la manière dont elle est activée, d'où l'importance du choix des interactions homme-machine, de l'ergonomie de l'interface et du type d'organe de contrôle.

1.2.4. INTERACTIONS HOMME MACHINE

Le choix de la communication homme machine est primordial pour un système interagissant avec l'homme, et d'autant plus quand celui-ci est en situation de handicap. Elle doit être adaptée à la personne et doit fournir, du côté utilisateur, toutes les indications lui permettant de choisir l'action souhaitée, et du côté machine, toutes les informations nécessaires à l'exécution de la tâche demandée. Sa conception dépend essentiellement de la nature des fonctionnalités proposées (notamment de leur rôle et de leurs degrés d'autonomie), du type d'organe de contrôle permettant à l'utilisateur d'accomplir les interactions homme machine, et de l'interface présentée à l'utilisateur.

1.2.4.1. JOYSTICKS

L'organe de commande le plus utilisée est le joystick, (R. C. Simpson 2005), (D. P. Miller et Slack 1995). Une étude clinique, (Fehr, Langbein, et Skaar 2000), montre que 81% des fauteuils électriques standard sont conduit par un joystick classique (Fig. 1.13-a) et que 9% utilisent un joystick au menton ou à la tête (Fig. 1.13-b). L'avantage de ce type de commande est la manière intuitive dont on l'utilise. Cependant, il nécessite une certaine dextérité et un

contrôle continu, ce qui le rend difficilement utilisable aux personnes atteintes de certains types de déficiences lourdes. Des interfaces utilisant le joystick ont été développées pour des fauteuils intelligents, comme dans (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006), où l'approche consiste à montrer une carte de l'environnement à l'utilisateur sur laquelle il indique l'endroit où il souhaite se rendre (Fig. 1.14). Pour cela, il déplace un curseur avec le joystick et quand celui-ci reste immobile un certain temps, la pièce indiquée est sélectionnée.



Fig. 1.13 : Joystick standard (a), Joystick au menton (b).

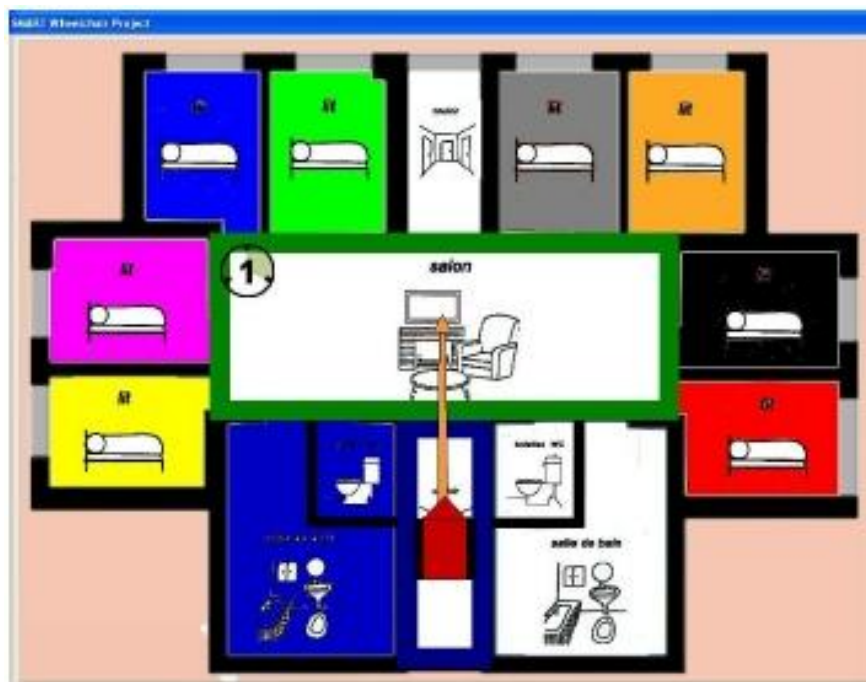


Fig. 1.14 : Interface du prototype WAD commandé à partir d'un joystick, (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006).

1.2.4.2. COMMANDES DE TYPE TOUT-OU-RIEN

Dans le cas où l'utilisateur ne peut pas utiliser un joystick, les capteurs tout ou rien constituent une alternative. Il existe des capteurs de contact (type Bumper) pour la tête (Fig. 1.15), des capteurs de souffle (Felzer et Nordmann 2007) (Fig. 1.16) et d'autres boutons poussoirs. Ils peuvent s'adapter à des déficiences motrices sévères grâce à l'information simple qu'ils fournissent. Néanmoins, ils nécessitent un travail plus conséquent sur l'interface

pour fournir une bonne communication. Ainsi, les fauteuils intelligents utilisant une commande tout ou rien sont équipés d'un écran pour communiquer avec l'utilisateur. Les interfaces créées pour ce type de commande utilisent une approche par « balayage » des informations (Bourhis et al. 2001), (Yanco 1998). Elle consiste à proposer les différentes options de navigation les unes après les autres sur un écran. L'utilisateur sélectionne ensuite l'action de son choix avec l'appui sur la commande (Fig. 1.17).



Fig. 1.15 : Capteur appui tête.



Fig. 1.16 : Capteur de souffle.

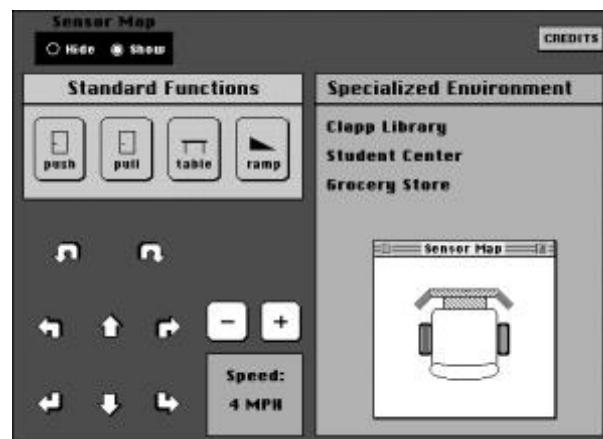


Fig. 1.17 : Interface du prototype Wheellesley utilisant un capteur tout ou rien, (Yanco 1998).

1.2.4.3. COMMANDES BASEES SUR L'ANALYSE DES SIGNAUX PHYSIOLOGIQUES

D'autres commandes plus élaborées sont basées sur l'acquisition et l'analyse des signaux physiologiques de type EOG, EMG ou EEG. Tout d'abord, l'utilisation de capteur EOG (Electro-Oculogramme), mesurant une différence de potentiels électriques induits par la rotation oculaire, permet après traitement d'extraire l'endroit observé par l'utilisateur sur l'interface. Ce type de commande est employé par plusieurs prototypes de fauteuils intelligents. Dans (Yanco 1998), un ensemble de capteurs EOG est utilisé afin de contrôler un

pointeur d'écran sur une interface aménagée (Fig. 1.18-a). L'utilisateur peut ainsi indiquer à l'aide du pointeur s'il veut avancer, reculer, tourner à gauche ou à droite, ou s'arrêter. Une approche similaire est proposée dans (Barea et al. 2002) dans laquelle les informations des capteurs EOG sont directement utilisées pour indiquer la direction à suivre. Si l'utilisateur regarde un point au loin, proche, à droite ou à gauche, le fauteuil avance, recule, tourne à droite ou tourne à gauche respectivement. Ici, l'interface sert uniquement de retour visuel (Fig. 1.18-b).

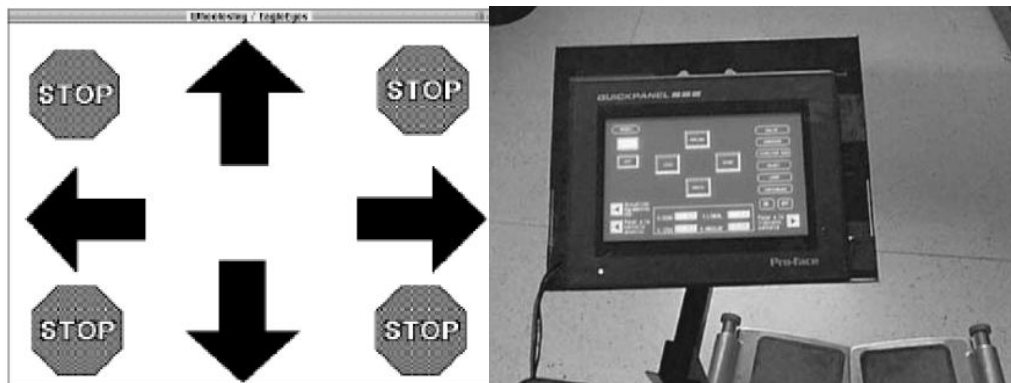


Fig. 1.18 : Interface (EOG) du prototype Wheelesley (Yanco 1998) (a), et du prototype SIAMO (Barea et al. 2002) (b).

Ensuite, d'autres ont utilisé des signaux de type EMG (Electromyogramme) mesurant l'activité électrique musculaire afin d'extraire des informations tout ou rien issues d'une contraction volontaire d'un muscle choisi. Par exemple, dans (Han et al. 2003), les signaux émis par les muscles à gauche et à droite de la nuque sont utilisés pour établir un contrôle du fauteuil. Ici, la contraction des deux muscles permet l'avance du fauteuil, la contraction du muscle gauche dirige le fauteuil vers la gauche, et similairement, la contraction du muscle droit fait tourner le fauteuil à droite. Une autre approche est proposée dans (Tsui et al. 2007) basée sur la fusion des informations EMG et EOG en utilisant les signaux EMG pour indiquer la direction à suivre (avance, droite, gauche...) et les signaux EOG pour ajuster la vitesse du fauteuil (Fig. 1.19).

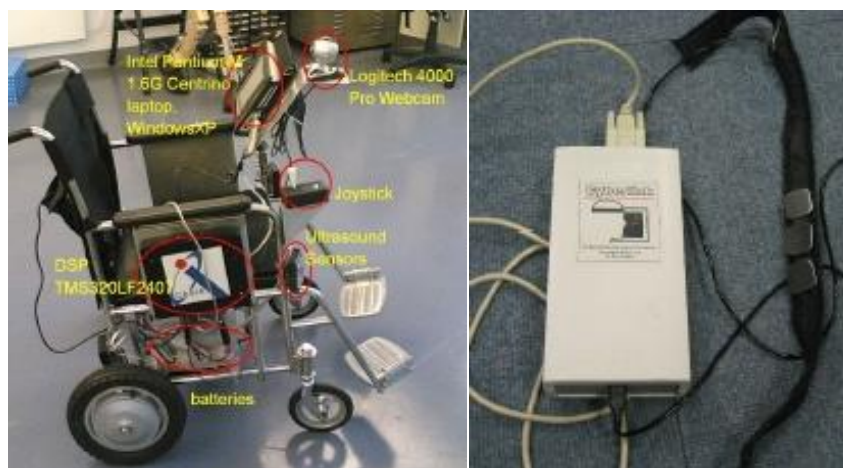


Fig. 1.19 : Prototype RoboChair (Tsui et al. 2007) (a), avec le capteur EOG - EMG intégré à un bandeau (b).

Enfin, d'autres prototypes utilisent des commandes basées sur l'utilisation des signaux EEG (Electro-encéphalogramme) qui mesure l'activité électrique du cerveau grâce à des électrodes placées sur le cuir chevelu. Par exemple, le prototype BCW (Rebsamen et al. 2006) (Fig. 1.20) et le prototype LURCH (Blatt et al. 2008) (Fig. 1.21) utilisent un capteur type BCI (Brain Computer Interface) permettant à l'utilisateur de contrôler l'interface présentée sur un ordinateur. Un système de localisation utilisant un ensemble de marqueurs (codes-barres placés dans l'environnement à des endroits clés, comme les portes) et un système odométrique, permettent à l'utilisateur d'enregistrer un ensemble de trajectoires prédéfinies. Celles-ci sont alors affichées sur une interface et sélectionnables à l'aide d'une commande de type BCI. Pour cela, l'utilisateur doit se concentrer sur l'élément de l'interface correspondant à la trajectoire désirée. L'inconvénient de ce type d'interface telle qu'elle est conçue actuellement est le manque de confort visuel. En effet, les éléments proposés sur l'interface sont balayés par un clignotement rapide pour solliciter l'utilisateur, ce qui peut se révéler déranger pour un usage prolongé.



Fig. 1.20 : Prototype BCW (a), avec son capteur BCI (b), et son interface (c).

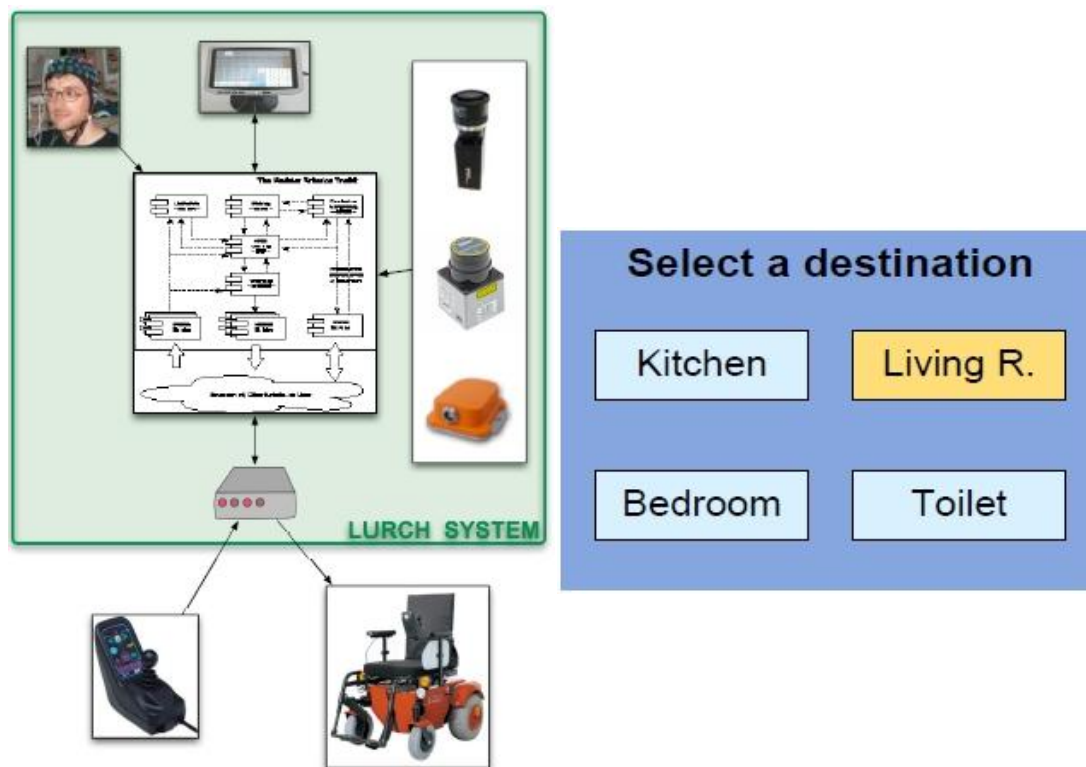


Fig. 1.21 : Prototype LURCH (a), avec son interface (b).

1.2.4.4. COMMANDES BASEES SUR L'ANALYSE DE LA GESTUELLE OU DU REGARD

L'échange entre l'homme et la machine ne repose pas forcément sur une structure matérielle. Des commandes basées sur l'analyse de l'utilisateur ont été conçues. C'est le cas dans (Mazo et al. 2000), où une caméra vidéo est utilisée pour l'observer. A partir d'un traitement de l'image, les orientations du visage et du regard de l'utilisateur sont extraites, puis utilisées afin de déterminer la direction que suivra le fauteuil. La commande est déterminée à partir des deux règles suivantes. Quand on désire tourner vers un endroit, on regarde l'endroit avant d'y aller, et, plus on regarde loin, plus on désire aller vite. Une méthode similaire est établie sur le prototype Watson (Fig. 1.22) dans (Matsumoto, Ino, et Ogasawara 2001) où la position angulaire du visage est également utilisée pour indiquer la direction. La vitesse d'avance du fauteuil est, quant à elle, déterminée à partir de l'écart entre l'angle d'orientation de la tête et l'angle du regard. Ainsi, la vitesse d'avance est maximale si le regard est aligné avec l'orientation du visage traduisant la focalisation de l'utilisateur vers une position. Et plus l'écart d'angle entre le regard et le visage est élevé plus le fauteuil ralentit. Par ailleurs, il dispose également d'une gestuelle particulière pour autoriser ou arrêter un déplacement. Pour cela, il utilise un « acquiescement de tête » pour démarrer la conduite, et une « secousse de tête » pour arrêter.

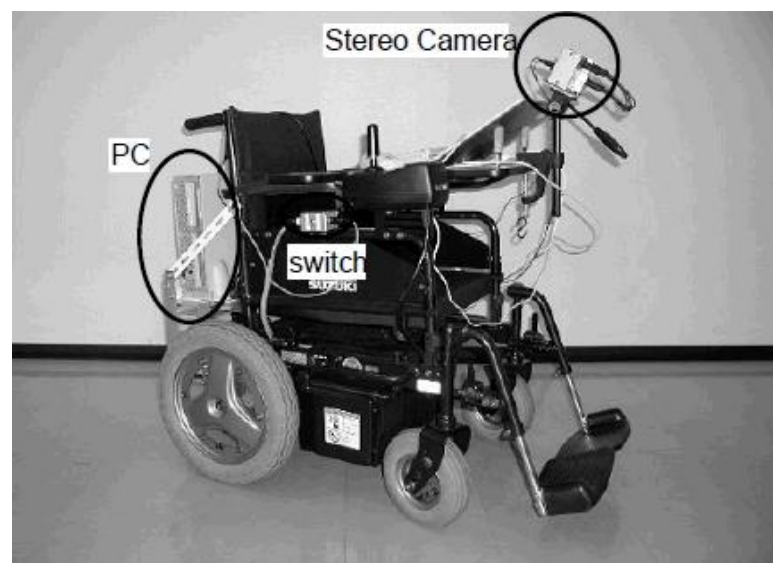


Fig. 1.22 : Prototype Watson (Matsumoto, Ino, et Ogasawara 2001).

1.2.4.5. COMMANDES PAR RECONNAISSANCE VOCALE

La reconnaissance vocale constitue aussi un mode de commande de fauteuil (Pires et al. 1998), (Fezari et Khati 2009). La voix de l'utilisateur est enregistrée par microphone, puis traitée à l'aide d'un système de reconnaissance vocale afin d'extraire un ensemble d'ordres élémentaires comme : avance, stop, tourne, vite, doucement... Les mouvements élémentaires sont complétés par une fonctionnalité d'évitement d'obstacle. La reconnaissance vocale étant vulnérable aux bruits issus de l'environnement, un système est proposé dans (Coelho et Braga 2009) afin de mesurer les bruits et de les éliminer dans la commande établie (Fig. 1.23). La reconnaissance vocale devient alors plus efficace.

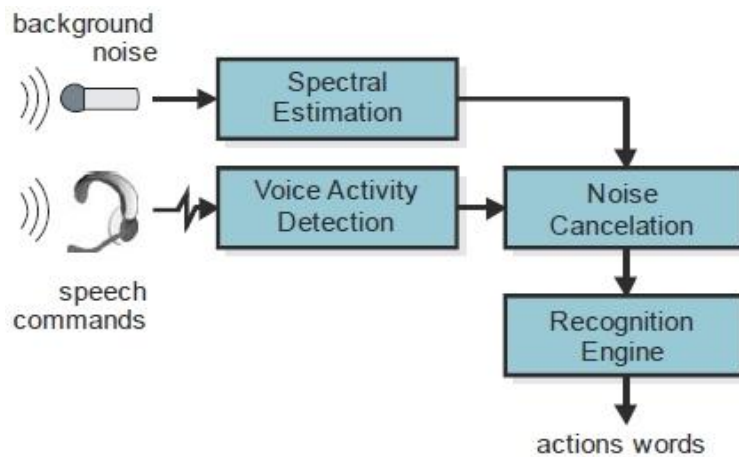


Fig. 1.23 : Principe de la reconnaissance vocale du prototype ezGo (Coelho et Braga 2009).

1.2.4.6. COMMANDES PAR LA LANGUE

Plus récemment, les commandes utilisant la langue sont apparues. Ainsi dans (Huo, Wang, et Ghovanloo 2008), on propose différents types de commande à partir de l'analyse des mouvements de la langue (Fig. 1.24). L'utilisateur porte un casque équipé de capteurs magnétiques ainsi qu'un aimant situé sur sa langue, ce qui permet d'obtenir la position de la langue par rapport à sa position au repos. Le premier type de commande proposée associe cinq mouvements (avance, recul, gauche, droite et position neutre) à la position de la langue correspondante. Ensuite, un second type de commande permet à l'utilisateur de combiner les cinq déplacements. Par exemple, il peut indiquer une commande pour tourner lorsque le fauteuil avance, et ainsi le fauteuil tourne et avance en même temps.

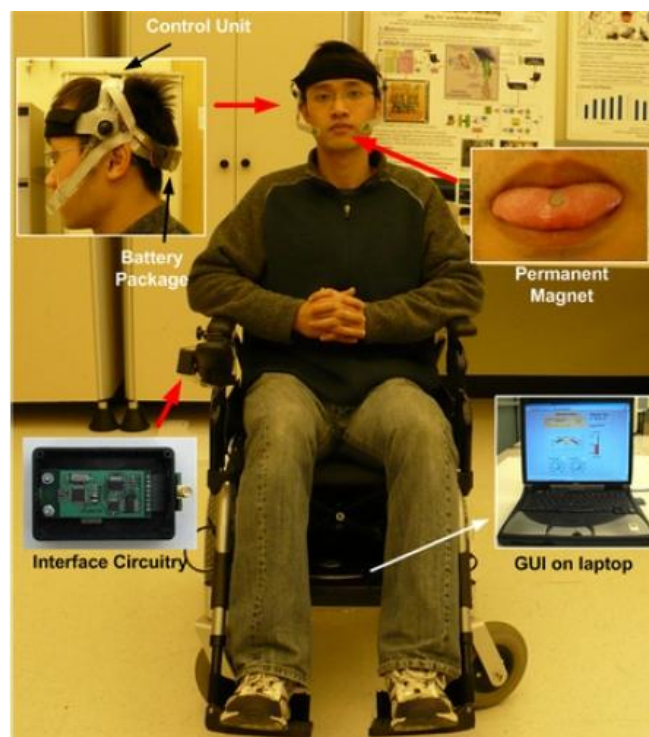


Fig. 1.24 : Prototype TDS-PWC.

1.2.5. NIVEAU D'AUTONOMIE DE L'ASSISTANCE A LA MOBILITE

Une des problématiques importantes lors du développement d'un fauteuil roulant électrique intelligent est le partage des tâches entre la personne handicapée et le fauteuil, et notamment le juste choix du degré d'autonomie des fonctionnalités proposées (Nisbet 2002), (Bourhis et Agostini 1998). En effet, il peut varier sur une plage allant d'un degré nul, dans le cas d'une conduite manuelle sans aucune forme d'assistance (fauteuil roulant électrique classique), à un degré maximal, dans le cas où l'intégralité des déplacements s'effectue automatiquement. Dans le cas où le degré d'autonomie est trop faible, l'intervention de l'homme est trop sollicitée et celui-ci peut avoir des difficultés à conduire. L'aide apportée est alors insuffisante. Dans le cas contraire, s'il est trop important, l'homme perd sa capacité décisionnelle. En effet, si toutes les situations rencontrées sont gérées de manière autonome sans faire appel à la cognition humaine, celui-ci peut se sentir dirigé contre sa volonté et ainsi ressentir de la réticence à utiliser ce type d'assistance.

Il est donc indispensable de rechercher une approche intermédiaire axée sur l'équilibre entre l'utilisateur et la machine. Ainsi, de nouvelles manières de concevoir l'aide à la conduite ont émergé, comme la conduite par succession de mouvements élémentaires (Crisman et Cleary 1998), (Yanco 1998), la conduite partagée (Levine et al. 1999) ou, récemment, la conduite assistée avec retour haptique (Hadj Abdelkader 2011). Dans cette optique, nous nous intéresserons aux approches semi-autonomes proposant un ensemble de fonctionnalités d'aide à la mobilité que l'utilisateur déclenche à partir d'une interface adaptée.

1.2.6. LES PROTOTYPES VAHM

Le projet Vahm (Véhicule Autonome pour personnes Handicapés Moteurs) est un projet de développement de fauteuil intelligent au sein du laboratoire d'automatique humaine et de sciences comportementales (L.A.S.C) de l'université Paul Verlaine de Metz. L'objectif est de fournir différents types d'assistance à la conduite pour des personnes ayant des difficultés à conduire à l'aide de commandes traditionnelles. Le premier prototype, Vahm-1 (Fig. 1.25-a), est un robot mobile « Robuter » équipé d'un siège et d'une perception réalisée à partir de la fusion de donnée issue de capteurs ultrasons associés à deux codeurs odométriques (Pruski et Bourhis 1991). Celui-ci présente une architecture logicielle « coopérative » (Agostini 1996) permettant de faire varier le niveau d'autonomie du robot en fonction de l'environnement et de la personne : selon les cas l'homme pouvait être superviseur d'un mouvement autonome du robot ou le robot superviseur d'un pilotage manuel

Le second prototype, Vahm-2 (Fig. 1.25-b), propose une instrumentation d'un fauteuil du commerce, le Power Push. Celui-ci dispose des mêmes capteurs que le modèle précédent ainsi que d'un système de vision monoculaire. Plusieurs fonctionnalités de navigation autonome ont été développées telles que l'évitement d'obstacle et le suivi de mur (Bourhis et al. 2001) en utilisant la fusion de données odométriques et ultrasonores pour contrôler le fauteuil dans l'environnement, puis, à partir d'une localisation du fauteuil grâce à l'observation de l'environnement par un système de vision (Horn, Courcelle, et Kreutner 2000).



Fig. 1.25 : Prototype Vahm-1(a), Prototype Vahm-2 (b).

Enfin, le troisième prototype, Vahm-3 (Fig. 1.26), est également une instrumentation d'un fauteuil du commerce, le Storm 3 du constructeur Invacare. Il est équipé de codeurs odométriques, de capteurs ultrasons, d'une caméra et d'un ordinateur embarqué. Il fournit également l'ensemble des fonctionnalités précédentes ainsi qu'une fonctionnalité de navigation présentée dans (Grasse 2007), utilisant une méthode de localisation basée sur l'utilisation de filtre particulaire. Actuellement, d'autres travaux s'effectuant en parallèle de l'étude présentée dans ce mémoire proposent une assistance à la conduite par un retour haptique fonction de la proximité des obstacles autour du fauteuil (Hadj Abdelkader 2011).



Fig. 1.26 : Prototype Vahm-3.

1.2.7. CONCLUSION

L'évolution de la technologie en général, de la fiabilité des capteurs et de l'électronique de contrôle, et également, l'amélioration de l'accessibilité à ces technologies ont permis aux fauteuils roulants électriques intelligents de beaucoup progresser depuis leur apparition (R. C. Simpson 2005). De nombreuses fonctionnalités complexes ont été établies qui n'ont cependant pas eu d'écho chez les utilisateurs. On peut incriminer le coût des dispositifs ou les imperfections de leurs développements mais il nous semble que le problème vient aussi de l'angle d'approche.

Deux critères nous semblent particulièrement importants. Le premier est l'adaptabilité. En effet, il existe un grand nombre de fauteuils et de technologies différentes. Le système proposé se doit donc d'être léger, adaptable sur tout type de fauteuil roulant électrique standard et pouvant être utilisé à partir de la plupart des organes de contrôle existants pour faciliter un transfert technologique. De plus, du fait de la très grande diversité des pathologies engendrant des déficiences motrices lourdes, l'assistance à la conduite doit être ouverte et paramétrable de manière à s'adapter à chaque personne. Le deuxième critère concerne l'acceptabilité. L'autonomie des fonctionnalités et le type de commande doivent permettre une utilisation ergonomique du fauteuil. L'assistance à la conduite a pour rôle d'aider l'utilisateur à accomplir le déplacement souhaité et non de diriger le fauteuil contre sa volonté. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode de commande qui traduise la volonté de l'utilisateur. En cela, l'approche déictique, décrite dans ce qui suit, nous semble être intéressante.

1.3. APPROCHE DEICTIQUE

1.3.1. INTRODUCTION

Déictique, du grec ancien δεικτικός (deiktikos) "action de montrer",

1. adj. Qui sert à désigner, à montrer.

L'origine du terme "déictique" provient du grec ancien "deiktikos" qui signifie "action de montrer". Dans un contexte de commande de système, le principe d'une approche déictique consiste à récupérer un ordre provenant de l'utilisateur sous la forme d'une simple action de montrer un objectif sur une interface, pour qu'ensuite, celle-ci soit réalisée automatiquement par le système piloté. Ce type d'approche se révèle particulièrement intuitif pour la formulation d'un ordre dans un contexte de déplacement. En effet, l'ordre le plus élémentaire formulé par un utilisateur peut prendre la forme "Action + Lieu", par exemple, "Je souhaite aller ici", "Je veux prendre cet objet", ou "je veux longer ce couloir". L'utilisateur doit juste préciser le type d'action à réaliser et l'endroit où celle-ci doit être appliquée. Ainsi, une interface humain-machine permettant de définir ces deux informations par une simple action de montrer est considérée comme une "Interface déictique".

Pour concevoir ce type d'interface, une possibilité est de présenter à l'utilisateur un aperçu de l'environnement sur lequel il peut pointer ses objectifs. Cet aperçu doit être proche de la perception humaine afin que l'interface soit intuitive. Pour effectuer un déplacement, l'utilisateur indique la position à laquelle il souhaite appliquer une action en la pointant directement. Ensuite, il doit indiquer le type d'action à réaliser. Pour cela, il existe plusieurs possibilités. La première est que l'utilisateur choisisse parmi une liste d'actions possibles. L'ordre s'effectue alors en deux temps, il choisit tout d'abord l'action, puis pointe sur l'aperçu de l'environnement pour l'appliquer. La deuxième possibilité est de déclencher une action prédéfinie liée à l'endroit indiqué. Par exemple, le fait de montrer une personne sur l'interface déclenche automatiquement une action de suivi, traduisant ainsi l'ordre "Je veux suivre cette personne". L'avantage de cette seconde approche est qu'un ordre utilisateur s'effectue en une seule action de pointage sur l'interface, simplifiant grandement l'interaction humain-machine. L'inconvénient est qu'elle nécessite une reconnaissance des éléments présents sur l'interface afin d'y associer les actions leur correspondant.

Appliquer à une assistance à la conduite, cette approche permet de penser la conduite différemment. L'ordre utilisateur étant donné ponctuellement, le déplacement global se résume à une séquence de déplacements élémentaires qui sont définis intuitivement par l'utilisateur par une série d'actions de pointage sur l'interface. Ceci réduit les efforts physiques à fournir par l'utilisateur par rapport à une conduite manuelle par joystick imposant un contrôle continu.

Dans cette seconde partie de l'état de l'art, nous proposons de recenser plusieurs développements mettant en œuvre l'approche déictique dans différents domaines

d'application, comme la robotique mobile, la téléopération, le développement de véhicule semi autonome, et plus récemment, le domaine de la réalité augmentée, et encore, le développement de fauteuil intelligent.

1.3.2. APPROCHE DEICTIQUE DANS LES APPLICATIONS ROBOTIQUES

1.3.2.1. ROBOTIQUE MOBILE

Dans le domaine de la robotique mobile, il existe plusieurs projets illustrant cette approche. Par exemple, dans (P. E. Trahanias et al. 1997), une plateforme mobile utilise l'image vidéo d'une caméra comme interface de pilotage (Fig. 1.27). L'utilisateur pointe un endroit de l'image et le robot s'y rend automatiquement. La méthodologie utilisée se base sur un algorithme de suivi vidéo. Une fois que l'utilisateur a pointé sa cible, une zone autour de celle-ci est choisie, puis suivie dans l'image vidéo. Pour atteindre la cible, le robot se déplace de manière à placer cette zone au centre de l'image vidéo. Ensuite, le robot continue d'avancer et s'arrête lorsque le centre de la zone suivie descend en dessous d'un seuil dans l'image vidéo. Cette fonctionnalité de navigation vers un point est complétée par une fonctionnalité d'évitement d'obstacle qui assure un déplacement sans collision. Celle-ci utilise les données issues d'une perception par capteurs ultrasons afin de dévier le robot d'un obstacle pour ensuite se rediriger vers la cible.

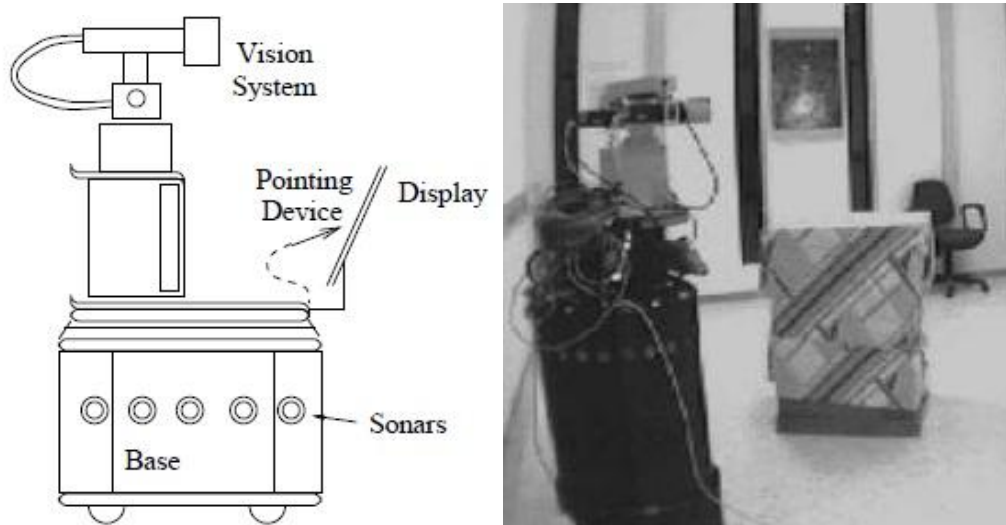


Fig. 1.27 : Plateforme mobile, (P. E. Trahanias et al. 1997).

Un autre exemple, présenté dans (Sekimoto, Tsubouchi, et Yuta 1997), propose un robot mobile équipé d'un système de vision et d'encodeurs, commandé à distance par ordinateur. Son interface présente à l'utilisateur la vision perçue par le robot (Fig. 1.28). Pour effectuer un déplacement, celui-ci indique l'endroit dans lequel il veut positionner le robot en le pointant dans l'image vidéo. Le point montré est converti en position topographique en utilisant un modèle de projection de l'image vidéo vers le plan du sol. Enfin, une trajectoire est planifiée et suivie en utilisant les données odométriques.

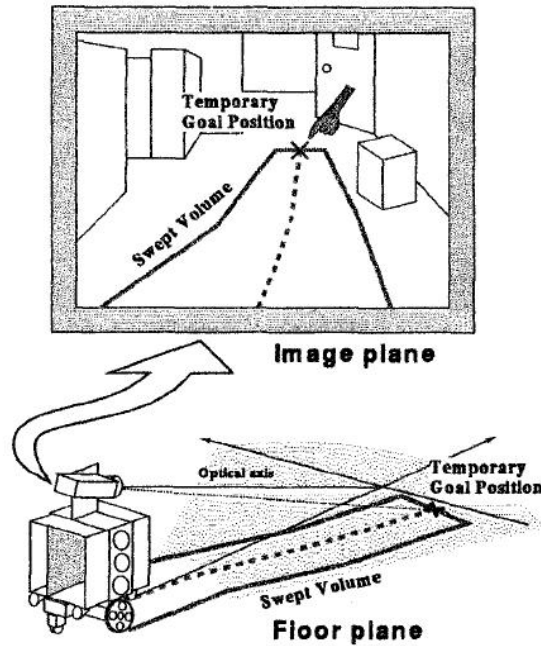


Fig. 1.28 : Principe de fonctionnement de l'interface proposée dans (Sekimoto, Tsubouchi, et Yuta 1997).

Une autre approche est utilisée dans (Ohmori et Sakamoto 2010) dans laquelle une caméra placée au plafond d'une pièce observe une zone de l'environnement dans laquelle un utilisateur peut contrôler un robot mobile à partir d'un écran présentant l'image vidéo (Fig. 1.29-a). Un système de localisation permet de déterminer la position du robot dans l'environnement. Celui-ci utilise deux marqueurs placés dans le champ de vision de la caméra. Le premier est positionné aléatoirement dans l'environnement et le second est fixé au dessus du robot mobile. La position du robot mobile dans l'environnement est déterminée à partir de l'analyse de l'orientation et de la position des marqueurs dans l'image vidéo (Fig. 1.29-b). Pour demander un déplacement, l'utilisateur pointe sur l'écran l'endroit où il veut positionner le robot. Ensuite, la position pointée sur l'interface est convertie en une position de l'environnement correspondante. Enfin, une trajectoire est établie et suivie à partir du système de localisation.

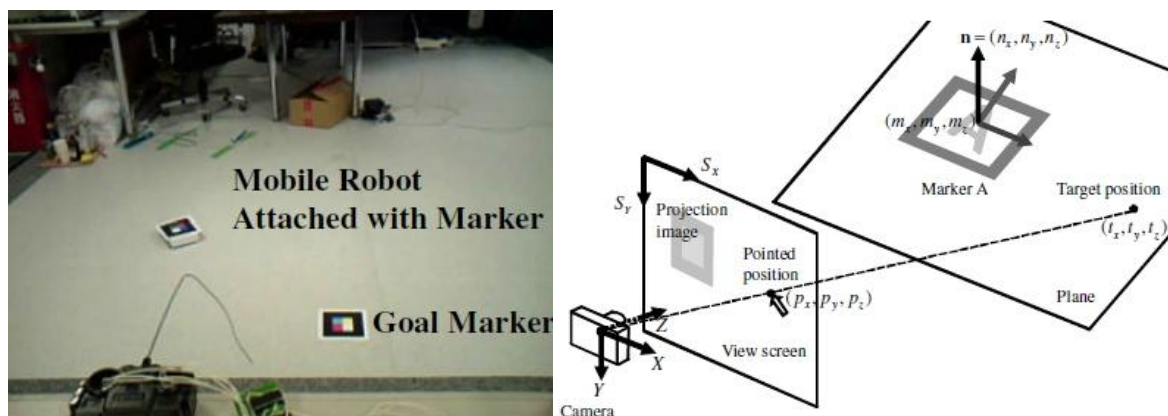


Fig. 1.29 : Robot mobile et marqueurs vus par la caméra (a), Correspondance entre un point de l'écran en position de l'environnement (b).

Enfin, une autre méthode est proposée dans (Nadrag 2011) dans laquelle un robot mobile d'assistance pour le maintien à domicile, équipé d'une caméra et d'un capteur laser à balayage, est piloté à distance. L'interface contient une reconstruction virtuelle de l'environnement réalisée à partir des mesures laser et est enrichie avec l'image vidéo affichée sur un plan vertical (Fig. 1.30). Le robot est représenté par un avatar placé au centre bas de l'interface. Pour le contrôler, l'utilisateur indique un point sur le sol virtuel et le robot s'y rend automatiquement après avoir planifié sa trajectoire.

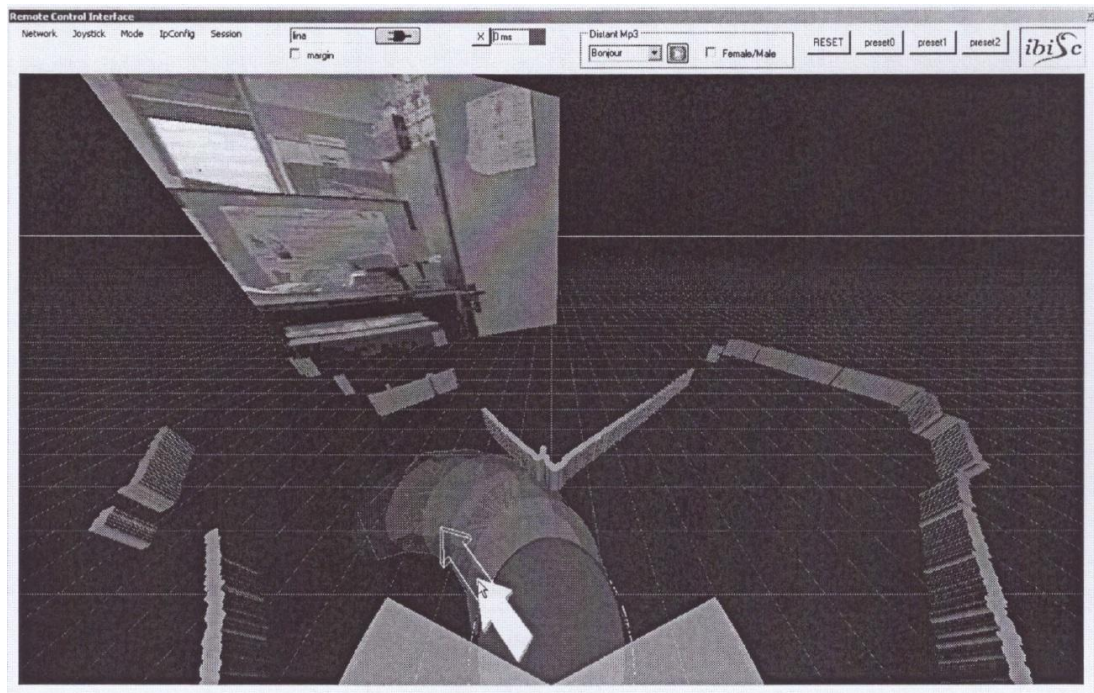


Fig. 1.30 : Interface de pilotage, (Nadrag 2011).

1.3.2.2. REALITE AUGMENTEE

La réalité augmentée permet d'enrichir une image vidéo représentant un aperçu réel de l'environnement en ajoutant des éléments virtuels évoluant en temps réel avec l'environnement (Green, Billinghurst, et al. 2008). Elle peut être employée pour la conception d'une interface de type déictique, notamment dans le cas où les éléments ajoutés mettent en valeur des éléments réels de l'environnement de manière à informer l'utilisateur sur des actions possibles qu'il peut réaliser en les pointant. Plusieurs applications en téléopération et en robotique mobile utilisent la réalité augmentée pour établir ou faciliter le contrôle. Ainsi dans (X. Gao et al. 2011), on présente une commande assistée d'un bras robotisé à l'aide d'un système de vision stéréoscopique. Le contrôle du bras s'effectue sur une interface présentant un aperçu vidéo d'ensemble. Sur celle-ci, la réalité augmentée est utilisée pour recréer une représentation virtuelle du bras afin de permettre à l'utilisateur de visualiser ses déplacements avant qu'ils soient réalisés automatiquement. Pour cela, il déplace cette représentation virtuelle du bras (à l'origine superposé avec le bras réel sur l'interface), puis lorsque le bras virtuel est dans la position désirée, il autorise le déplacement et le bras s'y déplace automatiquement. La figure suivante illustre une séquence d'un déplacement du bras robotisé (Fig. 1.31). Le bras robotisé est dans une position initiale (a), puis l'utilisateur penche

virtuellement le bras (b), et celui-ci prend automatiquement la position indiquée (c). Ensuite, il déplace à nouveau virtuellement le bras (d) pour qu'enfin celui-ci effectue le déplacement automatiquement (e).

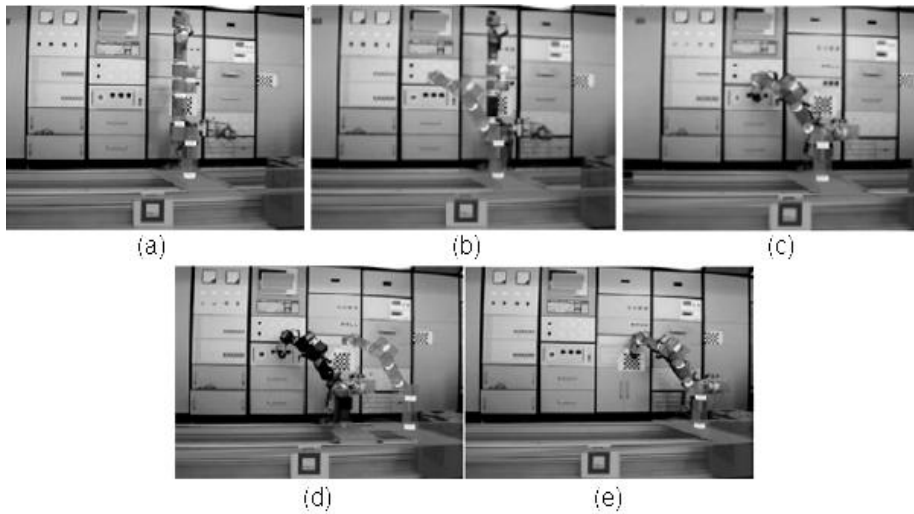


Fig. 1.31 : Séquence de déplacement du bras robotisé (X. Gao et al. 2011).

Une autre approche est présentée dans (R. Tarca et al. 2010). Une assistance au contrôle d'un bras robotisé est proposée pour aider à la manipulation à distance de petits objets dans une zone de travail définie (Fig. 1.32). Pour cela, une caméra observe un plan de travail sur lequel est dessinée une grille. Tous les objets placés dans celui-ci sont identifiés et un modèle 3D leur est associé. L'interface présente l'image vidéo ainsi que les modèles des objets en 3D superposés aux objets réels indiquant à l'utilisateur qu'il peut les saisir avec le bras en les pointant sur l'interface.

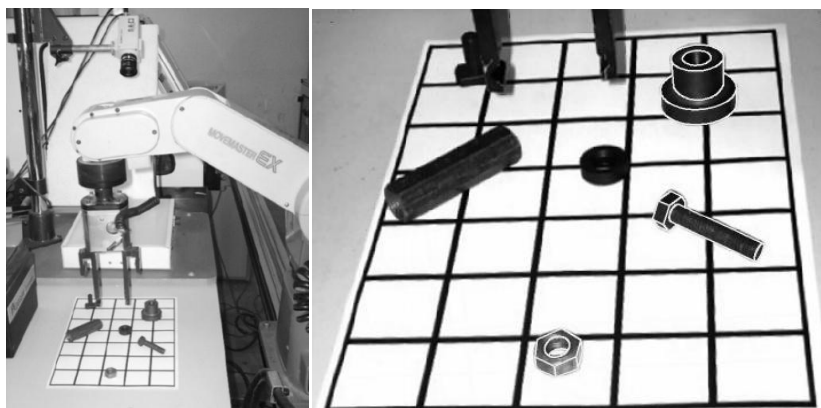


Fig. 1.32 : Bras robotisé (a), avec un aperçu de l'interface (b).

Un autre exemple, présenté dans (Green, Chen, et al. 2008), est un système de pilotage à distance d'un robot mobile à partir d'une interface utilisant la réalité augmentée. L'utilisateur porte un visiocasque (Head Mounted Display HMD) et une tablette sur laquelle est projetée une représentation virtuelle du robot et de son environnement (Fig. 1.33). Pour demander un déplacement, l'utilisateur pointe sur l'environnement virtuel un emplacement et le robot s'y déplace automatiquement.

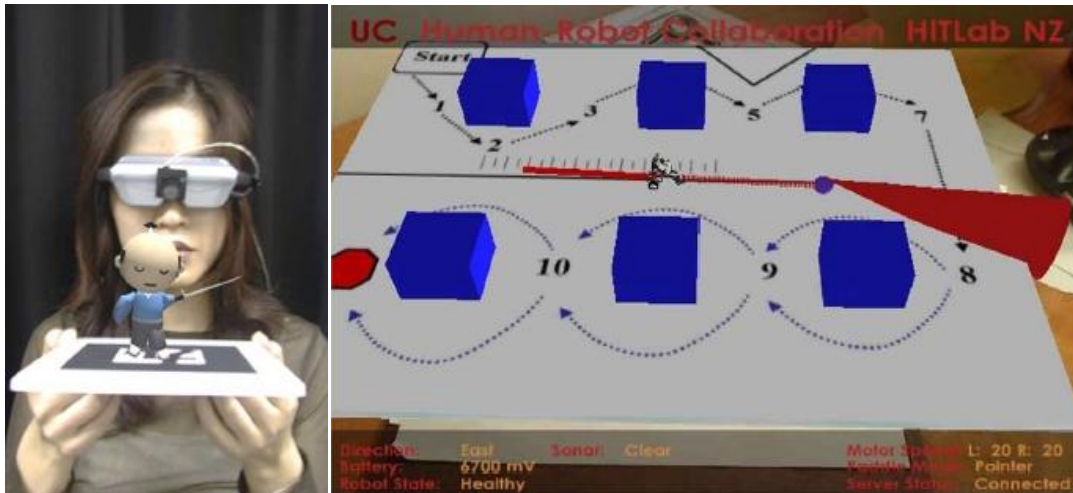


Fig. 1.33 : Visiocasque (a), avec une représentation virtuelle de l'environnement (b).

1.3.3. APPROCHE DEICTIQUE POUR LES ASSISTANCES ROBOTISEES AUX PERSONNES HANDICAPEES

1.3.3.1. BRAS ROBOTISES

L'approche déictique a également été envisagée en téléopération de bras robotisés pour personnes handicapées. Par exemple, le système AVISO, présenté dans (Leroux et al. 2007), fournit une assistance à la préhension d'objet pour un bras robotisé de type Manus équipé d'un système de vision stéréoscopique (Fig. 1.34). L'utilisateur dispose d'une interface présentant l'image vidéo et cinq boutons permettant de déplacer manuellement le bras (haut, bas, gauche, droite) et de valider un ordre. Pour prendre un objet, l'utilisateur déplace manuellement le bras afin d'avoir sa cible sur l'image vidéo, puis l'encadre à l'aide du curseur de la souris. Le bras s'approche et saisit automatiquement l'objet à partir d'un asservissement visuel après validation.

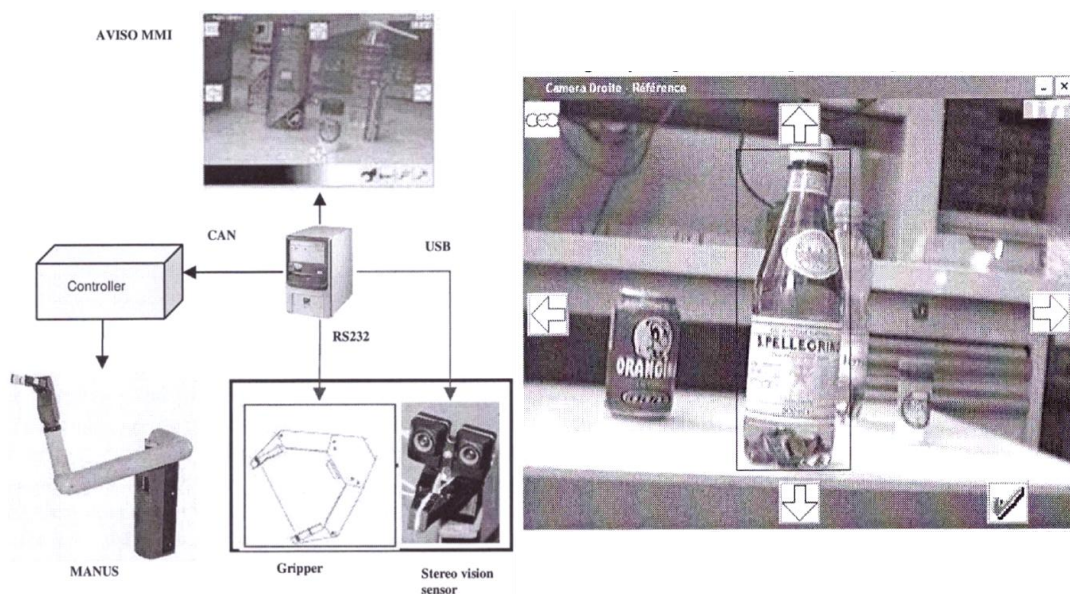


Fig. 1.34 : Système AVISO, (Leroux et al. 2007).

Une autre approche est présentée dans (Bien et al. 2004) pour une plateforme mobile équipée d'un bras robotisé commandée à distance par un utilisateur en fauteuil roulant (Fig. 1.35). La plateforme mobile dispose d'un système de vision stéréoscopique lui permettant d'asservir le bras robotisé lors de la préhension d'objet et d'un système de localisation permettant de contrôler la position et la vitesse de la plateforme dans l'environnement. Celle-ci est paramétrée pour réaliser douze tâches prédéfinies, comme aller chercher à boire, ouvrir la porte, etc., afin d'assister l'utilisateur dans ses tâches quotidiennes.



Fig. 1.35 : Projet KARES II, (Bien et al. 2004).

Pour donner un ordre à la plateforme l'utilisateur dispose d'une casquette équipée d'une caméra et d'un capteur magnétique dont l'objectif est d'analyser la direction de son regard afin de lui permettre de contrôler un pointeur sur un écran d'ordinateur (Fig. 1.36). Une interface est affichée sur cet écran mettant à disposition une image vidéo issue du système de vision du bras robotisé sur la plateforme et un ensemble de boutons correspondant aux tâches disponibles et aux commandes de déplacement de la plateforme (Fig. 1.37). Pour donner son ordre, l'utilisateur positionne la plateforme de manière à avoir son objectif dans le champ de vision du bras robotisé, en fixant du regard les commandes de déplacement (haut, bas, gauche, droite), puis sélectionne la tâche à réaliser en regardant le bouton associé et la valide en fixant le bouton "ok".

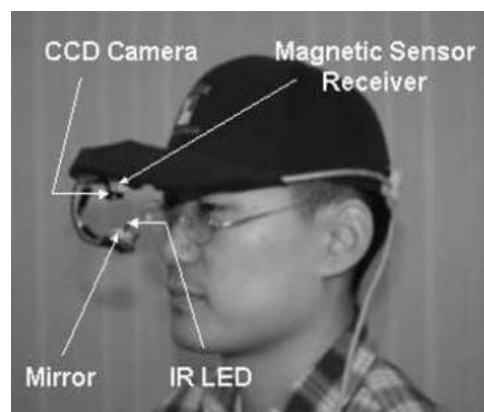


Fig. 1.36 : Casquette permettant d'analyser le regard de l'utilisateur.

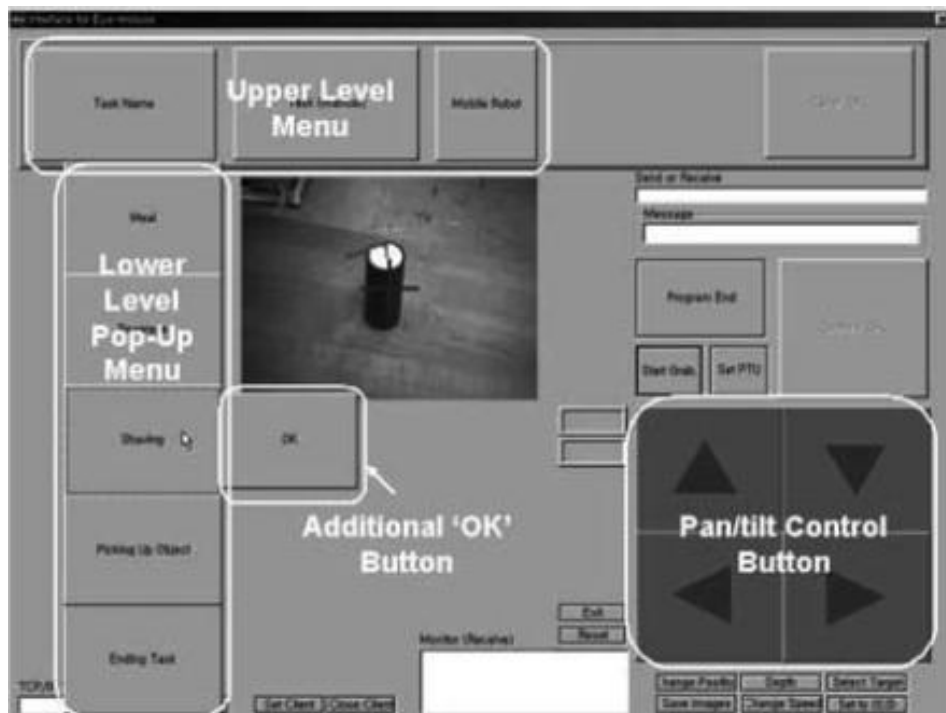


Fig. 1.37 : Interface de pilotage du projet KARES II, (Bien et al. 2004).

1.3.3.2. FAUTEUILS ROULANTS ELECTRIQUES INTELLIGENTS

Dans le domaine des fauteuils roulants intelligents, une première approche se basant sur un système de vision est développée dans (Crisman et Cleary 1998). L'interface déictique contient un panel proposant à l'utilisateur les différentes possibilités de déplacement (Fig. 1.38), ainsi que l'image vidéo comme aperçu de l'environnement. Pour commander le fauteuil, l'utilisateur choisit le type d'ordre à effectuer sur le panel et pointe l'endroit de l'environnement qu'il souhaite atteindre sur l'image vidéo. Le panel des ordres disponibles se divise en plusieurs parties, une pour indiquer l'action à réaliser comme « Arrêt », « suivre », « aller à », « tourne autour de »..., une autre pour fournir des informations de positionnement comme « devant », « derrière », « par la gauche », « par la droite », une autre pour les informations de proximité comme « au contact », « proche », « loin »... et enfin une dernière partie pour indiquer la vitesse « lente », « vitesse de marche », « vitesse de course »... Ensuite, le suivi de l'endroit ciblé dans l'image doit être réalisé avec un traitement d'image utilisant le critère de Bayes. Sur cet exemple, la gestion du déplacement du fauteuil n'a pas été traitée.



Fig. 1.38 : Panel permettant à l'utilisateur d'établir son ordre.

Une approche similaire est développée dans (Rao et al. 2002) sur le prototype du GRASP (déjà décrit &1.1.2.3), où l'interface est projetée avec un vidéo projecteur sur la tablette du fauteuil. Celle-ci contient l'image vidéo de l'environnement et des boutons pour choisir l'ordre à effectuer (les ordres proposées ici sont « va à », « avance en évitant les obstacles », « suit le mur », et « passe la porte »). Pour se déplacer, l'utilisateur choisit l'action qu'il veut effectuer en la montrant sur la tablette, et ensuite, il pointe sur l'image l'endroit où il souhaite l'appliquer. Une caméra observe la zone projetée, et extrait l'ordre donné par l'utilisateur en analysant la position de sa main à partir d'un traitement de l'image (Fig. 1.39).

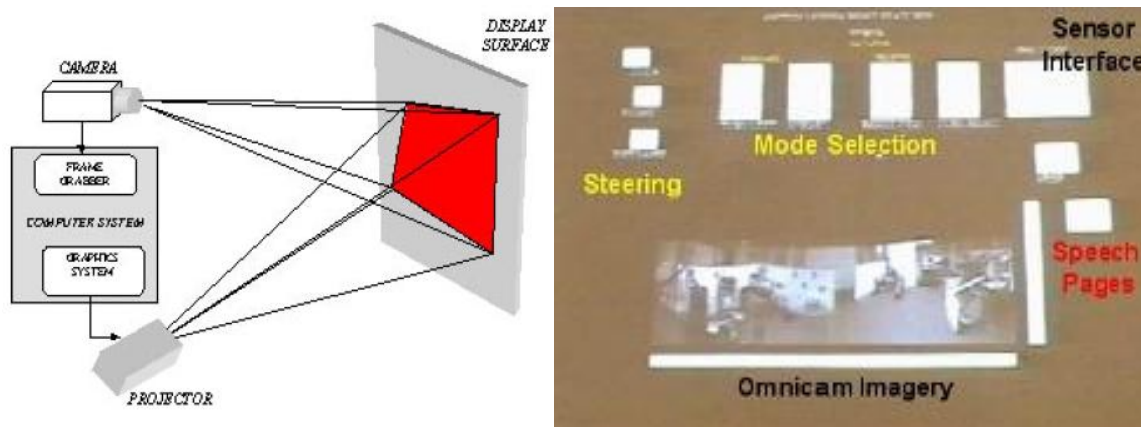


Fig. 1.39 : Principe de l'interface projetée (a), avec un aperçu de l'interface (b).

1.3.4. CONCLUSION

La commande déictique constitue une approche intéressante pour piloter un système. Plusieurs approches déictiques ont été élaborées dans de nombreux domaines et ont montré qu'elles simplifient grandement la commande. En effet, le principe de montrer l'objectif sur un aperçu de l'environnement pour que le système piloté effectue automatiquement l'action correspondante rend la commande simple et intuitive. Dans un contexte de mobilité, la commande établie par l'utilisateur peut se traduire par une succession d'ordres élémentaires du type : "Je veux aller ici", "Je souhaite franchir cette porte"... ce qui permet d'obtenir une contrôle séquentiel caractérisé par une succession de primitives autonomes dans lequel l'utilisateur n'intervient que ponctuellement.

1.4. CONCLUSION

Les fauteuils roulants électriques intelligents ont beaucoup évolué depuis leur apparition et constituent une aide précieuse en termes d'assistance à la mobilité. Les fonctionnalités proposées permettent d'assister la personne dans des situations difficiles avec plusieurs degrés d'autonomie. Cependant, malgré une demande de plus en plus importante et les nombreux prototypes existant, très peu de transferts technologiques ont été effectués. Cela peut s'expliquer par de nombreux facteurs comme l'imperfection des développements et le coût des dispositifs, mais cela nous semble venir également de l'angle d'approche. En soi, deux critères nous semblent particulièrement importants. Le premier est l'adaptabilité. Il existe un grand nombre de fauteuils et d'organes de commande différents. Le deuxième est l'acceptabilité, le

degré d'autonomie des fonctionnalités et le type de commande doit permettre à l'utilisateur de contrôler le fauteuil selon sa volonté.

Ainsi, notre objectif est de concevoir une assistance à la conduite en respectant ces deux contraintes, en ayant d'un côté un système léger et facilement transposable sur tout type de fauteuil, et d'un autre côté, une interface de commande ergonomique permettant à l'utilisateur d'exprimer au mieux sa volonté. Pour cela, nous utilisons une approche déictique.

Chapitre 2 : FAUTEUIL INTELLIGENT, ARCHITECTURE MATERIELLE ET LOGICIELLE

2.1. Introduction	34
2.2. Structure du fauteuil	34
2.2.1. Architecture matérielle	34
2.2.2. Architecture logicielle	36
2.3. Perception laser	37
2.3.1. Capteur laser à balayage	38
2.3.1.1. Présentation	38
2.3.1.2. Caractéristiques des mesures	39
2.3.2. Perception de l'environnement sur 360° avec trois capteurs laser à balayage	42
2.3.2.1. Conditionnement des mesures lasers	43
2.3.2.2. Changement de repère et étalonnage	43
2.3.2.3. Triage des données lasers	46
2.3.2.4. Recherche de cohérence des données lasers	47
2.4. Mode de déplacement du fauteuil	49
2.4.1. Introduction	49
2.4.2. Principe de l'asservissement	50
2.4.3. Mode de contrôle du fauteuil	51
2.4.4. Simulation du joystick par logique floue	52
2.4.4.1. Introduction	52
2.4.4.2. Structure	53
2.4.4.3. Normalisation	54
2.4.4.4. Fuzzification	54
2.4.4.5. Inférence	57
2.4.4.6. Défuzzification	58
2.4.4.7. Fonctionnement arrière	59
2.4.4.8. Essais en simulation du module de logique floue	60
2.4.4.9. Conditionnement des tensions	61
2.4.5. Régulation	61
2.4.5.1. Introduction	61
2.4.5.2. Détermination de l'amplitude de la position simulée du joystick	61
2.4.5.3. Détermination de l'orientation de la position simulée du joystick	62
2.4.5.4. Résultats	64
2.5. Conclusion	64

2.1. INTRODUCTION

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons le dispositif d'assistance à la mobilité développé sur le prototype Vahm. L'aménagement du fauteuil est détaillé dans une première partie en présentant la structure matérielle et logicielle du prototype. Ensuite, nous nous intéressons aux capteurs laser réalisant la perception de l'environnement. Ses avantages, ses inconvénients, ainsi que les différents traitements utilisés pour conditionner les données laser, sont approfondis dans une seconde partie. Enfin, la manière dont les déplacements du fauteuil sont gérés via l'assistance à la conduite est détaillée dans une troisième partie en présentant le schéma d'asservissement du fauteuil dont nous expliquons chacun des composants.

2.2. STRUCTURE DU FAUTEUIL

2.2.1. ARCHITECTURE MATERIELLE

Cette dernière version du prototype VAHM se distingue des précédentes par le parti pris de définir une structure plus légère d'assistance à la conduite qui puisse être adaptée facilement à tout type de fauteuil roulant électrique du commerce, tout en disposant d'une perception de l'environnement suffisante. Ainsi, nous n'utilisons pas d'odométrie, généralement lourde à installer. La structure matérielle que nous proposons est décrite par le schéma Fig. 2.1. Elle emploie une perception de nature extéroceptive réalisée à partir de plusieurs capteurs laser à balayage répartis autour du fauteuil. Ensuite, l'image vidéo issue d'une caméra fixée à l'avant du fauteuil est utilisée pour concevoir l'interface avec l'utilisateur. Enfin, le contrôle du fauteuil s'effectue au moyen d'une carte électronique insérée dans le boîtier de commande du constructeur (son très faible encombrement permet son intégration dans tous les types de boîtier existants).

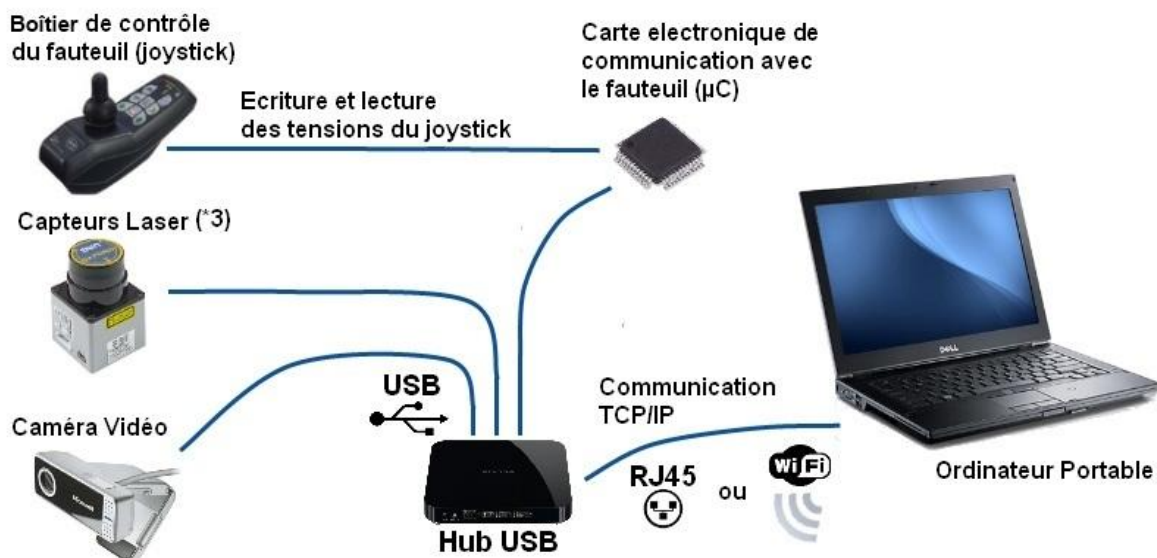


Fig. 2.1 : Structure matérielle de l'assistance à la conduite sur le prototype Vahm-3.

Tous ces éléments sont reliés à un routeur via une communication de type USB2.0. Le rôle de celui-ci est d'émuler tous les périphériques connectés vers un ordinateur portable via une communication TCP/IP classique. Dans notre cas, nous utilisons une communication Ethernet filaire RJ45 standard (l'utilisation d'une communication sans fil type Wifi pourrait également fonctionner en plaçant un routeur wifi en amont du routeur USB). Nous utilisons des protocoles de communication standard ce qui ouvre la possibilité d'utiliser des systèmes plus légers par la suite comme une tablette PC ou un Smartphone par exemple. Ce système est modulable et adaptatif, ce qui est conforme à notre optique de développement d'une assistance à la mobilité facilement transposable d'un type de fauteuil à un autre.

Le rôle de la carte électronique qui assure la communication entre l'assistance à la conduite et le fauteuil est de plusieurs natures. Tout d'abord, l'utilisateur a le choix d'utiliser ou non l'assistance, elle doit donc laisser la possibilité d'utiliser le fauteuil en mode manuel. Dans ce cas, la carte ne modifie en rien le fonctionnement fourni par le constructeur. Elle transmet les instructions issues du joystick. Ensuite, dans le cas où l'on utilise l'assistance à la conduite, la carte effectue deux tâches. La première est de conditionner les ordres venant de l'ordinateur portable en commandes comprises par le fauteuil générant ainsi les déplacements attendus par les fonctionnalités autonomes. La seconde tâche consiste à récupérer la position du joystick du constructeur afin de reproduire une commande manuelle via notre assistance. Par ailleurs, nous équipons le joystick du constructeur d'un bouton poussoir qui permet à l'utilisateur de contrôler l'interface (son fonctionnement sera détaillé chapitre 4) ; la carte fournit également l'état de ce bouton poussoir à l'ordinateur. La figure suivante présente la version du prototype Vahm-3 dans cette configuration (Fig. 2.2).

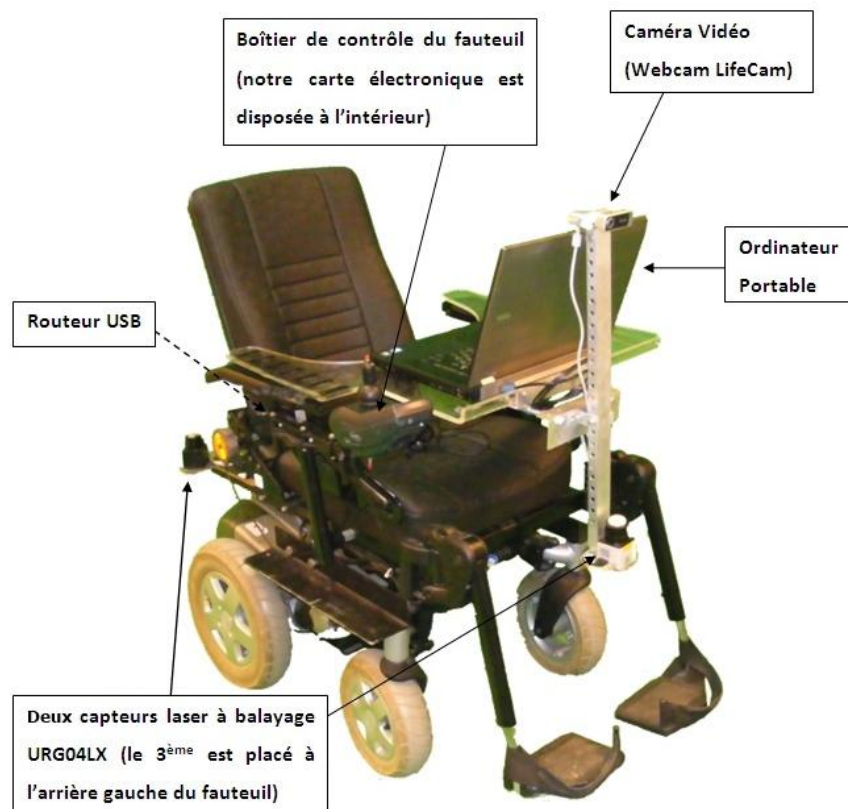


Fig. 2.2 : Prototype Vahm-3.

2.2.2. ARCHITECTURE LOGICIELLE

Sur l'ordinateur, tous les périphériques connectés au routeur sont émulés comme s'ils étaient directement connectés à l'ordinateur. Une fois le matériel correctement configuré (pilotes et configuration des communications propres à chaque périphérique), l'ensemble du système est contrôlable par voie logicielle.

La conception du logiciel se base sur une structure multi-agents issue de celle proposée sur les prototypes précédents (Morere et Pruski 2004). Nous modifions uniquement, dans la structure, la manière de catégoriser les agents pour qu'elle corresponde au mieux à notre structure matérielle. Il existe trois types d'agents fonctionnant en parallèle et communiquant entre eux par le biais d'une mémoire partagée et commune à tous. Tout d'abord, les agents de type environnemental ont pour rôle de récupérer, de conditionner et de stocker en mémoire toutes les données liées à la perception et aux interactions avec l'environnement (par exemple, les données des capteurs lasers, l'interface avec l'utilisateur, etc.). Ensuite, les agents de type comportemental ont pour objectif de fournir une consigne de déplacement du fauteuil en temps réel à partir de l'analyse des données environnementales disponibles en mémoire dans l'optique de générer un comportement de déplacement spécifique. Enfin, un agent de type action définit un comportement actif parmi les agents comportementaux disponibles en fonction des informations issues des agents environnementaux (notamment l'interface avec l'utilisateur). Puis il gère et supervise les déplacements du fauteuil correspondant à l'agent comportemental actif. La figure Fig. 2.3 présente la manière dont nous avons classifié nos différents agents.

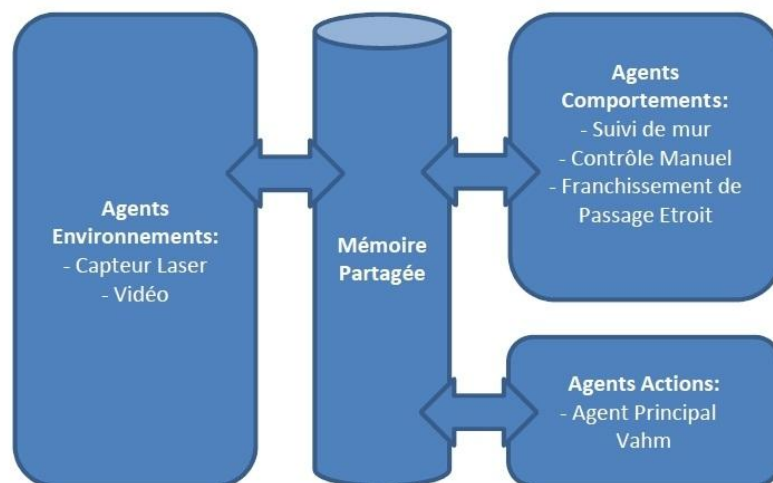


Fig. 2.3 : Architecture logicielle : structure multi-agent.

A partir de cette structure, nous développons un ensemble d'agents. Tout d'abord, nous utilisons un seul agent de type action, l'agent principal Vahm. Il est l'élément central de l'application et a deux rôles principaux. Le premier est de gérer l'ensemble des agents fonctionnant en parallèle, il doit vérifier qu'ils s'ouvrent, fonctionnent et se ferment correctement. Le deuxième rôle est de gérer la communication avec le fauteuil via la carte électronique. Il s'occupe d'envoyer les commandes de déplacements du fauteuil et récupérer

l'état du joystick et du bouton poussoir qu'il met à disposition dans la mémoire partagée. La commande transmise au fauteuil par l'agent principal dépend d'un système de priorité. Chaque agent comportemental se voit attribuer un niveau de priorité qui évolue en fonction du choix de l'utilisateur, de l'état du fauteuil et des conditions de sécurité. La commande choisie appartient à l'agent comportemental ayant la priorité la plus importante.

Ensuite, les deux agents environnementaux correspondent à chaque mode de perception. Le premier, l'agent Capteur Laser a pour rôle de communiquer avec l'ensemble des capteurs laser, d'effectuer la lecture des mesures dès qu'elles sont disponibles, de fusionner ces données, de les filtrer et de les conditionner de manière à les rendre pertinentes, puis de les stocker dans la mémoire partagée pour qu'elles soient disponibles à tout moment pour les autres agents. Le deuxième, l'agent Vidéo a pour rôle de gérer l'image vidéo de la caméra. C'est dans cet agent que l'on réalise l'interface avec l'utilisateur et que l'on gère l'ensemble des interactions avec celui-ci.

Enfin, trois agents comportementaux sont développés pour chaque mode de fonctionnement du fauteuil. Ceux-ci correspondent aux fonctionnalités proposées par l'assistance à la conduite. Le premier, l'agent Contrôle Manuel permet de reproduire toute forme de conduite manuelle. Il récupère la position du joystick du constructeur disponible en mémoire et fournit en retour le comportement de déplacement manuel correspondant, reproduisant ainsi la conduite manuelle du constructeur. Il permet aussi de gérer tout les types de joystick standard que l'on peut connecter sur l'ordinateur portable. Il propose également une commande manuelle effectuée par pointeur sur l'interface. Le deuxième, l'agent Suivi de mur a pour rôle d'écrire en mémoire les commandes qui permettent de générer un suivi de mur sur la droite ou sur la gauche selon le choix de l'utilisateur. Pour déterminer cette commande, il utilise les données laser stockées en mémoire afin d'asservir le fauteuil sur l'environnement. Enfin le troisième, l'agent Passage Etroit permet de détecter l'ensemble des passages étroits disponibles dans l'environnement grâce aux mesures lasers, et de générer la commande permettant de franchir automatiquement un passage choisi par l'utilisateur.

L'avantage de ce type de structure est son évolutivité. Ainsi, lorsque l'on souhaite développer une nouvelle fonctionnalité, il suffit d'ajouter un nouvel agent comportemental, et lorsque l'on souhaite ajouter un capteur ou d'autres éléments d'interface, il suffit d'ajouter un agent environnemental. Dans ces deux cas, cela s'effectue rapidement et ne modifie que peu le reste du programme.

2.3. PERCEPTION LASER

La perception est réalisée à partir d'un seul type de capteur, les capteurs lasers à balayages. Toutes les fonctionnalités autonomes utilisent cette perception pour localiser le fauteuil dans l'environnement et pour générer les commandes de déplacement. Dans un premier temps, nous avons utilisé un seul capteur laser placé à l'avant du fauteuil à partir duquel nous avons réalisé les premiers développements et évaluations. Ensuite, nous avons étendu la perception laser à trois capteurs positionnés autour du fauteuil afin d'obtenir une perception panoramique

de l'environnement. Dans cette partie, nous détaillerons la nature des mesures issues de ces capteurs, ainsi que l'ensemble du conditionnement que nous effectuons afin qu'elles soient exploitables.

2.3.1. CAPTEUR LASER A BALAYAGE

2.3.1.1. PRESENTATION

Nous utilisons deux types de capteur laser similaires du constructeur Hokuyo, les capteurs URG04LX et URG04LXUG01 (Fig. 2.4).

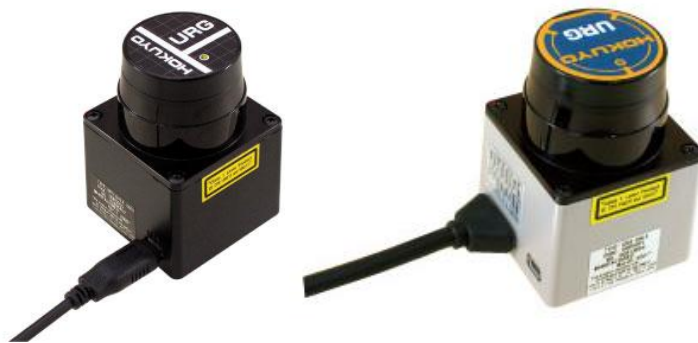


Fig. 2.4 : Les capteurs lasers à balayage URG04LXUG01 et URG04LX.

Leur principe de fonctionnement est de faire tourner une lentille à l'aide d'un moteur. Un faisceau laser modulé traverse la lentille à un angle donné, percute un obstacle et est renvoyé vers un récepteur qui mesure le nombre d'impulsions entre l'envoi et la réception du faisceau afin d'obtenir la distance pour l'angle donné. Le moteur fait ensuite tourner la lentille et une nouvelle mesure est obtenue à l'angle suivant. Pour ce type de capteur, les mesures laser s'effectuent jusqu'à une distance de 4m, dans un balayage angulaire de 240° avec un angle de résolution entre chaque mesure d'environ $0,36^\circ$. Chaque balayage complet avec réception des données s'effectue en 120ms environ et se compose de 765 points de mesure pris dans l'environnement (Fig. 2.5).

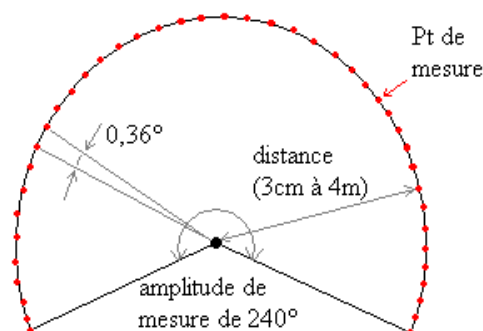


Fig. 2.5 : Répartition des points de mesure pour un capteur laser.

Pour chaque capteur, à la fin d'un balayage, les points de mesure sont codés puis envoyés à l'ordinateur lorsque celui-ci les demande par l'envoi d'une commande spécifique. A la réception des mesures, nous effectuons un premier conditionnement de manière à décoder les

données et à les présenter sous forme d'un tableau de points exprimés par leurs coordonnées cartésiennes et cylindriques. Disposer de ces deux types de coordonnées pour chaque point de mesure facilite la recherche d'un point dans un tableau global : certaines méthodes utilisent la position angulaire des points alors que d'autres utilisent leurs abscisses ou ordonnées. On exprimera donc un point de mesure laser de la manière suivante $P_{\alpha}\{x; y\}$ et $P_{\alpha}\{\rho; \theta\}$, avec α l'angle de mesure. Nous réalisons une cartographie à partir des mesures (Fig. 2.6) afin de les visualiser et d'estimer les avantages et inconvénients de ce type de capteur.

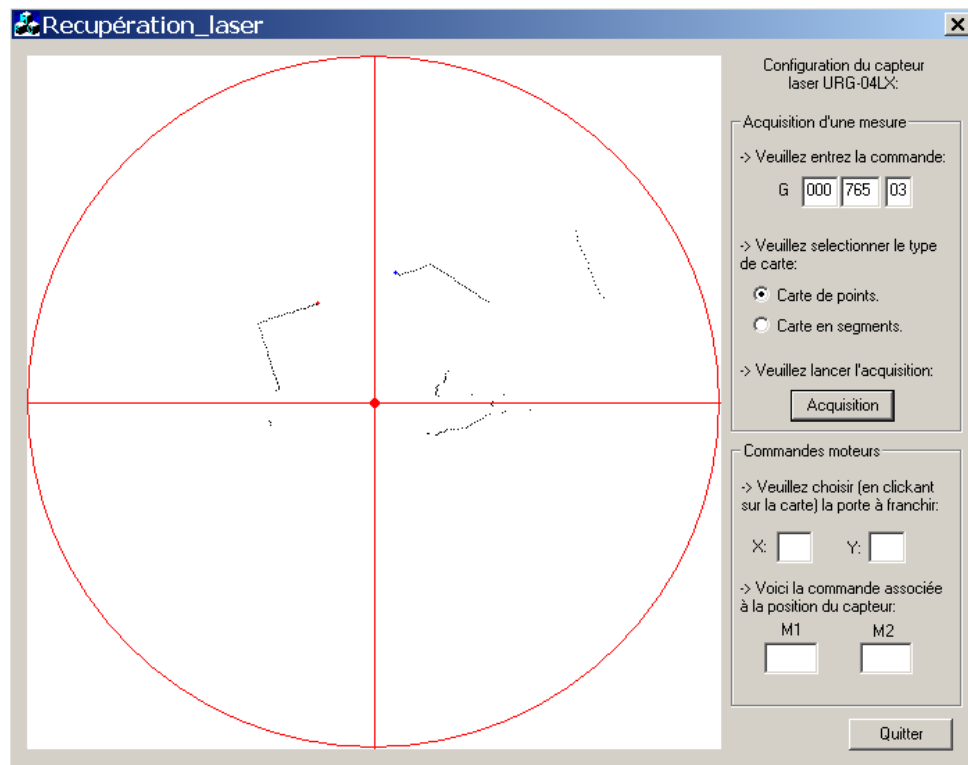


Fig. 2.6 : Aperçu des mesures laser sur une cartographie.

2.3.1.2. CARACTERISTIQUES DES MESURES

Le principal avantage de ce type de capteur est la profusion et la qualité des mesures, ainsi que la rapidité d'acquisition de celles-ci. Toutefois, il présente quelques inconvénients liés à la nature et à la structure du capteur. Le premier est que le balayage des mesures sur l'environnement s'effectue uniquement dans un plan de mesure horizontal. Les obstacles au sol ou en l'air ne peuvent être détectés. Il existe d'autres points faibles liés essentiellement à la nature du laser. Pour les mettre en évidence, nous procédons à une série de tests afin de connaître le domaine de validité des mesures.

- DETECTION D'OBSTACLES DE DIFFERENTS MATERIAUX

Le premier test consiste à établir une zone balisée dans laquelle nous plaçons un certain nombre d'obstacles de tailles, de couleurs et de matériaux différents, dans l'espace de perception du capteur. L'objectif, est d'observer les limites de la diversité de perception (observer quels objets sont détectables ou non). Pour les essais, les différents obstacles de différentes natures sont placés à l'intérieur d'un cadre de planches de bois (Fig. 2.7). Lors de

cet essai, nous déplaçons ou remplaçons certains obstacles. On peut voir sur cet exemple que tous les obstacles sont correctement représentés, et que la plupart des objets sont détectables par le capteur.

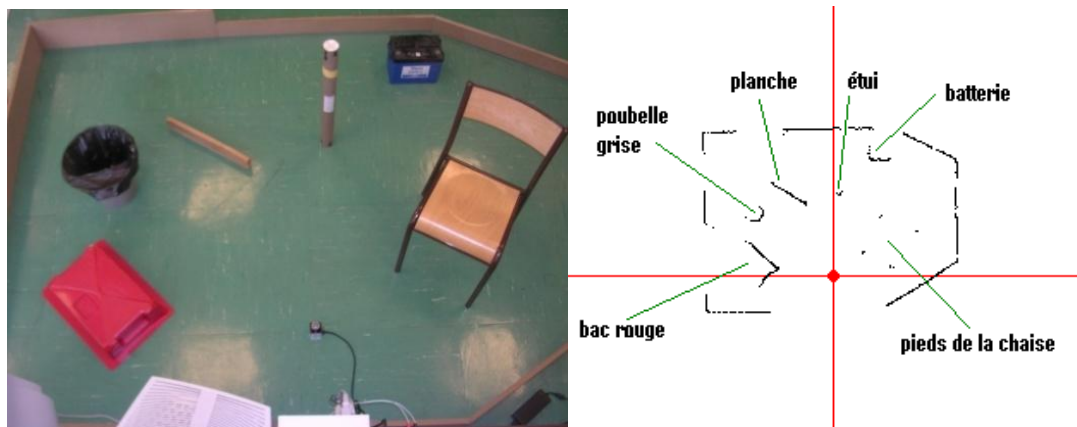


Fig. 2.7 : Aperçu de la zone contenant les obstacles avec la cartographie laser associée.

Ensuite, en changeant la disposition des obstacles dans le champ de perception du capteur, deux problèmes ont été mis en évidence. Le premier est lié à la taille de l'obstacle. Lorsque celui-ci est trop petit, il ne sera détecté qu'à faible distance. C'est le cas par exemple des pieds de la chaise. Quand nous les reculons, le capteur ne les perçoit plus. Dans un des essais suivants nous quantifierons cette limite. Le deuxième est lié aux matériaux des obstacles. Deux types de matériaux ne sont pas perçus. Les premiers sont les matériaux translucides (comme le verre) dans lesquels le faisceau laser ne se réfléchit pas. Les deuxièmes sont les matériaux noirs réfléchissant sur lesquels le faisceau laser est dévié ou absorbé. Pour le mettre en évidence, nous remplaçons la poubelle grise précédente par une poubelle noire réfléchissante (Fig. 2.8). Dans ce dernier cas de figure, la poubelle noire est toutefois détectée à faible distance du capteur laser (à partir d'une distance inférieure à 1m environ).

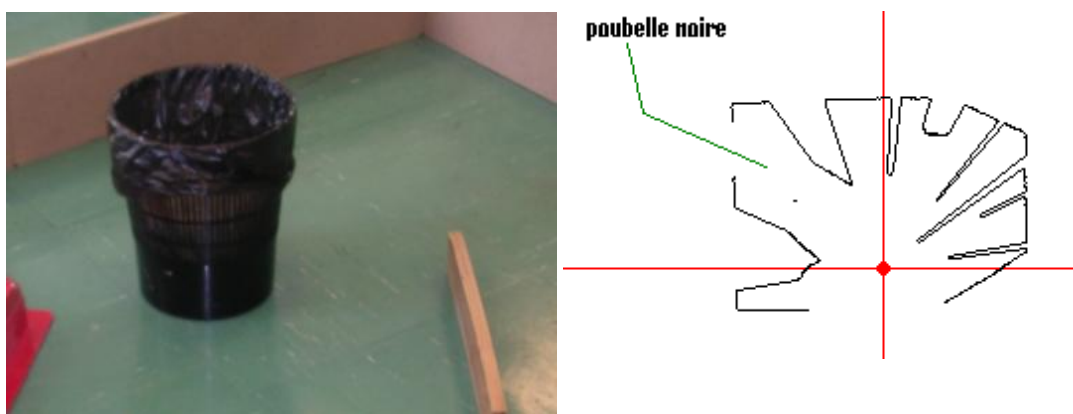


Fig. 2.8 : Perception de la poubelle noire réfléchissante par le capteur laser.

- DERIVE DES MESURES EN FONCTION DE LA DISTANCE

Le deuxième test permet d'évaluer la dérive des points de mesure pris sur un obstacle à différentes distances du capteur. Pour cela, le capteur laser est positionné entre deux planches parallèles entre lesquelles une planche est placée perpendiculairement. Au fur et à mesure des

essais, la planche est éloignée du capteur. On observe l'évolution de la perception des planches (censées être droites) en fonction des distances (Fig. 2.9).

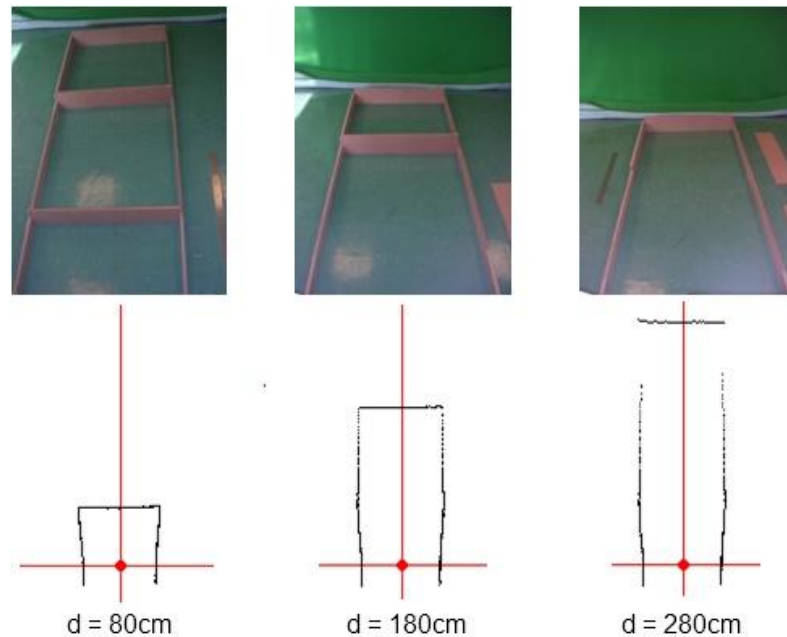


Fig. 2.9 : En haut, les trois couloirs tests, et en bas les cartographies laser associées.

Lors des essais, nous pouvons remarquer une distorsion des mesures pour des distances proches du capteur (environ 50cm). Cela peut amener à des écarts de précisions variant jusqu'à environ 2cm (l'échelle de la cartographie est d'un cm pour un pixel, le plus gros écart pour une même planche est de deux pixels).

- QUANTIFICATION DE LA RESOLUTION DU CAPTEUR

Ce dernier test permet de quantifier la résolution réelle du capteur en observant jusqu'à quelle distance il est en mesure de détecter un objet de faible taille. Pour cela, on utilise un objet calibré de 2cm de large que l'on éloigne progressivement du capteur laser. On détermine ensuite jusqu'à quelle distance il est perçu par le laser, puis nous la comparons avec la distance théorique calculée à partir de la résolution annoncée par le constructeur. Elle est donnée à $0,36^\circ$ entre deux points de mesure, c'est-à-dire qu'un objet de 2cm devrait être perceptible à la distance d'environ 3m20. En reculant l'objet dans l'environnement, nous remarquons que de moins en moins de points de mesures identifient l'objet. La figure suivante (Fig. 2.10) montre un aperçu de l'essai avec les cartographies superposées présentant quatre positions de l'objet. Dans la position P1, à 50cm du capteur, l'objet est caractérisé par cinq points de mesure. En P2, à 75cm, l'objet est représenté par trois points de mesure. En P3, à 100cm, l'objet n'est représenté que par un seul point de mesure et ce jusqu'à P4, à 121cm. Au-delà, l'objet n'est plus perçu. La distance limite de perception est donc inférieure à la résolution annoncée pour des objets de faible taille.

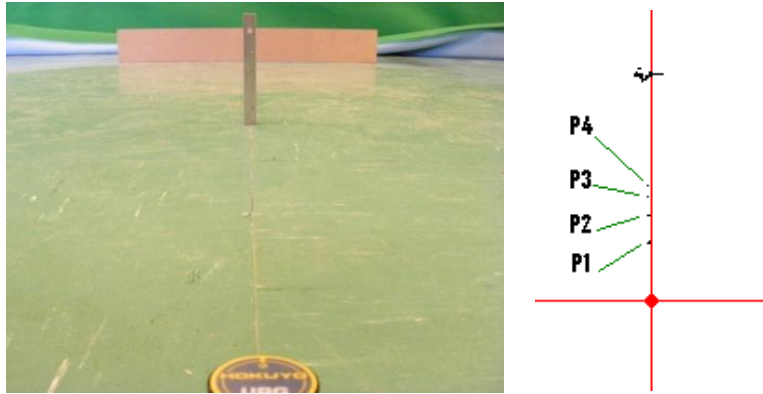


Fig. 2.10 : Test sur la résolution du capteur laser.

• CONCLUSION

Le capteur laser est en mesure de détecter la plupart des obstacles que peut rencontrer un fauteuil roulant lors de sa navigation. Toutefois, ces essais mettent en évidence trois de ses limites. Tout d'abord, nous avons pu constater que deux types de matières étaient mal perçus par le laser, les matières translucides et les matières plastiques noires réfléchissantes, et ensuite, que les objets de faible taille, comme des pieds de chaise (fins) ou une lampe à pied par exemple, ne sont détectés qu'à distance réduite. Enfin, au niveau de la précision, nous avons pu observer des erreurs maximales de 2cm environ, dues à une légère distorsion des mesures proches du capteur. Dans notre application, la plupart des obstacles présents dans l'environnement ont des caractéristiques qui satisfont aux conditions de visibilité par le capteur laser et particulièrement à la hauteur où les capteurs sont placés sur le fauteuil (à hauteur de genoux, à 40cm). Comme notre fauteuil a un encombrement de 70cm de large sur 100cm de long, la perception laser est adéquate pour réaliser des fonctionnalités de navigation à cette échelle de l'environnement.

2.3.2. PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT SUR 360° AVEC TROIS CAPTEURS LASER A BALAYAGE

Dans sa première version, notre assistance à la conduite utilisait un capteur laser placé à l'avant du fauteuil. Mais pour certaines manœuvres, comme le braquage, le besoin d'une perception plus large est apparu pour rendre les fonctionnalités réalisables. C'est pourquoi nous avons conçu une perception laser sur 360° qui utilise trois capteurs laser repartis autour du fauteuil. Toutes les mesures lasers, que ce soit avec un seul ou trois capteurs, sont exprimées dans un repère global centré sur le capteur laser placé à l'avant et ayant comme axe des ordonnées, l'axe d'avance du fauteuil.

Les données des trois capteurs sont alors fusionnées dans ce repère de manière à obtenir une perception équivalente à celle d'un seul capteur laser qui scruterait l'environnement sur 360°. De plus, les données doivent être exploitables par les fonctionnalités que nous présenterons par la suite. Pour cela, les données doivent être organisées, filtrées, et stockées de manière à obtenir le même format de données que celui dont nous disposons avec un seul capteur, soit en un tableau de points caractérisés par leurs coordonnées.

2.3.2.1. CONDITIONNEMENT DES MESURES LASERS

Pour chaque capteur laser, nous effectuons un premier conditionnement des données de manière à faciliter leurs manipulations. Les mesures laser sont bornées de 30mm à 4000mm et lorsqu'un capteur n'a pas de retour sur une mesure, il fixe automatiquement celle-ci à 4000mm. Afin de considérer uniquement les mesures ayant une réelle correspondance avec un élément de l'environnement, on ne garde que celles comprises entre 30mm et 3900mm. Ainsi le nombre de points de mesure par capteur est variable et évolue en fonction de l'environnement, il est précisé à chaque nouvelle acquisition. Ensuite, les données de chaque capteur sont organisées en fonction du balayage effectué. La première mesure est celle prise à l'angle de départ, et la dernière est celle prise à l'angle d'arrivée. Le balayage s'effectue en sens trigonométrique de -30° à 210° dans le repère de chaque capteur. Nous obtenons donc trois tableaux de points caractérisés par leurs coordonnées cylindriques et cartésiennes de taille variable exprimés dans leurs repères respectifs. Le repère de mesure du capteur L_i est nommé $R_i(OR_i; x_i; y_i)$ avec $i=1,2,3$ (Fig. 2.11).

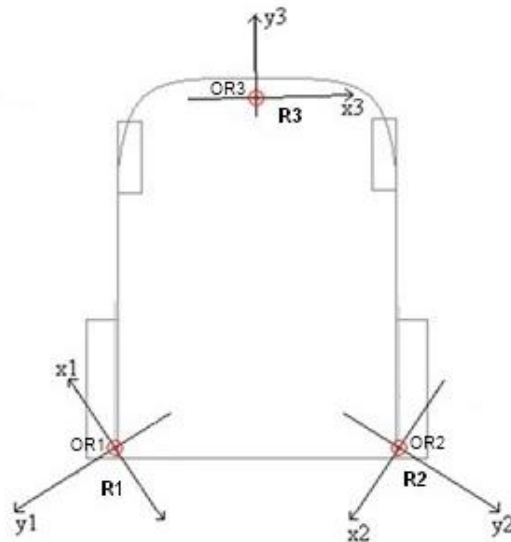


Fig. 2.11 : Positionnement des repères des capteurs laser sur le fauteuil.

2.3.2.2. CHANGEMENT DE REPERE ET ETALONNAGE

Pour réunir les données laser issues des trois capteurs, il faut les exprimer dans un même repère global. On choisit le centre du capteur avant comme origine de celui-ci, et l'axe d'avance du fauteuil comme axe des ordonnées. Ce repère global est nommé $R\{O; x; y\}$. Tout d'abord, nous considérons que les trois repères, R_1 , R_2 et R_3 , se trouvent à la même hauteur, celle du centre du capteur avant. En réalité, il existe un léger écart de hauteur entre le capteur avant et les deux autres placés à l'arrière, cependant leurs plans de mesure étant parallèles et très proches (un écart de 1 ou 2cm environ), nous pouvons faire cette approximation. Ensuite, on sait que pour chaque capteur laser, il faut appliquer un changement de repère caractérisé par deux translations, une en x et une en y , ainsi qu'une rotation autour de l'axe z qui représente l'angle d'orientation du capteur par rapport au repère global. L'annexe A présente la méthode que nous avons utilisée pour effectuer ce changement

de repère. Ainsi, les points appartenant à R1 doivent subir un changement de repère caractérisé par les deux translations T_{x1} et T_{y1} et la rotation R_{z1} . De même pour les points appartenant à R2 avec T_{x2} , T_{y2} et R_{z2} , et pour ceux appartenant à R3 avec T_{x3} , T_{y3} et R_{z3} (Fig. 2.12). Le repère R3 étant centré sur le repère global R, ses trois transformations sont censées être nulles. Toutefois, la fixation du capteur laser sur le fauteuil amène un léger décalage pratique. Il est nécessaire de pouvoir ajuster son orientation pour que l'axe des ordonnées du troisième repère s'aligne avec l'axe d'avance du fauteuil.

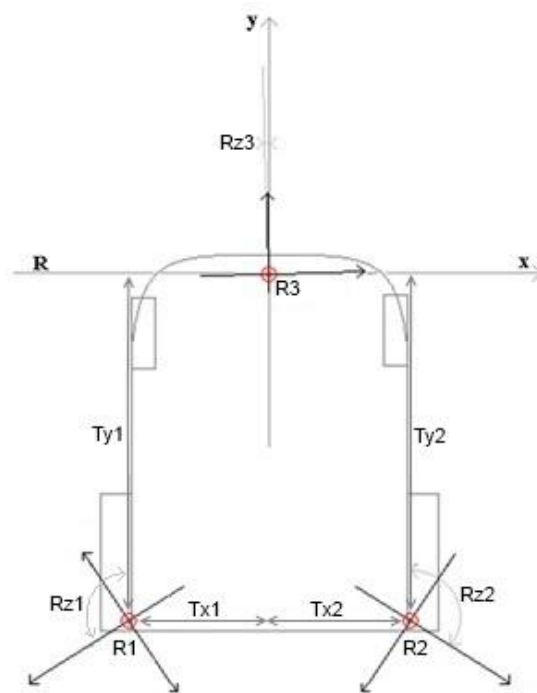


Fig. 2.12 : Transformations des changements de repère.

Pour déterminer les différents paramètres de ces changements de repère, nous avons effectué une première estimation de la position et de l'orientation de chaque capteur sur le fauteuil en mesurant où ils se trouvent par rapport au centre du repère (cela correspond aux deux translations et à la rotation). Puis on effectue les changements de repère avec ces premières estimations (Tableau 2.1). La cartographie des mesures obtenue à partir de ces paramètres (Fig. 2.13) montre un décalage entre les données de chaque laser. Il est donc nécessaire d'effectuer un recalage plus précis afin d'obtenir une bonne superposition des données.

L_i	T_{x_i} (en cm)	T_{y_i} (en cm)	R_{z_i} (en degrés)
L1	-29	-100	-135
L2	29	-100	135
L3	0	0	0

Tableau 2.1 : Première estimation des emplacements des capteurs laser dans le repère global.

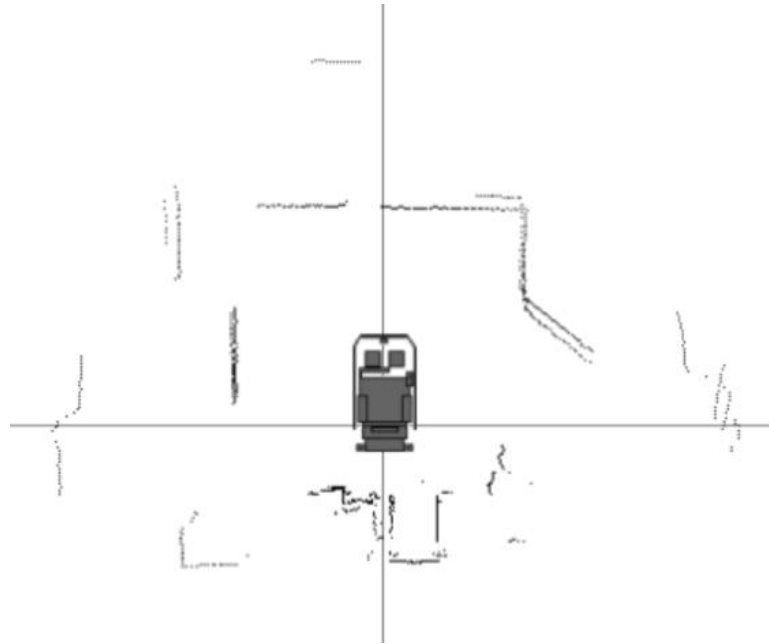


Fig. 2.13 : Cartographie après le changement de repère avec les premières estimations.

Pour cela, on utilise des éléments caractéristiques de l'environnement facilement identifiables dans les mesures laser (comme les coins d'un obstacle par exemple). Chaque élément doit être perçu par deux capteurs différents de manière à ce que l'on puisse ajuster les paramètres par tâtonnement. On place ainsi des panneaux de bois tout autour de fauteuil de manière à former des angles. Chaque capteur laser perçoit trois angles, un qu'il est le seul à voir, un qui est perçu par le capteur laser à sa gauche, et un dernier, qui est perçu par le capteur laser à sa droite (Fig. 2.14).

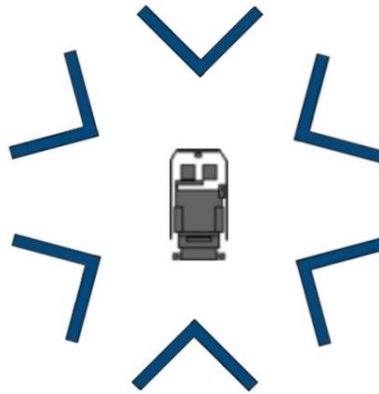


Fig. 2.14 : Disposition des planches de bois pour effectuer l'étalonnage des capteurs.

Ensuite, nous ajustons par tâtonnement les paramètres des changements de repère (T_{xi} , T_{yi} , et R_{zi} des trois capteurs) jusqu'à obtenir la superposition des données laser sur la cartographie. Les angles perçus par un seul capteur nous permettent de connaître avec précision la position des capteurs dans le repère global et les angles perçus par deux capteurs permettent d'ajuster l'orientation d'un capteur par rapport à l'autre avec précision. En ajustant les paramètres de position et d'orientation alternativement, nous arrivons à la superposition et obtenons les paramètres affinés (Tableau 2.2 et Fig. 2.15). L'échelle de la cartographie est de 1cm par pixel, ce qui correspond à la précision des paramètres des changements de repère.

Li	T_{x_i} (en cm)	T_{y_i} (en cm)	R_{z_i} (en degrés)
L1	27	-95	-137
L2	-26,5	-95	129,5
L3	0	0	3

Tableau 2.2 : Paramètres affinés des changements de repère.

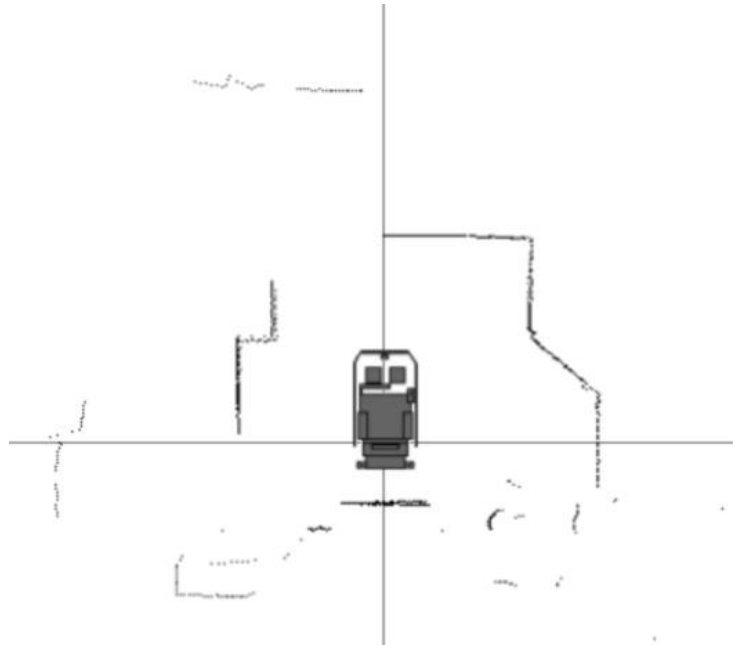


Fig. 2.15 : Données lasers superposées après étalonnage.

Enfin, tous les points de mesure issus des trois capteurs sont stockés en mémoire dans un tableau contenant pour chacun d'entre eux leurs coordonnées cartésiennes et cylindriques (Fig. 2.16).

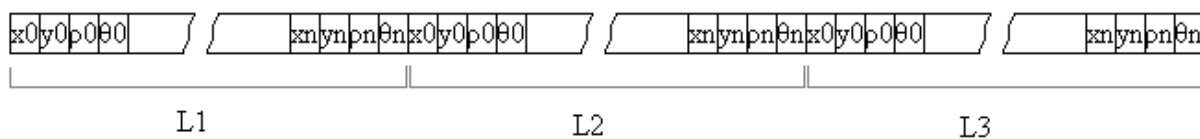


Fig. 2.16 : Structure de mémorisation des données lasers.

2.3.2.3. TRIAGE DES DONNEES LASERS

L'utilisation de plusieurs capteurs laser pose le problème du recouvrement de leur champ de vision (Fig. 2.17). Dans ces zones couvertes par deux lasers, le nombre de points de mesure est plus important que dans les autres zones ce qui renforce la perception dans celles-ci. Cependant, cela engendre également une répartition inégale des points de mesure tout autour du fauteuil. De plus, comme chaque laser effectue son propre balayage angulaire, les mesures prises dans les zones de recouvrement ne se suivent pas et donc les mesures d'un même obstacle perçu par deux lasers se trouvent séparées dans le tableau de mesure. Sous cette forme, il serait difficile d'établir des algorithmes de traitement afin d'extraire les caractéristiques de l'environnement. Il est nécessaire que le tableau de mesures exprime les

données selon un balayage de 0° à 360° . Le centre de ce « laser global » sera le centre du repère global $R\{O ; x ; y\}$. Nous organisons donc les données au moyen de l'algorithme du tri rapide (Hoare 1962) qui permet d'ordonner les mesures relativement à leur position angulaire.

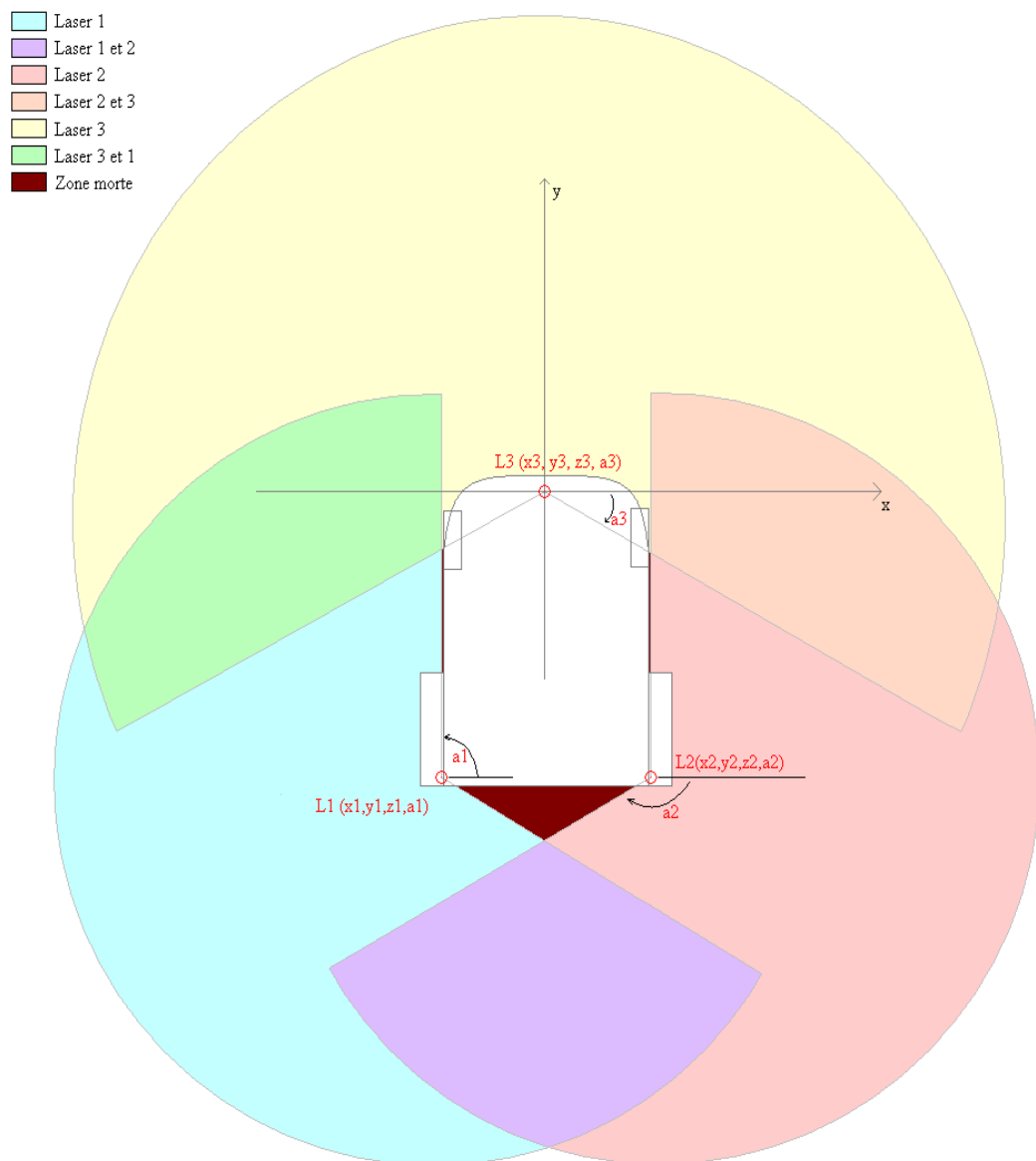


Fig. 2.17 : Chevauchement des visions des capteurs lasers.

2.3.2.4. RECHERCHE DE COHERENCE DES DONNEES LASERS

Un autre problème doit être traité. Dans certaines configurations courantes, la vision d'un obstacle perçu par deux lasers peut rendre les mesures incohérentes. En effet, les points de mesures peuvent être consécutifs angulairement sans pour autant appartenir au même obstacle de l'environnement. Un exemple en est donné Fig. 2.18 où le laser 2 perçoit la planche tandis que le laser 3 perçoit le mur derrière la planche ce qui crée un effet de « pic » lorsque l'on trace le contour de l'environnement point à point. Normalement, si les points avaient été vus par un seul capteur, le mur aurait été masqué par la planche. C'est pourquoi, nous souhaitons établir une méthode de détection de ces configurations permettant d'éliminer ces « pics » afin d'obtenir une continuité entre les points de mesure.

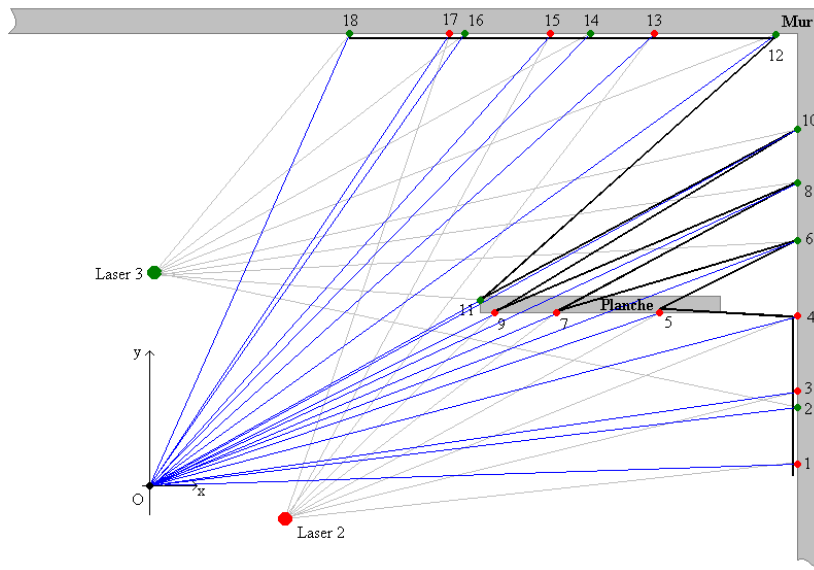


Fig. 2.18 : Illustration du problème des points pics.

Pour cela, on établit une approche basée sur l'analyse des distances séparant un point de ses points voisins. On effectue un balayage sur les points de mesure, et pour chacun d'eux, on mesure la distance qui le sépare du point précédent (notée D_{prec}), la distance le séparant du point suivant (notée D_{suiv}), et enfin, la distance entre le point précédent et le point suivant (notée D_{entre}). La détection des « pics » est assurée en recherchant les cas où D_{prec} ou D_{suiv} est supérieure à D_{entre} . C'est à dire, si l'on considère trois points successifs $M(i-1)$, $M(i)$ et $M(i+1)$, seul les points $M(i)$ appartenant à la région grisée sont préservés (Fig. 2.19).

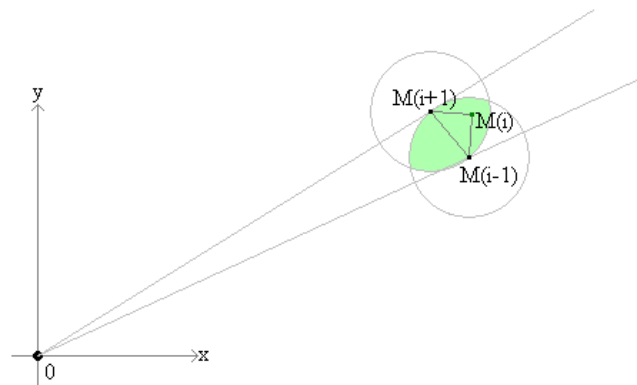


Fig. 2.19 : Méthode de filtrage des points pics.

Lorsqu'un point « pic » est détecté lors du balayage, il est supprimé du tableau de mesure avant de poursuivre le balayage, ce qui revient dans l'exemple de la figure Fig. 2.18 à ne pas considérer les points 6, 8, 10 et 12 issus de la perception du laser 3. De plus, il faut commencer le balayage dans une zone où il n'y a pas de chevauchement de données. En effet, si celui-ci débutait sur un point pic, on risquerait d'éliminer un point valide. Sur l'exemple, en prenant le point 6 comme départ, on éliminerait les points 5, 7 et 9 à la place des points 6, 8 et 10. Le point de départ du balayage est choisi à 90° dans la zone avant du fauteuil, observée uniquement par le capteur L3.

Une fois cette sélection réalisée, les mesures laser sont stockées en ordre angulaire dans un tableau qui sera utilisé facilement par le reste du programme (Fig. 2.20). A chaque nouvelle acquisition, le tableau de mesure est rafraîchi.

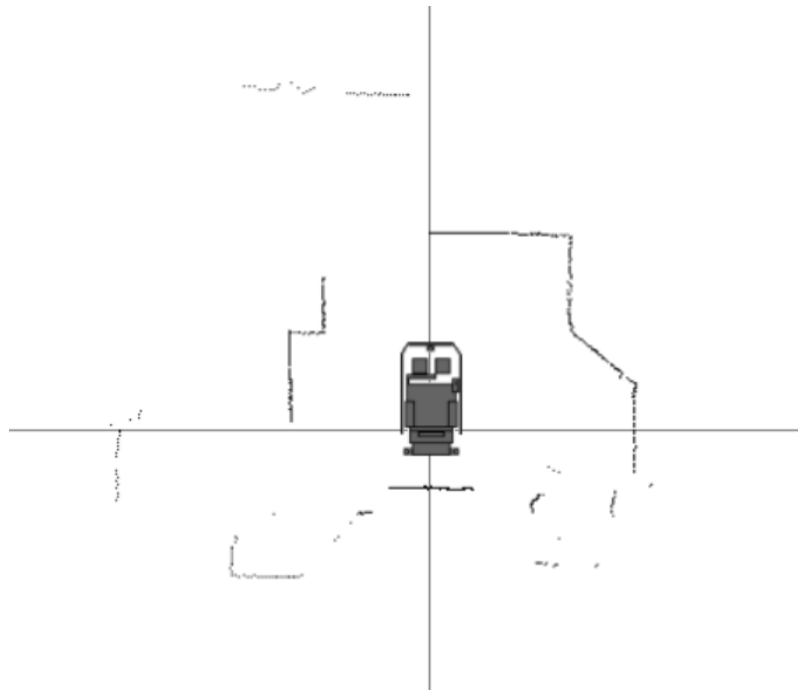


Fig. 2.20 : Mesures laser exprimées dans le repère global après filtrage.

2.4. MODE DE DEPLACEMENT DU FAUTEUIL

2.4.1. INTRODUCTION

L'utilisateur dispose de deux modes de conduite, soit il utilise le joystick du constructeur pour effectuer une conduite manuelle, soit il active via l'interface les fonctionnalités autonomes qui seront détaillées dans le chapitre 3. Nous développons un système d'asservissement qui permet aux différentes fonctionnalités de contrôler le fauteuil. Pour cela, le système de régulation asservit le fauteuil vers un point appartenant à l'environnement, que l'on appelle « Point Cible ». Il sera défini de manière spécifique par chaque fonctionnalité et exprimé par ses coordonnées cylindriques dans le repère du fauteuil correspondant à celui de la cartographie laser. Ce système de régulation est conçu de manière à définir les commandes pour atteindre le point cible avec un comportement de conduite analogue à celui d'un utilisateur qui chercherait à l'atteindre en conduite manuelle.

L'avantage de ce système est de permettre le développement des fonctionnalités autonomes par la définition d'une succession de points cibles sur lesquels le fauteuil sera asservi. La détermination de ces points cibles s'effectue pour chaque fonctionnalité à partir de l'analyse des données laser et des données fournies par l'utilisateur via l'interface. Cela constitue un asservissement en position et en orientation du fauteuil à partir des données extéroceptives, dans lequel la boucle de retour est une analyse de l'environnement orientée par le choix de l'utilisateur.

2.4.2. PRINCIPE DE L'ASSERVISSEMENT

Le système d'asservissement est présenté par le schéma bloc suivant (Fig. 2.21) pour lequel nous détaillerons les différents éléments.

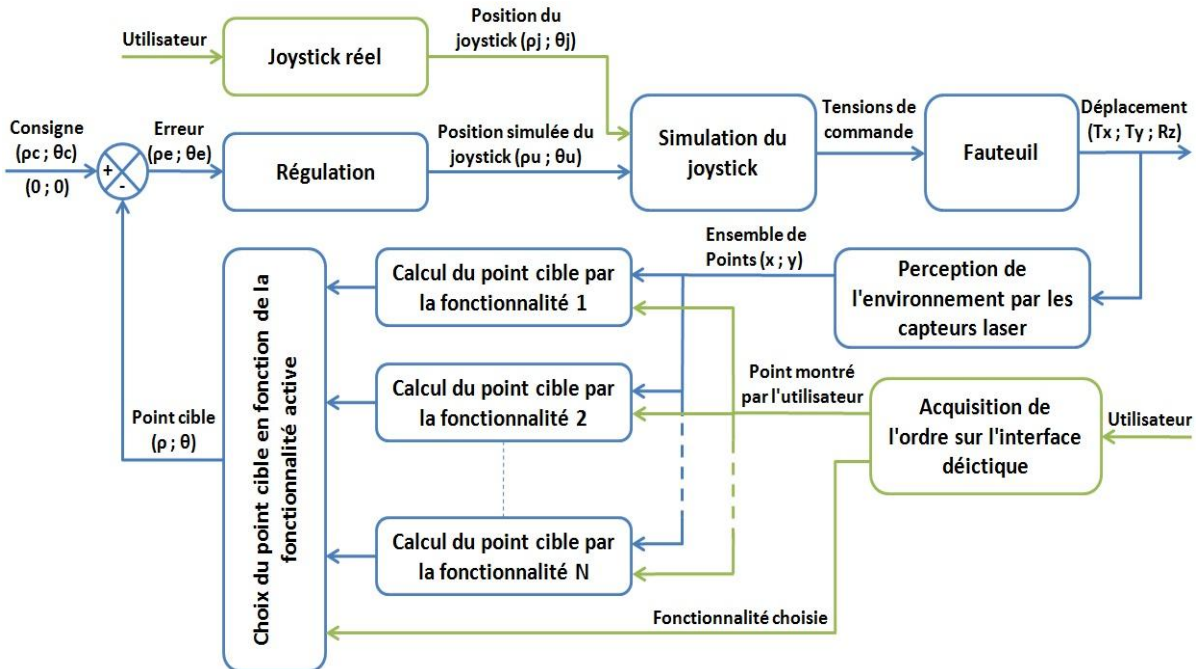


Fig. 2.21 : Architecture de l'asservissement du fauteuil.

Le processus à asservir est le fauteuil pour lequel le modèle n'est a priori pas connu. Il est considéré comme une boîte noire ayant en entrée les tensions de commande envoyées par la carte électronique, et en sortie, le déplacement du fauteuil observé par la perception laser. Il n'est pas nécessaire que la dynamique du fauteuil soit connue précisément. Le système doit s'adapter à tout type de fauteuils électriques commandés par joystick. De plus, le poids de l'utilisateur est variable et possède une grande influence sur la dynamique de celui-ci.

Ensuite, la chaîne directe se compose de deux autres blocs :

- Le premier bloc, la régulation, consiste à déterminer la position simulée du joystick permettant d'atteindre le point cible retenu de manière à s'approcher au mieux de ce qu'aurait fait un utilisateur avec un joystick réel. Le régulateur utilisé est de type PID.
- Le deuxième bloc, la simulation du joystick, a pour objectif de déterminer les tensions à envoyer au fauteuil à partir d'une position donnée du joystick. Cela permet de contrôler le fauteuil par voie logicielle de deux manières, soit en envoyant la position simulée du joystick ($p_u ; \theta_u$) issue du système de régulation afin de déplacer le fauteuil avec les fonctionnalités autonomes, soit en utilisant la position fournie par tout type de joystick ($p_j ; \theta_j$) connecté au système en conduite manuelle. Cela peut être par exemple l'utilisation d'un joystick au menton, ou d'un mini joystick.

Enfin, la boucle de retour est constituée de trois grandes parties :

- La première est la perception de l'environnement par les capteurs lasers que nous avons détaillée précédemment (cf. §2.3). Ce bloc correspond fonctionnellement à l'agent environnemental "Capteur Laser" et fournit de manière périodique le tableau des points de mesure exprimés dans le repère du fauteuil. Celui-ci est disponible pour chaque fonctionnalité autonome.
- La deuxième est l'acquisition de l'ordre utilisateur via l'interface déictique. Ce bloc correspond fonctionnellement à l'agent environnemental "Vidéo" et sera détaillé dans le chapitre 4. L'ordre de l'utilisateur est caractérisé par deux informations, le choix de la fonctionnalité à activer et l'emplacement dans le repère du fauteuil où elle doit être appliquée.
- La troisième partie se compose de toutes les fonctionnalités autonomes, correspondant fonctionnellement aux agents comportementaux. Chacune d'entre elles définit un point cible à partir du tableau de mesures et de l'emplacement montré par l'utilisateur pour appliquer la fonctionnalité. Le comportement de déplacement est ainsi généré par une succession de points cibles caractérisés par leurs coordonnées cylindriques ρ et θ . Cette partie sera approfondie dans le chapitre 3.

2.4.3. MODE DE CONTROLE DU FAUTEUIL

Le fauteuil doit être contrôlé par voie logicielle de la même manière pour les deux modes de contrôle, que ce soit par les fonctionnalités via le système de régulation, ou par la commande manuelle via le joystick. Pour cela, nous concevons une commande par « simulation du joystick » qui consiste à traduire une position de joystick caractérisée par son amplitude et son orientation en tension de commande permettant le contrôle du fauteuil via la carte électronique. Le contrôle automatique se caractérise par les étapes suivantes. Tout d'abord, chaque fonctionnalité fournit un point cible à partir de l'analyse de l'environnement et de l'interface. Ensuite, le fauteuil est asservi sur le point cible de la fonctionnalité choisie par l'utilisateur. Le système de régulation détermine alors une position fictive du joystick permettant l'atteinte de ce point cible. Enfin, cette position fictive d'un joystick est traduite en tensions de commande qui sont envoyées au fauteuil. Ainsi, les trajectoires issues du système de régulation s'exprimeront en une succession de positions fictives du joystick.

En ce qui concerne la commande par le joystick réel, les contraintes matérielles de l'application nous imposent de les faire passer par le module de simulation. Nous créons donc un agent comportemental (Contrôle Manuel) qui a pour rôle de reproduire la commande manuelle fournie à partir du joystick du constructeur. Pour cela, la position du joystick est récupérée via notre carte électronique, puis est caractérisée par son amplitude et son orientation qui sont alors traduites en tensions de commande. Ce mode de fonctionnement permet de vérifier et d'ajuster les paramètres de la simulation du joystick. En effet, la conduite manuelle doit être identique avec ou sans passage par le module de simulation du joystick ; l'établissement de ce module sera détaillé dans la partie suivante. Cet agent comportemental

prend également en charge tout autre joystick que l'on peut connecter au système. Il peut aussi être activé manuellement via l'interface. Pour cela, l'utilisateur dispose d'un cercle représentant le joystick dans lequel il peut déplacer une flèche à l'aide du curseur à l'écran. L'amplitude et l'orientation de cette flèche indiquent une position simulée d'un joystick et permet ainsi le contrôle du fauteuil en passant par la simulation du joystick (Fig. 2.22).



Fig. 2.22 : Interface de la commande manuelle reproduit par notre application.

2.4.4. SIMULATION DU JOYSTICK PAR LOGIQUE FLOUE

2.4.4.1. INTRODUCTION

La simulation du joystick doit reproduire par voie logicielle les comportements en déplacement du fauteuil tels qu'ils sont générés avec le joystick du constructeur. La variation des tensions de commande en fonction de celle de la position du joystick n'est pas connue précisément, il est donc nécessaire d'établir le lien entre les deux. Une solution serait d'identifier les tensions de commande pour toutes les positions possibles du joystick et d'en établir une matrice de passage. Cependant, cela présente l'inconvénient qu'elle ne serait valable que sur notre prototype. Nous préférons rechercher une méthode permettant de s'adapter facilement à tout type de fauteuil électrique commandé par joystick. Pour cela, nous créons un module de logique floue établissant ce lien à partir de l'observation des

comportements en déplacement du fauteuil. Les entrées de ce module sont l'amplitude ρ_u et l'orientation θ_u de la position simulée du joystick et les sorties sont deux tensions de commande intermédiaires, nommées Taa et Tgd, qui sont une représentation simplifiée des tensions verticale et horizontale du joystick. Ces deux tensions sont ensuite conditionnées dans le format spécifique correspondant aux tensions de commande envoyées par le joystick réel au fauteuil.

Pour développer le module de logique floue, nous analysons le fonctionnement du joystick réel. Son amplitude peut varier de 0 à 100%, allant de sa position au repos jusqu'à son inclinaison maximale, et son orientation peut varier sur 360° (l'angle nul est choisi arbitrairement sur l'axe d'avance du fauteuil). Lors de l'utilisation du joystick, nous remarquons que le comportement en marche avant est symétrique au comportement en marche arrière, à la seule différence que les amplitudes en sorties ont un niveau différent. C'est à dire que la vitesse maximale d'avance est légèrement supérieure à la vitesse maximale de recul. Nous dissocions donc les deux modalités de fonctionnement, la marche avant pour toutes les positions ayant une orientation comprise entre -90° et 90°, et la marche arrière pour toutes les positions au-delà de 90° ou inférieures à -90°. Dans un premier temps, nous développons le module de logique floue pour la marche avant, puis nous l'adapterons ensuite au fonctionnement arrière.

2.4.4.2. STRUCTURE

Le module de logique floue se compose de plusieurs parties (Bouchon-Meunier et Zadeh 1995). La normalisation permet de mettre à l'échelle les entrées, la fuzzification consiste à projeter les entrées sur des ensembles flous, l'inférence transforme les ensembles flous d'entrée en ensembles flous de sortie en appliquant des règles, la défuzzification détermine des valeurs numériques à partir des ensembles flous de sortie, et enfin, l'amplification met à l'échelle les valeurs numériques de sortie (Fig. 2.23).

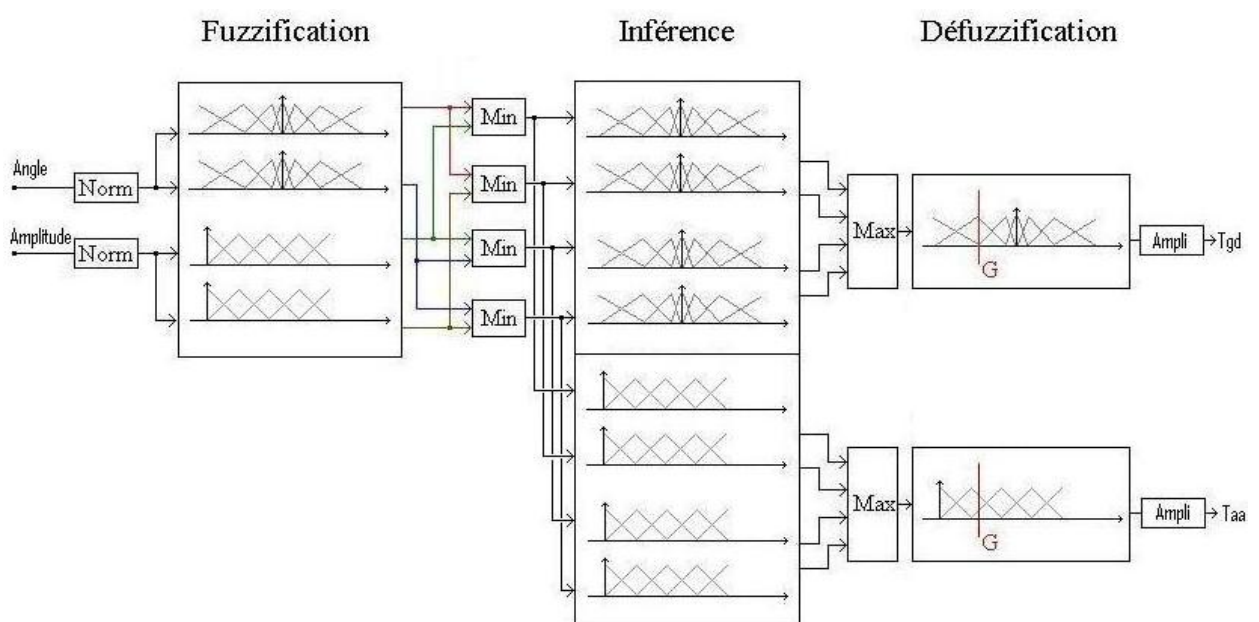


Fig. 2.23 : Structure de la logique floue

2.4.4.3. NORMALISATION

La première étape de la logique floue consiste à normaliser nos entrées ρ_u et θ_u , la variation de ρ_u allant de 0, la position au repos, à son maximum $\widehat{\rho_u}$ (100%), lorsque l'inclinaison du joystick simulée est à son maximum. Ensuite, la variation de l'orientation θ_u sera limitée à un minimum $\widehat{\theta_u}$ (-90°) jusqu'à son maximum $\widehat{\theta_u}$ (+90°). La normalisation de l'amplitude et de l'orientation sont exprimées par les équations (2.1) et (2.2) avec ρ_{uN} variant de 0 à 1 et θ_{uN} variant de -1 à 1.

$$\rho_{uN} = \frac{\rho_u}{\widehat{\rho_u}} \quad (2.1)$$

$$\theta_{uN} = \frac{2\theta_u}{\widehat{\theta_u} - \widehat{\theta_u}} \quad (2.2)$$

2.4.4.4. FUZZIFICATION

- CHOIX DES ENSEMBLES FLOUS EN ENTREE

Cette étape consiste à projeter les entrées normalisées ρ_{uN} et θ_{uN} dans des ensembles flous. Ces derniers sont composés de fonctions d'appartenance traduisant un état linguistique. Chaque ensemble flou possède une structure dépendant de la nature de la variable d'entrée qui lui est associée. Ainsi, pour déterminer les ensembles flous liés aux variables d'entrée ρ_{uN} et θ_{uN} , nous nous intéressons à leur nature. Tout d'abord, la variation de l'amplitude du joystick traduit la volonté de vitesse, plus l'amplitude est grande plus on souhaite aller vite. Nous considérerons l'augmentation de la vitesse comme proportionnelle à l'amplitude du joystick, nous choisissons donc une répartition linéaire des fonctions d'appartenance dans l'ensemble flou lié à l'amplitude ρ_{uN} (Fig. 2.24).

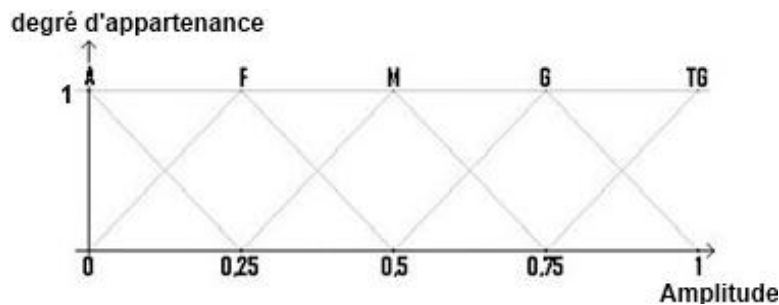


Fig. 2.24 : Ensemble flou associé à l'amplitude ρ_{uN} .

Les fonctions d'appartenance sont triangulaires. Chacune d'entre elles traduit un niveau de vitesse, soit A la vitesse nulle, F une vitesse faible, M une vitesse moyenne, G une vitesse importante, TG la vitesse maximale. Pour se représenter la répartition de ces fonctions, nous pouvons observer leurs correspondances sur une position simulée de joystick (Fig. 2.25).

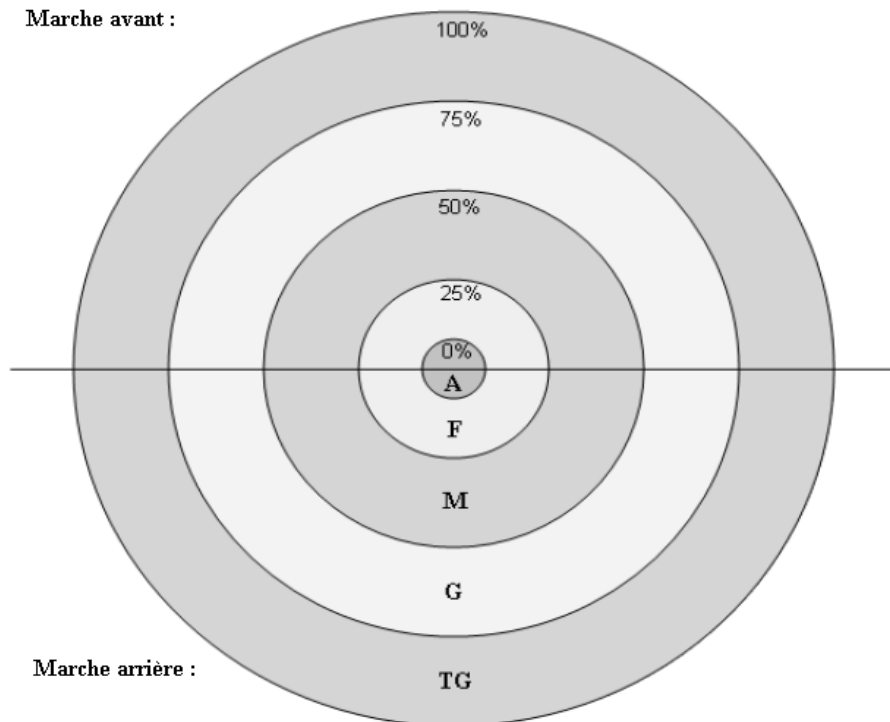


Fig. 2.25 : Correspondance des fonctions d'appartenance liées à l'amplitude avec une position simulée d'un joystick.

Ensuite, l'orientation du joystick indique directement la direction vers laquelle on souhaite se diriger. Pour une même amplitude du joystick, une variation de l'angle d'orientation autour de zéro entraîne une montée en vitesse angulaire plus importante que la même variation d'angle autour de l'orientation maximale. C'est pourquoi nous choisissons l'ensemble flou associé à l'orientation θ_{uN} suivant (Fig. 2.26).

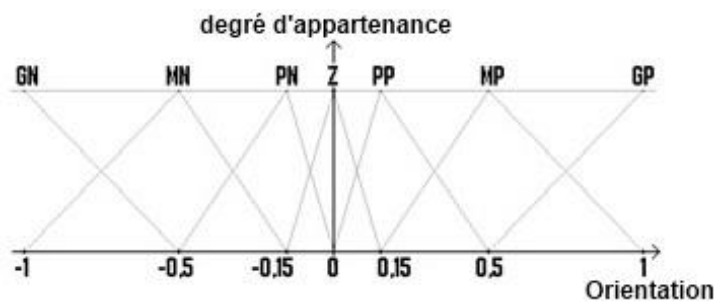


Fig. 2.26 : Ensemble flou associé à l'orientation θ_{uN} .

La répartition des fonctions d'appartenance en fonction des positions du joystick est alors la suivante (Fig. 2.27). Chacune des zones traduit une orientation vers laquelle le fauteuil doit se diriger, soit Z tout droit, PN légèrement sur la gauche, PP légèrement sur la droite, MN moyennement à gauche, MP moyennement à droite, GN fortement à gauche, GP fortement à droite. Pour se représenter la répartition de ces fonctions, nous pouvons observer leurs correspondances sur une position simulée de joystick.

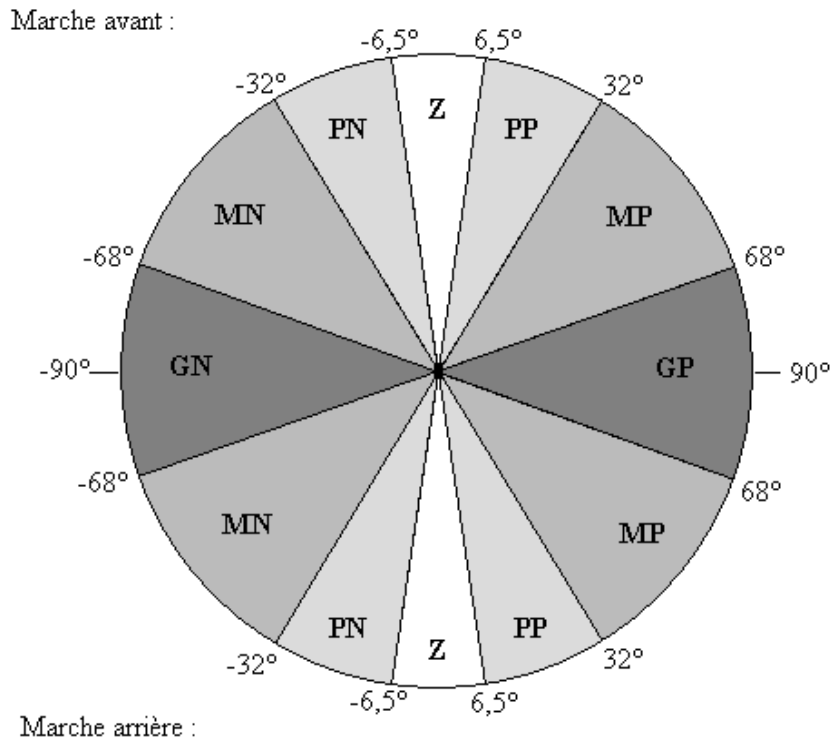


Fig. 2.27 : Correspondance des fonctions d'appartenance liées à l'orientation avec une position simulée d'un joystick.

Dans ces deux ensembles flous, l'amplitude d'une fonction d'appartenance est appelée « degrés de vérité », celle-ci varie de 0 à 1. L'appartenance à une fonction est « fausse » à 0 et « vraie » à 1 comme dans un fonctionnement binaire, entre ces deux valeurs, la logique floue introduit la notion de « un peu vrai ». La projection d'une variable d'entrée dans un ensemble flou coupe deux fonctions d'appartenance. Cela peut se traduire par exemple comme un peu à vitesse faible et beaucoup à vitesse moyenne. Ainsi, une fois que les deux variables d'entrées ont été projetées dans leurs ensembles flous respectifs, on obtient en sortie de l'étape de fuzzification quatre fonctions d'appartenances couplées à quatre degrés de vérité différents.

- CHOIX DES ENSEMBLES FLOUS EN SORTIE

Après avoir déterminé les ensembles flous associés aux entrées, il faut également déterminer ceux dans lesquels les sorties Taa et Tgd seront établies. De la même manière nous nous intéressons à la nature de ces variables. Taa représente un indice de la vitesse d'avance du fauteuil, plus Taa est grand plus le fauteuil avance vite. Nous considérons la relation entre Taa et la vitesse d'avance comme proportionnelle, nous utiliserons donc le même ensemble flou que celui de l'amplitude du joystick (Fig. 2.24), c'est à dire une répartition linéaire avec les mêmes fonctions d'appartenance. Ensuite, Tgd représente un indice de la vitesse angulaire du fauteuil, de la même manière que pour l'orientation du joystick. Nous utiliserons également le même ensemble flou en sortie pour Tgd que pour l'orientation du joystick θ_u en entrée (Fig. 2.26).

2.4.4.5. INFERENCE

L'étape d'inférence permet de déterminer les ensembles flous des sorties à partir des ensembles flous des entrées grâce à des règles d'inférence. Celles-ci s'appliquent sur les fonctions d'appartenance et s'articulent de la manière suivante : « Si l'entrée 1 appartient à la fonction d'appartenance A ET si l'entrée 2 appartient à la fonction d'appartenance B ALORS la sortie 1 appartiendra à la fonction d'appartenance C ET la sortie 2 appartiendra à la fonction d'appartenance D ». Toutes les règles régissant le fonctionnement du système sont exprimées dans une matrice d'inférence.

- DETERMINATION DE LA MATRICE D'INFERENCE

Pour réaliser la matrice d'inférence, nous devons déterminer les règles qui lient les deux entrées ρ_{uN} et θ_{uN} projetées dans leurs ensembles flous avec les deux sorties Taa et Tgd dans leurs ensembles flous. Pour cela, nous devons analyser le comportement du fauteuil lorsqu'on le déplace avec le joystick. En observant le fauteuil, nous établissons les règles suivantes.

- Les vitesses angulaire et linéaire sont liées. En effet, lorsque l'on veut tourner et avancer en même temps, il faut adapter la vitesse d'avance en fonction de la vitesse angulaire désirée.
- Le fauteuil avance à sa vitesse linéaire maximale uniquement lorsque l'amplitude du joystick est à fond et avec un angle nul.
- Pour une amplitude linéaire donnée, l'augmentation de l'angle (dans les deux sens droite et gauche) amène un ralentissement de la vitesse linéaire.
- Pour un angle nul, la variation de la vitesse linéaire est proportionnelle à la variation d'amplitude.
- Les variations angulaires doivent être modérées à faible vitesse pour ne pas provoquer d'à-coup ou de comportement instable lors d'une approche.

Ces différents comportements permettent d'établir la matrice d'inférence (Tableau 2.3). La première règle indique de manière générale que dans chaque couple d'entrée $\{\rho_{uN} ; \theta_{uN}\}$ on obtient un couple de sortie $\{Taa; Tgd\}$ de manière que ces deux sorties appartiennent à des fonctions d'appartenance ne provoquant pas de comportements contradictoires. Par exemple, si on demande une forte amplitude avec un fort angle, le fauteuil ne peut pas avancer à fond et tourner à fond en même temps sous risque de faire basculer le fauteuil (c'est une règle de bon sens), c'est pourquoi il faut adapter les sorties en conséquence. Ensuite pour les autres règles, on trouve leurs effets dans des parties bien définies de la matrice. Ainsi, la deuxième règle correspond à la partie en rouge, la troisième à la partie en bleu, la quatrième à la partie en vert et enfin la dernière à la partie en jaune.

\		Angle θ_{uN}							Sorties
		GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP	
Amplitude ρ_{uN}	A	A	A	A	A	A	A	A	Taa
		PN	PN	Z	Z	Z	PP	PP	Tgd
	F	F	F	F	F	F	F	F	Taa
		MN	PN	PN	Z	PP	PP	MP	Tgd
	M	F	F	M	M	M	F	F	Taa
		GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP	Tgd
	G	F	M	G	G	G	M	F	Taa
		GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP	Tgd
	TG	F	M	G	TG	G	M	F	Taa
		GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP	Tgd

Tableau 2.3 : Matrice d'inférence.

Un exemple de règle issue de cette matrice : « SI θ_{uN} appartient à MN ET ρ_{uN} appartient à M ALORS Tgd appartiendra à MN ET Taa appartiendra à F ».

- MOTEUR D'INFERENCE

Après avoir déterminé les différentes fonctions d'appartenance des sorties, il faut déterminer leurs degrés de vérité. Pour cela on utilise la méthode min/max de Mamdani qui s'exprime comme suit. Lorsqu'on applique une règle entre deux entrées, on garde le degré de vérité minimal entre ces deux entrées comme degrés de vérité des sorties. C'est la partie « Min » de la méthode. Après avoir appliqué les règles d'inférence, chaque sortie est caractérisée par quatre fonctions d'appartenance associées à quatre degrés de vérité issus des différentes combinaisons des entrées fuzzifiées. Pour déterminer l'ensemble flou final de chaque sortie Taa et Tgd, on agglomère les quatre fonctions d'appartenance obtenues pour chaque sortie en donnant comme degrés de vérité la valeur maximale de chaque fonction d'appartenance. C'est la partie « Max » de la méthode. Ainsi, en sortie d'inférence, on obtient deux ensembles flous caractérisant l'état des sorties Taa et Tgd.

2.4.4.6. DEFUZZIFICATION

L'étape de défuzzification a pour rôle de convertir les ensembles flous de sortie en valeurs déterministes significatives de ces ensembles. Pour cela, nous utilisons la méthode du centre de gravité. Les centres de gravité de Taa et Tgd sont exprimés par les équations (2.3) et (2.4).

$$GT_{aa} = \frac{\sum_{i=0}^n \mu T_{aa}(i) \times T_{aa}(i)}{\sum_{i=0}^n \mu T_{aa}(i)} \quad (2.3)$$

$$GT_{gd} = \frac{\sum_{i=0}^n \mu T_{gd}(i) \times T_{gd}(i)}{\sum_{i=0}^n \mu T_{gd}(i)} \quad (2.4)$$

Avec :

$\mu T_{gd}(i)$: le degré de vérité à $T_{gd}(i)$.

$T_{gd}(i)$: abscisse normalisée de la sortie angulaire variant sur $[-1 ; 1]$.

$\mu T_{aa}(i)$: le degré de vérité à $T_{aa}(i)$.

$T_{aa}(i)$: abscisse normalisée de la sortie linéaire variant sur $[0 ; 1]$.

GT_{gd} et GT_{aa} : les centres de gravité de T_{aa} et T_{gd} .

Les valeurs de sortie obtenues sont normalisées, il faut donc les mettre à l'échelle. Pour chacune d'elle, un coefficient d'amplification est choisi de manière à obtenir les mêmes niveaux de tensions que ceux fournis par le joystick réel. Pour les ajuster, nous basculons de la conduite manuelle par joystick en passant par la logique floue avec la conduite manuelle sans passer par le module. Nous affinons les coefficients d'amplification jusqu'à ne plus ressentir de différence entre les deux modes.

2.4.4.7. FONCTIONNEMENT ARRIERE

Pour prendre en compte le fonctionnement arrière, nous utilisons la logique floue précédemment décrite de manière symétrique. Pour cela, nous conditionnons les positions du joystick appartenant à la marche arrière de manière à obtenir une variation de l'orientation allant de -90° à 90° . Ainsi, toutes positions ayant une orientation au delà de 90° ou inférieures à -90° déclenchent la marche arrière et sont conditionnées comme l'illustre la figure suivante (Fig. 2.28). Par exemple, une orientation de 120° devient une orientation de 60° en marche arrière. Ensuite, en sortie de la logique floue, la tension de sortie T_{aa} est inversée pour générer la marche arrière et est amplifiée avec un coefficient propre à la marche arrière.

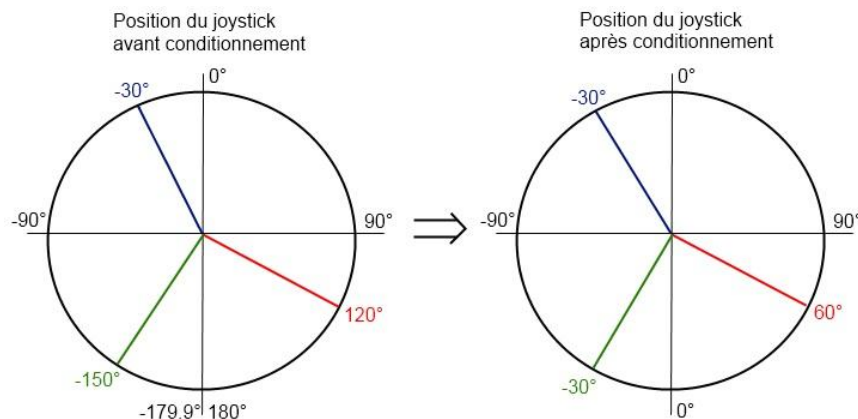


Fig. 2.28 : Conditionnement de l'orientation de la position simulée du joystick.

Cette méthode présente deux avantages. Le premier est que la variation en orientation du joystick est continue. Le passage de la marche avant vers la marche arrière ne présente aucun à-coup. Le deuxième est qu'elle permet d'ajuster l'amplitude des tensions de sortie pour la marche avant indépendamment de la marche arrière en ajustant les coefficients d'amplification. Ceci permet un réglage adapté des vitesses d'avance et de recul (les tensions Tgd des deux modes restent identiques).

2.4.4.8. ESSAIS EN SIMULATION DU MODULE DE LOGIQUE FLOUE

Avant de mettre en application le module de logique floue sur le fauteuil, nous réalisons un simulateur permettant de visualiser son fonctionnement et vérifier que tous les comportements reproduits par les règles d'inférences s'effectuent correctement. Pour cela, l'utilisateur entre lui-même les entrées et le réglage de la logique floue (amplitude, orientation, bornes de normalisation, et amplificateurs des sorties). Ensuite, pour chaque étape, les ensembles flous et les sorties sont automatiquement affichées (Fig. 2.29). En haut à gauche, les deux ensembles flous correspondent à la fuzzification de l'orientation du joystick et en bas à gauche, les deux ensembles correspondent à celle de l'amplitude du joystick. En haut au milieu, les quatre ensembles représentent les ensembles flous de la sortie Tgd après inférence, et à droite les quatre ensembles de la sortie Taa. Enfin, les deux ensembles flous agglomérés des deux sorties Taa et Tgd sont affichés en bas à droite. Les résultats numériques sont affichés en bas à gauche.

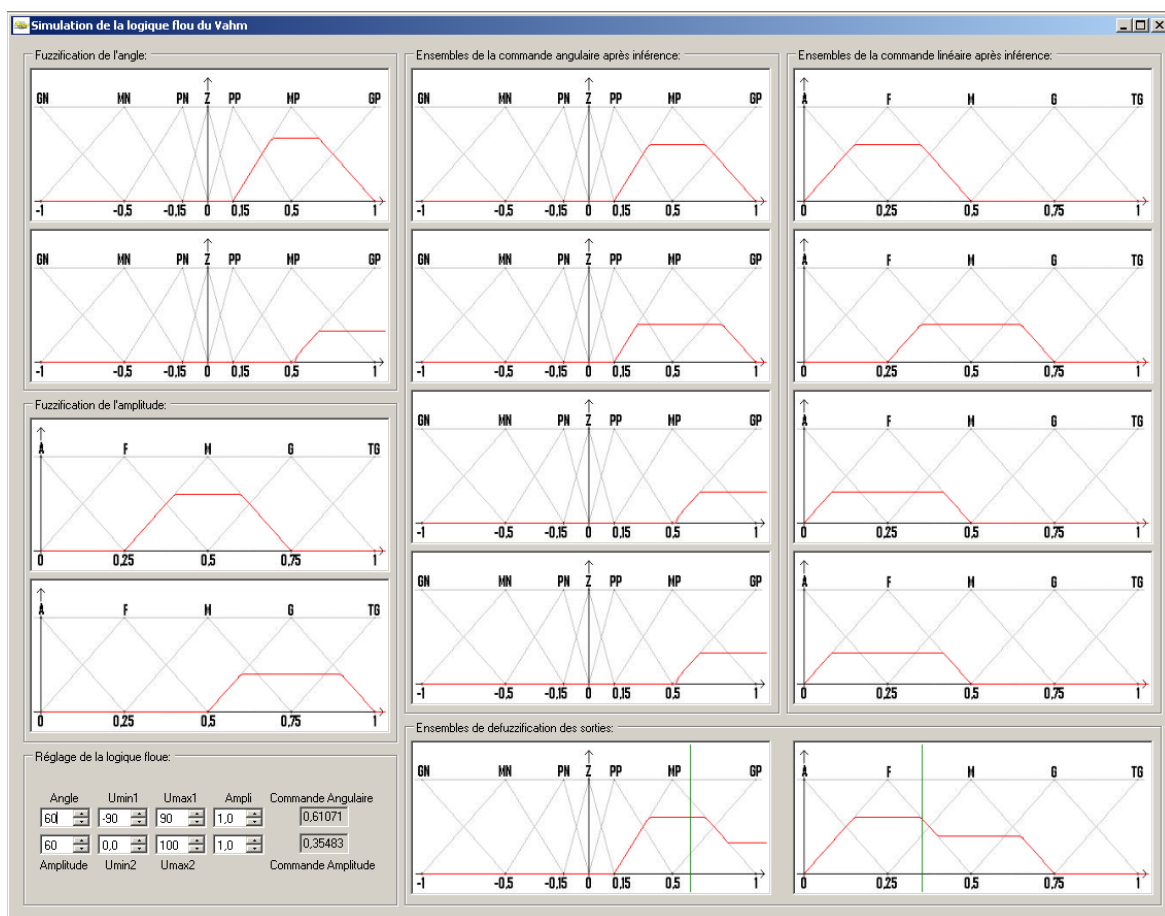


Fig. 2.29 : Essai en simulation du module de logique floue.

2.4.4.9. CONDITIONNEMENT DES TENSIONS

L'envoi des tensions de commande s'effectue via la carte électronique qui se connecte au boîtier de contrôle du fauteuil en remplaçant le joystick. Les tensions de commande à envoyer doivent avoir le même format que celles envoyées par le joystick d'origine. Ce système est adaptable à tout fauteuil électrique car le format des tensions fournies par un joystick est identique pour quasiment tous les boîtiers de contrôle des fauteuils actuels, il suffit d'ajuster les paramètres du module de simulation du joystick.

Les tensions de commande Taa et Tgd issues du module de logique floue sont centrées sur la position au repos du joystick. Cela permet de mettre en évidence les liens entre ces tensions et la position du joystick. Ainsi, le fauteuil est immobile pour des valeurs nulles de Taa et Tgd, et une variation de Taa et Tgd induit respectivement une variation de la vitesse linéaire et de la vitesse angulaire du fauteuil. Mais les tensions que délivre le joystick réel sont dans un format spécifique. Il nous faut conditionner Taa et Tgd sous le format attendu par le boîtier de commande. Le format des tensions du joystick, le format des tensions de commande, et la méthode de conversion permettant le passage d'un format à l'autre sont présentés dans l'annexe B.

2.4.5. REGULATION

2.4.5.1. INTRODUCTION

Le rôle du bloc régulateur est de générer une position simulée du joystick caractérisée par une amplitude ρ_u et une orientation θ_u afin d'atteindre un point cible dans l'environnement caractérisé par ses coordonnées cylindriques exprimées dans le repère global, soit la distance ρ et l'angle θ . La succession de positions du joystick simulées se rapprochera autant que possible de celles qu'aurait envoyé un utilisateur afin qu'il soit facile à celui-ci de comprendre ce que fait le fauteuil et ainsi qu'il accepte facilement l'utilisation des fonctionnalités autonomes. Pour le développement de notre assistance à la conduite, nous analyserons donc la manière dont est manipulé le joystick par une personne en conduite manuelle afin de reproduire le même type de commande.

L'objectif étant l'atteinte du point cible, la consigne est choisie de manière à superposer le point cible visé et le centre du repère du fauteuil, soit pour une distance ρ_c nulle et une orientation θ_c nulle. Les erreurs en entrée du régulateur sont donc composées d'une erreur en distance ρ_e séparant le centre du repère global du fauteuil du point cible et d'une erreur angulaire θ_e représentant l'angle entre l'axe d'avance du fauteuil et l'axe reliant le centre du repère global au point cible. Le module de régulation va calculer l'amplitude et l'orientation d'une position simulée du joystick en fonction de ces deux erreurs.

2.4.5.2. DETERMINATION DE L'AMPLITUDE DE LA POSITION SIMULEE DU JOYSTICK

Lorsque l'on observe les mouvements du joystick lors d'un déplacement quelconque, le conducteur utilise en quasi permanence l'amplitude maximale du joystick. Le seul cas où il

réduit et adapte une amplitude plus basse est lors d'une approche d'une position particulière (par exemple, la rencontre d'un obstacle, ou lorsque l'on atteint son objectif). Le relâchement du joystick correspond à un ralentissement progressif jusqu'à l'arrêt. Il faut donc prévoir lors de l'approche de l'objectif une diminution de vitesse similaire en tenant compte de ce comportement. Par ailleurs, il faut éviter que le fauteuil tente de s'arrêter en une distance inférieure à son temps naturel de freinage (lié à l'inertie). On mesure donc la distance nécessaire au fauteuil pour s'arrêter de manière douce, sans à-coup lorsque l'on relâche le joystick progressivement ; elle est environ de 30cm. Ainsi, tant que l'erreur de position ρ_e est supérieure à 30cm, la commande en amplitude est de 100%. En dessous, la relation entre ρ_e et ρ_u est linéaire (Fig. 2.30), ce qui permet une approche du point cible de manière fluide et contrôlée.

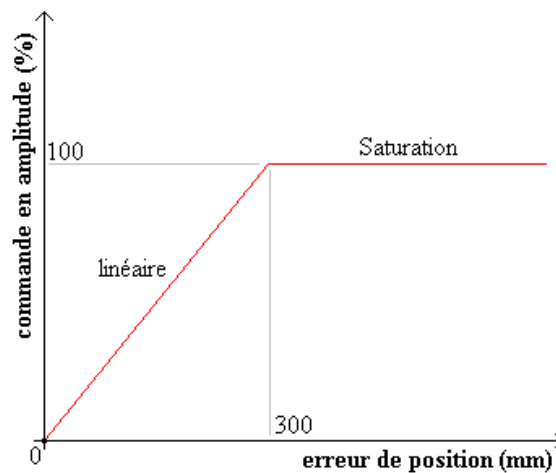


Fig. 2.30 : Détermination de la commande en amplitude à partir de ρ_e .

2.4.5.3. DETERMINATION DE L'ORIENTATION DE LA POSITION SIMULEE DU JOYSTICK

Lorsqu'un utilisateur souhaite se diriger dans une direction, il incline le joystick vers celle-ci. Lorsque le fauteuil commence à tourner et s'approche de l'alignement désiré, l'utilisateur réduit progressivement l'orientation du joystick jusqu'à une orientation nulle lorsque le fauteuil est correctement aligné. Ainsi, pour déterminer l'orientation de la position simulée du joystick, nous utilisons uniquement l'erreur angulaire θ_e . Ensuite, pour reproduire le ralentissement progressif de l'orientation, nous utilisons un régulateur de type PID discret (Samet et al. 1997). Celui-ci prend en compte les états antérieurs des erreurs et des commandes envoyées lorsqu'il détermine l'orientation. Cela permet d'anticiper le ralentissement angulaire à l'approche de la direction.

Pour paramétrer le régulateur PID, nous utilisons la méthode empirique de Takahashi. Celle-ci permet un réglage directement en boucle fermée sans avoir besoin d'identifier le modèle du fauteuil. Cette méthode a besoin de deux paramètres. Le premier est le gain d'oscillation, nommé Kosc qui correspond au gain minimal du correcteur proportionnel pour lequel le fauteuil entre en oscillations autour de la direction visée. Le deuxième est la période de ces oscillations, nommée Tosc. Pour déterminer ces deux paramètres, on utilise la partie proportionnelle du régulateur et l'on augmente le coefficient proportionnel jusqu'à obtenir le

régime oscillatoire. On relève alors K_{osc} , correspondant à ce coefficient et on détermine T_{osc} en fonction du nombre d'échantillons durant une période d'oscillation. En pratique, le fauteuil se dirige vers un point cible défini et suivi dans l'environnement à chaque rafraichissement des mesures laser (les méthodes le permettant seront expliquées dans le chapitre 3). La trajectoire du fauteuil est mémorisée lors des essais afin de mieux identifier le régime oscillatoire (Fig. 2.31). La courbe en rouge représente la trajectoire du capteur laser à l'avant du fauteuil et la courbe en bleu la trajectoire du point central de l'axe des roues motrices. On mesure K_{osc} égal à 8 qui correspond à une trajectoire oscillante du fauteuil pour laquelle nous mesurons $T_{osc} = 20T_e$ (T_e représente le temps de rafraichissement des mesures, il est environ égal à 200ms).

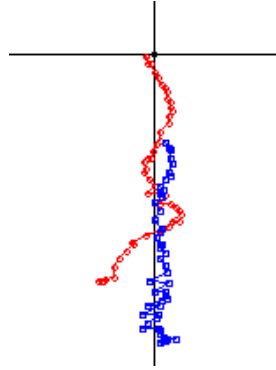


Fig. 2.31 : Trajectoire du fauteuil à $K = K_{osc}$.

Ensuite, on détermine les coefficients du correcteur PID, soit K_p le correcteur proportionnel, K_d le coefficient du correcteur dérivé et K_i le coefficient du correcteur intégral, à l'aide des équations (2.5), (2.6) et (2.7).

$$K_i = \frac{1,2 \times T_e \times K_{osc}}{T_{osc}} = 0,48 \quad (2.5)$$

$$K_p = 0,6 \times K_{osc} - 0,5 \times K_i = 4 \quad (2.6)$$

$$K_d = \frac{3 \times K_{osc} \times T_{osc}}{40 \times T_e} = 12 \quad (2.7)$$

Ces valeurs déterminent un ordre de grandeur des paramètres à partir duquel ils sont ajustés. Tout d'abord, nous observons un effet mémoire provoqué par l'action intégrale engendrant des dépassements trop importants. Afin de les supprimer nous réduisons notre régulateur PID à un régulateur de type Proportionnel-Dérivé en supprimant le correcteur intégral. Nous ajustons empiriquement la valeur du correcteur dérivé et du correcteur proportionnel afin d'obtenir un comportement confortable et adapté. Nous utilisons les paramètres finaux suivant : $K_p=4$, $K_i=0$ et $K_d=11$. La trajectoire suivante illustre l'asservissement en orientation qui ne présente pas de dépassement (Fig. 2.32).

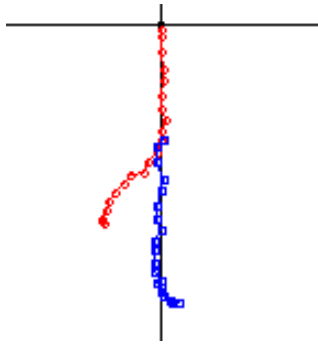


Fig. 2.32 : Trajectoire obtenue avec $K_i=0$, $K_p=4$ et $K_d=11$ (Angle de départ de 40°).

2.4.5.4. RESULTATS

Le système d'asservissement du fauteuil permet d'atteindre un point cible selon une trajectoire similaire à celle qu'aurait réalisé un utilisateur à l'aide d'un joystick réel. Nous obtenons ainsi des déplacements sans surprises qui peuvent être anticipés par l'utilisateur. Un des avantages les plus importants est que l'on prend en compte des manœuvres de braquage directement dans le système d'asservissement. Lorsque le point cible est derrière lui ou sur son côté, le régulateur fournira un angle de joystick très élevé qui sera traduit en une rotation en marche arrière par la logique floue, puis au fur et à mesure que l'orientation se réduit le régulateur va générer un angle plus faible, permettant au fauteuil de passer en marche avant tout en continuant de réduire l'orientation et en avançant vers la cible jusqu'à l'atteindre. On obtient ainsi des déplacements complexes entièrement gérés par le système d'asservissement. Par la suite, toutes les fonctionnalités que nous développerons n'auront qu'à indiquer un point à atteindre pour déplacer le fauteuil vers celui-ci, ce qui facilitera grandement leurs développements.

2.5. CONCLUSION

La structure matérielle de notre assistance a pour principal avantage d'être légère et facilement transposable sur tout type de fauteuil électrique standard. Le matériel employé (capteurs laser et caméra) a un faible encombrement et fournit toutes les informations nécessaires à l'établissement de fonctionnalités d'assistance à la conduite. De plus, le système reste ouvert de manière à être personnalisable. En effet, l'ajout de capteurs supplémentaires ou d'organes de commande adaptés à la personne s'effectue simplement en les connectant au système via des communications standard de type USB ou Ethernet.

La structure logicielle que nous proposons permet de gérer efficacement l'ensemble des capteurs, l'interface avec l'utilisateur et le contrôle du fauteuil via le système d'asservissement. Elle a été conçue de manière à faciliter le développement des fonctionnalités d'assistance à la conduite.

Chapitre 3 : FONCTIONNALITES AUTONOMES

3.1. Introduction	66
3.2. Franchissement automatique de passage étroit	66
3.2.1. Principe	66
3.2.2. Méthodes de détection des passages étroits	67
3.2.2.1. Méthode des demi-cercles.....	67
3.2.2.2. Méthode de regroupement en ensembles	69
3.2.2.3. Contrôle de la validité des ensembles	71
3.2.2.4. Détermination du sens de passage.....	74
3.2.3. Choix et suivi d'un passage étroit	75
3.2.4. Méthode de génération de trajectoire.....	76
3.2.4.1. Détermination des points cibles	77
3.2.4.2. Détermination des zones	78
3.2.4.3. Position et orientation des zones	79
3.2.5. Résultats.....	80
3.3. Suivi de mur	82
3.3.1. Principe	82
3.3.2. Analyse de l'environnement	83
3.3.3. Détermination du point cible	84
3.3.3.1. Distance de sécurité	85
3.3.3.2. Direction du suivi.....	85
3.3.3.3. Vitesse d'avance du fauteuil.....	86
3.3.4. Choix de l'utilisateur	86
3.3.5. Résultats.....	86
3.3.6. Amélioration de la trajectoire	88
3.4. Conclusion	90

3.1. INTRODUCTION

Notre assistance à la conduite repose sur un ensemble de fonctionnalités autonomes permettant d'alléger la charge de conduite lors de manœuvres spécifiques. L'objectif n'est pas de remplacer complètement l'utilisateur avec des mouvements autonomes mais de fournir une aide à la navigation sous contrôle ce dernier réalisant ainsi une coopération entre l'homme et la machine. Chaque fonctionnalité réalise une tâche demandée par l'utilisateur, et les déplacements engendrés peuvent être interrompus à tout moment. De plus, il est nécessaire que l'utilisateur puisse anticiper les manœuvres effectuées par le fauteuil lors de déplacements autonomes, elles sont donc conçues de manière à produire un comportement adapté aux attentes de celui-ci.

Toutes les fonctionnalités fournissent un comportement de déplacement issu de l'analyse de l'environnement et des informations provenant de l'utilisateur. Pour cela, elles utilisent la perception laser pour analyser l'environnement et pour contrôler le déplacement du fauteuil dans celui-ci. Elles disposent en entrée du tableau de coordonnées cartésiennes et cylindriques des points de mesure laser exprimées dans le repère global du fauteuil (§2.3). Les ordres de l'utilisateur issus de l'interface (détaillée dans le chapitre 4) sont utilisés pour définir le type de tâche et l'endroit où elle s'exécute. Les fonctionnalités sont conçues de manière à fournir en sortie un point cible exprimé dans le repère global vers lequel le fauteuil se dirigera grâce au système d'asservissement (§2.4). Nous décrivons dans ce chapitre les méthodes établies pour développer ces fonctionnalités, notamment la manière dont nous analysons et extrayons les informations de l'environnement à partir des données laser, ainsi que les méthodes nous permettant de déterminer les points cibles associés à celles-ci. Actuellement, nous proposons deux fonctionnalités, le franchissement automatique de passage étroit et le suivi de mur automatique.

Par ailleurs, comme nous n'utilisons pas d'odométrie, nous ne pouvons pas utiliser des méthodes traditionnelles par grille pour générer les trajectoires, (Parikh et al. 2004) et (C. Gao, Sands, et Spletzer 2010). Chaque méthode est développée en fonction de la perception dont on dispose et des informations provenant de l'utilisateur via l'interface.

3.2. FRANCHISSEMENT AUTOMATIQUE DE PASSAGE ETROIT

3.2.1. PRINCIPE

Cette fonctionnalité doit permettre à l'utilisateur de franchir automatiquement un passage étroit que celui-ci aura ciblé au préalable via l'interface. Pour la réaliser, nous procédons en plusieurs étapes. Tout d'abord, nous devons détecter tous les passages étroits de l'environnement que le fauteuil est en mesure de franchir. Pour cela, nous analysons les données laser pour les localiser. Ensuite, l'ordre de l'utilisateur issu de l'interface indique quel passage l'utilisateur veut franchir, il faut alors être en mesure de pouvoir le suivre lors du déplacement. Enfin, nous devons déterminer à chaque instant un point cible vers lequel le fauteuil va se diriger de manière à générer une trajectoire permettant le franchissement.

3.2.2. METHODES DE DETECTION DES PASSAGES ETROITS

Pour franchir un passage étroit, il faut pouvoir l'identifier. Pour cela nous disposons du tableau de points de mesures laser permettant d'identifier la structure de l'environnement dans le plan du repère global du fauteuil. En observant notre cartographie, on établit la définition d'un passage étroit de la manière suivante : « Un passage étroit, vu par un capteur laser, est un espace libre entre deux ensembles d'obstacles, d'une largeur minimale permettant le passage du fauteuil et d'une largeur maximale au-dessus de laquelle aucune manœuvre n'est nécessaire ».

Les limites de cet espace libre sont caractérisées par deux points appartenant à des obstacles que l'on appelle « points frontières ». Ils peuvent être définis comme un point ayant d'un côté d'autres points de mesure, et de l'autre, aucun point de mesure dans un espace libre suffisant au passage du fauteuil (on dispose d'un fauteuil de 70cm de large, 100cm de long). Ainsi, nous identifions chaque passage étroit de l'environnement par ses deux points frontières qui caractérisent les limites de cet espace libre. Afin de détecter tous les passages étroits à chaque rafraîchissement des mesures, nous avons développé, dans un premier temps, une première méthode que l'on nomme « la détection par demi-cercle ». Son principe consiste à détecter tous les points frontières présents dans l'environnement, puis à appliquer un filtrage sur ces points permettant d'éliminer ceux ne définissant pas un passage étroit et d'associer les autres par deux afin de caractériser chaque passage étroit présent dans l'environnement. Ensuite, les limites de cette méthode nous ont amenés à développer une seconde méthode permettant de rendre plus efficace la détection des passages étroits. Celle-ci consiste à regrouper les points de mesure en ensembles d'obstacles, puis à rechercher les passages étroits optimaux entre ces ensembles.

3.2.2.1. METHODE DES DEMI-CERCLES

Comme un passage étroit est caractérisé par ses deux points frontières le délimitant, nous cherchons tout d'abord à détecter tous les points frontières disponibles dans l'environnement. Nous divisons ces points en deux catégories, les points frontières avec un vide à gauche, et les points frontières avec le vide à droite. Pour les identifier dans notre tableau de mesures laser, nous considérons qu'un point est frontière avec le vide à droite s'il ne possède pas d'autres points dans un demi-cercle à sa droite, et respectivement, qu'un point est frontière avec le vide à gauche s'il ne possède pas d'autres points dans un demi-cercle à sa gauche (Fig. 3.1). C'est pourquoi nous appelons cette méthode « détection par demi-cercle ». Pour les déterminer, nous effectuons un balayage des points et pour chacun d'entre eux, nous vérifions qu'il n'existe pas d'autres points (en effectuant un second balayage) ayant une abscisse supérieure et se trouvant à une distance inférieure à la largeur du fauteuil (distance réglable). Si aucun point à sa droite et à cette distance n'existe, c'est qu'il s'agit d'un point frontière avec le vide sur sa droite. La même évaluation est effectuée pour des abscisses inférieures au point avec la même distance pour déterminer les points frontières avec le vide à gauche. A la fin du balayage, les points retenus sont considérés comme points frontières et sont mémorisés. Afin

de les visualiser, nous les surlignons sur la cartographie avec deux couleurs, soit les points frontières avec le vide à gauche en bleu et ceux avec le vide à droite en rouge (Fig. 3.2).

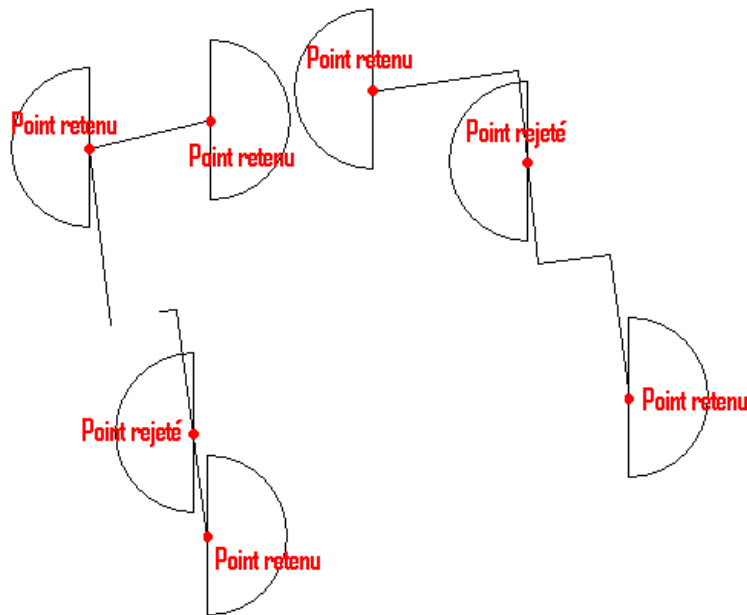


Fig. 3.1 : Méthode de détection des points frontières par demi-cercles.

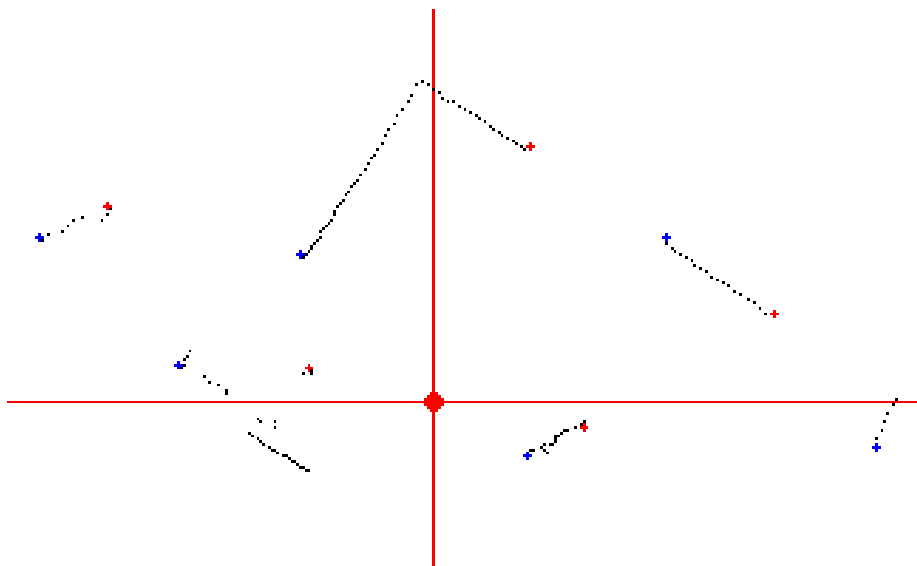


Fig. 3.2 : Affichage des points frontières avec la méthode des demi-cercles.

Ensuite, il faut déterminer les associations de points frontières caractérisant chaque passage étroit. On effectue un balayage des points frontières et pour chacun d'entre eux, nous recherchons s'il existe un autre point frontière complémentaire (à gauche pour un point à droite par exemple) pour lequel la distance entre les deux est comprise entre 85cm et 150cm (ce que l'on considère être la largeur d'un passage). Si tel est le cas, nous mémorisons cette association comme un des passages étroits présents dans l'environnement, et s'il n'en existe aucun, le point frontière est supprimé. Nous vérifions l'efficacité de la méthode en affichant les passages étroits retenus sur la cartographie (Fig. 3.3).

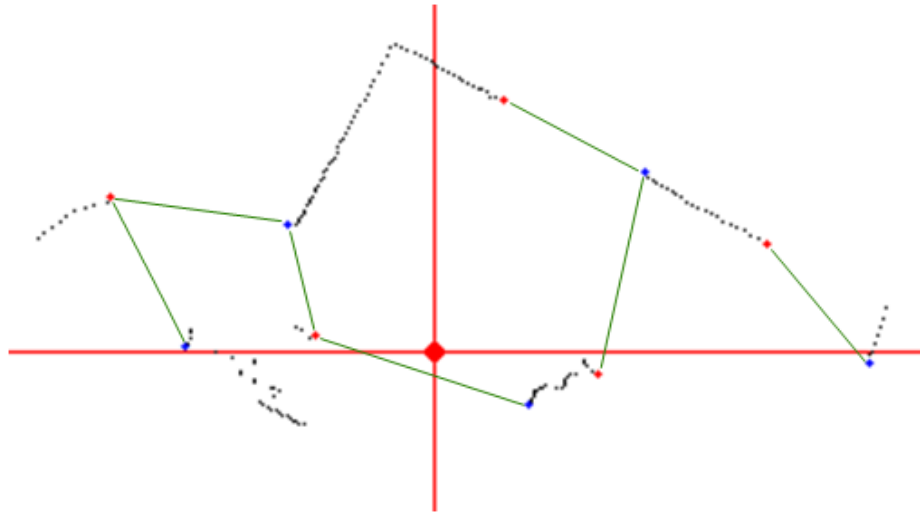


Fig. 3.3 : Détection des passages étroits avec la méthode des demi-cercles.

Lors des premiers essais, cette méthode s'est avérée simple et rapide à mettre en œuvre. Cependant, elle a une limite : elle est inopérante dans certaines configurations où les points frontières gauche et droite ne sont pas clairement distincts, notamment quand le passage ciblé est aligné avec l'axe du fauteuil. Ce cas de figure arrive fréquemment lors de la manœuvre de franchissement automatique. Les points frontière peuvent alors être tous deux avec le vide à gauche (ou à droite) en fonction de la forme du passage, et ils ne seront pas considérés comme un passage étroit. Cette méthode est donc en échec lors des franchissements qui nécessitent un braquage supérieur à 90° . Afin de pouvoir franchir tous les passages possibles, nous recherchons une seconde méthode plus robuste.

3.2.2.2. METHODE DE REGROUPEMENT EN ENSEMBLES

Nous recherchons une méthode d'analyse des données permettant de s'affranchir des aléas de l'angle d'observation. Plusieurs méthodes de regroupement de points existent et ont été développées en robotique mobile (Premebida et Nunes 2005). En s'inspirant de l'une d'entre elle, le PDBS (Point-Distance-Based methods), nous développons une approche simplifiée consistant à regrouper les points de mesures issus du capteur laser en ensembles représentant des obstacles. Deux ensembles sont considérés comme distincts s'il existe un passage possible du fauteuil entre eux. Pour effectuer ce regroupement, on effectue un balayage des points de mesure et l'on calcule pour chacun d'entre eux la distance qui le sépare du point précédent. Si la distance est supérieure à un passage possible du fauteuil, alors on crée un nouvel ensemble sinon on ajoute ce point à l'ensemble courant. De ce fait, on obtient plusieurs ensembles représentant des groupements d'obstacles de l'environnement. Pour faciliter leur visualisation, on affiche par alternance, un ensemble rouge, suivi d'un bleu, puis un rouge, etc. (Fig. 3.4).

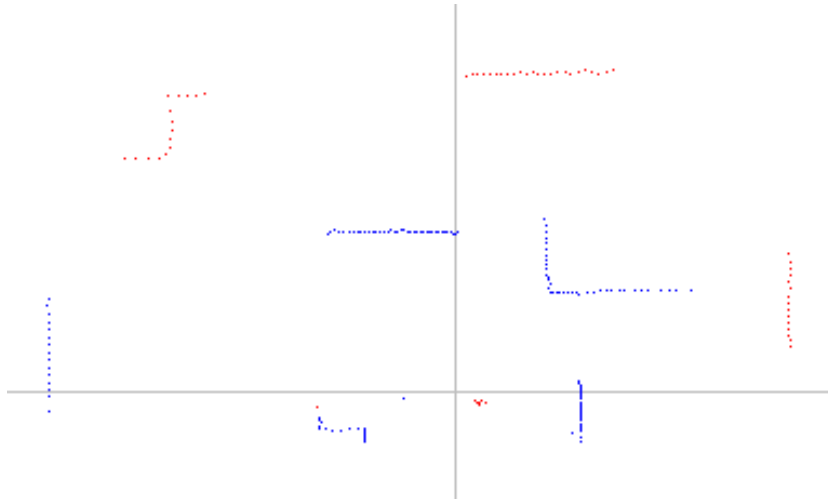


Fig. 3.4 : Répartition des points en ensembles.

Une fois les ensembles identifiés, il faut trouver les passages étroits dans l'environnement. Pour cela, on utilise une méthode de recherche de minimum. Chaque groupement d'obstacles est composé d'un ensemble de points. Pour chaque combinaison possible entre deux ensembles, on recherche la combinaison de points qui minimise la distance entre les deux obstacles. Si cette distance minimale est comprise entre 85cm et 150cm, alors ces deux points sont considérés comme points frontières d'un passage étroit. On mémorise chaque passage étroit caractérisé par ces deux points. Tous les passages étroits retenus sont affichés en vert sur la cartographie (Fig. 3.5) sur laquelle les points bleus et rouges représentent respectivement les points frontières droite et gauche d'un passage étroit.

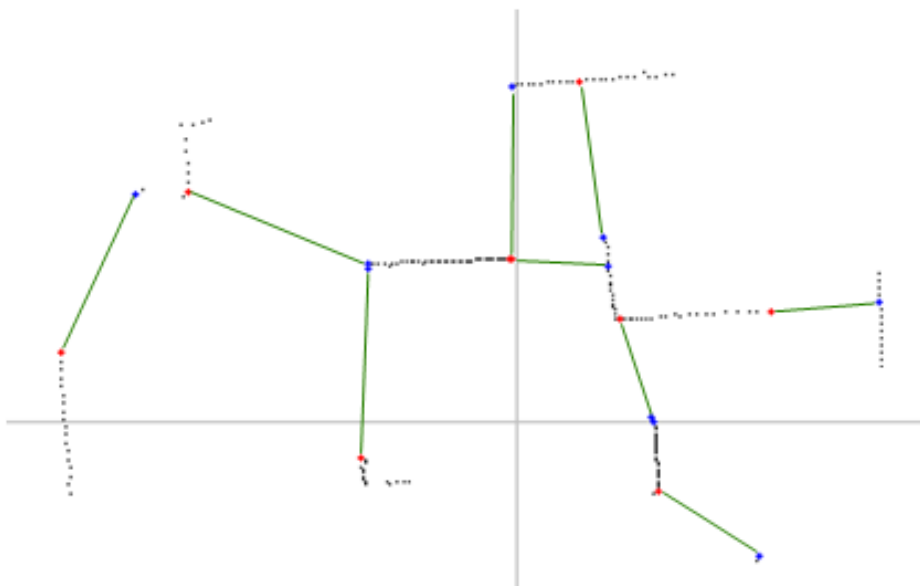


Fig. 3.5 : Détection des passages étroits avec la méthode de regroupements en ensembles.

Lors des essais, cette méthode s'est révélée plus robuste que la première méthode. Peu importe l'orientation du fauteuil par rapport au passage étroit, celui-ci est identifié et suivi avec efficacité. De plus, la méthode présente l'avantage de détecter les passages étroits les plus "critiques" entre chaque ensemble. Par exemple, une porte n'étant pas entièrement

ouverte peut être identifiée de manière différente selon l'orientation du battant (Fig. 3.6). Avec la première méthode, les cas (a) et (b), le passage est identifié dans un cas sur les montants de la porte et dans l'autre cas entre un montant et le bout du battant. Alors qu'avec la seconde méthode, dans les deux cas (c) et (d), le passage retenu est toujours celui le plus critique et est identifié entre les deux montants.

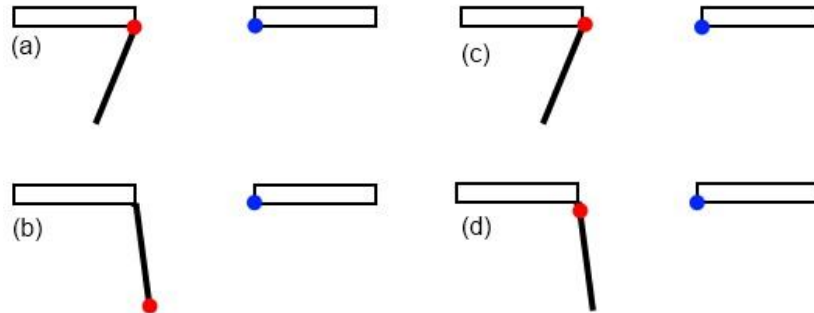


Fig. 3.6 : Exemple de détection de passage étroit avec la méthode des demi-cercles (a et b) et avec la méthode de regroupement en ensembles (c et d).

3.2.2.3. CONTROLE DE LA VALIDITE DES ENSEMBLES

Dans la plupart des cas, la seconde méthode de détection donne satisfaction. Toutefois, elle a été développée pour une perception utilisant un seul capteur laser et lorsque nous avons élargi la perception avec trois capteurs laser, certaines difficultés sont apparues. Tout d'abord, comme on dispose à présent d'une vision laser sur 360°, il est possible que le premier et le dernier ensemble perçus dans l'environnement puissent appartenir au même obstacle sans pour autant être regroupés par l'algorithme. Ensuite, comme la scrutation des points s'effectue de manière angulaire, on peut rencontrer deux ensembles séparés lors de l'analyse, en raison de la présence d'un autre obstacle, et qui auraient dû appartenir au même groupement d'obstacles. La Fig. 3.7 illustre ce problème. On trouve cette situation avec les ensembles E7, E8, et E9. En effet, E7 est créé, puis E8 et enfin E9 qui est considéré comme distinct de E7 alors qu'il apparaît clairement qu'il n'existe pas un espace suffisant entre E7 et E9 pour les dissocier. En conséquence, la recherche aura retenu un passage étroit entre E7 et E8 puis un autre entre E8 et E9 qui ne correspondent pas à la topologie du lieu. Par ailleurs, l'algorithme de recherche de passage prenant en compte toutes les combinaisons d'ensembles distincts, un passage étroit est identifié dès lors que les conditions de distances sont vérifiées, c'est ce qui se reproduit entre les ensembles E1 et E5 bien que l'ensemble E3 ait une place telle que le passage n'existe pas.

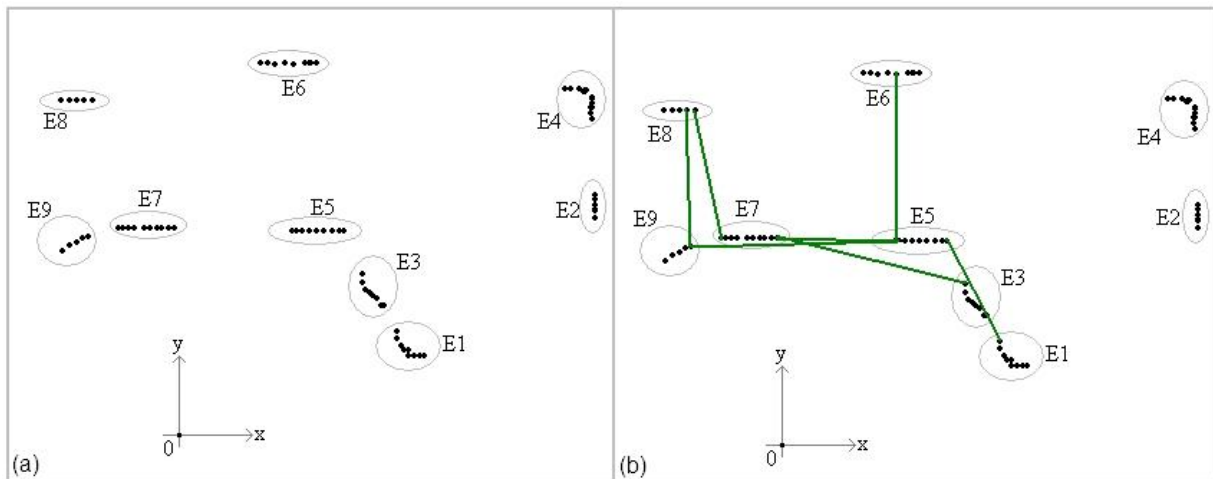


Fig. 3.7 : Détection des passages dans l'environnement par 3 télémètres laser : détection des ensembles (a); recherche des passages étroits(b).

Pour résoudre ces deux cas de figure, nous ajoutons un critère de contrôle sur les ensembles constitués. Une fois tous les groupements d'obstacles identifiés, on recherche pour toutes les associations possibles de deux ensembles, la distance minimale les séparant. Pour cela, pour chaque point du premier ensemble, on effectue un balayage de tous les points appartenant au second ensemble. S'il existe une distance minimale séparant ces points inférieure à la largeur du fauteuil, alors les deux ensembles sont fusionnés, et dans le cas contraire, ils restent disjoints. Ensuite, on applique la suite de la méthodologie en recherchant les passages étroits entre les nouveaux ensembles. Cette modification permet de filtrer tous les passages étroits indésirables (passages obstrués ou redondants) (Fig. 3.8), et aussi de fusionner le premier et dernier ensemble s'ils appartiennent au même groupement d'obstacles.

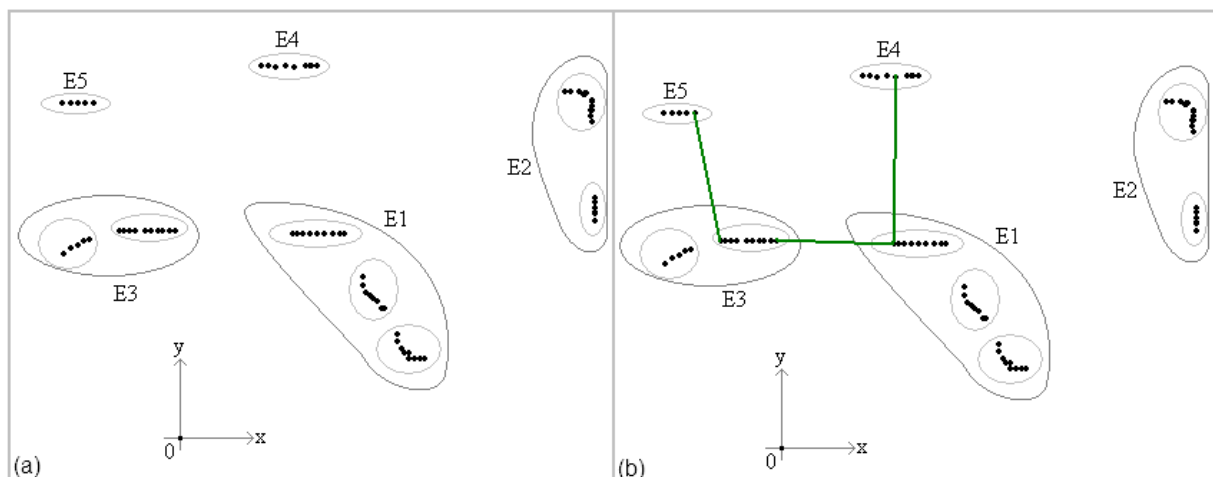


Fig. 3.8 : Détection des passages après modifications : détection des ensembles (a), recherche des passages étroits (b).

Pour vérifier l'efficacité de la méthode, le fauteuil est placé dans un environnement complexe présentant de nombreuses difficultés pour la perception (Fig. 3.9). De nombreux obstacles sont placés autour du fauteuil à différentes distances et sont de différentes tailles de manière à obtenir le plus de configurations possibles de passages étroits.



Fig. 3.9 : Aperçu de l'environnement complexe.

Ensuite, la cartographie est configurée de manière à afficher tous les passages étroits détectés sans validation (Fig. 3.10). Le nombre de passages considérés est très important et beaucoup d'entre eux sont erronés. La validation permet de sélectionner les seuls passages étroits existant réellement dans l'environnement (Fig. 3.11). Sur les figures suivantes, chaque passage étroit est représenté par une ligne verte, et les groupements d'obstacles sont alternativement représentés en rouge et bleu.

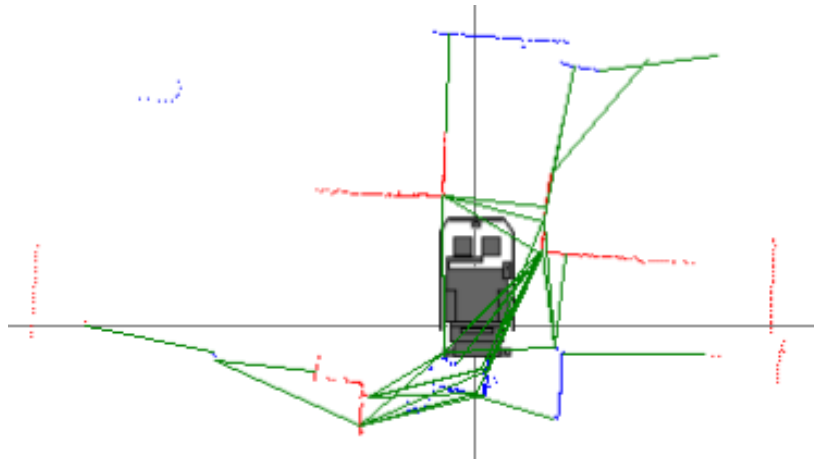


Fig. 3.10 : Recherche de passages étroits dans un environnement complexe sans validation.

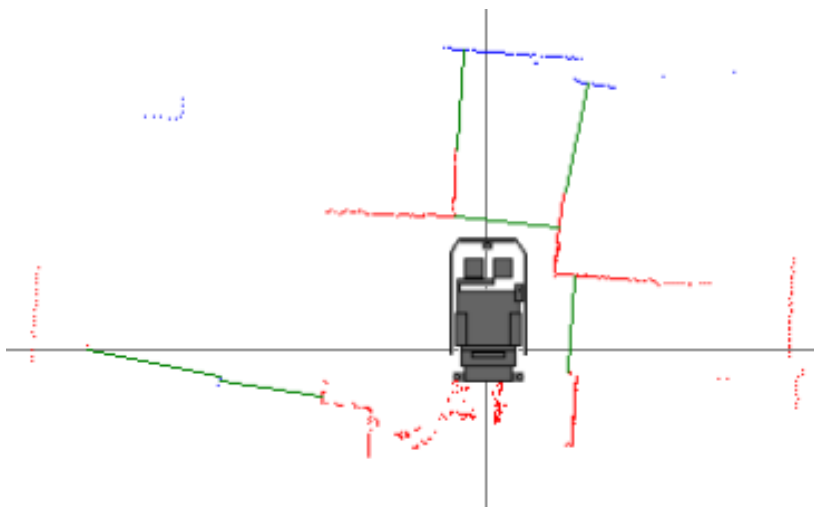


Fig. 3.11 : Recherche de passages étroits dans un environnement complexe avec validation.

Cette seconde méthode permet une détection robuste et rapide des passages étroits dans l'environnement. A chaque rafraichissement des mesures laser, tous les passages détectés sont caractérisés par les coordonnées des deux points frontières les délimitant.

3.2.2.4. DETERMINATION DU SENS DE PASSAGE

Lorsqu'une personne souhaite franchir un passage quelconque, elle connaît nécessairement le sens de son parcours. En revanche, ce n'est pas le cas avec une perception laser qui ne fournit que la position du passage en fonction de l'emplacement du fauteuil. Chaque passage est caractérisé par deux points le délimitant. Ces points frontières sont mémorisés dans un ordre toujours identique. Le balayage sur les ensembles lors de la recherche des passages étroits s'effectue de manière angulaire dans le sens trigonométrique. Le point frontière appartenant au premier ensemble est considéré comme le point frontière droit du passage, et celui appartenant au second ensemble, correspond au point frontière gauche (Fig. 3.12). Dans la plupart des cas, cet ordre permet d'obtenir un sens de franchissement correct.

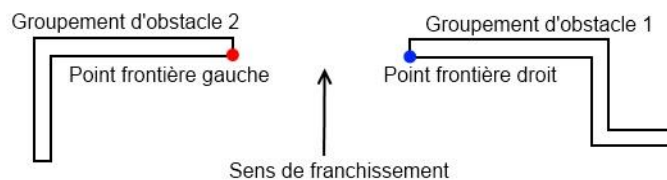


Fig. 3.12: Caractérisation d'un passage étroit.

Cependant, dans certaines configurations, il doit être corrigé. C'est le cas par exemple pour les passages vus entre un groupement d'obstacles en face à droite du fauteuil et un autre derrière à droite. Cela arrive souvent pour un passage vu entre le premier et le dernier ensemble (passage $\{1;N\}$ sur la figure Fig. 3.13), et plus rarement, avec d'autres combinaisons d'ensembles, comme par exemple, entre le deuxième et l'avant dernier (ce qui dépend de la topologie de l'environnement). Les points frontières des passages dans ces configurations doivent être inversés pour indiquer un sens de franchissement correct.

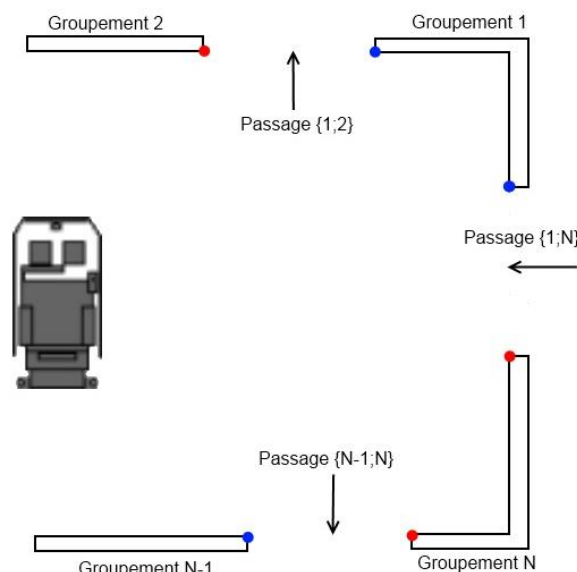


Fig. 3.13 : Configuration dans laquelle le sens de franchissement est incorrect.

Pour être sûr que le sens de franchissement est correct, l'ordre des points frontières de chaque passage étroit est contrôlé. Pour cela, on se base sur l'emplacement du fauteuil par rapport au passage étroit correspondant (Fig. 3.14). Tout d'abord, le coefficient directeur de la droite reliant le centre du passage au fauteuil est déterminé. Ensuite, Pour chaque point frontière gauche, nous vérifions s'il est bien positionné par rapport à cette droite. Ainsi, si le centre du passage a une abscisse négative, le point frontière gauche doit se situer en dessous de la droite et si son abscisse est positive, le point frontière gauche doit se situer au-dessus de la droite. Enfin, si cette condition n'est pas réalisée, les points frontières gauche et droit sont inversés de manière à obtenir le bon sens de franchissement.

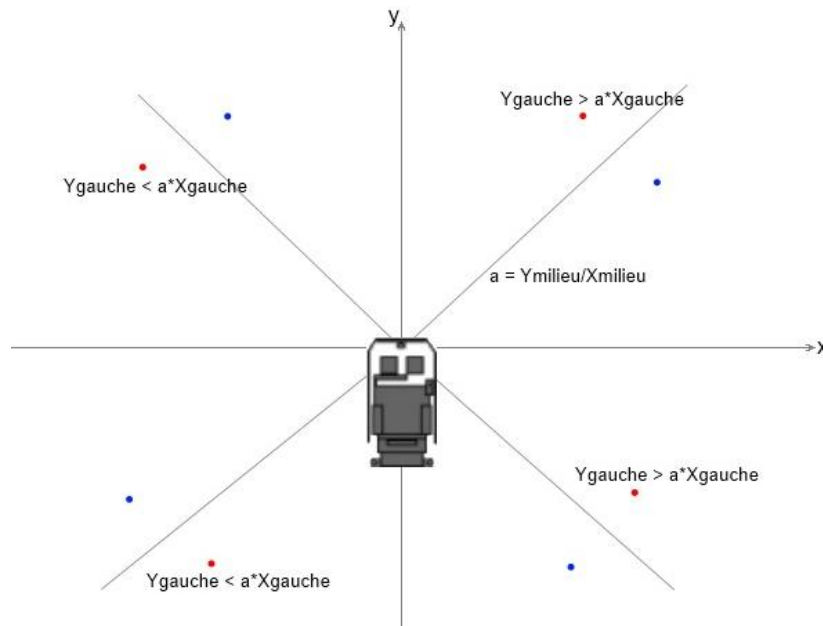


Fig. 3.14 : Méthode pour déterminer le sens de franchissement d'un passage étroit.

3.2.3. CHOIX ET SUIVI D'UN PASSAGE ETROIT

Une fois que l'on connaît la position de chaque passage étroit dans le repère global du fauteuil, l'utilisateur doit dans un premier temps indiquer celui qu'il souhaite franchir automatiquement. Pour cela, il utilise l'interface dont le fonctionnement sera détaillé dans le chapitre 4. Celle-ci fournit deux informations utilisées par les fonctionnalités. La première est le type de fonctionnalité que l'utilisateur souhaite accomplir, et la deuxième est l'endroit où il souhaite l'appliquer. Lorsqu'un franchissement automatique de passage étroit est demandé, l'endroit montré sur l'interface par l'utilisateur est converti en coordonnées dans le repère global du fauteuil, et on détermine le passage à franchir en recherchant celui qui est le plus proche du point indiqué. Ensuite, comme l'emplacement du passage étroit va évoluer au fur et à mesure du déplacement du fauteuil, on va devoir retrouver son emplacement à chaque rafraîchissement des données laser. Pour cela, avant d'actualiser une mesure, on mémorise le point central du passage à franchir, noté $PM(t-1)$ qui sera utilisé comme point indicateur pour les données laser suivantes. Ainsi, pour retrouver le passage étroit à chaque nouvelle mesure, on recherche celui dont le point central, noté $PM(t)$, minimise la distance entre $PM(t)$ et $PM(t-1)$ (Fig. 3.15).

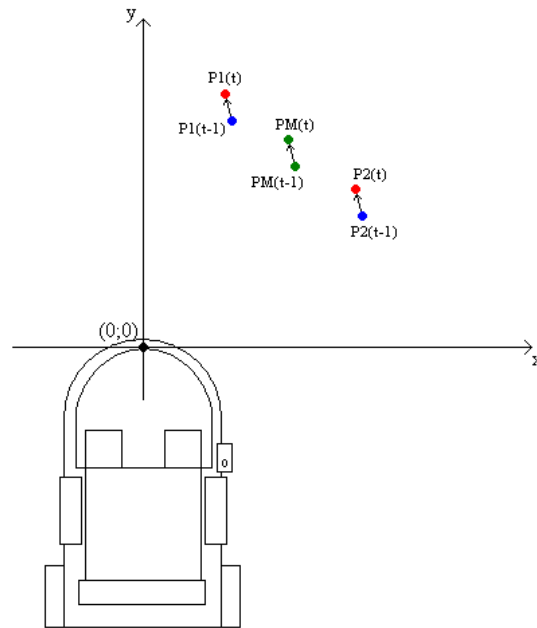


Fig. 3.15 : Contrôle de distance lors du suivi d'un passage étroit.

Ensuite, il peut arriver qu'un passage étroit ciblé s'obstrue au cours de la manœuvre, par exemple si une porte se ferme ou qu'une personne passe dedans. Le fauteuil aura alors tendance à se raccrocher à un autre passage étroit, le plus proche de celui perçu précédemment, conduisant le fauteuil vers un objectif différent de celui de l'utilisateur. Il est donc nécessaire de détecter cette obstruction d'un passage de manière à arrêter le fauteuil dans ces situations. Pour cela, nous ajoutons un contrôle lors du suivi. La distance séparant le centre du passage étroit choisi à celui du passage étroit perçu à l'itération précédente ne doit pas dépasser un seuil de sécurité choisi empiriquement à 30cm, ce qui correspond à la distance maximale parcourue par le fauteuil entre deux acquisitions laser en tenant compte de sa vitesse.

3.2.4. METHODE DE GENERATION DE TRAJECTOIRE

Pour franchir un passage étroit, l'utilisateur doit effectuer une trajectoire qui peut contenir des manœuvres difficiles et qui dépend principalement de la position et de l'orientation de départ du fauteuil par rapport au passage. Nous recherchons une méthodologie permettant de déterminer une trajectoire acheminant le fauteuil à travers le passage ciblé de la même manière que l'aurait fait un utilisateur en mode manuel, et ce, pour toutes les configurations de passages étroits possibles. Pour cela, nous observons comment un utilisateur réalise le franchissement avec un joystick. Celui-ci ne vise pas directement le centre du passage car l'encombrement du fauteuil est tel qu'une approche directe entrainerait une collision. Il contrôle son approche en se dirigeant tout d'abord vers le passage en visant un point situé devant celui-ci. Ensuite, tout en continuant son avancée vers le passage, il oriente le fauteuil de manière à le placer dans l'axe de celui-ci. Et enfin, lorsque l'utilisateur s'est assuré que le fauteuil est bien orienté vers le passage et qu'il n'y a aucun danger de collision, il continue son avancée, tout en corrigeant l'orientation si besoin, jusqu'au franchissement complet.

Par ailleurs, comme on ne dispose pas d'un plan de l'environnement ou de données proprioceptives permettant de localiser le fauteuil, nous ne pouvons pas utiliser des méthodes classiques de génération de trajectoire. Nous optons pour une approche spécifique qui se base sur une navigation relative à l'emplacement du passage étroit choisi. Afin de reproduire les comportements observés, nous concevons une méthode qui consiste à définir plusieurs zones en fonction de la position et de l'orientation du passage étroit choisi, puis à affecter un point cible à chacune d'elles. A chaque instant, le fauteuil vise le point cible relatif à la zone dans laquelle il se situe. Ainsi, se situant dans une première zone, le fauteuil vise un premier point cible qui l'amène dans une seconde zone et vise alors le second point cible, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il atteigne la position finale. Enfin, la position et l'orientation des zones et de leurs points cibles évoluent dans l'image laser en fonction de l'emplacement du passage étroit choisi.

3.2.4.1. DETERMINATION DES POINTS CIBLES

Chaque point cible a pour fonction de reproduire une étape du comportement qu'a un utilisateur lors d'un franchissement de passage étroit en contrôle manuel. Le franchissement automatique est réalisé par la succession de quatre points cibles. Le premier point cible, Pc1, correspond à l'approche vers le passage. Le deuxième, Pc2, a pour objectif d'orienter le fauteuil vers le centre du passage. Le troisième, Pc3, permet d'amener le fauteuil jusqu'au centre du passage en s'assurant que l'orientation du fauteuil reste correcte. Enfin, le dernier point cible, Pc4, entraîne le franchissement du passage et amène le fauteuil en position finale. L'emplacement de ces points est ajusté de manière à reproduire la trajectoire désirée, et ce, quelle que soit la position de départ du fauteuil (Fig. 3.16).

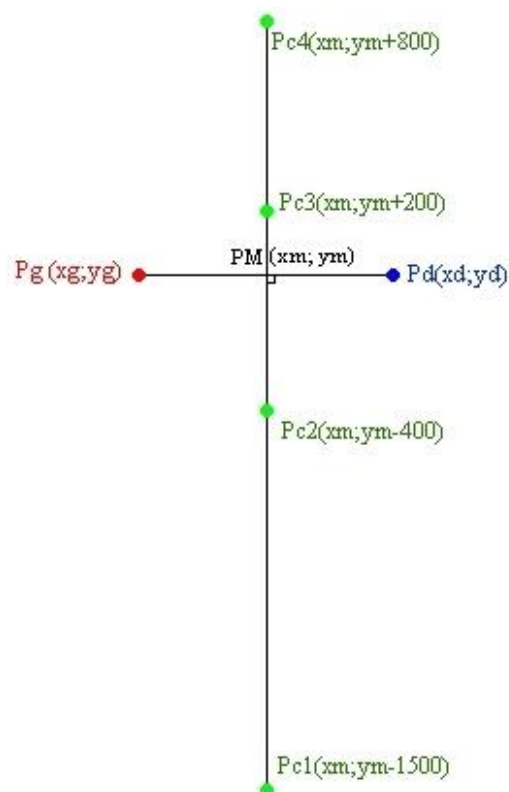


Fig. 3.16 : Position des points cibles par rapport au passage étroit visé (en mm).

3.2.4.2. DETERMINATION DES ZONES

Ensuite, il faut déterminer les instants où le fauteuil doit basculer d'un point cible vers un autre. Cela se produit avant que le fauteuil n'atteigne le point considéré. En effet, si celui-ci devrait atteindre et s'arrêter sur chaque point cible, la trajectoire réalisée serait saccadée et nuirait au confort de l'utilisateur. Pour cela, nous établissons un gabarit définissant les quatre zones associées aux quatre points cibles de manière à générer un déplacement fluide. Nous avons établi plusieurs configurations. Le premier gabarit retenu a été établi pour une perception réalisée avec un seul capteur laser (Leishman, Horn, et Bourhis 2010). Celui-ci permet le franchissement des passages étroits dans les limites de la perception (cf. 3.2.5). Nous l'avons par la suite adapté à l'élargissement de la perception à 360° afin de permettre le franchissement de tous les passages étroits présents dans l'environnement. Nous retenons le gabarit suivant (Fig. 3.17). Le scénario d'un franchissement automatique se déroule de la manière suivante. Lorsque le fauteuil se situe dans la zone 1 (correspondant à toutes les positions du fauteuil en dehors des autres zones), il vise Pc1. Avant de l'atteindre, il entre dans la zone 2 et change de point cible en se dirigeant vers Pc2. Puis, ainsi de suite, il entre dans la zone 3 et se dirige vers Pc3, pour finalement entrer dans la dernière zone, et atteindre Pc4, correspondant à sa position finale.

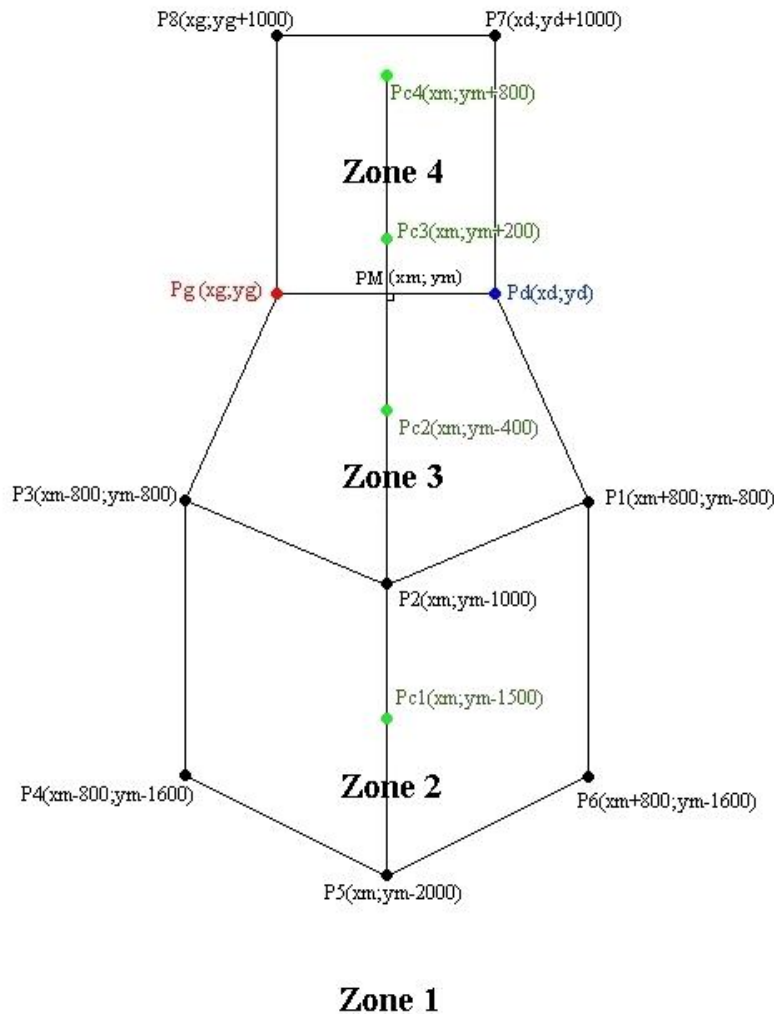


Fig. 3.17 : Gabarit des zones avec leurs points cibles (en mm)

3.2.4.3. POSITION ET ORIENTATION DES ZONES

Enfin, lors du déplacement du fauteuil, la vision du passage ciblé évolue dans l'image laser en fonction des mouvements du fauteuil. Il est donc nécessaire que le gabarit suive les modifications du passage étroit en position et en orientation. Pour cela, tous les points délimitant les zones et les points cibles doivent subir ces modifications, c'est à dire, une rotation R_{gabZ} d'angle α autour du centre du passage, et deux translations T_{gabX} et T_{gabY} définies par le déplacement du point milieu de la porte (x_m et y_m) (Fig. 3.18).

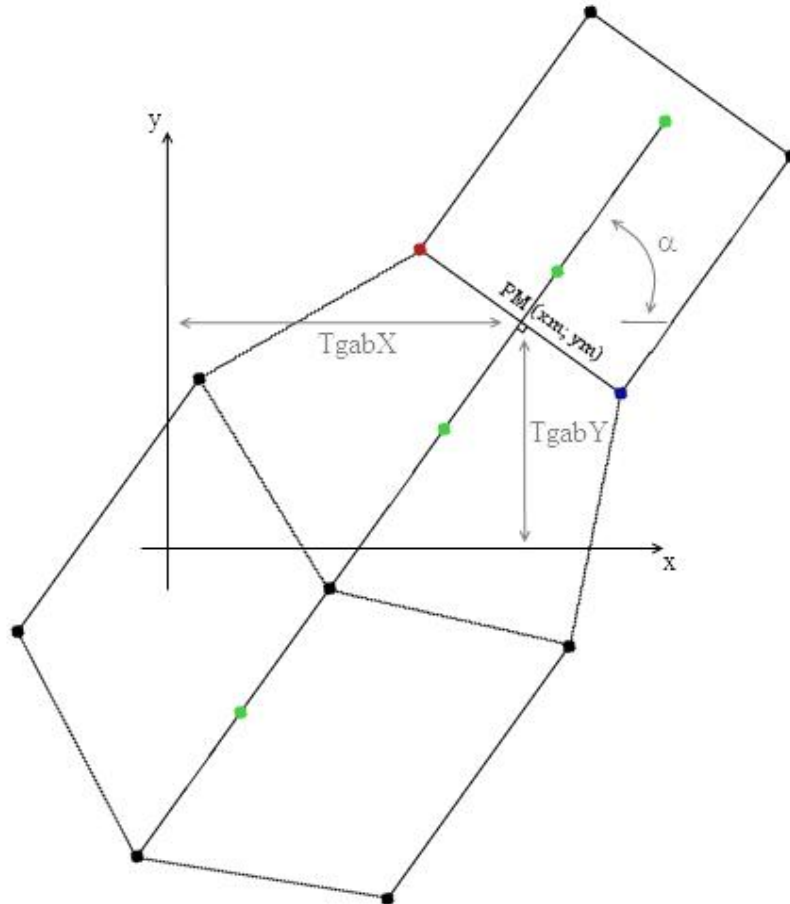


Fig. 3.18 : Transformation des zones en fonction du centre du passage étroit.

Nous utilisons les équations (3.1) et (3.2) pour appliquer ces transformations (avec x_g et y_g , les coordonnées d'un point du gabarit avant transformation centrées dans le repère global, et x_T et y_T , leurs coordonnées après transformation, centrées sur le passage étroit).

$$x_T = x_g \cos(\alpha) - y_g \sin(\alpha) + x_m \quad (3.1)$$

$$y_T = x_g \sin(\alpha) + y_g \cos(\alpha) + y_m \quad (3.2)$$

Pour visualiser et vérifier le bon fonctionnement de la méthode, les zones et leurs points cibles sont affichées sur la cartographie (Fig. 3.19). La zone active et le point cible visé sont représentés en vert clair, les autres sont en vert foncé.

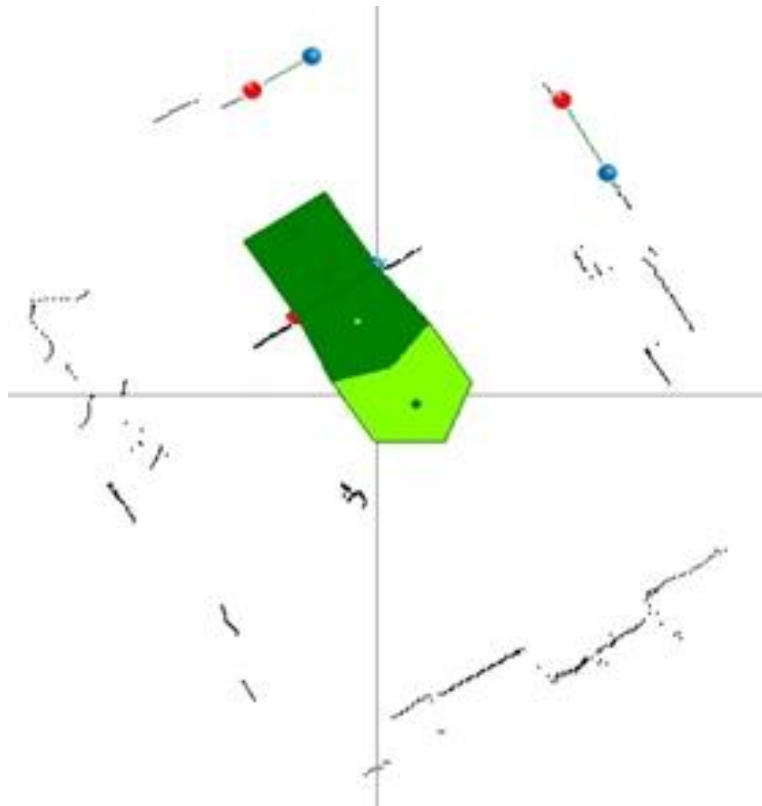


Fig. 3.19 : Affichage des zones et points cibles lors d'un franchissement automatique.

3.2.5. RESULTATS

Dans un premier temps, nous avons utilisé la fonctionnalité de franchissement automatique de passage étroit avec un seul capteur laser placé à l'avant du fauteuil afin de pouvoir évaluer son efficacité. L'objectif est d'observer les trajectoires qu'effectue le fauteuil dans différentes configurations afin de vérifier si elles correspondent bien à ce qu'on attend de la fonctionnalité.

Nous ne disposons pas de perception proprioceptive, comme l'odométrie. Pour relever la trajectoire qu'effectue le fauteuil en conduite assistée, nous établissons donc une méthode basée uniquement sur la perception extéroceptive fournie par le capteur laser. Nous observons l'évolution de l'emplacement du passage ciblé par rapport au fauteuil dans la cartographie. La trajectoire du passage étroit observée par le capteur laser permet de restituer la trajectoire du fauteuil par projection de la position et l'orientation du fauteuil par rapport au passage dans une carte centrée sur le passage. Enfin, pour chaque passage étroit, nous présentons d'un côté l'image vidéo en début de manipulation sur laquelle la position du curseur indique l'emplacement pointé par l'utilisateur pour lancer la fonctionnalité, et d'un autre côté, la trajectoire effectuée par le fauteuil (Fig. 3.20).

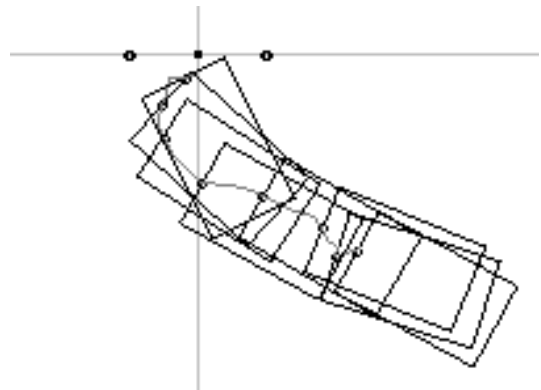
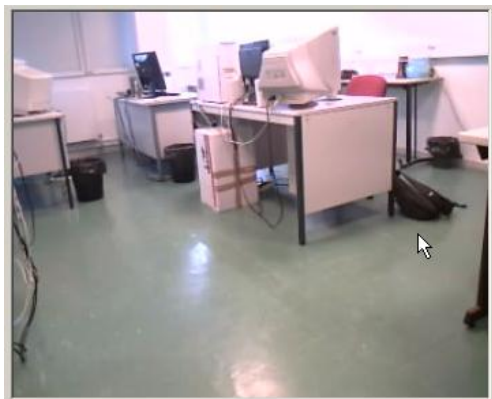
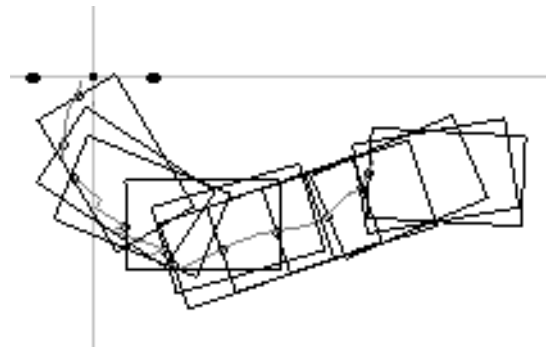
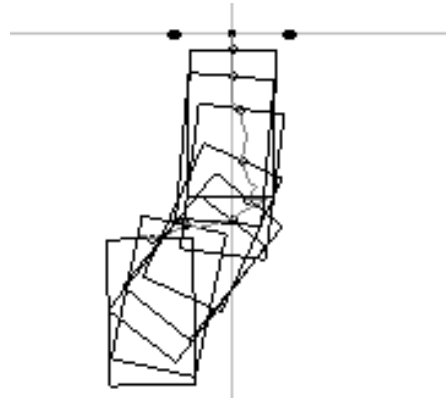


Fig. 3.20 : Franchissement automatique de passage étroit présentant la vision de départ (à gauche) associée à la trajectoire effectuée (à droite).

Lors de ces essais, on peut observer les variations de vitesse correspondant aux écarts entre les rectangles qui représentent la position du fauteuil enregistrée à intervalle de temps régulier. Ceci nous permet d'analyser le comportement du fauteuil lors du déplacement. Par exemple, dans le deuxième essai, le fauteuil tourne légèrement afin de s'écarter lentement de la porte, puis il avance en accélérant progressivement jusqu'à hauteur de celle-ci. Ensuite, le fauteuil tourne vers la porte en réduisant progressivement sa vitesse d'avance tout en accélérant sa vitesse angulaire de manière à s'aligner avec le passage. A l'approche de l'alignement, la vitesse angulaire est réduite et le fauteuil ré-augmente progressivement sa vitesse d'avance jusqu'à franchissement. On remarque que les trajectoires obtenues sont proches de celles qu'aurait effectuées un humain manuellement. Dans presque toutes les situations, cette fonctionnalité se révèle efficace.

Nous avons pu mesurer plusieurs limites d'utilisation de la fonctionnalité. La première est liée à la perception. Dans le cas où le fauteuil est collé à un mur et doit franchir un passage dans l'alignement de celui-ci, le fauteuil doit s'écarter du mur et il peut se produire que le passage sorte du champ de vision du laser entraînant l'arrêt de la fonctionnalité. D'où l'importance d'élargir la perception laser sur 360° de manière à rendre efficace la fonctionnalité quelle que soit l'orientation du fauteuil par rapport au passage (ce qui sera assuré par l'implantation des trois capteurs laser).

La seconde limite correspond à la taille minimale du passage étroit que peut franchir le fauteuil. Ce dernier fait 70cm de large et son alignement avec l'axe perpendiculaire au passage n'est pas parfait et dépend essentiellement de sa position de départ et de la manœuvre qu'il devra effectuer. Lors des essais, le fauteuil s'est avéré en mesure de franchir tout passage étroit de largeur supérieure ou égale à 85cm.

Enfin, la dernière limite est liée à la méthode. Si un franchissement automatique est demandé sur un passage étroit trop proche du fauteuil, il ne pourra pas effectuer une manœuvre correcte. Ainsi, pour assurer le franchissement, le fauteuil doit au moins suivre les trois derniers points cibles (PC2, PC3 et PC4). Le premier point cible PC1 correspond à l'approche approximative lors d'un départ suffisamment lointain et n'est utilisé que pour adoucir la trajectoire. Il permet d'anticiper le changement brutal d'orientation en écartant le fauteuil du passage et ainsi obtenir une courbe fluide. Nous évaluons donc une distance minimale à respecter à partir de laquelle le franchissement automatique fonctionne à coup sûr. Suite à des essais pratiques, nous estimons la distance entre le centre du passage ciblé et le fauteuil à environ 1m. Tant que cette limite est respectée, tous les franchissements automatiques demandés sont assurés pour tout passage étroit d'au moins 85cm (pour la largeur de notre fauteuil), et ce, quelles que soient l'orientation et la position de départ du fauteuil (avec la perception sur 360°). Ainsi, seuls les passages étroits qui garantissent ces conditions de validité sont affichés sur l'interface de manière à ce que l'utilisateur soit certain qu'un passage indiqué sera franchi automatiquement.

3.3. SUIVI DE MUR

3.3.1. PRINCIPE

La seconde fonctionnalité doit permettre à l'utilisateur de longer automatiquement un mur sur la gauche ou sur la droite. Les méthodes de suivi de mur existantes sont pour la plupart basées sur l'utilisation de capteurs ultrasons ou infrarouges (D. P. Miller et Slack 1995), (Pires et Nunes 2002). Les caractéristiques des mesures laser étant différentes (plus précises et plus nombreuses), nous établissons notre propre approche à partir de cet organe de perception. Dans un premier temps, le principe de la méthode consiste à extraire de l'environnement plusieurs distances significatives qui permettent de comprendre la configuration dans laquelle le fauteuil se situe. Elles sont ensuite utilisées pour déterminer le point cible vers lequel le fauteuil doit se diriger pour effectuer le suivi de mur demandé.

3.3.2. ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT

Notre perception étant basée sur les mesures du capteur laser, nous disposons d'un aperçu de l'environnement particulièrement riche qui nous permet d'anticiper la variabilité de l'environnement au fur et à mesure de l'avancée du fauteuil. Pour établir notre méthode, nous nous intéressons à la manière dont une personne analyse l'environnement lorsqu'elle longe un mur dans un couloir en conduite manuelle. Ainsi nous remarquons qu'un utilisateur effectue plusieurs contrôles sur l'environnement afin d'évaluer la situation dans laquelle il se situe, et ajuste ou corrige en conséquence sa trajectoire. Il évalue tout d'abord la distance le séparant du mur suivi qu'il essaye de maintenir constante afin de garantir le suivi lors de son avancée. Ensuite, il estime la largeur du passage emprunté en évaluant l'espace disponible entre le mur suivi et les obstacles du côté opposé. Si le passage se restreint, il adapte sa vitesse et se centre dans celui-ci. Enfin, il surveille l'approche d'un obstacle en mesurant la distance entre le fauteuil et les obstacles se situant à l'avant. En fonction de ces trois observations, l'utilisateur corrige sa trajectoire et adapte sa vitesse. En s'inspirant de cette analyse, nous cherchons à mesurer ces trois distances significatives à partir de notre perception (on se place dans le cas d'un suivi de mur à droite, l'autre fonctionnant symétriquement) :

- La première d_{Dr} est la distance de suivi. Elle correspond à la distance mesurée entre le centre du repère global et l'obstacle le plus proche du fauteuil sur sa droite. L'objectif consiste à la maintenir égale à une distance de sécurité.
- La deuxième d_{Av} est la distance aux éventuels obstacles se situant en face du fauteuil. Elle est mesurée entre le centre du repère global et l'obstacle le plus proche en face du fauteuil et permet d'ajuster la vitesse d'avance du fauteuil.
- Enfin, la troisième d_{Ga} est la distance mesurée à gauche du fauteuil. Elle caractérise la largeur du passage que l'on emprunte. Elle permet d'ajuster la distance de sécurité en cas de manque d'espace.

Pour évaluer ces trois distances, on établit trois zones (Fig. 3.21). Dans chacune d'elles, on recherche le point de mesure le plus proche du centre du repère global. On considère la distance séparant ces deux points comme étant la distance significative de cette zone. Ainsi d_{Ga} sera la distance mesurée dans la zone à gauche, d_{Av} la distance de la zone avant (ouverture de 60°), et d_{Dr} la distance de la zone à droite.

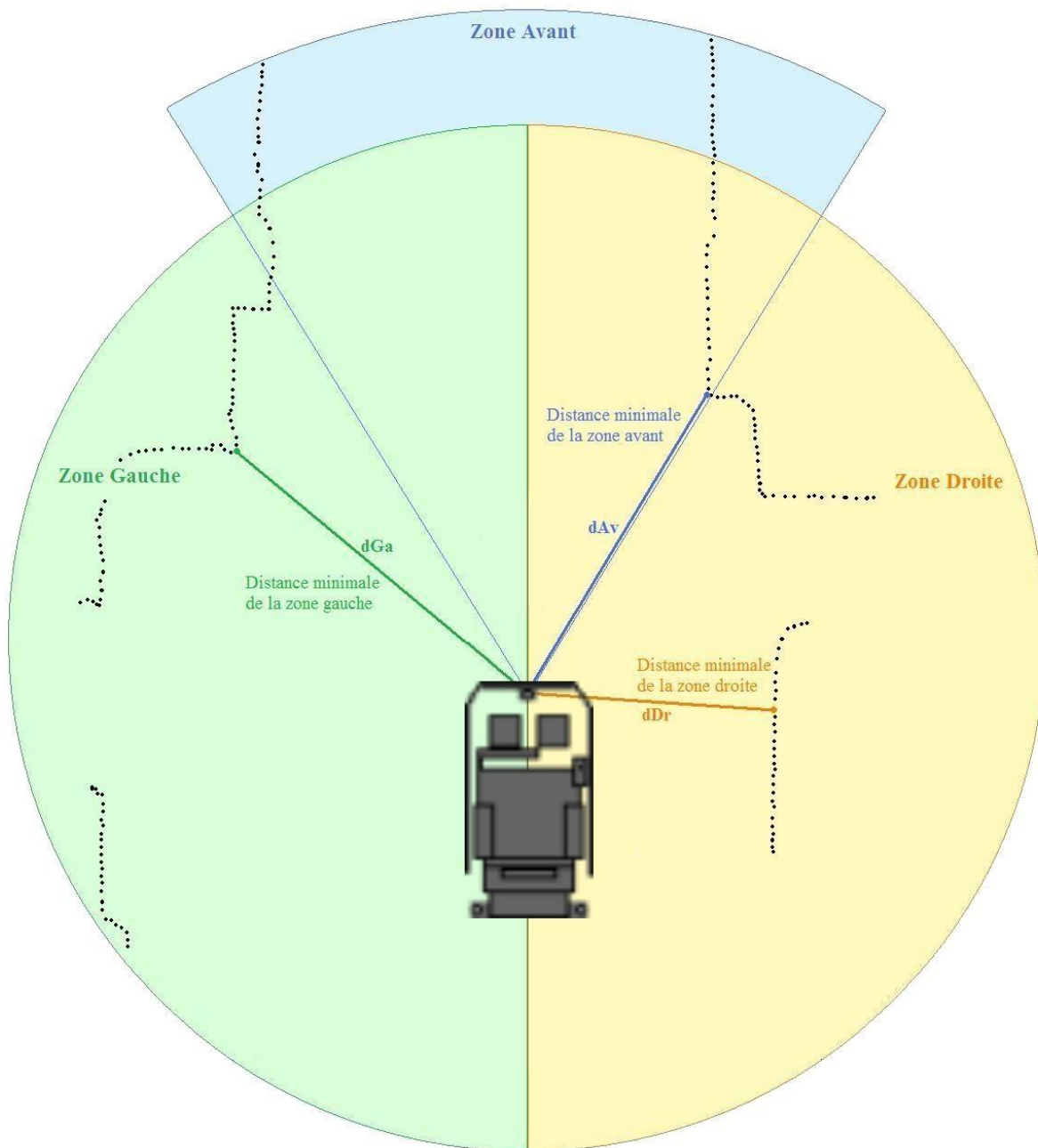


Fig. 3.21 : Détermination des distances significatives du suivi de mur.

3.3.3. DETERMINATION DU POINT CIBLE

Plusieurs paramètres doivent être déterminés afin de mettre en œuvre le suivi du mur. Tout d'abord, il est nécessaire de définir la distance de sécurité, nommée $d_{securite}$, que le fauteuil doit maintenir avec le mur. Celle-ci est variable et doit s'adapter à l'environnement. Ensuite, il faut définir la succession de points cibles qui permettront d'obtenir une trajectoire de suivi confortable. Tous ces paramètres sont déterminés à partir des trois distances significatives d_{Dr} , d_{Av} et d_{Ga} .

3.3.3.1. DISTANCE DE SECURITE

La distance de sécurité dépend de la largeur du fauteuil et de l'espace disponible dans l'environnement. En effet, lorsque l'espace emprunté par le fauteuil est restreint, il est nécessaire de s'approcher du mur suivi pour ne pas entrer en collision avec un mur opposé. Par exemple, dans un couloir, s'écarter trop du mur suivi revient à coller le mur opposé. La distance de sécurité doit donc varier pour s'adapter à l'environnement. Cela permet par exemple de centrer le fauteuil dans un couloir étroit, ou, d'approcher le fauteuil près du mur lorsque l'on croise une personne dans un couloir. Sa plage de variation s'étend d'une valeur maximale $d_{secuMax}$ lorsque l'espace est libre, à une valeur minimale $d_{secuMin}$ quand le passage emprunté est restreint. Ces deux limites sont déterminées en fonction de la taille du fauteuil. Ainsi, $d_{secuMin}$ est fixée à 40cm, ce qui correspond à la demi-largeur du fauteuil (les distances sont mesurées à partir de l'axe en y du repère global) avec une marge de sécurité d'environ cinq centimètres et $d_{secuMax}$ est choisie à 80cm, ce qui correspond à un peu plus de la largeur du fauteuil (afin de laisser un espace confortable pour manœuvrer, sans pour autant être trop loin du mur suivi).

La variation de $d_{securite}$ ne doit être ni trop rapide sous peine de réagir trop violemment à l'environnement, ni trop lente pour éviter des collisions. Pour la déterminer, nous utilisons la distance significative d_{Ga} de la manière suivante. Si d_{Ga} est inférieure à la distance de sécurité précédente, signifiant que le passage emprunté est moins large qu'à l'instant précédent, alors la distance de sécurité est diminuée progressivement jusqu'à sa valeur minimale. Ensuite, si le passage s'élargit à nouveau, la distance de sécurité est augmentée progressivement jusqu'à sa valeur maximale. Pour cela, à chaque itération des mesures, un incrément, nommée Δd_s , est ajouté ou enlevé à la distance de sécurité. Il est choisi empiriquement à 10mm de manière à éviter un changement brutal de direction et permet de réduire suffisamment rapidement la distance de sécurité pour éviter une collision à l'approche d'un obstacle du côté opposé au suivi. La détermination de $d_{securite}$ à partir de d_{Ga} est décrite par l'algorithme (3.3).

Si $d_{Ga} > d_{securite}(t - 1)$ Alors

Si $d_{securite} < d_{secuMax}$ Alors $d_{securite}(t) = d_{securite}(t - 1) + \Delta d_s$

Si $d_{securite} > d_{secuMax}$ Alors $d_{securite}(t) = d_{secuMax}$

(3.3)

Sinon

Si $d_{securite} > d_{secuMin}$ Alors $d_{securite}(t) = d_{securite}(t - 1) - \Delta d_s$

Si $d_{securite} < d_{secuMin}$ Alors $d_{securite}(t) = d_{secuMin}$

3.3.3.2. DIRECTION DU SUIVI

La direction vers laquelle le fauteuil s'oriente dépend de l'emplacement du point cible caractérisé par ses coordonnées polaires ρ et θ dans le repère global. La détermination de θ

doit garantir le maintien de la distance de suivi d_{Dr} égale à la distance de sécurité $d_{securite}$. L'écart entre ces deux distances est donc considéré comme image de l'erreur d'orientation du fauteuil. Nous estimons cette erreur dans ses variations de $-d_{securite}$ à $d_{securite}$ correspondant à une variation de d_{Dr} allant de 0 à $2 \times d_{securite}$ (en dessous, le fauteuil entrerait en collision avec le mur, et au-dessus, il en serait trop éloigné). Il est nécessaire de convertir la variation de l'erreur en angle compréhensible du système de régulation. On utilise pour cela un coefficient multiplicateur ($A_{max}/d_{securite}$) permettant d'obtenir une variation de θ allant de -90° à 90° (notons $A_{max} = 90^\circ$). Ainsi, afin d'assurer un angle maximal positif si $d_{Dr} = 2 \times d_{securite}$ et un angle maximal négatif si $d_{Dr} = 0$, on calcule θ par l'équation (3.4).

$$\theta = \frac{A_{max}}{d_{securite}} \times (d_{Dr} - d_{securite}) \quad (3.4)$$

3.3.3.3. VITESSE D'AVANCE DU FAUTEUIL

La vitesse d'avance du fauteuil lors du suivi dépend de la distance du point cible visé. Plus celui-ci se situe loin, plus le fauteuil avance vite. Ainsi ρ est déterminé de manière à réduire progressivement la vitesse d'avance du fauteuil à l'approche d'un obstacle. On choisit $\rho = d_{Av}$ lorsqu'un obstacle se situe à une distance inférieure à un seuil noté d_{Avmax} , et $\rho = d_{Avmax}$ sinon. La distance maximale d_{Avmax} est fixée à 30cm et correspond à la distance nécessaire au fauteuil pour s'arrêter alors qu'il se déplace à sa vitesse maximale lors du suivi.

3.3.4. CHOIX DE L'UTILISATEUR

L'activation d'un suivi de mur automatique s'effectue sur demande de l'utilisateur via l'interface et, comme pour toute fonctionnalité, deux informations sont extraites de l'ordre de l'utilisateur. La première est le type de fonctionnalité à activer, il doit correspondre à une demande de suivi de mur. La deuxième est l'endroit où l'appliquer. Pour le suivi de mur, contrairement à la fonctionnalité de franchissement automatique, il n'y a pas un endroit en particulier à viser, soit le fauteuil doit suivre le mur à droite, soit celui de gauche. L'utilisateur doit donc choisir une de ces deux possibilités. La récupération de ces deux informations sera détaillée dans le chapitre 4 portant sur l'interface.

3.3.5. RESULTATS

Dans un premier temps, la méthode a été implémentée en utilisant un seul capteur laser placé à l'avant du fauteuil. Pour évaluer le suivi de mur, on l'utilise dans des situations très diverses soit, le suivi à gauche, à droite, dans un couloir avec ou sans obstacle, avec des rétrécissements, des agrandissements. Pour présenter ces résultats, on se propose d'analyser le comportement du fauteuil à chaque étape d'un parcours type (Fig. 3.22). La trajectoire représentée est celle du capteur laser placé à l'avant du fauteuil.

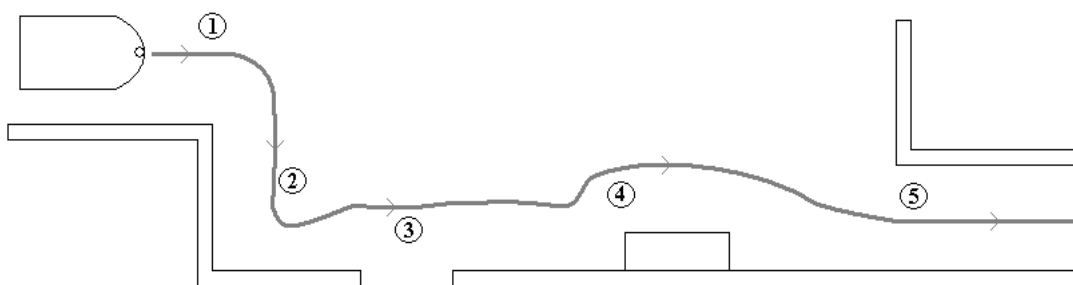


Fig. 3.22 : Exemple de parcours type avec le suivi de mur.

En ①, ce dernier avance en longeant le premier mur et lorsque sa distance à droite devient grande (en dépassant l'angle), il tourne à droite de manière à revenir se mettre à distance de sécurité. En ②, le fauteuil s'approche du mur et commence à tourner en douceur, puis lorsque la distance perçue à l'avant diminue, le fauteuil ralentit progressivement et tourne de plus en plus vite. Lorsqu'il n'y a plus d'obstacle en face, le fauteuil ré-accélère progressivement et tourne de moins en moins vite jusqu'à l'alignement avec le mur. En ③, au moment où le fauteuil détecte le trou de la porte, il va se raccrocher au mur d'après. Il pourra ainsi passer devant celle-ci sans modification de la trajectoire. A noter que si le passage avait été suffisamment grand, le fauteuil y serait entré. En ④, le fauteuil esquive l'objet à droite en tournant légèrement à gauche et revient sur le mur progressivement. Enfin, en ⑤, le fauteuil avance et lorsqu'il détecte le mur de gauche, il diminue la distance de sécurité de manière à centrer le fauteuil dans le couloir. Et lorsque le mur de gauche sera dépassé, le fauteuil s'écartera de nouveau à la distance de sécurité maximale. Dans ce parcours, on constate que le suivi automatique de mur remplit la plupart de nos attentes.

Cette méthode se révèle efficace dans la plupart des cas que peut rencontrer l'utilisateur dans son environnement quotidien. Il existe cependant certaines configurations qui peuvent entraîner une collision, il est donc nécessaire de les identifier et d'arrêter le suivi lorsqu'elles sont détectées. Lors des essais, nous en avons observé deux. La première est liée aux limites de perception. Dans le cas où le fauteuil doit tourner à 180° autour d'un angle du mur, l'angle peut sortir du champ de mesure du laser (le capteur se situant à l'avant du fauteuil), et le fauteuil peut entrer en collision avec le mur (Fig. 3.23). L'élargissement de la perception à 360° permet d'éviter cette situation.

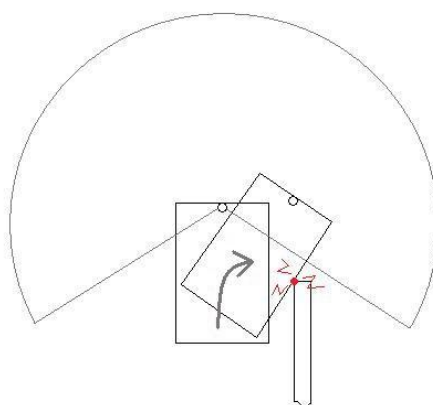


Fig. 3.23 : Première situation mettant en échec le suivi de mur.

Ensuite, dans certaines configurations, le fauteuil peut être contraint à droite, en face et à gauche. C'est le cas par exemple, quand le fauteuil entre dans un renforcement. Dans ce cas l'utilisation du suivi de mur peut entraîner une collision lorsque le fauteuil essaye de se dégager (Fig. 3.24). Il est donc nécessaire de détecter ces situations et d'arrêter la fonctionnalité. Pour cela, nous ajoutons un contrôle sur les distances significatives. Si une des deux distances d_{Ga} et d_{Av} devient inférieure à un seuil de sécurité correspondant à $d_{secuMin}$, le fauteuil s'arrête par mesure de sécurité évitant ainsi les collisions dues à l'utilisation du suivi de mur dans ces situations délicates.

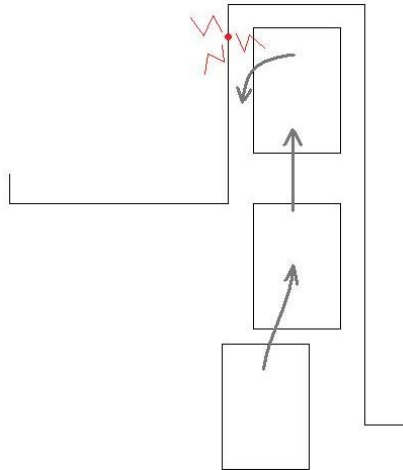


Fig. 3.24 : Deuxième configuration où le suivi de mur peut entraîner une collision.

Enfin, même si la trajectoire obtenue par la méthode permet de suivre efficacement un mur sans à-coup en compensant correctement les erreurs de positionnement par rapport au mur, on remarque que le fauteuil réagit sans anticipation lors de forts changements de configuration de l'environnement. Par exemple, dans les cas ② et ④ sur le parcours type, le fauteuil perçoit le mur ou l'obstacle tardivement, ce qui amène le fauteuil à s'approcher trop près de l'angle du mur, alors qu'un utilisateur aurait anticipé en coupant le virage ou en s'écartant progressivement de l'obstacle avant d'y être confronté. Nous cherchons donc une manière d'améliorer la méthode afin d'obtenir une trajectoire plus compréhensible pour l'utilisateur.

3.3.6. AMELIORATION DE LA TRAJECTOIRE

Afin d'anticiper l'approche des obstacles, il nous paraît important d'introduire un point de contrôle situé à l'avant du fauteuil. Par analogie aux modèles pilote-véhicule pour le contrôle de la trajectoire d'un véhicule automobile (Sentouh et al. 2010), nous nous intéressons à la manière dont l'utilisateur établit et corrige sa trajectoire. Le modèle proposé tient compte de deux types de corrections apportées par l'utilisateur, l'anticipation et la compensation. Lors d'un parcours, l'analyse de l'environnement par l'utilisateur porte sur deux zones de l'environnement. La première est une zone proche du véhicule dans laquelle l'utilisateur analyse les écarts de trajectoire, ce qui l'amène à corriger la position du véhicule par rapport à la trajectoire désirée. La seconde est une zone éloignée dont l'analyse permet à l'utilisateur d'anticiper et de compenser la variabilité de l'environnement en observant l'orientation que devra suivre le fauteuil. Nous améliorons la méthode précédente de manière à analyser

l'environnement à partir de deux points de références. Pour cela, nous considérons deux zones de l'environnement caractérisées par leur point central que l'on nomme « point de contrôle » qui représente le focus de l'endroit observé par l'utilisateur. La première correspond à la zone proche et est caractérisée par un point de contrôle se situant au centre du repère global du fauteuil (centre du capteur laser avant) juste devant l'utilisateur. La seconde correspond à la zone éloignée et possède un point de contrôle se situant dans l'axe du fauteuil à une distance d'un mètre par rapport au centre du repère global. Pour chaque point de contrôle, nous effectuons le même contrôle de distance qu'énoncé précédemment, soit la mesure de d_{Dr} , d_{Av} et d_{Ga} . Les mesures ne sont plus déterminées en fonction du centre du repère global mais en utilisant comme référence l'emplacement du point de contrôle. La figure suivante illustre ces modifications (Fig. 3.25).

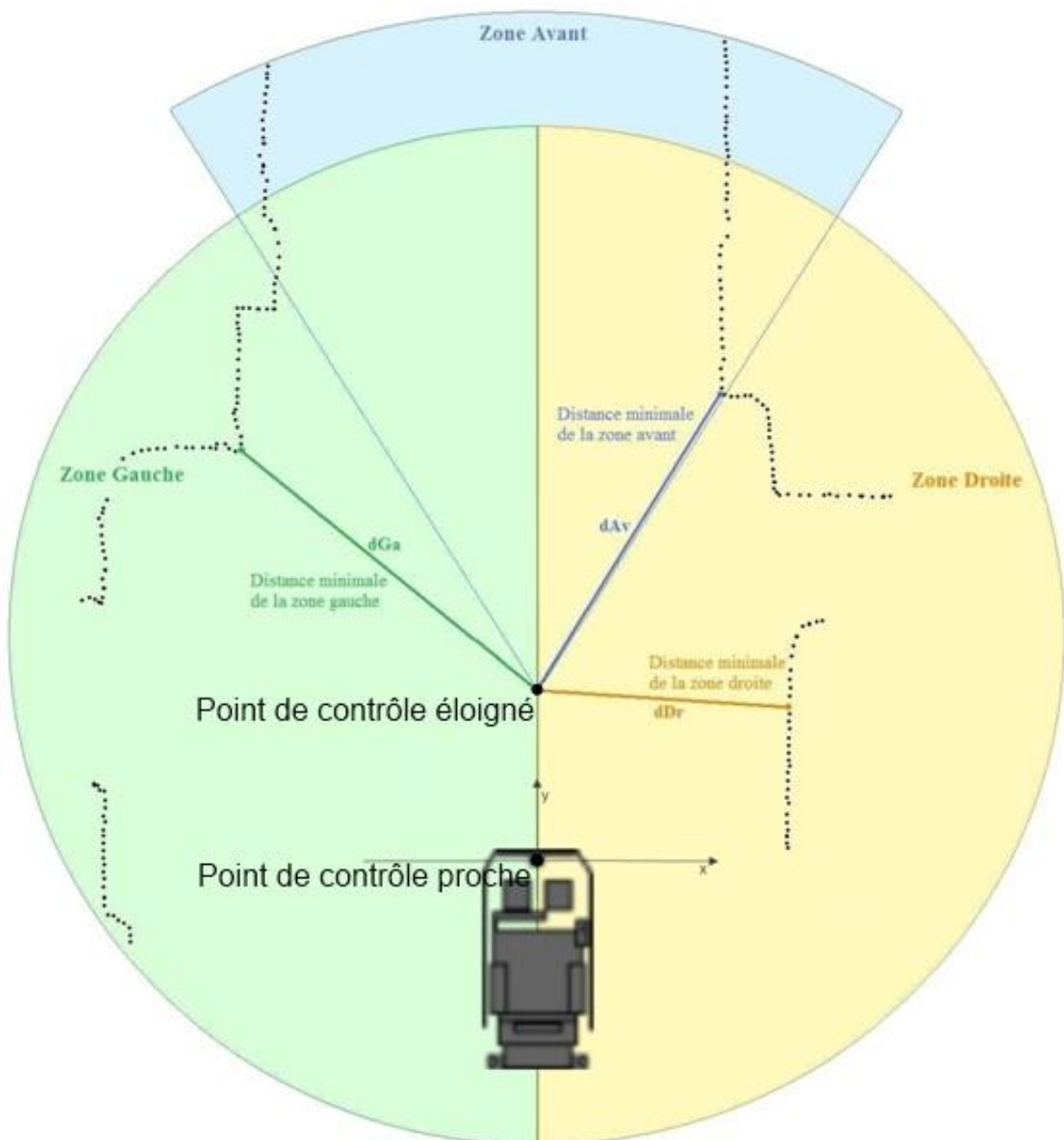


Fig. 3.25 : Ajout des points de contrôle.

Ensuite, lorsque l'on dispose des trois distances significatives mesurées pour chaque point de contrôle, on les compare entre elles (par exemple, on compare d_{Dr} éloigné et d_{Dr} proche). Si une des trois distances du point de contrôle proche est inférieure à celle correspondante au point éloigné alors on considère ces distances comme significatives, et dans le cas contraire, on retient celles du point éloigné. Ainsi, l'anticipation d'un obstacle est effectuée uniquement lorsque le fauteuil dispose de suffisamment de place. Enfin, une fois les distances choisies la détermination du point cible s'effectue de la même manière.

Cette modification permet d'obtenir une réaction à l'environnement plus proche de celle qu'aurait fait un utilisateur et permet d'obtenir des trajectoires plus fluides et plus facilement comprises par l'utilisateur. La figure suivante illustre la trajectoire obtenue pour le parcours type (Fig. 3.26).

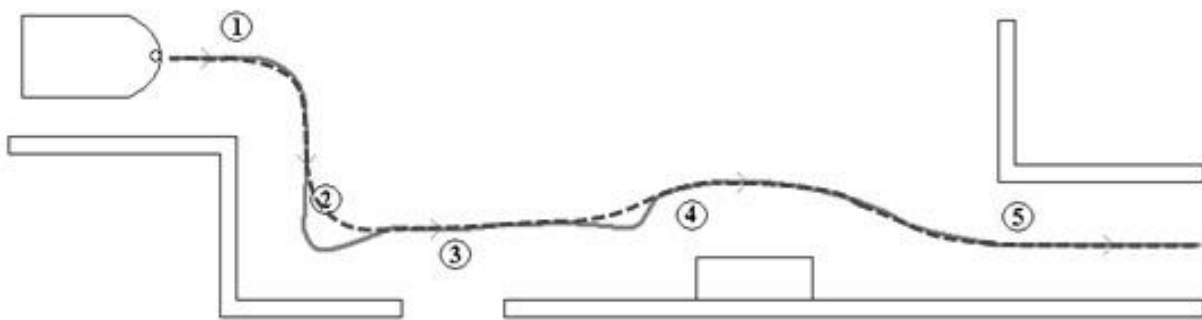


Fig. 3.26 : Trajectoire obtenue avec deux points de contrôle (en pointillés) comparée à la trajectoire obtenue précédemment (en trait plein).

3.4. CONCLUSION

L'optique de notre assistance à la conduite ne consiste pas à remplacer la conduite manuelle mais plutôt à la compléter à l'aide de fonctionnalités autonomes. Chacune d'elles permet à l'utilisateur de gérer des situations qui sont difficiles ou fatigantes à réaliser manuellement. Le franchissement automatique de passage étroit permet d'effectuer les manœuvres complexes nécessaires au franchissement d'une porte ou d'un passage délicat, et le suivi de mur permet d'alléger la charge de conduite de l'utilisateur sur un trajet long comme lorsqu'il doit longer un couloir par exemple. De plus, pour que l'utilisateur ait confiance en ces fonctionnalités, il est important qu'elles effectuent correctement leurs tâches quelle que soit la situation. Les limites observées pour chacune d'elles sont gérées et nous verrons par la suite (cf. chapitre 4) que l'interface ne présente à l'utilisateur que les endroits où les fonctionnalités peuvent accomplir correctement leur tâche.

Chapitre 4 : COMMANDE DEICTIQUE

4.1. Introduction	92
4.2. Conception de l'interface	92
4.2.1. Modalités de l'interaction humain-machine	92
4.2.2. Caméra vidéo	93
4.2.3. Organe de commande	94
4.2.4. Structures de l'affichage	94
4.2.4.1. Affichage avec menu des tâches	94
4.2.4.2. Affichage synthétique	95
4.2.4.3. Priorité entre les modes.....	97
4.3. Projection des points de l'image vidéo dans le repère du fauteuil	97
4.3.1. Analyse de la zone observée par la caméra.....	97
4.3.2. Correspondance par approximation linéaire	100
4.3.3. Correspondance entre deux plans	103
4.3.4. Conversion d'une localisation en point de l'image vidéo.....	105
4.4. Affichage des éléments sur l'écran	106
4.4.1. Représentation d'un passage étroit dans l'image vidéo	106
4.4.1.1. Introduction.....	106
4.4.1.2. Analyse du contexte de perspective	107
4.4.1.3. Effet de profondeur dans l'image vidéo	108
4.4.1.4. Effets de la vue en plongée	110
4.4.1.5. Représentation finale du passage étroit dans l'image vidéo	111
4.4.2. Représentation du suivi de mur dans l'image vidéo	112
4.5. Conclusion.....	113

4.1. INTRODUCTION

L'efficacité de l'assistance à la mobilité proposée dans ce mémoire dépend des performances techniques de la réalisation bien sûr mais également de l'ergonomie de l'interface permettant son contrôle, d'autant plus que les utilisateurs concernés sont des personnes handicapées moteurs. Dans ce contexte applicatif il nous apparaît important de concevoir une interface simple et intuitive. Ainsi, nous avons décidé de mettre en œuvre une approche déictique qui nous semble être particulièrement adaptée à la situation. Son principe est de permettre à l'utilisateur de contrôler le fauteuil à partir d'une instruction du type : "Je veux franchir cette porte", "je veux atteindre ce point" ou encore "je veux suivre ce mur". Pour cela, il dispose sur l'interface d'un aperçu de l'environnement sur lequel il peut montrer ses objectifs par une simple action de pointage. Par exemple, lorsqu'il souhaite franchir une porte, il lui suffit de la pointer sur l'interface pour que le fauteuil déclenche automatiquement un franchissement automatique. D'autre part, pour aider l'utilisateur à comprendre au mieux les possibilités de l'assistance proposée, on présente un retour d'information sur l'interface précisant à chaque instant l'état du fauteuil ainsi que toutes les actions qu'il peut accomplir.

Dans ce chapitre, nous définirons tout d'abord le contexte dans lequel nous avons réalisé l'interface déictique. L'interaction humain-machine, le type de caméra utilisé, ainsi que les organes de commande seront détaillées. Ensuite, nous présenterons les différents affichages conçus et leurs fonctionnements. Enfin, nous détaillerons les méthodologies permettant sa réalisation, notamment la manière de convertir une information provenant de l'interface en information exprimée dans le repère du fauteuil, ainsi que la méthode permettant le retour d'information sur l'interface à partir de celles fournies par les fonctionnalités.

4.2. CONCEPTION DE L'INTERFACE

4.2.1. MODALITES DE L'INTERACTION HUMAIN-MACHINE

Le contexte dans lequel l'interface est réalisée est le suivant. Notre fauteuil est équipé d'une caméra dont l'image vidéo est affichée sur l'écran de l'ordinateur et constitue le support principal de l'interface. Cet aperçu de l'environnement est proche de la vision de l'utilisateur ce qui lui permet de reconnaître et d'associer facilement les éléments réels de l'environnement avec ceux présents sur son interface. Ensuite, pour donner son ordre, l'utilisateur dispose d'un organe de commande lui permettant de réaliser l'action de pointage sur l'interface. Celui-ci doit être adapté aux déficiences motrices de la personne. Cette tâche de pointage, qui caractérise l'ordre de l'utilisateur, consiste à indiquer sur l'image vidéo l'endroit où il souhaite effectuer une tâche. Ici, Il y a donc deux informations importantes à communiquer à la machine, la localisation et la nature de la tâche demandée. Ces informations sont exprimées dans le repère de l'image vidéo. Comme l'ensemble des informations utilisées par la machine sont exprimées dans le repère du fauteuil, il est nécessaire de pouvoir convertir toutes les informations de l'ordre utilisateur obtenues via l'interface en informations exprimées dans ce même repère.

Ensuite, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la perception du fauteuil, réalisée à partir des capteurs laser à balayage, permet d'analyser l'environnement et de contrôler le fauteuil dans celui-ci grâce aux fonctionnalités autonomes et au système d'asservissement. L'action correspondant à l'ordre utilisateur ayant été convertie est alors exécutée.

Enfin, pour que l'utilisateur constate que l'action demandée est réalisée et pour prendre connaissance de toutes les actions que peut accomplir le fauteuil, un retour d'information est nécessaire et doit être présenté à l'utilisateur sur l'interface. Pour cela, comme toutes les indications fournies par la machine sont exprimées dans le repère du fauteuil, il est nécessaire de les convertir dans le repère de l'image vidéo. L'état du fauteuil est affiché et tous les éléments correspondant à une action possible sont mis en évidence sur l'interface. Le schéma suivant décrit l'interaction humain-machine en œuvre dans l'assistance à la conduite (Fig. 4.1).

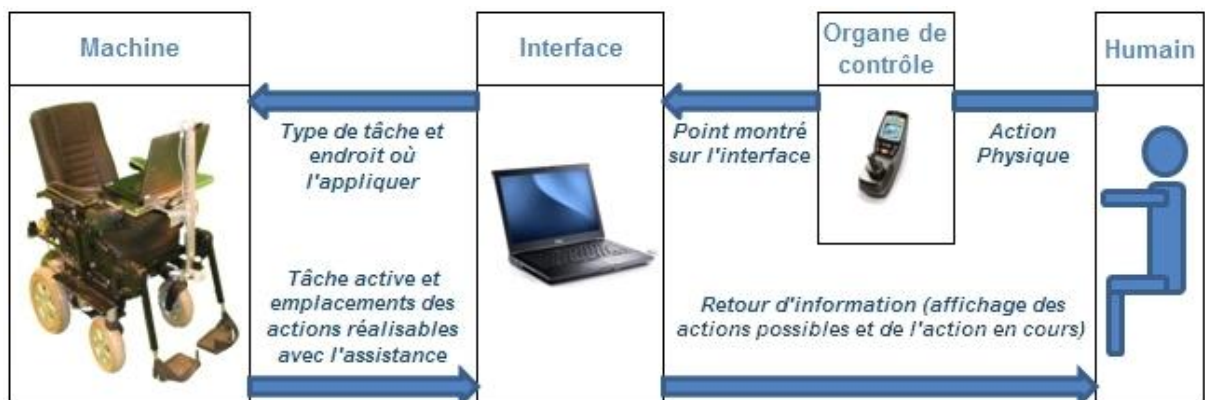


Fig. 4.1 : Interaction humain-machine.

4.2.2. CAMERA VIDEO

L'image vidéo utilisée pour réaliser l'interface est fournie par une caméra de type LifeCam VX-7000 de Microsoft (Fig. 4.2). Celle-ci est connectée directement en USB sur le routeur et positionnée à l'avant du fauteuil comme cela a été décrit précédemment (cf. &2.1, Fig. 2.1). La caméra fournit une image vidéo de résolution 640*480 avec un angle de vision horizontal de 70°. Nous n'effectuerons pas de traitement sur celle-ci par la suite, toutefois, afin de garantir un flux vidéo continu et le plus rapide possible, nous manipulons l'image vidéo à partir des bibliothèques DirectX, laissant ainsi toutes possibilités de traitement.



Fig. 4.2 : Caméra VX-7000 avec son image vidéo.

La hauteur et l'inclinaison de la caméra sont choisies de manière à obtenir un aperçu de l'environnement le plus proche possible de celui qu'aurait une personne assise dans le fauteuil (Fig. 4.3). Pour cela, nous plaçons la caméra à une hauteur correspondant au focus du regard de la personne et nous l'inclinons de manière à le faire correspondre à celui de la caméra. Ces paramètres de réglage peuvent être ajustés pour chaque utilisateur.

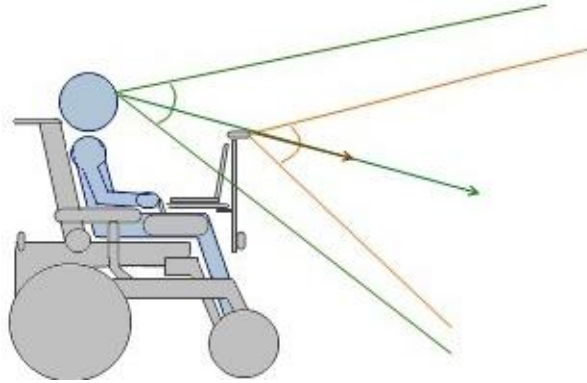


Fig. 4.3 : Inclinaison de la caméra.

4.2.3. ORGANE DE COMMANDE

L'organe de commande doit permettre à l'utilisateur de réaliser physiquement l'action de pointage sur l'interface. Il doit être adapté aux déficiences motrices de la personne et se doit donc d'être personnalisable. Par exemple, cela peut être un écran tactile sur lequel l'utilisateur pointera directement avec son doigt, ou encore un capteur des mouvements de la tête ou de la direction du regard permettant de contrôler un pointeur sur l'interface.

Dans notre développement actuel, un contrôle du pointeur à l'écran est réalisé à partir du joystick. Cela permet de commander le fauteuil en mode automatique avec le même organe de commande qu'en mode manuel (évitant ainsi les mouvements larges de l'utilisateur pour basculer d'une commande automatique vers une commande manuelle, ou inversement). Le joystick du fauteuil étant utilisé pour déplacer le fauteuil en mode manuel, il faut pouvoir basculer du mode manuel vers le mode automatique. Pour cela, on utilise un bouton poussoir incrusté dans le joystick. Ainsi, quand l'utilisateur veut effectuer une tâche de pointage sur l'interface, il appuie une fois sur le bouton pour passer en mode automatique, il peut ensuite utiliser le joystick pour déplacer le pointeur sur l'interface et il appuie une seconde fois pour valider l'action. Par ailleurs, il est important d'ajuster la vitesse de déplacement du pointeur à l'écran en fonction de la personne qui l'utilise. Dans notre cas, nous choisissons une vitesse relativement basse afin de faciliter la prise en main de l'assistance à la conduite à tous les utilisateurs lors des essais.

4.2.4. STRUCTURES DE L'AFFICHAGE

4.2.4.1. AFFICHAGE AVEC MENU DES TACHES

En tenant compte des interactions humain-machine décrites précédemment, on réalise une première interface basée sur le scénario suivant (Fig. 4.4). Pour définir sa commande,

l'utilisateur doit effectuer deux actions de pointage. Tout d'abord, il doit indiquer la tâche à effectuer dans un menu présenté à côté de l'aperçu de l'environnement. Ensuite, il pointe l'endroit sur ce dernier pour lancer l'action.



Fig. 4.4 : Première interface réalisée mettant en œuvre l'approche déictique.

Pour effectuer le retour d'information, les éléments de l'environnement correspondant à la fonctionnalité choisie sont surlignés sur l'image vidéo. Par exemple, si l'utilisateur choisit une tâche de franchissement automatique de passage étroit, tous les passages étroits présents sur l'interface sont mis en évidence. Ainsi, l'utilisateur sait qu'en indiquant un passage le fauteuil sera capable de le franchir. De plus, on affiche en bas de l'interface le nom de l'action en cours afin de connaître l'état du fauteuil. Ainsi on verra s'afficher « Arrêt » quand le fauteuil est immobile, « Commande manuelle » quand l'utilisateur déplace le fauteuil avec le joystick, ou encore le nom des fonctionnalités comme « Suivi de mur » ou « Franchissement automatique » en conduite assistée. Enfin, l'arrêt d'une tâche s'effectue de deux manières, soit automatiquement à la fin de l'action demandée, soit par une intervention de l'utilisateur sur un des organes de commande, par exemple en pointant de nouveau sur l'interface ou en bougeant le joystick. Toute intervention de l'utilisateur entraîne l'arrêt immédiat des fonctionnalités automatiques et le fauteuil retourne en contrôle manuel. Le basculement d'un mode automatique vers le mode manuel se fait ainsi très naturellement. Par exemple, lorsque l'utilisateur franchit un passage difficile automatiquement, il peut continuer en manuel avec le joystick sans s'arrêter, juste en reprenant celui-ci.

4.2.4.2. AFFICHAGE SYNTHETIQUE

L'inconvénient de cette première approche est que le conducteur doit effectuer deux actions pour formuler sa commande, une pour indiquer la tâche et une pour indiquer la localisation. De plus, le choix de la tâche dans un menu n'est pas très intuitif. En effet, l'utilisateur doit d'abord choisir l'action à effectuer pour ensuite montrer où l'appliquer, alors que

naturellement, on indique les deux en même temps. Le fait de montrer une porte dans un contexte de déplacement signifie que l'on veut la franchir. On décide donc d'améliorer l'interface en respectant deux contraintes. La première est que l'on ne présentera que l'aperçu de l'environnement comme interface de manière à la rendre la plus intuitive possible. Ainsi toutes les informations seront présentées sur l'aperçu. Et la deuxième est de simplifier au maximum la commande de l'utilisateur. On souhaite qu'elle se résume à une tâche unique de pointage indiquant à la fois la localisation et la nature de la tâche. La deuxième interface est présentée sur la figure ci-dessous (Fig. 4.5).

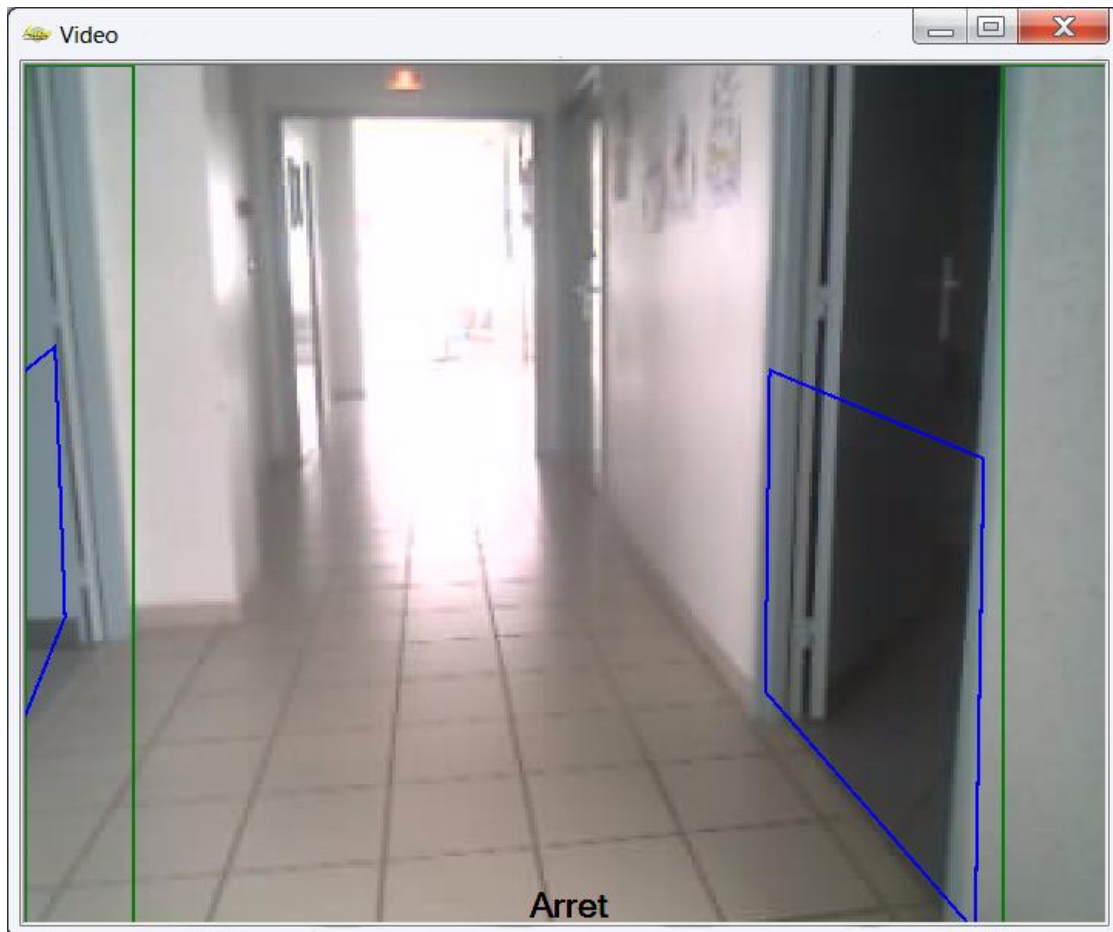


Fig. 4.5 : Deuxième interface réalisée mettant en œuvre l'approche déictique.

Elle est conçue de la manière suivante. Toutes les actions possibles du fauteuil sont affichées sur l'aperçu de l'environnement, et tous les éléments correspondant à une action envisageable sont surlignés avec un code couleur. Les passages étroits sont surlignés en bleu, de manière à ce que l'utilisateur sache qu'un franchissement automatique de passage étroit sera lancé lorsqu'il indique un élément surligné en bleu sur l'interface. De même, les suivis de mur gauche et droit utilisent des rectangles de couleur verte placés à gauche et à droite de l'interface. Ainsi, la localisation, la nature de la tâche et le moment où elle doit être exécutée sont indiqués en une seule action de pointage. L'ordre utilisateur est simplifié et traduit un ordre naturel, facile à donner, correspondant bien à l'approche déictique souhaitée. Par ailleurs, la gestion de l'arrêt et l'affichage de l'état du fauteuil restent identiques à la première interface.

4.2.4.3. PRIORITE ENTRE LES MODES

Avec cette seconde interface, il peut se produire que les représentations des deux fonctionnalités se chevauchent si un passage étroit se situe au bord de l'image vidéo se superposant à la représentation du suivi de mur. Il faut alors attribuer un niveau de priorité entre les modalités de conduite ; en l'occurrence le franchissement automatique de passage étroit a une priorité supérieure au suivi de mur. Ainsi, dans l'exemple précédent, un point montré par l'utilisateur sur un chevauchement des deux fonctionnalités aboutira au lancement du franchissement automatique (le rectangle du suivi de mur étant sur toute la hauteur, nous donnons la priorité au franchissement automatique, plus restreint). Par ailleurs, le fait qu'un simple contact sur le joystick enclenche la commande manuelle revient à attribuer une priorité supérieure à la conduite manuelle par rapport à la conduite autonome.

4.3. PROJECTION DES POINTS DE L'IMAGE VIDEO DANS LE REPERE DU FAUTEUIL

Pour réaliser l'interface déictique, il faut traduire ce que montre l'utilisateur en information utilisable par le fauteuil. Il est donc nécessaire d'établir une méthode de correspondance entre un point de l'image vidéo et un point appartenant au repère du fauteuil. Ensuite, pour les retours d'informations issues des mesures laser, cette correspondance sera employée de manière inverse.

4.3.1. ANALYSE DE LA ZONE OBSERVEE PAR LA CAMERA

Pour établir cette correspondance, il faut identifier la zone appartenant au plan de mesure laser qui est observée par la caméra. Comme les capteurs lasers et la caméra sont fixés sur le fauteuil, les paramètres de cette correspondance ne changent pas au cours du temps. La caméra est fixée à 65cm au-dessus du capteur laser positionné à l'avant du fauteuil qui est lui-même à 44cm du sol. Lorsqu'on analyse l'image vidéo, on remarque que sa partie haute représente des points de l'environnement qui se situent au-delà de la perception laser, et donc, seule sa partie basse possède une correspondance point à point avec le champ de perception laser. L'image vidéo est donc divisée en deux zones, la zone haute et la zone basse (Fig. 4.6), pour lesquelles l'association avec les mesures laser sera traitée différemment.



Fig. 4.6 : Zones de l'image vidéo.

La limite haute de la zone basse représente la limite du champ de perception laser dans le repère global, soit environ 4m. Cela correspond à un pourcentage de la hauteur de l'image vidéo que l'on nomme $th\%$. Pour le déterminer, un objet de référence marqué à hauteur des capteurs est placé en limite de mesure laser, la hauteur à laquelle la marque apparaît sur l'image vidéo correspond à la valeur du seuil, soit une zone haute de 40% et une zone basse de 60%. Ces proportions sont spécifiques à notre configuration.

Ensuite, chaque point appartenant à la zone basse possède une correspondance directe avec un point appartenant au champ de perception laser. La projection de cette zone dans le repère global est trapézoïdale. Il faut donc associer les points délimitant ce trapèze dans le repère global avec les points le délimitant sur l'interface (Fig. 4.7). Les points P1 à P4 correspondent aux projections des quatre coins de la zone basse, ils sont déterminés en mesurant leurs réelles localisations dans l'environnement.

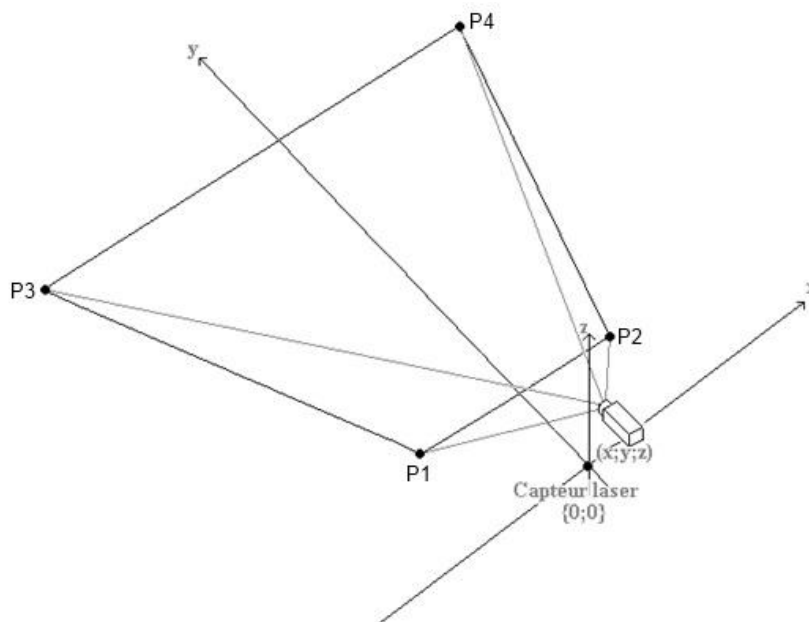


Fig. 4.7 : Projection de la zone basse dans le repère global.

La taille et le positionnement de cette projection trapézoïdale dans le repère global du fauteuil dépend des caractéristiques de la caméra. Tout d'abord, les largeurs et la longueur du trapèze dépendent respectivement du focus horizontal et du focus vertical, tous deux paramètres intrinsèques de la caméra. Ensuite, la position du trapèze par rapport au centre du repère global dépend de la position de la caméra et de son inclinaison, tous deux paramètres extrinsèques de la caméra.

Pour obtenir les positions exactes de ces points, on utilise la même méthode que pour déterminer le seuil limitant les deux zones. On place dans l'environnement des objets de référence marqués à hauteur des capteurs de manière à ce que les marques de chacun d'eux se situent aux limites de la zone basse (Fig. 4.8). Une fois en place, on mesure leurs coordonnées dans le repère global. Lorsque toutes les positions de référence sont déterminées pratiquement, on établit un périmètre de la vision de manière à visualiser les limites de la projection de la zone basse (Fig. 4.9).



Fig. 4.8 : Périmètre de vision en pratique.

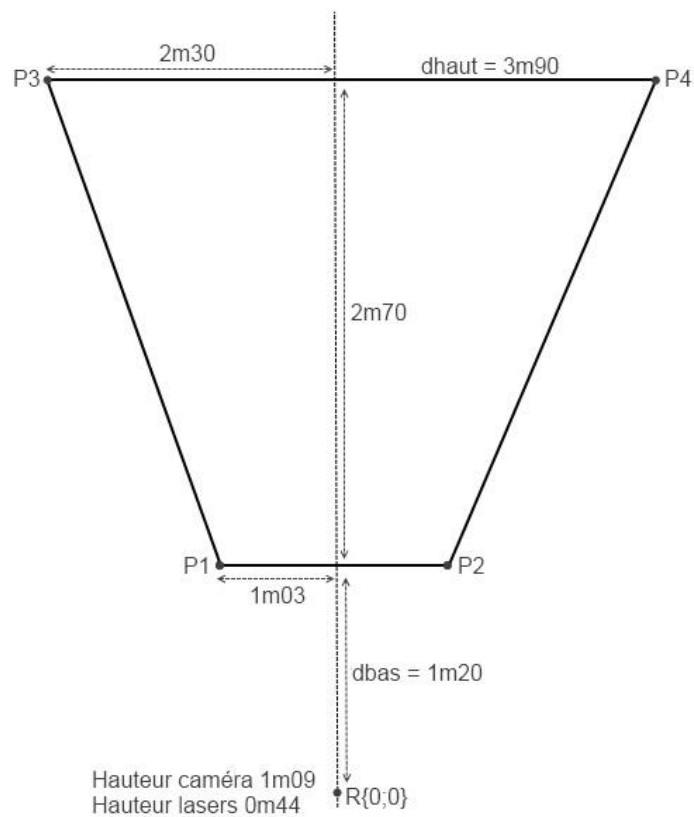


Fig. 4.9 : Estimation de la projection de la zone basse dans le repère global.

Enfin, la projection des points appartenant à la zone haute correspond à des points plus éloignés dans le repère global qui se situent hors du champ de perception du capteur laser. On considère que les points montrés par l'utilisateur dans la zone haute ne correspondent pas à leurs projections dans le repère global mais à un point se situant en hauteur. Par exemple, lorsque l'on indique une porte en arrière-plan dans l'image vidéo, son centre se situe dans la zone haute alors qu'elle est identifiée par le laser à une distance proche de la limite de perception. Pour que les indications de l'utilisateur dans la zone haute correspondent bien aux éléments de l'environnement, nous limitons la projection des points dans cette zone à la limite de perception laser (Fig. 4.10).

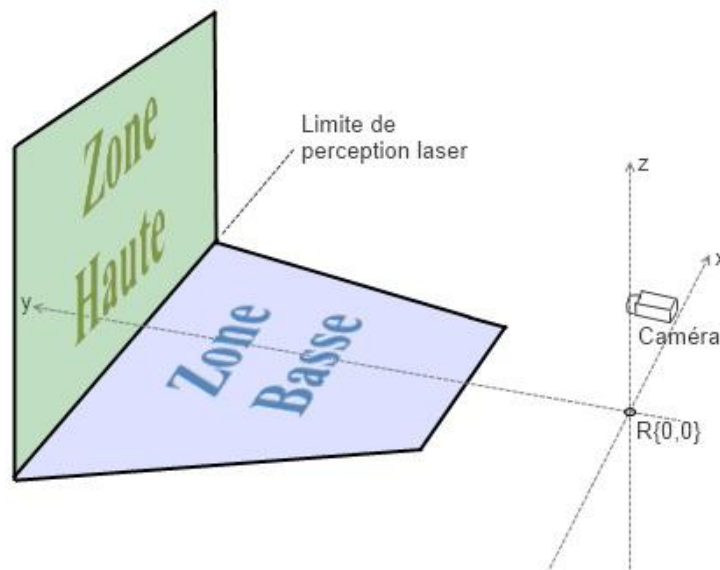


Fig. 4.10 : Correspondance de la zone haute de l'image vidéo dans le repère global.

4.3.2. CORRESPONDANCE PAR APPROXIMATION LINEAIRE

Pour établir une relation entre une position donnée sur l'écran et sa position correspondante dans le repère global, nous utilisons une première approche par approximation linéaire. Afin d'expliquer la méthode, on considère dans un premier temps la seule partie de l'image vidéo qui a une correspondance avec le repère global, puis dans un second temps, nous adapterons la méthode aux deux zones de l'image vidéo pour tenir compte de l'analyse précédente. Sur l'image vidéo, un point donné est caractérisé par sa position en pixel $\{i, j\}$. Pour plus de commodité, celle-ci est traduite en position angulaire par rapport à la caméra, et est caractérisée par deux angles $\{A_v ; A_h\}$ correspondant respectivement à la position angulaire horizontale et verticale. Pour les déterminer, on fait correspondre la largeur et la hauteur de l'écran aux focus horizontal et vertical de la caméra, puis on considère l'axe reliant le centre de la caméra au centre de l'image vidéo comme axe de repère. Ainsi, A_h correspond à l'angle entre l'axe reliant le point d'abscisse i au centre de la caméra et l'axe du repère. Et de même, A_v correspond à l'angle entre l'axe reliant le point d'ordonnée j au centre de la caméra et l'axe du repère, (Fig. 4.11).

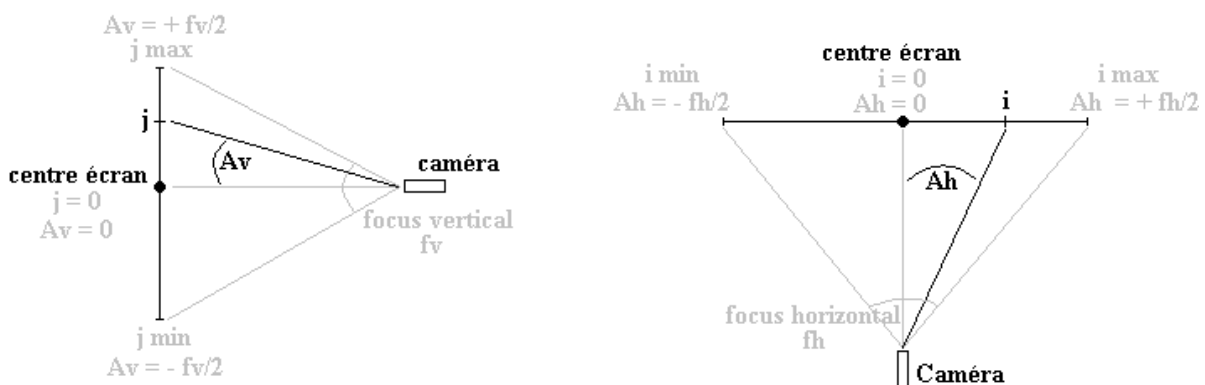


Fig. 4.11: Mesure des angles A_h et A_v à partir de la position en pixel $\{i, j\}$ de l'image vidéo.

Il faut alors aussi connaître les limites angulaires des focus de la caméra. L'angle A_h varie de $\pm 35^\circ$ autour du point central de l'image (l'angle de focus horizontal étant d'environ 70°). De même pour la variation de l'angle A_v . L'angle de focus vertical étant d'environ 42° , A_v varie de $\pm 21^\circ$ en haut et en bas par rapport au point central de l'écran. A partir de ces deux angles A_h et A_v , on détermine les coordonnées cylindriques $\{\rho; \theta\}$ du point correspondant dans l'environnement en faisant plusieurs approximations (Fig. 4.12).

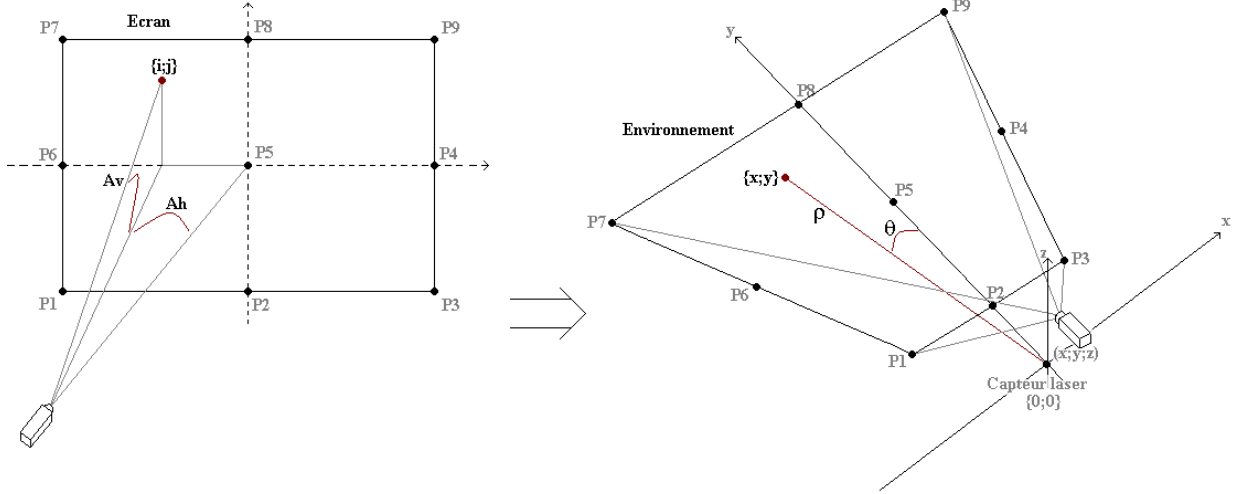


Fig. 4.12 : Correspondance entre un point à l'écran et son emplacement dans le repère global.

Tout d'abord, pour la détermination de θ , on considère la caméra suffisamment proche du capteur laser et centrée par rapport à lui pour estimer que $\theta = A_h$. Ensuite, ρ est déterminé à partir de A_v en considérant comme linéaire la variation de ρ en fonction de A_v autour de la projection du point milieu de l'image vidéo dans le repère global. Cette approximation est acceptable car le point montré sur l'image vidéo est généralement voisin du centre de celle-ci. Si l'ensemble de l'image vidéo avait une correspondance avec le repère global, nous ferions correspondre les limites de l'image vidéo avec celle de la projection (Fig. 4.13). On aurait alors,

$$\begin{aligned}
 \rho &= d_{haut} && \text{pour} && A_v = \frac{f_v}{2} \\
 \rho &= d_{bas} && \text{pour} && A_v = -\frac{f_v}{2} \\
 \rho &= d_{milieu} = \frac{d_{haut} + d_{bas}}{2} && \text{pour} && A_v = 0
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Ce qui donne,

$$\rho = \frac{(d_{haut} - d_{bas})}{f_v} \times A_v + d_{milieu} \tag{4.2}$$

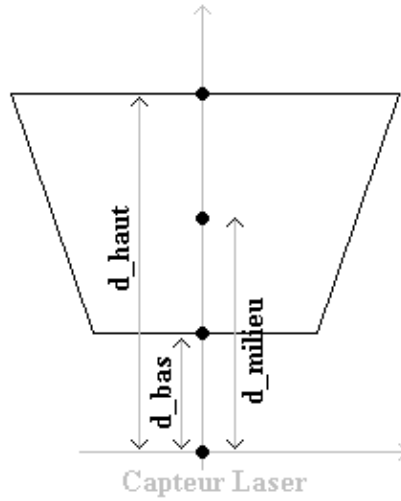


Fig. 4.13: Distance limite de la zone projetée dans l'environnement.

Cette relation de proportionnalité doit ensuite être adaptée à notre contexte où seule la partie basse de l'image vidéo représente la zone de perception laser. On a ainsi,

$$\begin{aligned}
 \rho &= d_{haut} && \text{pour } A_v = f_v(1 - th\%) - \frac{f_v}{2} = f_v(\frac{1}{2} - th\%) \\
 \rho &= d_{bas} && \text{pour } A_v = -\frac{f_v}{2} \\
 \rho &= d_{milieu} = \frac{d_{haut} + d_{bas}}{2} && \text{pour } A_v = \frac{f_v}{2}(1 - th\%) - \frac{f_v}{2} = -f_v \frac{th\%}{2}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

D'où,

$$\rho = \frac{(d_{haut} - d_{bas})}{f_v(1 - th\%)} \times A_v + \frac{d_{haut} + d_{bas}(1 - 2th\%)}{2(1 - th\%)} \tag{4.4}$$

Cette première approche, simple et rapide à mettre en œuvre, permet d'obtenir une approximation de l'emplacement dans le repère global correspondant au point montré par l'utilisateur sur l'interface. L'avantage est qu'elle est suffisamment précise pour retrouver une cible dans l'environnement (celles-ci étant assez grandes, comme une porte par exemple). Ensuite, le point désigné est localisé avec précision grâce aux mesures laser. Cette méthode nous a permis de mettre en œuvre rapidement une première version de la commande déictique. Cependant, si cette approximation est suffisante pour établir la commande, elle n'est pas assez précise pour effectuer le retour d'information vers l'interface. En effet, celui-ci permet de donner à l'utilisateur un choix d'actions possibles que le fauteuil peut réaliser dans notre approche déictique. Si le surlignage d'un élément sur l'interface est décalé par rapport à sa correspondance dans l'environnement, cela peut induire en erreur et incommoder l'utilisateur. Nous avons donc été amenés à concevoir une seconde méthode suffisamment précise pour établir le retour d'information sur l'interface.

4.3.3. CORRESPONDANCE ENTRE DEUX PLANS

Nous recherchons une méthode plus fine qui n'ait pas recours à l'approximation précédente, tout en restant légère et en utilisant des paramètres que nous puissions facilement mesurer. Pour cela, on se propose de déterminer la projection d'un point de l'image vidéo dans le repère global directement à partir des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra vidéo. Une telle approche est décrite dans (Cheng et Zelinsky 1996). Nous nous en sommes inspirés en l'adaptant à notre configuration et en tenant compte des deux zones de l'image vidéo. Les figures Fig. 4.14 et Fig. 4.15 présentent le contexte.

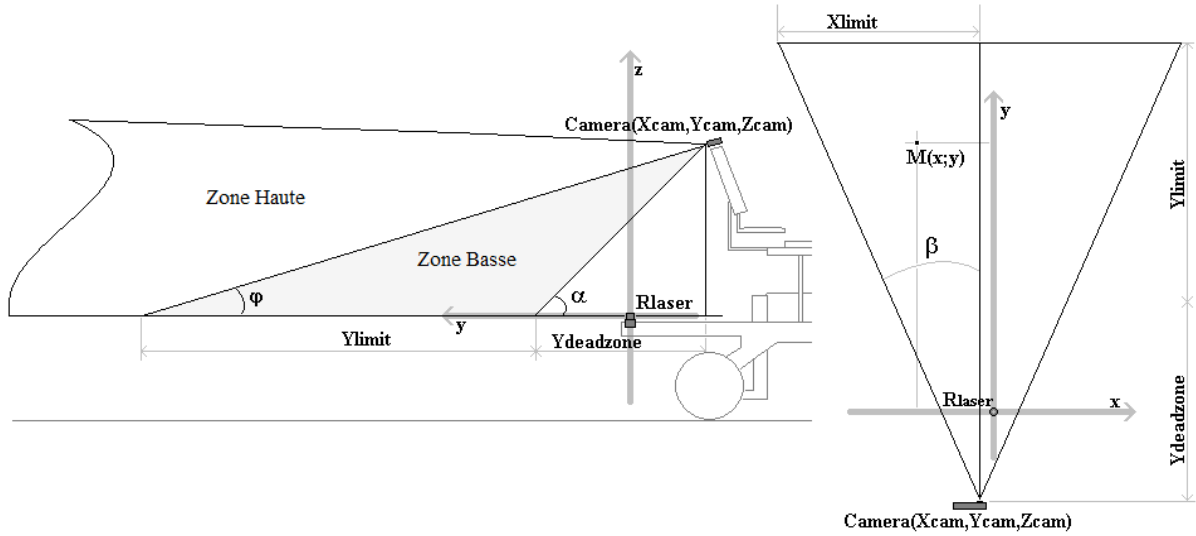


Fig. 4.14 : Schéma de la conversion Image Vidéo/Environnement, vues sur l'axe y-z et x-y.

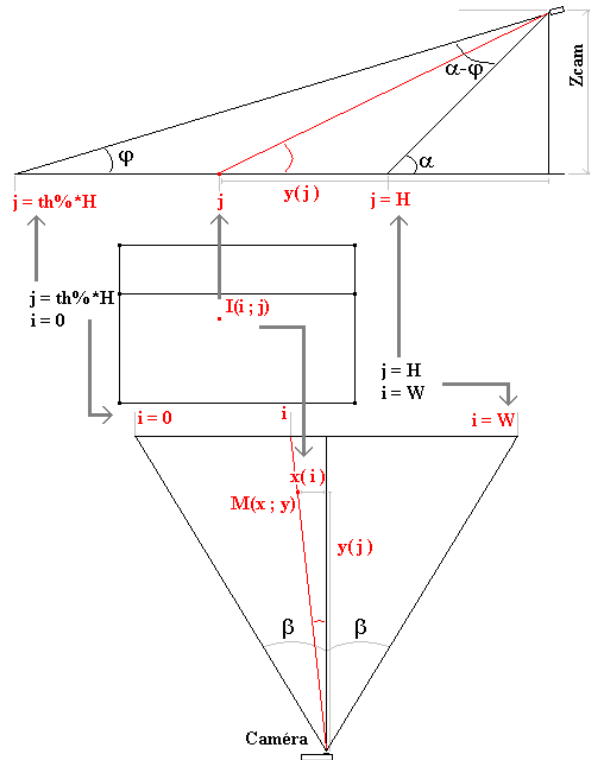


Fig. 4.15 : Conversion Image Vidéo/Environnement.

Les variables suivantes représentent le lien entre le plan des mesures laser et l'image de la caméra.

Ydeadzone	Longueur de la zone morte devant le fauteuil n'étant pas observée par la caméra, Ydeadzone = 1m20.
Ylimit	Longueur de la zone observée par la caméra, Ylimit = 2m70.
Xlimit	Largeur maximale de la zone observée par la caméra, Xlimit = 2m30.
α	Angle de projection verticale des points du bas de l'image vidéo.
β	Angle maximal de projection horizontale.
φ	Angle de projection verticale des points de l'image vidéo à la limite de la zone basse (pour $j = th\% \times H$).
Xcam, Ycam et Zcam	Coordonnées de la caméra. La caméra se situant au-dessus du centre du repère global, Xcam = 0, Ycam = 0 et Zcam = 65cm.

Notre objectif est de déterminer le point $M(x, y)$ appartenant au repère global à partir du point $I(i, j)$ de l'image vidéo correspondant. Pour cela, on tient compte de la zone de l'image vidéo dans laquelle $I(i, j)$ se trouve et des lois trigonométriques. Tout d'abord, on détermine les angles α, β et φ par les formules (4.5), (4.6) et (4.7).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{cam}}{Y_{deadzone}} \right) \quad (4.5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{X_{limit}}{Y_{limit} + Y_{deadzone}} \right) \quad (4.6)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{cam}}{Y_{limit} + Y_{deadzone}} \right) \quad (4.7)$$

Ensuite, pour tous les points se situant dans la zone basse, il faut faire correspondre la limite haute de la zone basse, en $j = th\% \times H$, avec sa projection dans l'environnement, en $y = Y_{limit} + Y_{deadzone}$, ainsi que la limite basse de la zone, en $j = H$, avec la limite de la zone morte, en $y = Y_{deadzone}$. De même, par analogie sur l'axe horizontal, on cherche à faire correspondre la limite gauche de l'écran, en $i = 0$, avec l'axe de projection horizontale correspondant (axe de $-\beta$), de même avec la limite droite de l'écran, en $i = W$, avec l'axe $+\beta$. Ainsi, x et y sont déterminés à partir des lois trigonométriques en fonction de i et j avec les fonctions (4.8) et (4.9).

$$y = \frac{Z_{cam}}{\tan\left(\varphi + \frac{(j - th\% \times H) \times (\alpha - \varphi)}{th\% \times H}\right)} \quad (4.8)$$

$$x = y \times \tan\left(\frac{\beta \times (2i - W)}{W}\right) \quad (4.9)$$

Pour la zone haute, on considère que les points perçus sont situés sur la limite de perception du capteur laser. On détermine y avec la fonction (4.10) (le calcul de x ne change pas).

$$y = \frac{Z_{cam}}{\tan(\varphi)} \quad (4.10)$$

Par cette seconde méthode de calcul, on obtient une correspondance plus précise entre les deux plans. En pratique, nous avons construit une matrice de passage contenant l'ensemble des coordonnées (x, y) pour chaque position (i, j) de l'image vidéo. Son utilisation apporte un gain de temps conséquent (les calculs étant remplacés par la recherche d'une valeur dans un tableau).

4.3.4. CONVERSION D'UNE LOCALISATION EN POINT DE L'IMAGE VIDEO

Pour que l'utilisateur puisse voir sur l'interface ce qu'il peut faire, il est nécessaire d'effectuer un retour d'information sur l'image vidéo. Pour cela, chaque fonctionnalité doit fournir tous les emplacements dans l'environnement dans lesquels elle peut être utilisée. Il est donc nécessaire de pouvoir effectuer la conversion inverse, d'un point de l'environnement (x, y) quelconque vers l'image vidéo. Comme les points à convertir sont issues de l'analyse des données laser, ils correspondent à la zone basse de l'image vidéo. Pour établir cette conversion, on inverse les fonctions précédentes liées à cette zone. On obtient les équations (4.11) et (4.12).

$$i = \frac{W}{2} \times \left(1 + \frac{\tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)}{\beta}\right) \quad (4.11)$$

$$j = th\% \times H \times \left(1 + \frac{\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z_{cam}}{y}\right) - \varphi\right)}{\alpha - \varphi}\right) \quad (4.12)$$

Enfin, on arrondit i et j en entiers pour retrouver l'emplacement correspondant dans l'image en pixels. Cette méthodologie fournit une précision amplement suffisante pour notre application.

4.4. AFFICHAGE DES ELEMENTS SUR L'ECRAN

Pour effectuer le retour d'information, chaque fonctionnalité autonome doit fournir les emplacements sur lesquels elle peut s'appliquer. Dans le cas du franchissement automatique de passage étroit, la localisation de tous les passages présents dans l'environnement est connue et doit être convertie sur l'image vidéo grâce à la méthode précédente. Pour que l'affichage soit explicite, il est nécessaire que les éléments affichés sur l'interface soit compréhensibles par l'utilisateur. En particulier, il ne suffit pas de convertir les points caractérisant chaque passage dans l'image vidéo car l'affichage se résumerait à un ensemble de points situés au niveau de la perception laser qui seraient difficilement interprétables par l'utilisateur. Il est donc nécessaire d'afficher des éléments représentatifs permettant à l'utilisateur de savoir immédiatement à quelles actions ils correspondent. Dans le cas du suivi de mur, il n'y a pas d'élément particulier de l'environnement qui identifie la fonctionnalité : « mur » est un terme générique se rapportant à un obstacle latéral sur lequel on asservit le mouvement autonome du fauteuil. Ainsi, pour représenter un suivi de mur, deux rectangles sont affichés à droite et à gauche de l'écran correspondant respectivement à un suivi de mur droit et gauche.

4.4.1. REPRESENTATION D'UN PASSAGE ETROIT DANS L'IMAGE VIDEO

4.4.1.1. INTRODUCTION

Pour que l'indication des passages étroits soit naturelle, on souhaite les surligner sur l'interface. Pour cela, chaque passage sera représenté par un quadrilatère s'adaptant à sa forme sur l'image vidéo. Ceux-ci sont définis par les quatre points (A, B, C, D) les délimitant comme le montre la figure suivante (Fig. 4.16).

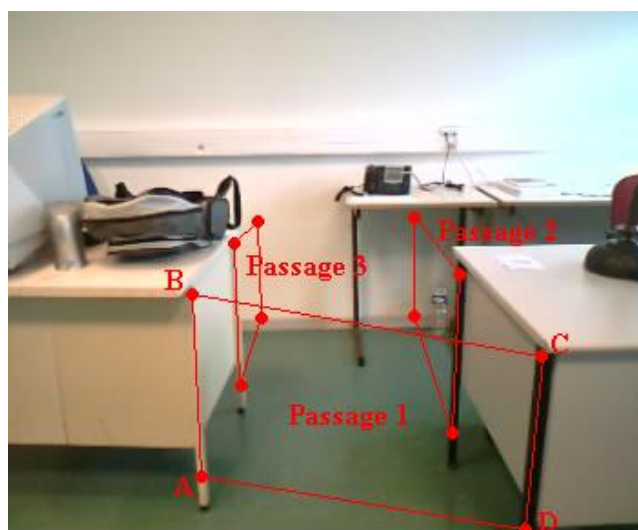


Fig. 4.16 : Visualisation des passages sur l'image vidéo.

Ces passages à représenter sont détectés par la perception laser (cf. chapitre 3). Chacun d'eux est identifié par les coordonnées des deux points les délimitant dans le plan de mesure laser. Pour construire cette structure, nous devons tout d'abord déterminer la position des quatre points A, B, C et D dans l'environnement en fonction des deux points frontières d'un passage étroit exprimés dans le repère global, que l'on nomme M1 et M2. Pour cela, on choisit les points A et B de manière à ce qu'ils se situent sur l'axe vertical du point frontière gauche du passage étroit et les points C et D sur l'axe vertical du point frontière droit. La taille de la représentation d'un passage est choisie de manière à ce qu'elle ne soit ni trop grande sur l'image vidéo sous peine d'occuper trop d'espace sur l'interface, ni trop petite ce qui la rendrait difficile à indiquer pour l'utilisateur. On fixe la hauteur de la représentation du passage à 80 cm de manière à ce que les points bas, A et D, se situent à 40cm en dessous des points frontières du passage et les points hauts, B et C, à 40cm au-dessus.

Ensuite, il faut représenter ces points dans l'image vidéo. On a vu que l'on pouvait convertir un point du repère laser vers celui de l'interface avec la méthode précédente, mais les points caractérisant la structure de chaque passage se situent dans un plan vertical autre. Afin de pouvoir utiliser la méthode précédente, il faut exprimer ces points dans le repère traité précédemment. Le principe consiste à rechercher les points appartenant au repère laser ayant la même position sur l'image vidéo que les quatre points de la structure. Pour cela, on recherche leurs projections dans le plan du laser du point de vue de la caméra, que l'on nomme A', B', C' et D' (Fig. 4.17). Leurs coordonnées sont déterminées par les lois de perspective liée au point de vue de la caméra. Enfin, la méthode de correspondance permet de les convertir en points de l'image vidéo, que l'on nomme A'', B'', C'' et D''. Une fois reliés, ils forment le quadrilatère se superposant avec le passage étroit.

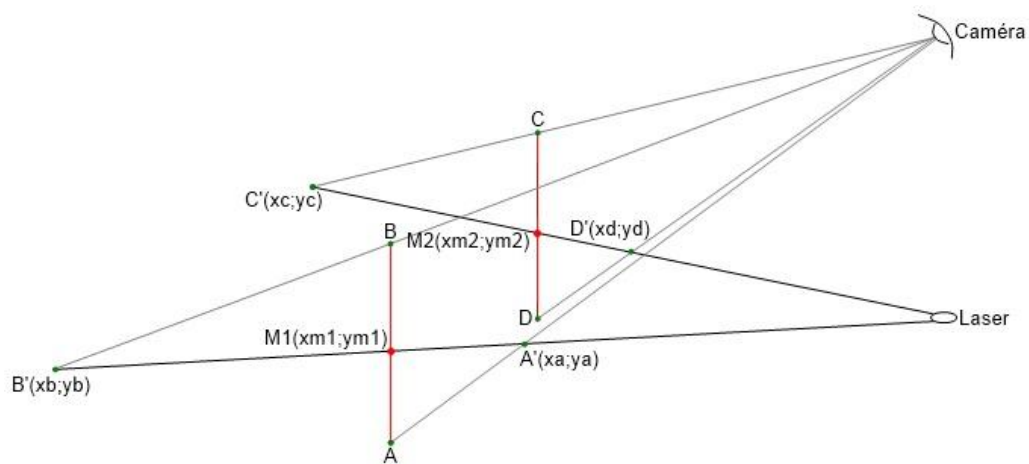


Fig. 4.17 : Projection des points de la structure dans le repère global, vue 3D.

4.4.1.2. ANALYSE DU CONTEXTE DE PERSPECTIVE

Pour pouvoir effectuer cette projection des points A, B, C et D vers les points A', B', C' et D' dans le repère global, nous devons tout d'abord analyser la perspective inclinée liée à la vue de la caméra. Celle-ci présente une vue en plongée qui se caractérise par deux effets. Le premier est l'effet de profondeur correspondant à la fuite des lignes vers le point d'horizon. Le

deuxième est l'effet de hauteur qui entraîne une convergence des verticales de l'image vidéo vers un point de fuite. La figure suivante illustre la fuite des lignes vers leurs points de fuite (Fig. 4.18). On dispose de quatre points de fuite, deux pour la fuite des droites horizontales de l'image (lignes vertes), un pour les droites verticales (lignes rouges) et un pour la profondeur (lignes bleues). Les points de fuite des lignes vertes et rouges se situent hors de l'image vidéo.

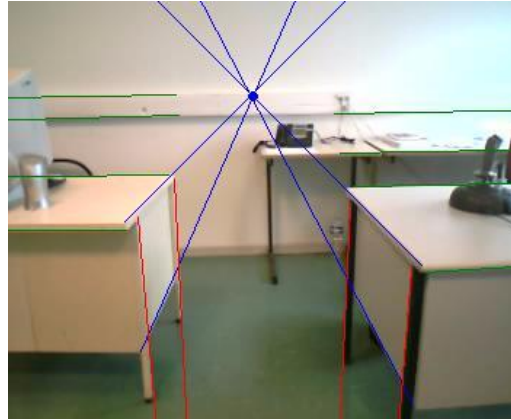


Fig. 4.18 : Points de fuite de l'image vidéo.

Ainsi, les droites AB et CD, étant des droites parallèles dans l'environnement, ne le sont plus dans l'image vidéo. Afin de déterminer l'emplacement dans l'image vidéo des points A", B", C" et D", il est nécessaire de considérer ces effets.

Dans notre configuration, l'axe de vision de la caméra est aligné avec l'axe du repère global. On remarque que l'effet de profondeur influe sur la taille des verticales de l'image vidéo, et que l'effet de hauteur provoque un décalage horizontal des points d'une verticale de l'image vidéo. On considère que l'on peut traiter ces effets indépendamment. Pour cela, on procède en trois étapes. Tout d'abord, on détermine les effets de la profondeur sans tenir compte de l'effet de hauteur. Dans cette première configuration, on détermine les coordonnées des quatre points projetés dans le repère global que l'on nomme A_p , B_p , C_p , et D_p . Ces points sont alors convertis à partir de la méthode précédente sur l'image vidéo. On considère que leurs positions verticales sur celle-ci est correcte. Ensuite, on détermine les effets de la vue en plongée sans tenir compte de la profondeur. Dans cette seconde configuration, on détermine à nouveau les coordonnées des quatre points projetés dans le repère global que l'on nomme A_h , B_h , C_h , et D_h . On les convertit sur l'image vidéo de la même manière. On considère que leurs positions horizontales sur celle-ci est correcte. Enfin, pour obtenir l'emplacement final des quatre points A", B", C" et D" sur l'image vidéo, on retient pour chaque point la position verticale de la première configuration (en j) et la position horizontale de la seconde configuration (en i).

4.4.1.3. EFFET DE PROFONDEUR DANS L'IMAGE VIDEO

Un élément sur l'image vidéo n'a pas la même taille en étant proche de la caméra que s'il en était loin. C'est pourquoi la projection des points A, B, C et D sur le plan du laser dépend du point de vue de la caméra. L'objectif ici est de retrouver les ordonnées des quatre points A_p , B_p , C_p et D_p à partir du positionnement de la caméra dans le repère global (Fig. 4.19).

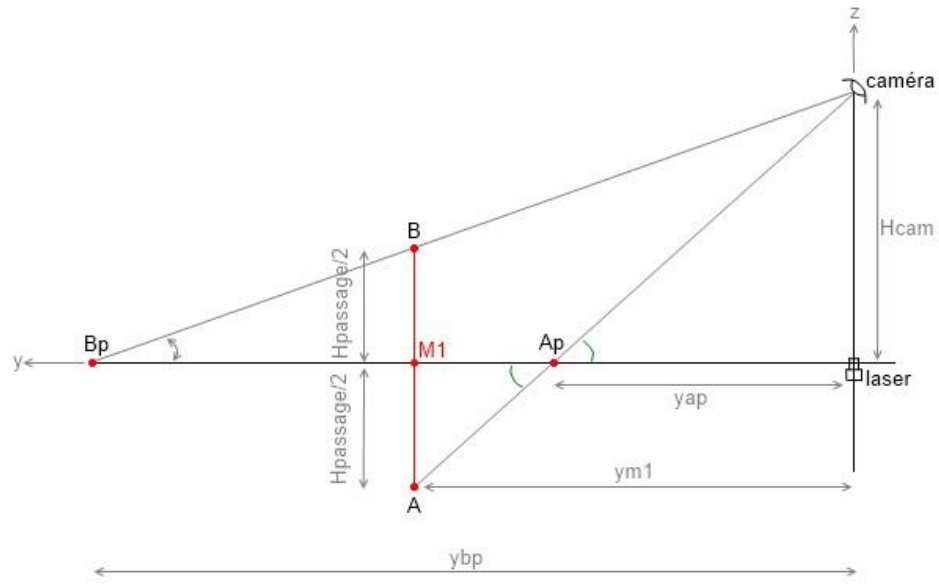


Fig. 4.19 : Projection des points définissant un passage étroit dans le repère global, plan y-z.

On note M1, le point de coordonnée $\{x_{M1}; y_{M1}\}$, le point gauche du passage étroit et M2, le point de coordonnée $\{x_{M2}; y_{M2}\}$ correspondant au point droit du passage étroit. On détermine y_{Ap} et y_{Bp} projection des points A et B dans le repère global à partir de y_{M1} , de H_{cam} , la hauteur de la caméra, et de $H_{passage}$, la hauteur de la représentation du passage étroit, avec les fonctions (4.13) et (4.14).

$$y_{Ap} = y_{M1} \times \frac{H_{cam}}{H_{cam} + H_{passage}/2} \quad (4.13)$$

$$y_{Bp} = y_{M1} \times \frac{H_{cam}}{H_{cam} - H_{passage}/2} \quad (4.14)$$

On détermine les ordonnées de C et D de la même manière à partir de y_{M2} .

$$y_{Cp} = y_{M2} \times \frac{H_{cam}}{H_{cam} - H_{passage}/2} \quad (4.15)$$

$$y_{Dp} = y_{M2} \times \frac{H_{cam}}{H_{cam} + H_{passage}/2} \quad (4.16)$$

Ensuite, comme on ne prend pas en compte les déviations sur l'axe x provoquées par la vue inclinée, les abscisses des points Ap et Bp sont les mêmes que celle de M1 et, de même, pour les points Cp et Dp avec M2 ($x_{Ap} = x_{Bp} = x_{M1}$ et $x_{Cp} = x_{Dp} = x_{M2}$). Enfin, on convertit les points Ap, Bp, Cp et Dp dans l'image vidéo pour obtenir la position en pixels de ces quatre points (Fig. 4.20). On peut remarquer la correspondance avec les lignes de profondeur dans l'image vidéo et l'écart avec les lignes verticales de l'image vidéo du fait de l'effet de hauteur qui n'a pas été traité. Par la suite, on ne gardera de cette conversion que les hauteurs en pixel (j) pour chaque point.

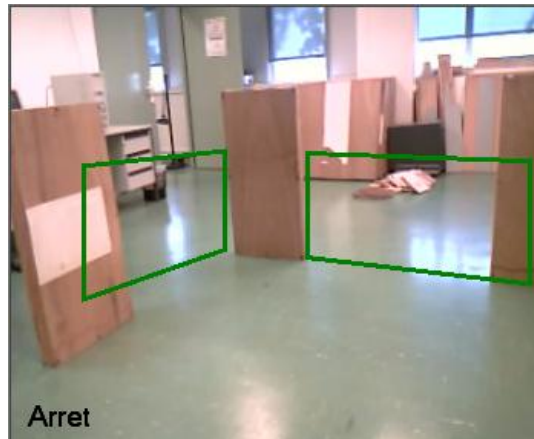


Fig. 4.20 : Représentation de passages étroits en tenant compte uniquement de l'effet de profondeur.

4.4.1.4. EFFETS DE LA VUE EN PLONGEE

Dans une vue en plongée, toutes les verticales de l'image vidéo fuient vers un même point, que l'on nomme PF. On recherche la projection des points A, B, C, et D dans le repère global ayant les mêmes abscisses du point de vue de la caméra en prenant en compte l'effet de hauteur sans considérer l'effet de profondeur. Nous nommons ces points Ah, Bh, Ch et Dh. Le passage étroit est représenté dans un plan vertical XZ (Fig. 4.21).

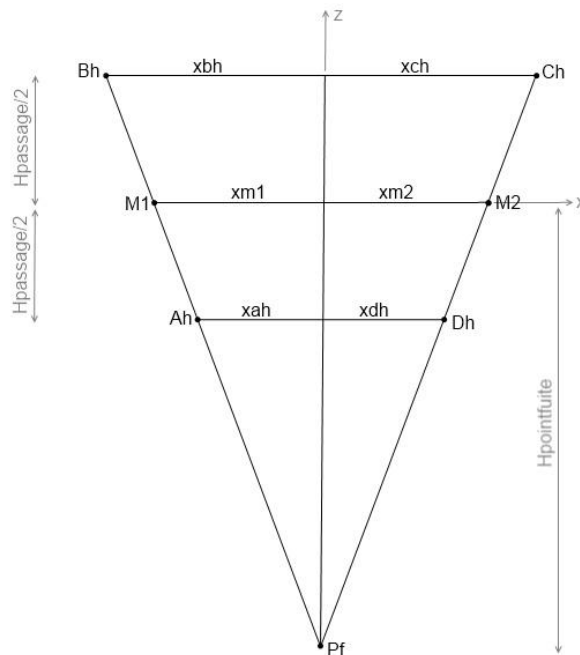


Fig. 4.21 : Projection sur l'axe des x des points du passage étroit dans le repère global.

On détermine les abscisses de ces quatre points, en fonction de la hauteur du passage, H_{passage} , et de la distance du point de fuite, $H_{\text{pointfuite}}$, à partir des équations (4.17), (4.18), (4.19) et (4.20). Pour déterminer cela, nous ajustons la hauteur du point de fuite en le diminuant progressivement jusqu'à ce que les verticales de la représentation du passage étroit se superposent avec celles de l'image vidéo.

$$x_{Ah} = x_{M1} \times \left(\frac{H_{pointfuite} - H_{passage}/2}{H_{pointfuite}} \right) \quad (4.17)$$

$$x_{Bh} = x_{M1} \times \left(\frac{H_{pointfuite} + H_{passage}/2}{H_{pointfuite}} \right) \quad (4.18)$$

$$x_{Ch} = x_{M2} \times \left(\frac{H_{pointfuite} + H_{passage}/2}{H_{pointfuite}} \right) \quad (4.19)$$

$$x_{Dh} = x_{M2} \times \left(\frac{H_{pointfuite} - H_{passage}/2}{H_{pointfuite}} \right) \quad (4.20)$$

Ensuite, les ordonnées de ces quatre points sont choisies identiques à celles des points frontières leur correspondant : les ordonnées de A et B correspondent à celle de M1, et de même pour C et D avec M2 ($y_{Ah} = y_{Bh} = y_{M1}$ et $y_{Ch} = y_{Dh} = y_{M2}$). Enfin, on convertit les point Ah, Bh, Ch et Dh dans l'image vidéo pour obtenir la position en pixels de ces quatre points (Fig. 4.22).

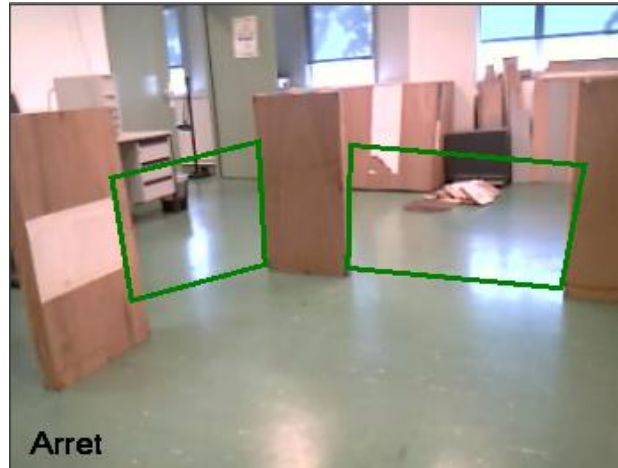


Fig. 4.22 : Représentation de passages étroits en tenant compte uniquement de la vue en plongée.

4.4.1.5. REPRESENTATION FINALE DU PASSAGE ETROIT DANS L'IMAGE VIDEO

La gestion des effets de profondeurs et de la vue en plongée permet séparément d'avoir d'un côté les bonnes hauteurs dans l'image vidéo, et de l'autre, un bon placement horizontal des points. Pour obtenir la position finale des quatre points A", B", C" et D" caractérisant la représentation d'un passage étroit sur l'image vidéo, on garde pour chacun d'eux son ordonnée issue de l'effet de profondeur, et son abscisse issue de l'effet de hauteur. On détermine ainsi les coordonnées dans l'image des points délimitant la structure de chaque passage étroit (Fig. 4.23) pour lesquels les lignes horizontales et verticales de la représentation des passages s'alignent avec celles de l'environnement sur l'image vidéo.



Fig. 4.23 : Représentation finale des passages étroits dans l'image vidéo.

4.4.2. REPRESENTATION DU SUIVI DE MUR DANS L'IMAGE VIDEO

L'affichage pour la fonctionnalité de suivi de mur est plus simple. En effet, l'utilisateur peut effectuer soit un suivi sur la gauche, soit sur la droite. Il n'y a donc pas d'éléments de l'environnement à identifier et à convertir sur l'image vidéo. Pour présenter ces deux possibilités à l'utilisateur, on utilise simplement les côtés de l'image vidéo. On affiche deux rectangles, un à gauche et l'autre à droite (Fig. 4.24). Lorsque l'utilisateur indique un point dans l'un d'entre eux, la fonctionnalité de suivi de mur associée se lance.

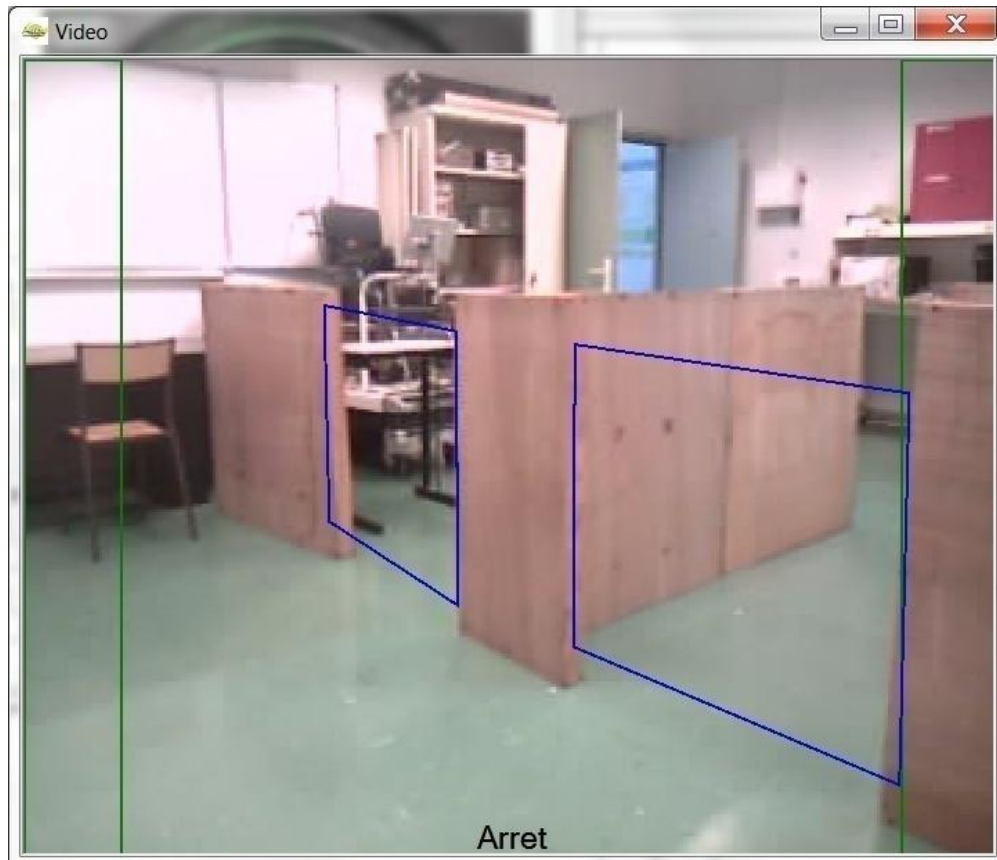


Fig. 4.24 : Affichage sur l'interface des éléments significatifs.

4.5. CONCLUSION

L'approche déictique nous a permis de concevoir une interface intuitive et ergonomique. Le principe de montrer ses objectifs en les pointant sur une interface présentant un aperçu de l'environnement proche de la vision humaine rend les interactions humain-machine confortables. De plus, la mise en évidence des actions disponibles et de l'état du fauteuil sur l'interface permet à l'utilisateur d'associer rapidement les capacités fournies par l'assistance avec les éléments leur correspondant dans l'environnement. Par ailleurs, l'ordre utilisateur est réalisé à partir d'une unique tâche de pointage qui peut être effectuée par n'importe quel organe de commande, ce qui permet de s'adapter facilement aux déficiences motrices de la personne. Cela peut être un écran tactile sur lequel l'utilisateur indique directement du doigt son objectif, ou encore tout type d'organe de commande qui permet de contrôler un pointeur sur l'écran, comme une souris d'ordinateur, une Trackball, ou un contrôle par le regard. Actuellement, le pointage est réalisé au moyen du joystick, c'est ce mode de commande que nous utiliserons lors de l'évaluation présentée au chapitre suivant.

Chapitre 5 : EVALUATION

5.1. Introduction	116
5.2. Présentation de l'assistance à des utilisateurs potentiels.....	117
5.3. Evaluation des performances de l'association Humain Machine	119
5.3.1. Introduction	119
5.3.2. Protocole expérimental	119
5.3.3. Critères de performance	120
5.3.3.1. Analyse temporelle	120
5.3.3.2. Fréquence d'utilisation des modalités	121
5.3.3.3. Indice d'inconfort.....	121
5.3.4. Charge de travail.....	121
5.3.5. Résultats.....	123
5.3.5.1. Durée et fréquence des modes de commande	123
5.3.5.2. Critère d'inconfort	124
5.3.5.3. Critère de charge de travail	125
5.3.6. Conclusion	126
5.4. Evaluation de la charge cognitive de l'utilisateur	127
5.4.1. Introduction	127
5.4.2. Protocole expérimental	127
5.4.3. Tâches secondaires	129
5.4.4. Résultats.....	129
5.4.4.1. Charge attentionnelle	129
5.4.4.2. Capacité décisionnelle.....	132
5.5. Discussion	135

5.1. INTRODUCTION

Afin d'évaluer notre assistance à la conduite, nous nous intéressons tout d'abord aux différentes méthodes d'évaluation mises en œuvre sur les fauteuils roulants électriques intelligents. Celles-ci sont très diverses et fonction du type d'assistance proposé. Différents protocoles d'évaluation ont été envisagés afin de comparer une conduite avec ou sans assistance à la mobilité (D. R. Mestre, Pergandi, et Mallet 2007), d'évaluer une assistance à partir de plusieurs types d'organes de commande (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006), ou encore de comparer une conduite autonome et semi-autonome à une conduite manuelle (Parikh et al. 2005).

Chaque méthode se base sur la mesure et l'analyse de critères que l'on peut classer en plusieurs catégories (Craig et al. 1993). Tout d'abord, l'évaluation peut porter sur l'efficacité de l'aide proposée, en mesurant par exemple les performances et la réussite des objectifs visés. Les critères choisis sont notamment la mesure du temps de parcours (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006), du nombre de collisions (Zeng, Burdet, et Teo 2008), (Sharma et al. 2010), du bon accomplissement de la tâche (R. C. Simpson, Poirot, et Baxter 1999), de la distance parcourue (Iturrate et al. 2009), de la vitesse moyenne (Montesano et al. 2010), ou encore, des écarts de trajectoire avec une trajectoire optimale (Carlson et Demiris 2008). Ensuite, l'évaluation peut porter sur les interactions entre l'homme et le fauteuil, en mesurant par exemple, le nombre et la difficulté des interactions avec l'interface (Parikh et al. 2005), (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006), ou avec l'organe de commande (Zeng, Burdet, et Teo 2008), ou encore, en mesurant les erreurs lors de l'établissement d'une commande (Iturrate et al. 2009), (Montesano et al. 2010). Enfin, l'évaluation peut porter essentiellement sur l'utilisateur, en mesurant sa charge de travail, son état général, ses ressentis, ainsi que le niveau de confiance dans l'assistance proposée. Pour cela, il existe des méthodes basées sur l'utilisation de questionnaires ad hoc (R. C. Simpson, Poirot, et Baxter 1999), (Iturrate et al. 2009), ou normalisés comme les questionnaires TLX (Task Load Index) (Sharma et al. 2010), ou encore employant le paradigme de la double tâche dans lequel on demande aux sujets d'effectuer une tâche secondaire en parallèle de la conduite (Parikh et al. 2005).

Les méthodes d'analyse sont pour la plupart descriptives, elles comparent par exemple les moyennes obtenues pour chaque critère dans chaque condition, ou encore, elles analysent les ressentis des sujets grâce à des questionnaires et à différentes observations faites lors des essais. Plusieurs études statistiques ont également été réalisées lorsque le nombre de sujets et le type de mesures le permettent (R. C. Simpson, Poirot, et Baxter 1999), (Parikh et al. 2005).

On peut également distinguer les évaluations faites à partir d'un panel de personnes valides de celles effectuées avec des personnes handicapées, utilisatrices potentielles du système. Les contraintes ne sont pas les mêmes, et leurs mises en œuvre sont différentes. Dans le cas de personnes valides, la durée et la difficulté des tâches demandées peuvent être plus importantes. De plus, il est plus aisé de disposer d'un grand nombre de sujets similaires afin de réaliser des études larges. Elles permettent d'apporter un grand nombre d'informations sur l'efficacité et l'utilisabilité de l'aide proposée. Dans le cas d'un panel de personnes

handicapées, les évaluations présentées font généralement intervenir un nombre de sujets moins important et se présentent souvent comme des études de cas. Une difficulté supplémentaire est de constituer un groupe de sujets de caractéristiques cliniques similaires du fait de la grande diversité des pathologies concernées. Par exemple, dans (Pergandi, Mallet, et Mestre 2006), le panel est constitué de quatre sujets souffrant de tétraparésie, dans (R. C. Simpson, Poirot, et Baxter 1999) de trois sujets IMC (Infirmité motrice cérébrale) et d'un sujet SPP (Syndrome Post-Polio), dans (Zeng, Burdet, et Teo 2008) de trois sujets IMC et de deux sujets TCC (traumatisme crânio-cérébral), ou dans (Montesano et al. 2010) de quatre sujets IMC. Les résultats de ces expérimentations sont cependant essentiels puisqu'ils permettent d'évaluer l'adéquation entre l'assistance proposée et les utilisateurs finaux.

L'objectif de notre évaluation est de déterminer ce que peut apporter notre assistance à la mobilité, fournissant une conduite séquentielle dans laquelle l'utilisateur peut faire appel à des primitives autonomes, par rapport à une conduite manuelle nécessitant un contrôle continu de la part de l'utilisateur. Pour la réaliser, nous nous interrogeons sur le type de paramètres à mesurer et la nature du panel de sujets à considérer. Tout d'abord, nous estimons que les critères de performance de la machine et de l'interaction humain-machine ne suffisent pas, à eux seuls, pour conclure sur l'intérêt ou non du système et sur son acceptabilité. D'autres paramètres portant sur la charge cognitive de l'utilisateur sont également importants, et doivent être pris en considération. D'autre part, le choix du panel de sujets est également important. Pour effectuer une évaluation quantitative avec un grand nombre de sujets, nous choisissons un panel de sujets valides. Toutefois, une évaluation d'ordre qualitative est effectuée avec des personnes handicapées.

Ainsi, notre évaluation s'effectue en trois étapes. Tout d'abord, la première étape consiste à présenter et à faire essayer l'assistance à la conduite à des utilisateurs finaux et à des cliniciens afin d'obtenir leurs avis et ressentis, cette évaluation est d'ordre qualitative et destinée à vérifier l'adéquation entre le système proposé et les utilisateurs. Ensuite, la deuxième étape concerne l'évaluation quantitative des performances de l'association homme machine ainsi que de la charge de travail de l'utilisateur comparées à une conduite manuelle. Cela permet de mesurer principalement les prérequis physiques nécessaires aux deux modes de conduite. Enfin, la dernière étape porte sur la charge cognitive de l'utilisateur en évaluant des critères tels que la charge attentionnelle et la capacité décisionnelle nécessaires lors d'une tâche de conduite. Cela permet d'identifier les tâches les plus coûteuses dans les deux modes de conduite et d'évaluer les prérequis cognitifs nécessaires à l'utilisation de l'assistance à la conduite.

5.2. PRESENTATION DE L'ASSISTANCE A DES UTILISATEURS POTENTIELS

Dans un premier temps, nous avons procédé à des essais avec et en présence de personnes handicapés et d'ergothérapeutes (Fig. 5.1). Ils se sont déroulés dans les locaux de l'Association Française contre les Myopathies (A.F.M., Evry). Leur objectif est d'obtenir les

avis et ressentis des utilisateurs potentiels afin de vérifier l'adéquation de nos fonctionnalités avec les réels besoins des utilisateurs. Nous avons ainsi pu profiter de leurs conseils et commentaires pour ajuster et améliorer les fonctionnalités et l'interface. Nous avons tout d'abord présenté le fauteuil et décrit son fonctionnement à une dizaine d'utilisateurs de fauteuil roulant électrique, qui ont ensuite assisté à plusieurs démonstrations. Puis, à l'aide de l'assistance médicale, nous avons pu faire essayer le prototype à l'intérieur et à l'extérieur des locaux à une personne présentant de grandes difficultés à conduire manuellement son fauteuil. Enfin, une séance d'échange a permis de recueillir les avis et ressentis sur l'assistance proposée.

De manière générale, le type d'interface, la commande et les fonctionnalités proposées ont été appréciés. L'approche déictique a été perçue comme intuitive et facile d'utilisation. Plusieurs demandes ont été formulées quant à l'amélioration du système, comme rendre les fonctionnalités utilisables en marche arrière, fournir une vue de l'environnement plus large sur l'interface, et fournir une aide lors de manœuvres plus complexes prenant en charge la marche arrière. Cela pourrait aider les personnes ayant un champ de vision réduit ou la tête bloquée les empêchant de manœuvrer correctement le fauteuil. Nous avons donc choisi d'étendre la perception laser tout autour du fauteuil afin de permettre à nos fonctionnalités de réaliser les manœuvres en marche arrière nécessaires à certains franchissements de passage étroit et à certaines configurations de suivi de mur. Nous avons également choisi d'améliorer l'interface afin de simplifier au mieux la commande et ainsi faciliter l'utilisation des fonctionnalités.



Fig. 5.1 : Essai à l'AFM.

Suite à ces essais qualitatifs, les modifications apportées à l'assistance à la conduite portant sur la perception avec la mise en place des trois capteurs laser, et sur l'interface en mettant en œuvre sa deuxième version, ont amélioré son efficacité. Nous pouvons alors envisager une évaluation plus approfondie d'ordre quantitative pour déterminer objectivement les apports de notre assistance.

5.3. EVALUATION DES PERFORMANCES DE L'ASSOCIATION HUMAIN MACHINE

5.3.1. INTRODUCTION

La première série d'expérimentations est destinée à identifier les prérequis physiques nécessaires à la conduite avec et sans assistance. Pour cela, nous mesurons plusieurs paramètres permettant d'évaluer la performance de l'association humain machine tels que le temps de parcours, la fréquence d'utilisation des modes, et l'indice d'inconfort lors de la conduite. Ensuite, nous cherchons à évaluer la charge de travail globale incluant les prérequis physiques et cognitifs, ainsi qu'à obtenir les ressentis des sujets lors des essais. Pour cela, nous utilisons la méthode subjective du TLX (Index 1986).

5.3.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Lors de cette première série d'essais, le panel d'expérimentateurs est constitué de neuf sujets valides, 6 hommes et 3 femmes de 22 ans à 50 ans. Chacun d'entre eux suit tout d'abord une phase d'apprentissage dans laquelle il se familiarise avec les deux types de conduite, avec et sans assistance, puis découvre le parcours qui lui est en outre décrit oralement (Fig. 5.2). Celui-ci est choisi assez long pour que chaque sujet ait à fournir des efforts. Il met en œuvre des situations de conduite diverses comme un franchissement de porte dans une pièce étroite pour lequel une manœuvre est requise ou un suivi de mur dans un long couloir. Chaque sujet reçoit pour consigne de respecter l'utilisation des fonctionnalités lui étant décrite lors de la phase d'apprentissage, d'éviter au maximum les collisions, et de conduire du mieux qu'il peut.

Ensuite, il peut commencer la phase d'évaluation. Celle-ci consiste à effectuer dix fois un parcours dans les deux modes de conduite. Pour éviter un effet d'ordre, la personne effectue deux parcours dans chaque mode en alternance. Plusieurs paramètres sont mesurés objectivement lors de la conduite, les mesures de temps, la fréquence des utilisations des modalités de conduite et un indice d'inconfort.

Enfin, chaque sujet doit répondre à un questionnaire de type TLX pour chaque type de conduite à la fin des essais afin d'obtenir une auto-évaluation subjective de la charge de travail.

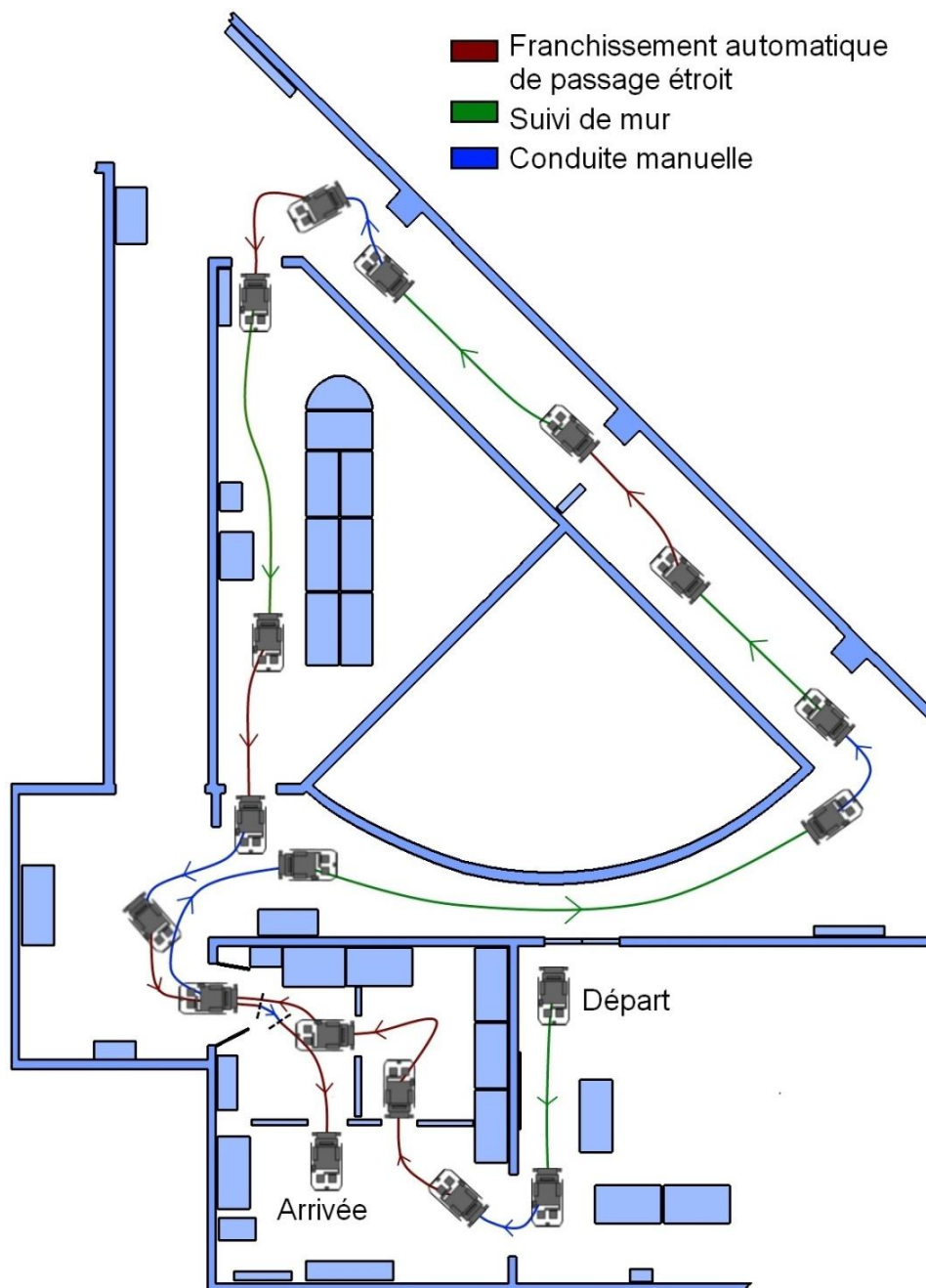


Fig. 5.2 : Parcours à effectuer avec les fonctionnalités automatiques lors de la première série d'essais.

5.3.3. CRITERES DE PERFORMANCE

5.3.3.1. ANALYSE TEMPORELLE

Tout d'abord, nous mesurons plusieurs paramètres temporels, le temps de parcours global, le temps passé dans chaque fonctionnalité, et le temps passé à l'arrêt. Ils permettent notamment d'estimer l'efficacité temporelle, le temps passé sur l'interface pour la conduite avec assistance, qui correspond également au temps où le sujet utilise l'organe de commande (le joystick en mode pointeur), et le temps passé à l'arrêt en conduite manuelle, qui correspond à la durée d'hésitation (cf. &5.3.3.2).

5.3.3.2. FREQUENCE D'UTILISATION DES MODALITES

Nous enregistrons également le nombre d'arrêts et le nombre de fonctionnalités utilisées, ce qui permet de mesurer la difficulté de l'utilisateur à respecter les consignes énoncées en début d'essai. Le nombre d'arrêts en conduite manuelle correspond en effet au nombre de fois où l'utilisateur hésite à l'approche d'un obstacle lui semblant dangereux (le sujet ayant pour consigne de faire le parcours en une fois, chaque arrêt indique une hésitation face à un obstacle). De même, en conduite assistée, si le nombre de fonctionnalités utilisées dépasse celui demandé en consigne, c'est que l'utilisateur éprouve des difficultés à établir correctement une commande sur l'interface.

5.3.3.3. INDICE D'INCONFORT

Enfin, nous calculons un indice d'inconfort. Pour cela, nous postulons que le confort de l'utilisateur sur le fauteuil dépend essentiellement des accélérations et des décélérations subies lors des déplacements. Les variations de tension sur le joystick du fauteuil traduisent directement une variation de vitesse du fauteuil dont on déduit les accélérations ou décélérations. L'indice d'inconfort Ic est déterminé à partir de l'équation suivante (5.1), où Taa est la tension verticale du joystick, traduisant la vitesse d'avance, Tgd la tension horizontale du joystick traduisant la vitesse angulaire, K le nombre d'observations sur une mesure et τ le temps entre deux observations fixé empiriquement à 300ms. Ce dernier ne doit être ni trop faible sous peine que l'indice Ic ne reflète pas les variations de grandes amplitudes, ni trop grand, ce qui masquerait les à-coups rapides sur le joystick.

$$Ic = \frac{1}{K\tau} \times \sum_{i=1}^{i=K\tau} \|Taa(i) - Taa(i - \tau)\| + \|Tgd(i) - Tgd(i - \tau)\| \quad (5.1)$$

5.3.4. CHARGE DE TRAVAIL

Afin de mesurer la charge de travail, nous utilisons un questionnaire de type TLX permettant son auto-évaluation par les sujets (Index 1986). Elle est définie par six critères, l'exigence mentale, correspondant à l'activité mentale et perceptive demandée par la tâche, l'exigence physique, traduisant l'activité physique associée à la tâche, l'exigence temporelle, correspondant à la contrainte de temps imposée à l'utilisateur pour réagir, l'effort, se traduisant par l'amplitude de la charge mentale et physique requise pour effectuer la tâche, la performance, correspondant à l'auto estimation de la réussite et de l'accomplissement de la tâche, et la frustration, définissant le niveau de stress et de contentement ressentis lors de la tâche.

Le questionnaire se divise en deux grandes parties. Dans un premier temps l'utilisateur doit définir son profil en attribuant un poids à chaque critère (Fig. 5.4), ensuite, il répond à six questions définissant les six critères de la charge de travail (Fig. 5.3).

Méthode TLX

Fichier Outils ?

Etape 1 **Etape 2** Etape 3 Résultats

1. Quel niveau de concentration (mentale et perceptive) avez-vous eu besoin lors de la conduite ?

Peu de concentration m'a été requise Beaucoup de concentration m'a été nécessaire

2. La conduite vous a-t-elle paru facile ou laborieuse physiquement ?

J'étais très peu stimulé(e) physiquement Il m'a été nécessaire d'effectuer beaucoup de mouvements

3. Avez-vous eu suffisamment de temps pour réagir lors de la conduite ?

J'avais à peine le temps de réagir J'avais largement le temps de réagir

4. Pensez-vous avoir conduit correctement le fauteuil lors du parcours ?

J'ai mal conduit le fauteuil J'ai très bien conduit le fauteuil

5. Quel effort avez vous dû fournir pour effectuer cette performance ?

Je n'ai pas eu besoin de forcer J'ai dû donner tout ce que j'avais

6. Lors de la conduite, comment évalueriez-vous votre état de stress ?

J'étais tout à fait à l'aise Je ne me sentais pas rassuré(e)

Précédant Suivant

Fig. 5.3 : Questionnaire TLX : évaluation des critères caractérisant la charge de travail.

Méthode TLX

Fichier Outils ?

Etape 1 Etape 2 **Etape 3** Résultats

1. Préférez vous être stimulé(e) physiquement (PD) ou mentalement (MD) ?

☐ Exigence Mentale (MD) ☐ Exigence Physique (PD)

2. Pour vous, est ce qu'avoir peu de temps pour réagir (TD) est plus gênant que d'être beaucoup stimulé(e) physiquement (PD) lors de la conduite ?

☐ Exigence Temporelle (TD) ☐ Exigence Physique (PD)

3. Pour vous, est-ce plus important d'avoir beaucoup de temps pour réagir (TD) ou de ne pas avoir de stress (FR) lors de la conduite ?

☐ Exigence Temporelle (TD) ☐ Stress (FR)

4. Vous est-il plus difficile de conduire le fauteuil, en ayant beaucoup d'activité mentale et perceptive à fournir (MD), ou en ayant que très peu de temps pour réagir (TD) ?

☐ Exigence Temporelle (TD) ☐ Exigence Mentale (MD)

5. Préférez-vous accomplir une bonne performance de conduite (OP) quitte à devoir effectuer beaucoup d'actions physiques (PD) lors de la conduite ?

☐ Performance (OP) ☐ Exigence Physique (PD)

6. Pour vous, est ce plus pénible de conduire en ayant peu de temps pour réagir (TD), ou d'avoir beaucoup d'effort à fournir (EF) ?

☐ Exigence Temporelle (TD) ☐ Effort (EF)

7. Préférez-vous accomplir une bonne performance de conduite (OP) quitte à devoir fournir une activité mentale importante (MD) lors de la conduite ?

☐ Performance (OP) ☐ Exigence Mentale (MD)

8. Cela vous gêne t'il plus, d'être beaucoup stimulé(e) physiquement (PD), ou d'avoir du stress (FR) lors de la conduite ?

☐ Stress (FR) ☐ Exigence Physique (PD)

9. Préférez-vous accomplir une bonne performance de conduite (OP) quitte à ressentir du stress (FR) lors de la conduite ?

☐ Performance (OP) ☐ Stress (FR)

10. Cela vous gêne t'il plus, d'être beaucoup stimulé(e) mentalement (MD), ou d'avoir du stress (FR) lors de la conduite ?

☐ Stress (FR) ☐ Exigence Mentale (MD)

11. Pour vous, est ce plus pénible de conduire, en devant fournir beaucoup d'effort (EF), ou étant beaucoup stimulé(e) physiquement (PD) ?

☐ Effort (EF) ☐ Exigence Physique (PD)

12. Préférez-vous accomplir une bonne performance de conduite (OP) quitte à devoir fournir plus d'effort (EF) lors de la conduite ?

☐ Performance (OP) ☐ Effort (EF)

13. Pour vous, est ce plus pénible de conduire, en devant fournir beaucoup d'effort (EF), ou étant beaucoup stimulé(e) mentalement (MD) ?

☐ Effort (EF) ☐ Exigence Mentale (MD)

14. Préférez-vous accomplir une bonne performance de conduite (OP) quitte à conduire en ayant un minimum de temps pour réagir (TD) ?

☐ Exigence Temporelle (TD) ☐ Performance (OP)

15. Pour vous, est ce plus pénible de conduire, en fournissant beaucoup d'effort (EF), ou en ressentant du stress (FR) ?

☐ Effort (EF) ☐ Stress (FR)

Précédant Suivant

Fig. 5.4 : Questionnaire TLX : établissement du profil du sujet.

5.3.5. RESULTATS

5.3.5.1. DUREE ET FREQUENCE DES MODES DE COMMANDE

Les mesures de durée et de fréquence des commandes utilisées sont des critères permettant d'évaluer la performance de l'association humain-machine. Elles nous renseignent sur le déroulement du parcours, sur la manière dont les sujets ont utilisé les fonctionnalités et permettent d'observer les difficultés rencontrées. Les résultats sont présentés sous formes de tableaux récapitulatifs. Le Tableau 5.1 présente les moyennes des durées dans chaque type de conduite pour l'ensemble des parcours effectués, ainsi que la moyenne sur tous les sujets et la répartition temporelle des fonctionnalités dans le parcours. Le Tableau 5.2 présente la fréquence d'utilisation des différentes fonctionnalités utilisées. Tous les sujets ont utilisé sans difficulté le mode automatique. Le temps passé dans chaque fonctionnalité est très proche pour chaque sujet ce qui était prévisible. En moyenne sur ce parcours, un sujet est à 22.3% à l'arrêt, 16% en conduite manuelle, 26.2% en franchissement automatique de passage étroit et enfin 35.5% en suivi de mur automatique. Pour le mode manuel, les sujets sont en moyenne 5.7% du temps à l'arrêt et 94.3% du temps en conduite manuelle. D'autre part, le temps de parcours global en mode automatique est deux fois plus long qu'en mode manuel (en moyenne, 104.4s en manuel et 237.8s en automatique). Ceci s'explique par le temps nécessaire à chaque changement de fonctionnalité (arrêt et sélection sur l'interface). La plupart des sujets n'ont pas eu de difficulté à conduire en mode manuel. On relève toutefois, pour quelques-uns d'entre eux, une conduite hésitante s'exprimant par des arrêts fréquents et courts devant les obstacles ou lors de manœuvres difficiles (conduite par à-coups).

	Parcours en Manuel			Parcours en Automatique				
Sujet	Temps global	Temps d'arrêt	Temps en contrôle manuel	Temps global	Temps d'arrêt	Temps en contrôle manuel	Temps en franchissement de passage étroit	Temps en suivi de mur
S01	112,2	9,0	103,2	220,9	44,1	34,4	59,4	83,0
S02	91,1	2,7	88,4	208,0	32,2	29,3	64,4	82,0
S03	105,3	6,4	98,9	242,1	58,3	35,2	64,2	84,4
S04	103,7	6,0	97,7	250,0	63,5	41,2	59,6	85,6
S05	123,5	10,2	113,3	266,0	71,0	46,2	60,9	87,9
S06	123,6	4,9	118,7	230,4	53,5	44,1	57,2	75,6
S07	96,7	6,7	90,0	258,0	62,9	36,7	71,3	87,1
S08	93,7	7,0	87,0	241,5	45,6	39,1	62,0	94,7
S09	89,4	1,0	88,4	223,7	47,0	35,8	61,1	79,8
Moy.	104,4	6,0	98,4	237,8	53,1	38,0	62,2	84,5
%	100,0%	5,7%	94,3%	100,0%	22,3%	16,0%	26,2%	35,5%

Tableau 5.1 : Analyse temporelle ; les temps sont en secondes.

Sujet	Parcours en Manuel	Parcours en Automatique		
	Nb. d'arrêt	Nb. d'arrêt	Nb. de franchissement de passage étroit	Nb. de suivi de mur
S01	16,0	17,2	8,4	5,4
S02	1,8	8,0	8,0	5,0
S03	3,8	13,8	9,4	6,8
S04	4,8	17,0	8,0	6,4
S05	15,0	27,0	9,8	6,0
S06	7,6	14,6	8,6	6,2
S07	6,4	29,0	8,8	6,2
S08	1,2	14,4	8,0	6,0
S09	1,0	15,3	8,0	6,3
Moy.	6,4	17,4	8,6	6,0

Tableau 5.2 : Analyse des actions effectuées.

Par ailleurs, il est important de comparer le temps pendant lequel l'utilisateur actionne l'organe de commande. En manuel, l'utilisateur emploie de manière continue le joystick et garde le contrôle sur celui-ci pendant la totalité du temps de parcours, soit en moyenne 104,4 secondes avec un fauteuil en mouvement, cela implique des manœuvres complexes à effectuer, sans interruption, ce qui représente beaucoup d'effort. En conduite assistée, le sujet utilise le joystick lorsqu'il conduit manuellement entre les fonctionnalités lors de déplacements d'ajustement courts et sans manœuvre, ou lorsqu'il effectue une commande sur l'interface quand le fauteuil est à l'arrêt (soit 22,3% du temps de parcours). L'emploi du joystick occupe donc en moyenne 91,1 secondes avec de nombreuses pauses et le fauteuil à l'arrêt la plupart du temps (l'utilisateur a tout son temps pour effectuer la commande sans risque de collision).

5.3.5.2. CRITERE D'INCONFORT

L'indice d'inconfort est estimé par le nombre d'à-coups subis lors des essais. Plus le sujet subit d'accélération, plus cet indice est élevé. Le Tableau 5.3 présente les moyennes des indices d'inconfort pour chaque sujet en manuel et en automatique. En comparant les moyennes des indices d'inconfort des deux modes de conduite, on constate un niveau moyen identique. Toutefois, on remarque des variations différentes pour chaque mode. Pour la conduite manuelle, l'indice d'inconfort est très variable selon les sujets et dépend beaucoup de leur maîtrise de la conduite du fauteuil. Ainsi il peut être très faible (0.488) pour une conduite quasi irréprochable (sans à-coup, trajectoire fluide) et très grand (1.058) pour une conduite hésitante (beaucoup d'arrêts, mouvements brusques). Pour la commande automatique, l'indice d'inconfort est assez stable (de 0.676 à 0.806) correspondant à une conduite normale (les seuls à-coups présent étant dus aux déplacements d'ajustement pour se réorienter lorsqu'une cible est hors du champ de vision de la caméra). On peut noter également, que le parcours en mode automatique nécessite beaucoup d'arrêts pour passer

d'une fonctionnalité à une autre ou du mode manuel vers une fonctionnalité, ce qui ajoute un grand nombre d'accélération ou de décélérations. Celles-ci sont progressives pour éviter un inconfort, ce qui augmente le temps de parcours.

Sujet	Indice d'inconfort global en mode manuel	Indice d'inconfort global en mode automatique
S01	1,028	0,712
S02	0,716	0,676
S03	0,626	0,700
S04	0,932	0,782
S05	1,058	0,806
S06	1,012	0,760
S07	0,604	0,716
S08	0,488	0,802
S09	0,566	0,690
Moy.	0,781	0,738

Tableau 5.3 : Analyse de l'indice d'inconfort.

Dans l'ensemble, on constate une amélioration du confort en mode automatique sauf pour des sujets conduisant le fauteuil en manuel de façon « experte ». Par ailleurs, on peut comparer le confort estimé quantitativement lors des essais au confort ressenti par le sujet, déduit des remarques et des observations faites ensuite. Le confort est en général apprécié sur le fauteuil en mode automatique et estimé équivalent à celui de la conduite manuelle. La grande différence entre les deux modes est que le conducteur devient « passager » du fauteuil quand les fonctionnalités autonomes sont lancées. Les accélérations du fauteuil sont donc moins anticipées et même si elles sont moins importantes qu'en mode manuel, elles sont plus difficiles à supporter.

5.3.5.3. CRITERE DE CHARGE DE TRAVAIL

Le Tableau 5.4 présente les moyennes des charges de travail calculées via un questionnaire TLX pour les deux modes de conduite. Les charges de travail des deux types de conduite sont très proches en moyenne. On observe cependant un changement de la nature de cette charge que nous avons tenté d'identifier qualitativement en fonction de l'analyse TLX et des avis des sujets recueillis en fin d'essai.

A partir de l'analyse des composantes de la méthode TLX, on peut remarquer, en mode automatique, une diminution de l'activité physique, de l'effort et des contraintes temporelles ressentis par l'ensemble des sujets. Pour l'activité mentale, on remarque qu'une légère augmentation en mode automatique est ressentie par une majorité des sujets. Par ailleurs, la performance est en général ressentie comme meilleure en mode manuel qu'en mode automatique. Ceci, en s'appuyant sur l'avis des sujets, s'explique par deux facteurs. Le premier est l'autosatisfaction d'accomplir soit même une performance à l'aide du joystick,

même dans le cas où celle-ci se révèle moins bonne qu'en utilisant l'assistance. Le deuxième facteur est lié à la maîtrise du fauteuil. Les sujets ayant une grande expérience de la conduite avec joystick peuvent effectuer manuellement des performances meilleures que celles obtenues avec l'assistance. Enfin, dans l'ensemble, on constate une légère diminution du stress ressenti en mode automatique pour une majorité des sujets.

Sujet	Charge de travail en mode manuel	Charge de travail en mode automatique
S01	0,171	0,172
S02	0,081	0,065
S03	0,165	0,158
S04	0,491	0,462
S05	0,469	0,548
S06	0,301	0,332
S07	0,091	0,066
S08	0,108	0,214
S09	0,411	0,193
Moy.	0,254	0,246

Tableau 5.4 : Analyse de la charge de travail.

5.3.6. CONCLUSION

Cette première série d'essais a permis de comparer les performances de la conduite avec assistance par rapport à la conduite manuelle. Tout d'abord, nous observons un temps de parcours considérablement plus long en mode automatique qu'en mode manuel, cela s'explique par les nombreux changements de fonctionnalités qui amènent un grand nombre d'arrêts, et pour garantir un même niveau de confort dans les deux modes, les accélérations et décélérations sont progressives, ce qui allonge le temps de parcours. De plus, l'établissement d'une commande sur l'interface s'effectue à l'arrêt. Ensuite, la fréquence de l'utilisation du joystick en conduite assistée est beaucoup moins intense qu'en conduite manuelle. En automatique, l'utilisation se fait soit pour établir une commande, soit pour effectuer un déplacement d'ajustement. Dans un cas le fauteuil est à l'arrêt, et l'indication à l'écran ne nécessite pas une dextérité particulière, et dans l'autre cas, les déplacements sont souvent courts et sans manœuvres. En manuel, en revanche, l'utilisation du joystick est continue et demande à l'utilisateur une dextérité plus importante. Ces observations sont également appuyées par le ressenti des sujets dans le questionnaire TLX, où l'exigence physique et l'effort à fournir sont perçus comme étant beaucoup plus faibles en mode automatique.

Cependant, en analysant la charge de travail, on remarque un niveau moyen identique pour les deux modes, avec notamment, une activité mentale ressentie plus importante en conduite assistée. Il nous semble donc important d'effectuer une évaluation plus approfondie de la

charge cognitive de l'utilisateur en quantifiant de manière objective les processus cognitifs mis en œuvre dans une tâche de conduite en fauteuil roulant.

5.4. EVALUATION DE LA CHARGE COGNITIVE DE L'UTILISATEUR

5.4.1. INTRODUCTION

Afin d'évaluer la charge cognitive de l'utilisateur lors de la conduite, nous nous intéressons à deux processus cognitifs employés dans ce type de tâche, l'attention soutenue, et la capacité de prise de décision. Pour les mesurer objectivement, nous utilisons le paradigme de la double tâche (Pashler 1994). Le principe est d'effectuer une tâche secondaire perturbatrice en parallèle de la tâche principale que l'on souhaite évaluer. Elle est également réalisée seule servant ainsi de tâche de contrôle. La dégradation des performances obtenues entre le contrôle et l'accomplissement en parallèle de la tâche principale est une indication de la manière dont les processus cognitifs employés dans la tâche secondaire interviennent dans la tâche principale.

5.4.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Cette seconde série expérimentale est divisée en deux sessions. La première (« session 1 ») est destinée à mesurer la charge attentionnelle des sujets et la seconde (« session 2 ») à évaluer leurs capacités décisionnelles mises en jeu dans les deux modes de conduite. Le protocole expérimental est identique pour les deux sessions à la différence que chacune d'elles utilise une tâche secondaire différente propre au processus cognitif mesuré. Nous définissons tout d'abord le protocole commun aux deux sessions, puis nous détaillons les tâches secondaires employées par chacune d'elles.

Pour chaque session, un groupe de douze sujets valides, composé de 8 hommes et 4 femmes âgés de 22 à 50 ans, suit le protocole suivant (le groupe de sujets est différent pour chaque session mais présente la même répartition en terme d'âge et de sexe). Tout d'abord, chaque sujet effectue une phase d'apprentissage des deux modes de conduite comme dans la première série d'essais, à la différence qu'il se familiarise également avec la tâche secondaire. Ensuite, les sujets sont soumis à trois tâches, une tâche de contrôle, « TControl », consistant à réaliser la tâche secondaire seule, une tâche de conduite avec assistance, en parallèle de la tâche secondaire « TAuto », et enfin, une tâche de conduite non assistée, en parallèle de la tâche secondaire « TManu ». Les sujets sont divisés en deux groupes et effectuent chaque tâche dix fois dans un ordre différent. Chaque sujet effectue la première moitié des tâches de contrôle au début et la deuxième moitié à la fin de l'expérimentation afin de pouvoir tester les effets de fatigue. Entre ces deux séries de tâches de contrôle, il effectue la première moitié des parcours avec la première tâche de conduite, suivie de l'ensemble des parcours avec la seconde tâche de conduite, et enfin, il effectue la seconde moitié des parcours avec la première tâche de

conduite. Le groupe 1 commence avec la conduite avec assistance et le groupe 2 commence avec la conduite manuelle afin de limiter les effets d'ordre. Le Tableau 5.5 présente cet ordre.

Groupe 1		Groupe 2	
Apprentissage	(10 à 20 min)	Apprentissage	(10 à 20 min)
TControl		TControl	
TAuto	(20 à 30 min)	TManu	(20 à 30 min)
TManu		TAuto	
Pause	(10 min)	Pause	(10 min)
TManu		TAuto	
TAuto	(20 à 30 min)	TManu	(20 à 30 min)
TControl		TControl	

Tableau 5.5 : Protocole expérimental pour chaque groupe.

Le parcours réalisé lors de cette deuxième série d'essais est plus court que celui de la première. La tâche secondaire demande, en effet, beaucoup d'effort aux sujets, un parcours trop long induirait donc une fatigue susceptible de biaiser les résultats. Le parcours est présenté Fig. 5.5, il est établi de manière à équilibrer l'utilisation des fonctionnalités.

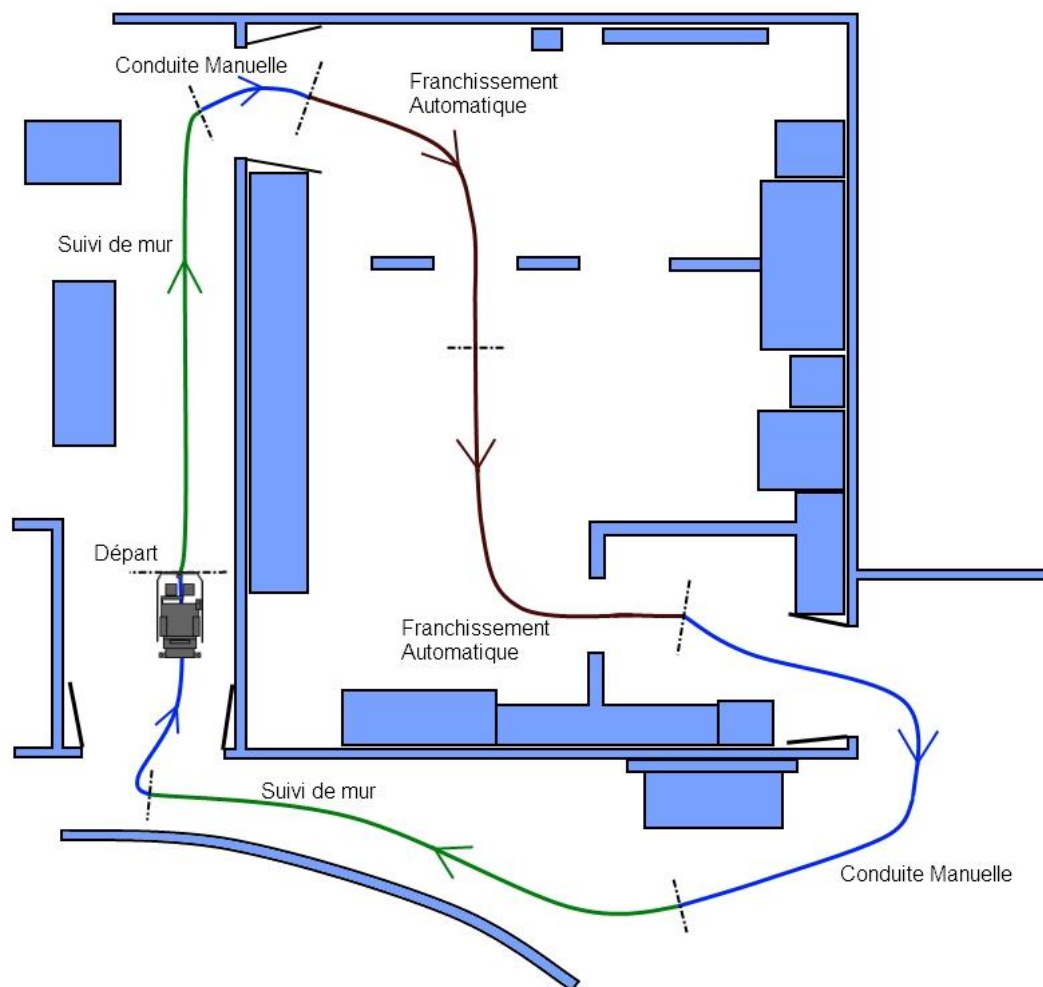


Fig. 5.5 Parcours à effectuer avec les fonctionnalités automatiques.

5.4.3. TACHES SECONDAIRES

Pour la première session, on souhaite évaluer la charge attentionnelle tout au long du parcours. On choisit pour cela une tâche de temps de réaction simple : le sujet doit répondre à des stimuli auditifs délivrés dans un casque (des « bips ») en appuyant le plus rapidement possible sur un bouton poussoir avec sa main gauche (sa main droite est réservée aux tâches de conduite). Le type de stimulus est choisi de manière à ne pas perturber les capacités perceptives nécessaires à la conduite comme la capacité visuelle par exemple, et permet d'interférer uniquement au niveau cognitif. La tâche en elle-même requiert différents mécanismes attentionnels tels que l'alerte tonique et l'attention soutenue.

Pour la deuxième session, nous souhaitons évaluer la capacité décisionnelle des sujets. Pour cela, nous utilisons une tâche de Go/NoGo : le sujet doit répondre aux stimuli cibles (sons aigus : « bips ») en appuyant sur le bouton poussoir, et ne pas répondre aux stimuli distracteurs (sons graves : « bops »). Une telle tâche mobilise, outre les mêmes mécanismes attentionnels que la tâche de temps de réaction simple, des capacités d'inhibition et de prise de décision. Lors des essais, nous mesurons plusieurs paramètres liés à la tâche secondaire, comme le temps de réponse (en ms) du sujet aux stimuli cibles, et les différentes erreurs (l'appui à un stimulus distracteur, l'appui alors qu'il n'y a pas de stimulus, ou encore l'oubli d'une réponse à un stimulus cible). Nous pouvons ensuite comparer ces paramètres mesurés dans la tâche de contrôle (tâche secondaire réalisée seule) avec ceux mesurés lors de la conduite avec et sans assistance et ainsi analyser la manière dont les sujets ont été perturbés.

5.4.4. RESULTATS

5.4.4.1. CHARGE ATTENTIONNELLE

L'analyse des temps de réaction et du nombre d'erreurs permet d'évaluer la charge attentionnelle du sujet tout au long du parcours et en particulier les mécanismes d'attention soutenue. Chaque réponse d'un sujet est placée sur une chronologie permettant de visualiser le temps de réponse associé avec l'action qu'effectuait le sujet avec le fauteuil. Les Fig. 5.6 et Fig. 5.7 présentent deux exemples de chronologies, respectivement avec la tâche de conduite assistée et avec la tâche de conduite manuelle. Le Tableau 5.6 définit les actions des chronologies.

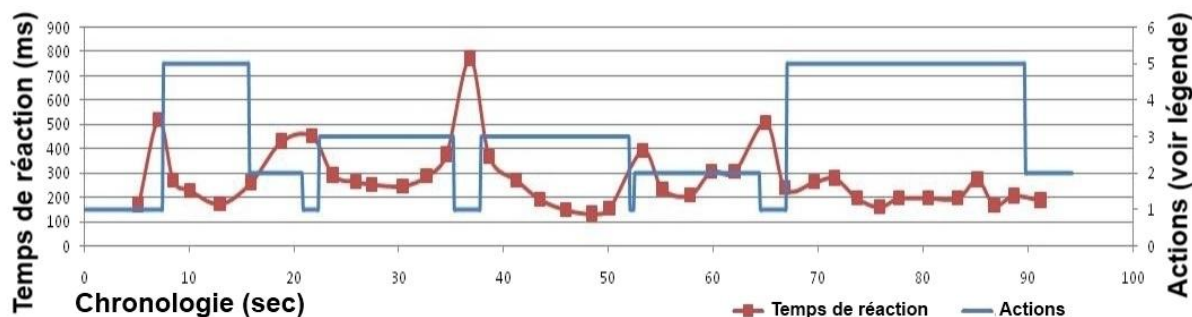


Fig. 5.6 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite avec assistance (session 1).

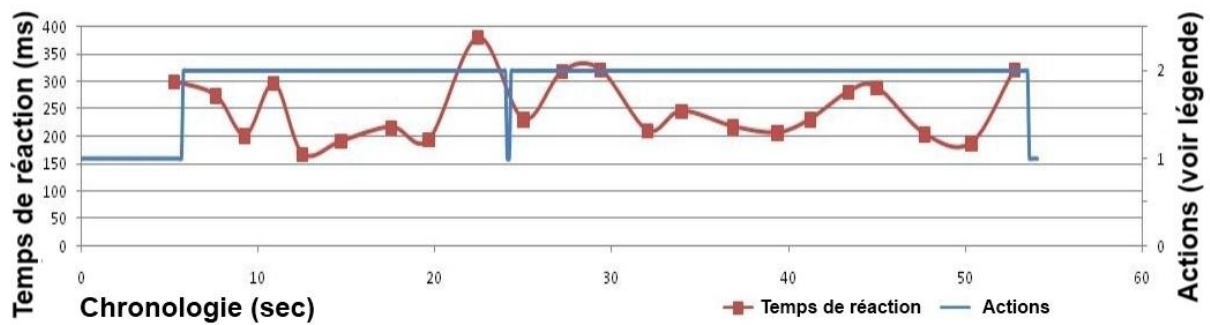


Fig. 5.7 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite manuelle (session 1).

Identifiant	Description des actions
0	Mode Debug
1	Arrêt
2	Conduite manuelle
3	Franchissement de passage étroit
4	-Réservé-
5	Suivi de mur

Tableau 5.6 : Légende des actions de la chronologie

L'analyse des chronologies permet d'identifier les difficultés que rencontrent les sujets. On remarque notamment que la répartition de la charge attentionnelle est très différente dans les deux modes. En conduite avec assistance, les sujets éprouvent des difficultés lors de l'établissement des commandes. Elles se traduisent par des augmentations des temps de réaction sous forme de pics courts et intenses dans les phases d'arrêts avant les utilisations de fonctionnalités automatiques. Pour la conduite manuelle, les difficultés surviennent plutôt lors des manœuvres, comme un franchissement de porte ou un resserrement du passage. Les pics observés sont plus longs et moins intenses.

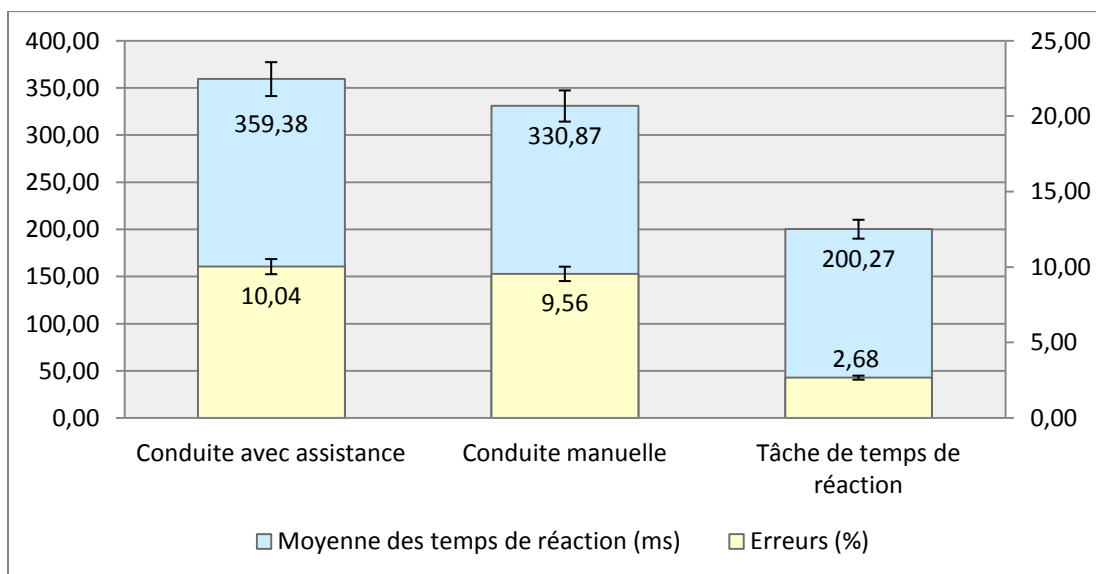


Fig. 5.8 : Moyennes des temps de réaction et pourcentages d'erreurs de l'ensemble des sujets pour chaque mode de conduite (session 1).

D'une manière globale, lorsque l'on observe les moyennes de temps de réaction et les erreurs effectuées par l'ensemble des sujets (Fig. 5.8), on remarque des temps de réaction moyens bien supérieurs à la tâche de contrôle pour les deux modes de conduite, ce qui montre que les capacités attentionnelles sont très sollicitées chez les sujets lors des tâches de conduite. Une analyse statistique est effectuée pour estimer si les écarts entre les moyennes pour les temps de réaction et les erreurs sont significatifs ou non.

En premier lieu nous procédons à plusieurs vérifications afin de pouvoir fusionner l'ensemble de nos données et utiliser les bons outils statistiques (Hollander et Wolfe 1999). Tout d'abord, nous vérifions les effets d'ordre avec un test de Mann-Whitney entre les moyennes des temps de réaction de chaque type de conduite pour les deux groupes de sujets (comparaison du groupe 1 avec le groupe 2 lors de la conduite avec assistance $p = 0.70$, et sans assistance $p = 0.59$), et les effets de fatigue avec un test de Wilcoxon entre les moyennes des temps de réaction des conditions de contrôle (tâche seule) faites en début et en fin d'essais ($p = 0.20$). Ces deux paramètres n'ayant pas une influence significative, nous pouvons réunir les données des deux groupes. Ensuite, nous avons testé la normalité de nos données avec le test de Shapiro-Wilk. Celles-ci ne suivant pas une distribution normale, nous utilisons le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis avec comparaison multiple. Nous comparons à l'aide de ce test les moyennes des temps de réaction et le nombre d'erreurs par parcours de l'ensemble des sujets pour chaque type de conduite. La Tableau 5.7 présente les intervalles de confiance des différences entre ces conditions pour un seuil de risque $\alpha = 0.05$. Les différences intergroupes sont significatives si l'intervalle ne contient pas la valeur nulle. On remarque que la charge attentionnelle globale des sujets pour les deux modes de conduite n'est pas significativement différente.

	Intervalle de confiance pour les moyennes de temps de réaction	Différence significative à $\alpha = 0.05$	Intervalle de confiance pour le nombre d'erreurs	Différence significative à $\alpha = 0.05$
TControl - TAuto	-177,5 à -114,5	oui	-89,8 à -29,7	oui
TControl - TManu	-155,3 à -92,3	oui	-111,4 à -51,4	oui
TManu-TAuto	-9,4 à 53,6	non	-51,7 à 8,4	non

Tableau 5.7 : Test de Kruskal-Wallis, différence des moyennes de temps de réactions et des erreurs entre les modes de conduite (session 1).

D'autre part, on s'intéresse de manière plus précise à la charge attentionnelle lors de la conduite avec assistance afin d'identifier les actions nécessitant le plus d'attention. Pour cela, nous effectuons également un test de Kruskal-Wallis entre les moyennes de temps de réaction de chaque type d'action, à l'arrêt (Av_Rt_Stop), en suivi de mur (Av_Rt_Wf), en franchissement de passage étroit (Av_Rt_Ptnp), et en conduite manuelle (Av_Rt_Manu). La Fig. 5.9 illustre les moyennes des temps de réaction globales pour chaque condition et le Tableau 5.8 présente les intervalles de confiance intergroupes.

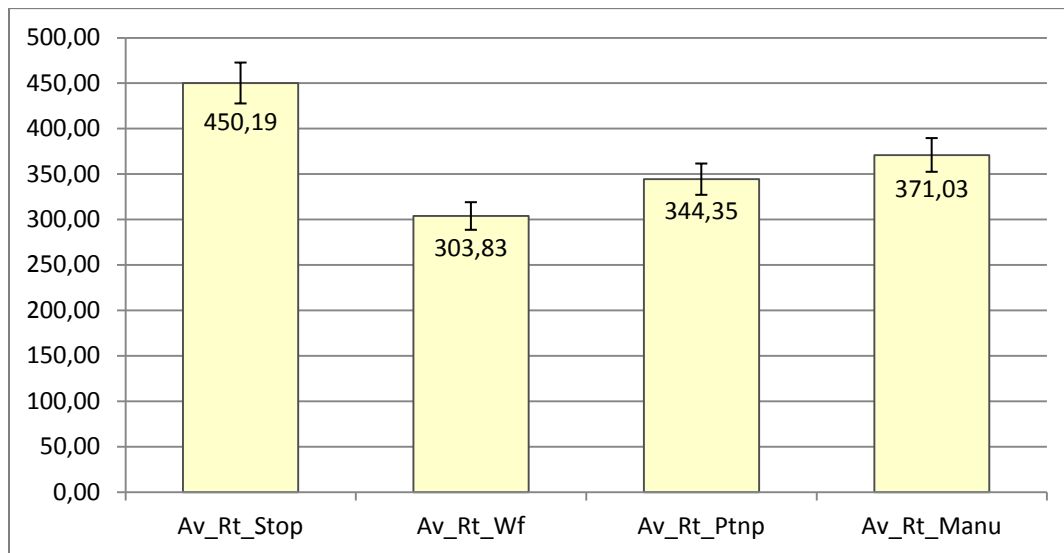


Fig. 5.9 : Moyennes des temps de réaction (en ms) de l'ensemble des sujets pour chaque condition en conduite avec assistance (session 1).

	Intervalle de confiance pour les moyennes de temps de réaction (en ms)	Différence significative à $\alpha = 0.05$
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Wf	827,6 à 1205,7	oui
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Ptnp	508,5 à 896,3	oui
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Manu	301,9 à 714,9	oui
Av_Rt_Wf – Av_Rt_Ptnp	-465,7 à -162,9	oui
Av_Rt_Wf – Av_Rt_Manu	-675,6 à -341,0	oui
Av_Rt_Ptnp – Av_Rt_Manu	-366,7 à -21,2	oui

Tableau 5.8 : Test de Kruskal-Wallis, différences entre les conditions de conduite avec assistance (session 1).

On remarque une charge attentionnelle élevée pour les phases à l'arrêt correspondant à l'établissement d'une commande, une charge moyenne pour les actions réalisées avec une commande manuelle et une charge plus basse pour les phases avec assistance.

5.4.4.2. CAPACITE DECISIONNELLE

La tâche de Go/NoGo sollicite les capacités d'inhibition et de prise de décision des sujets, ainsi que l'attention soutenue. En comparant les perturbations obtenues pour cette tâche avec celles de la tâche secondaire précédente (session 1, tâche de réaction simple), nous pouvons évaluer, outre les capacités attentionnelles, la place de la capacité décisionnelle des sujets dans la conduite et décrire les difficultés rencontrées. Les Fig. 5.10 et Fig. 5.11 présentent deux exemples de chronologie avec la tâche de Go/NoGo, en conduite respectivement avec et sans assistance. Les actions décrites sur les chronologies sont les mêmes que précédemment (Tableau 5.6).

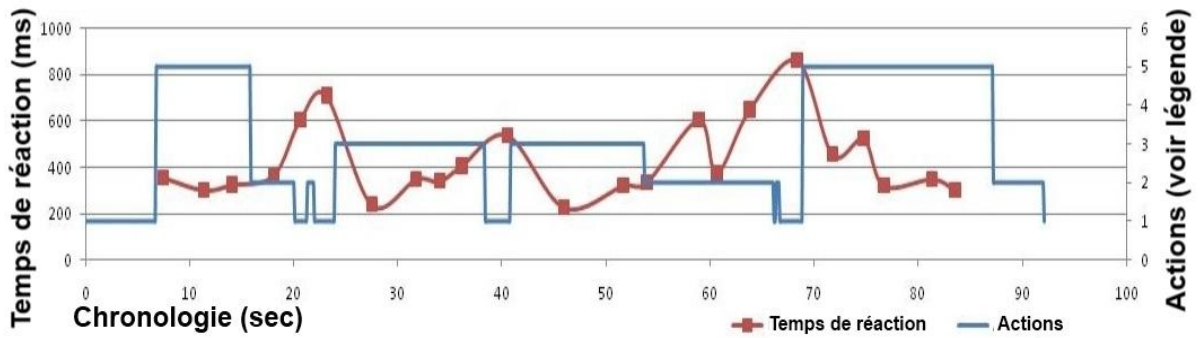


Fig. 5.10 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite avec assistance (session 2).

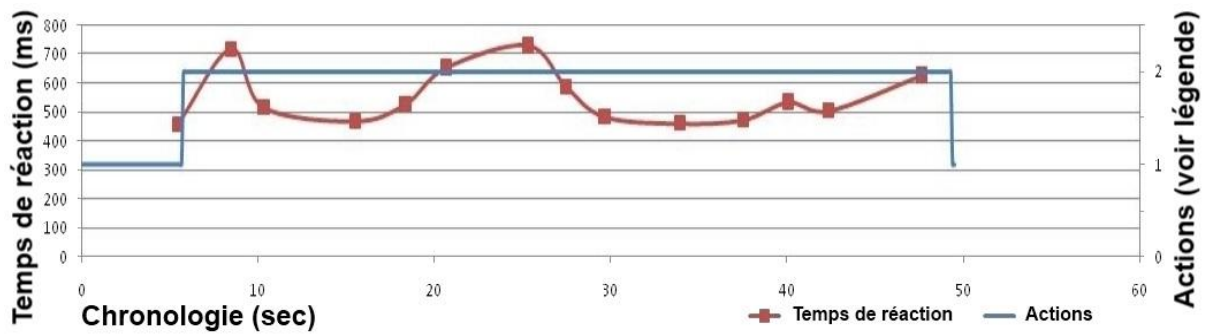


Fig. 5.11 : Exemple de chronologie obtenue lors de la conduite manuelle (session 2).

On remarque que les variations des temps de réaction sont similaires à celles observées lors de la tâche précédente à la différence que les pics sont plus larges pour les deux modes. Avec l'assistance, les sujets sont généralement perturbés lors de l'établissement d'une commande comme précédemment, et également à la fin de l'action qui précède cette commande. Lors de la conduite sans assistance, les sujets présentent généralement des difficultés lors d'une manœuvre comme précédemment.

Le protocole de mesure étant le même que pour l'estimation de la charge attentionnelle, nous effectuons les mêmes tests statistiques (les effets d'ordres, en comparant les moyennes de temps de réaction des deux groupes obtenues dans la tâche de conduite avec assistance, $p = 0.18$, et sans l'assistance, $p = 0.24$; l'effet de fatigue, en comparant les moyennes de temps de réaction de la tâche de Go/NoGo de début avec celles de fin d'essai pour l'ensemble des sujets, $p = 0.09$; et la normalité avec le test de Shapiro-Wilk) qui amènent aux mêmes conclusions. Les comparaisons s'effectuent donc également avec un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis entre les moyennes des temps de réponse et entre les erreurs pour chaque type de conduite et pour la condition de contrôle, et un test entre les types d'actions effectuées lors de la conduite automatique. La figure Fig. 5.12 illustre les moyennes et les erreurs pour les différents types de conduite. Le Tableau 5.9 présente les intervalles de confiance intergroupes du test statistique associés. Pour la conduite avec assistance, la figure Fig. 5.13 illustre les moyennes des temps de réponse dans chaque condition et le Tableau 5.10 présente les intervalles de confiance intergroupes du test statistique correspondant.

	Intervalle de confiance pour les moyennes de temps de réaction	Différence significative à $\alpha = 0.05$	Intervalle de confiance pour le nombre d'erreurs	Différence significative à $\alpha = 0.05$
TControl- TAuto	-110,6 à -47,7	oui	-98,8 à -36,7	oui
TControl- TManu	-77,9 à -14,9	oui	-83,9 à -21,8	oui
TManu- TAuto	1,2 à 64,2	oui	-16,2 à 45,9	non

Tableau 5.9 : Test de Kruskal-Wallis, différences des moyennes de temps de réactions et des erreurs entre les modes de conduite (session 2).

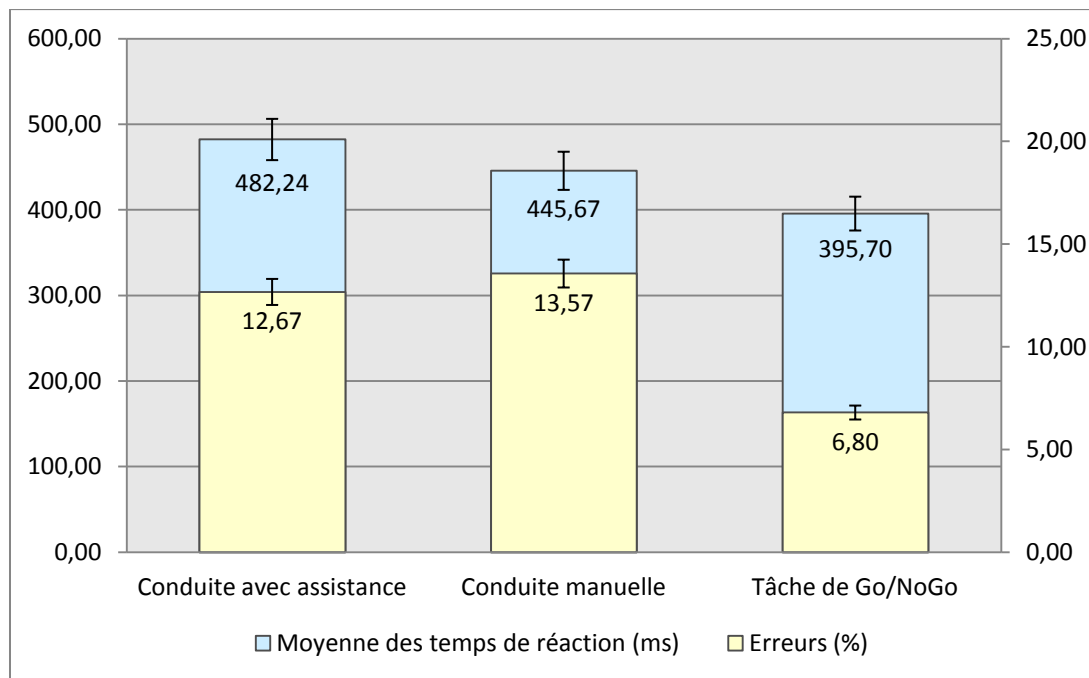


Fig. 5.12 : Moyennes des temps de réaction et pourcentage d'erreurs de l'ensemble des sujets pour chaque mode de conduite (session 2).

	Intervalle de confiance pour les moyennes de temps de réaction	Différence significative à $\alpha = 0.05$
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Wf	463,0 à 755,0	oui
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Ptnp	349,9 à 646,7	oui
Av_Rt_Stop – Av_Rt_Manu	224,9 à 535,2	oui
Av_Rt_Wf – Av_Rt_Ptnp	-227,1 à 5,6	non
Av_Rt_Wf – Av_Rt_Manu	-353,8 à -104,2	oui
Av_Rt_Ptnp – Av_Rt_Manu	-245,8 à 9,4	non

Tableau 5.10 : Test de Kruskal-Wallis, différence entre les conditions en conduite avec assistance (session 2).

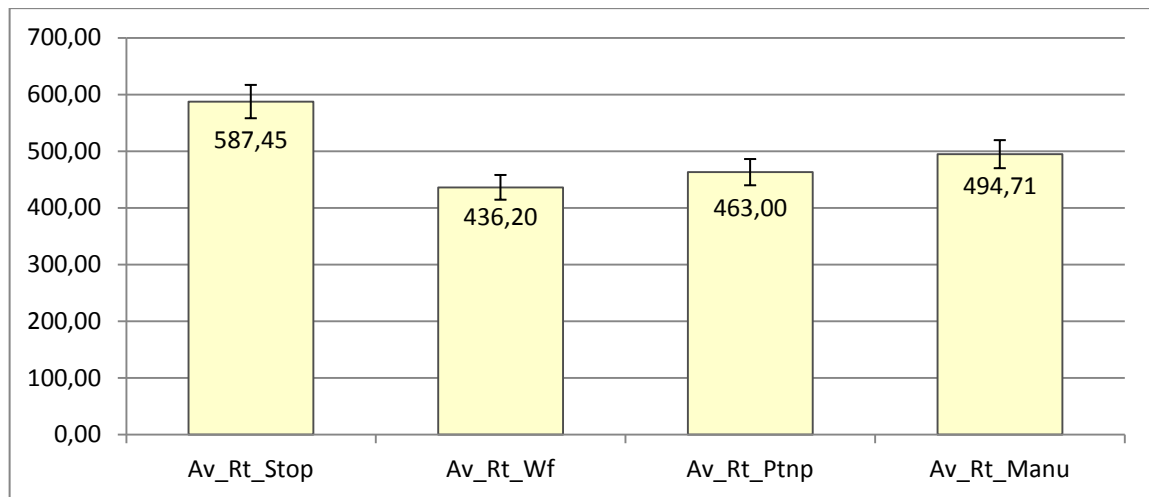


Fig. 5.13 : Moyennes des temps de réaction (en ms) de l'ensemble des sujets pour chaque condition en conduite avec assistance (session 2).

Lors de ces essais, nous pouvons observer des temps de réaction assez élevés même pour la condition de contrôle. Les sujets sont bien plus perturbés que lors des essais avec la tâche de réaction simple. On remarque que les écarts entre les deux types de conduite sont significatifs alors qu'ils ne l'étaient pas lors des essais précédents (session 1), ce qui montre que la conduite avec l'assistance implique des mécanismes décisionnels d'une manière plus importante qu'avec la conduite manuelle. Cependant, les écarts entre les temps de réactions de la tâche de Go/NoGo seule et lors des deux tâches de conduite ne sont pas très grands, ce qui peut suggérer que la capacité décisionnelle des sujets n'intervient que de manière limitée dans les deux tâches de conduite.

De manière descriptive, en conduite manuelle, on observe sur les chronologies des pics larges et assez élevés, mais peu nombreux. Ils traduisent dans la plupart des cas les situations dans lesquelles les sujets hésitent lors d'une manœuvre complexe. On observe généralement de nombreuses erreurs dans ces cas (de nombreux appuis en réponse à des « bops » particulièrement). Pour la conduite automatique, on observe également des pics, plus larges que lors des essais avec la tâche secondaire simple (session 1). Ils surviennent pendant les changements de fonctionnalité, principalement lors de l'établissement d'une commande où le sujet choisit sa cible sur l'interface, et également à la fin d'une fonctionnalité automatique lorsque le sujet anticipe l'action qu'il devra effectuer.

5.5. DISCUSSION

Les différentes expérimentations ont permis de mettre en évidence ce qu'apporte notre assistance à la mobilité en la comparant à une conduite manuelle, et également d'identifier ses exigences en termes de charge attentionnelle et de capacités décisionnelles. Lors de la première série d'essais (cf. 5.3), on remarque que la conduite avec assistance demande moins d'effort et moins de commandes sur le joystick pour accomplir un même parcours avec le même niveau de confort qu'une conduite manuelle, mais nécessite cependant plus de temps pour accomplir cette performance. La diminution de l'effort et de l'exigence physique

s'explique par le changement du type de commande. En mode manuel, les efforts physiques à fournir par les utilisateurs sont principalement demandés lors des manœuvres difficiles. Avec l'assistance, les manœuvres étant réalisées par les fonctionnalités automatiques, seul l'établissement des commandes nécessite un effort physique. Au niveau du confort, on atteint en mode automatique un même niveau qu'avec une bonne conduite manuelle. L'amélioration concernera donc des personnes handicapées ayant des difficultés de conduite avec un fauteuil électrique classique. L'inconvénient principal est l'allongement du temps de parcours par rapport à la conduite manuelle dû aux arrêts nécessaires lors des changements de fonctionnalité et aux temps d'établissement d'une commande. Cette constatation ne sera cependant pas forcément toujours vérifiée pour des personnes présentant des difficultés importantes pour contrôler manuellement leur fauteuil.

Ensuite, au niveau de la charge attentionnelle, les deux conduites requièrent en moyenne le même niveau d'attention mais a des moments différents. En conduite avec assistance, la charge attentionnelle est plus intense lors de l'établissement d'une commande (fauteuil à l'arrêt) alors qu'en conduite manuelle, la charge attentionnelle est plus intense lors d'une manœuvre difficile (fauteuil en mouvement). En revanche, la capacité décisionnelle nécessaire à la conduite avec assistance est légèrement plus importante qu'en mode manuel. Ceci est compréhensible du fait que l'utilisateur doit basculer d'une fonctionnalité vers une autre fréquemment et doit décider et anticiper le type d'action à effectuer, alors qu'en mode manuel, il n'y a qu'un seul type de commande.

Ces expérimentations permettent de déceler de manière générale les prérequis physiques et cognitifs nécessaires à l'utilisation de l'assistance en les comparant à une conduite manuelle de référence pour un même organe de commande. Ceci peut aider à cibler les personnes pour qui une telle assistance peut se révéler utile et utilisable. Par exemple, les personnes ayant une grande difficulté à conduire par des moyens classiques un fauteuil électrique du fait, de mouvements imprécis (cas de certaines personnes infirmes moteurs cérébraux) ou instables (tremblements), peuvent utiliser la conduite manuelle pour réaliser des mouvements simples et les fonctionnalités pour les manœuvres difficiles. Elle peut se révéler aussi efficace pour les personnes présentant une importante fatigabilité. Les efforts physiques à fournir avec l'assistance sont courts et espacés par des temps de repos, là où une conduite manuelle demande des efforts permanents.

D'autre part pour que l'assistance soit utilisable, la personne doit être en mesure de supporter les pics de charge attentionnelle imposés lors de l'établissement d'une commande. De même les capacités décisionnelles exigées pour la conduite en mode automatique sont plus importantes qu'en mode manuel. Ces deux facteurs peuvent donc s'avérer rédhibitoires du point de vue de l'utilisabilité du système pour certaines personnes handicapés moteurs, utilisateurs potentiels, souffrant de troubles cognitifs associés concernant notamment les mécanismes attentionnels et de décision. Il sera donc important de les estimer hors ligne avant toute expérimentation en conditions réelles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire, nous avons présenté une assistance à la conduite pour fauteuil roulant électrique intelligent. Lors de son développement, nous avons choisi de respecter deux contraintes qui nous semblent importantes pour permettre un transfert technologique. La première concerne l'adaptabilité. Il existe en effet un grand nombre de fauteuils et de technologies différentes. Pour que l'assistance puisse être utilisable par tous, il est important de disposer d'un système léger, adaptable sur tout fauteuil, et pouvant être utilisé à partir de la plupart des organes de contrôle existant. Par ailleurs, les utilisateurs potentiels présentant des caractéristiques physiques, et éventuellement cognitives, très diverses, il est nécessaire de proposer un système personnalisable. La seconde contrainte concerne l'acceptabilité. L'assistance à la conduite a pour rôle d'assister l'utilisateur dans ses déplacements et non de le remplacer. Le type de commande et l'autonomie des fonctionnalités doivent permettre une utilisation ergonomique du fauteuil et doit garantir le respect de la volonté de l'utilisateur pour que celui-ci les accepte.

L'architecture matérielle que nous avons proposée est indépendante de la technologie employée par le fauteuil. Elle se connecte en remplaçant le joystick du constructeur ce qui permet de s'adapter à tout type de fauteuil électrique standard utilisant un joystick. De plus, les capteurs et matériels utilisés (laser, caméra, etc.) sont légers et s'implémentent facilement sur un fauteuil. Le système est prévu pour être modulable, l'ajout d'un capteur, d'un organe de contrôle, ou autre s'effectue simplement en le connectant au système, le rendant ainsi personnalisable. Ceci répond à la contrainte d'adaptabilité.

L'assistance à la conduite proposée aide l'utilisateur dans des situations difficiles grâce à des fonctionnalités de navigation automatiques, actuellement le suivi de mur et le franchissement de passage étroit. Le conducteur dispose d'une interface déictique qui présente un aperçu vidéo de l'environnement sur lequel sont surlignées toutes les actions automatiques qui peuvent être réalisées. L'ordre à fournir par l'utilisateur se révèle ainsi simple et intuitif. La conduite obtenue est alors séquentielle : l'utilisateur bascule d'une conduite manuelle vers un déplacement autonome, ou d'une fonctionnalité vers une autre. De plus, l'utilisateur a toujours le contrôle sur le déroulement des actions automatiques : une simple action sur le joystick permet de retourner en conduite manuelle. Ceci répond à la contrainte d'acceptabilité et également de sécurité, le pilote du fauteuil restant superviseur du mouvement automatique.

La présentation de notre assistance à la conduite à l'AFM nous a permis de vérifier l'adéquation de l'aide proposée avec les besoins des utilisateurs. Ensuite, son évaluation quantitative nous a permis de cibler les personnes pour qui notre assistance peut apporter une aide comme, par exemple, les personnes ne pouvant effectuer de commande précise au joystick ou ayant une forte fatigabilité.

Plusieurs perspectives se dégagent de ces travaux. Tout d'abord, il serait intéressant de proposer différentes modalités d'utilisation et différents types d'interface permettant de contrôler le fauteuil avec plusieurs niveaux d'autonomie afin de s'adapter aux difficultés de la

personne. Actuellement, l'assistance à la conduite telle que nous la proposons aide ponctuellement l'utilisateur dans des déplacements difficiles. L'utilisateur conduit manuellement le fauteuil à l'aide du joystick et utilise les fonctionnalités semi-autonomes lorsqu'il en éprouve le besoin via l'interface déictique. Ce type d'aide se révèle être adéquate pour des personnes ayant des difficultés à réaliser certaines manœuvres difficiles ou éprouvantes mais qui peuvent toutefois conduire manuellement lors de déplacements simples. Il serait intéressant de fournir davantage de fonctionnalités permettant à l'utilisateur de réaliser tout les déplacements possibles avec une conduite semi-autonome pour permettre à des personnes n'ayant pas ces capacités de conduire un fauteuil via l'interface déictique. On peut alors imaginer l'ajout d'une fonctionnalité de suivi de direction pour remplacer la conduite manuelle, et d'autres fonctionnalités adaptées aux difficultés de la personne, comme le backtracking ou le suivi de personne.

Par ailleurs, les interactions homme-machine sur notre système sont actuellement caractérisées par l'action de pointage issue de l'organe de commande. Dans la configuration actuelle elle peut être réalisée à partir du joystick, d'un écran tactile ou encore par le contrôle d'un curseur avec le regard, ce qui laisse plusieurs possibilités de personnalisation. On peut imaginer encore d'autres types d'interaction compatibles avec une interface déictique pour ouvrir le champ des possibilités, comme par exemple un balayage des éléments surlignés à l'écran autorisant le pilotage du système via une commande de type tout ou rien, ou encore l'utilisation d'une interface cerveau-ordinateur permettant de sélectionner un élément de l'interface.

Ensuite, on peut également s'interroger sur l'intégration de l'assistance à la conduite dans l'environnement de l'utilisateur. Outre la capacité de mobilité, ce dernier doit pouvoir communiquer et interagir avec l'environnement. On peut imaginer une assistance proposant une interface plus générale lui permettant d'une part de contrôler le fauteuil, comme nous le proposons ici, et d'autre part lui fournissant des possibilités de contrôler un environnement "intelligent", permettant d'ouvrir et de fermer des portes ou des volets automatiques, d'allumer ou d'éteindre les lumières ou le téléviseur, ou encore de se connecter à distance à un ordinateur pour disposer des fonctionnalités de navigation internet et de jeux. On pourrait également mettre à disposition des fonctionnalités d'ordre médical, comme l'appel d'urgence, le rappel de prise de médicament, etc. Ainsi créer un environnement intelligent contrôlable par le fauteuil, qui est le principal outil de mobilité, pourrait permettre à l'utilisateur d'effectuer l'ensemble des tâches quotidiennes à partir de la même plateforme de contrôle, ce qui faciliterait grandement son maintien à domicile.

Enfin, une perspective à court terme est d'effectuer un transfert technologique en partenariat avec un industriel. L'objectif est de commercialiser un fauteuil roulant électrique intelligent disposant de notre assistance à la conduite. Il nous semble important que les utilisateurs aient un accès large à ce type d'assistance pour qu'elle puisse évoluer et répondre au mieux à leurs besoins. Mais, cette boucle de développement liant utilisateurs et concepteurs ne peut être effective que lorsque l'on dispose d'une structure matérielle pour le faire, structure qui, du fait

des exigences de sécurité et donc de fiabilité de l'application, doit être à notre sens un prototype industrialisé.

ANNEXE A : MODE DE CHANGEMENT DE REPERE

Soit pour exprimer le point $A(\rho_a, \theta_a) \in R_0$ dans le repère R_1 (deux repères orthonormés) avec comme transformations de $R_0 \rightarrow R_1$ une rotation d'angle α et deux translations T_x et T_y .

On détermine les coordonnées cartésiennes de $A \in R_0$:

$$x_{a \in R_0} = \rho_{a \in R_0} \times \cos(\theta_{a \in R_0})$$

$$y_{a \in R_0} = \rho_{a \in R_0} \times \sin(\theta_{a \in R_0})$$

Ensuite on détermine les coordonnées cartésiennes de $A \in R_1$:

$$x_{a \in R_1} = x_{a \in R_0} \times \cos(\alpha) - y_{a \in R_0} \times \sin(\alpha) + T_x$$

$$y_{a \in R_1} = x_{a \in R_0} \times \sin(\alpha) + y_{a \in R_0} \times \cos(\alpha) + T_y$$

Enfin, on détermine les coordonnées cylindriques de $A \in R_1$:

$$\rho_{a \in R_1} = \sqrt{(x_{a \in R_1})^2 + (y_{a \in R_1})^2}$$

$$\theta_{a \in R_1} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{y_{a \in R_1}}{x_{a \in R_1}} \right) & \text{si } x_{a \in R_1} \geq 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{y_{a \in R_1}}{x_{a \in R_1}} \right) + 180 & \text{sinon} \end{cases}$$

ANNEXE B : FORMAT DES TENSIONS DU JOYSTICK

Les joysticks de fauteuil fournissent plusieurs tensions sous un format bien défini. Il se compose de quatre tensions. La première tension, nommée T1, est l'image de la position verticale du joystick et est associée à une deuxième tension, nommée T1c, qui lui est complémentaire à un niveau de tension maximum, nommée Vcc. La troisième tension, nommée T2, est l'image de la position horizontale du joystick et est associée, elle aussi, à une quatrième tension, nommée T2c, lui étant complémentaire. De plus, les mouvements du joystick sont limités physiquement dans un cercle d'utilisation.

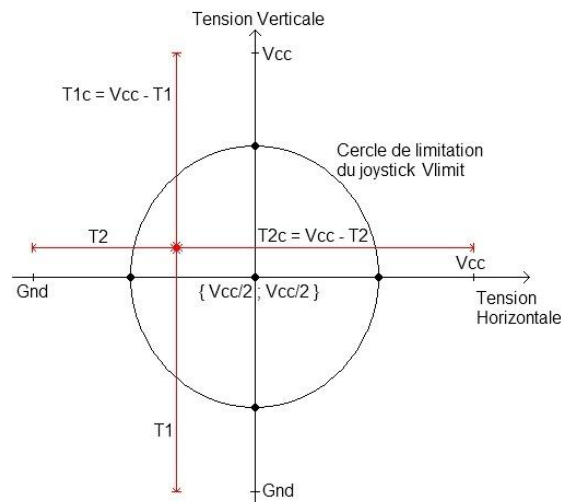


Fig. B.1 : Tensions délivrées par le joystick du fauteuil.

Les tensions de commande Taa et Tgd issues du module de logique floue sont centrées sur la position au repos du joystick. Cela permet de mettre en évidence les liens entre ces tensions et la variation de vitesse du fauteuil, notamment, d'avoir des tensions nulles pour une vitesse nulle.

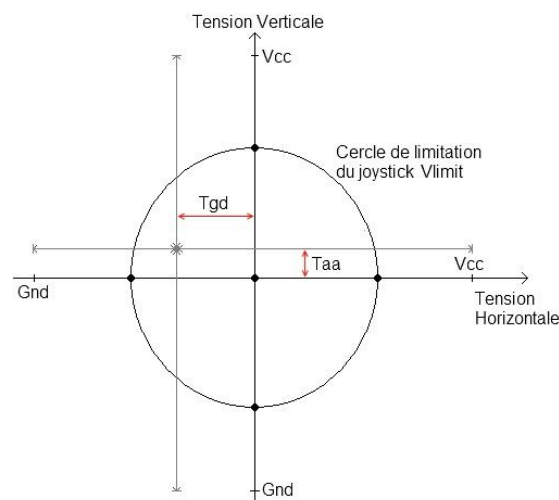


Fig. B.2 : Tensions issues du module de logique floue.

La conversion du format des tensions de commande vers celui du joystick réel doit prendre en compte le comportement réel du joystick. Dans une petite zone autour de sa position centrale, le joystick ne génère pas de variation de tension, ceci est lié à sa structure mécanique. Comme les tensions que nous écrivons ne dépendent d'aucune structure mécanique nous devons reproduire cette zone lors du conditionnement des tensions afin d'obtenir une commande la plus proche possible de ce qu'effectue réellement le joystick. Pour prendre en compte ces zones mortes, nous établissons une loi de correspondance entre les tensions de commande T_{aa} et T_{gd} issue du module de logique floue avec les tensions réellement envoyées aux fauteuils T_1 , T_{1c} , T_2 et T_{2c} .

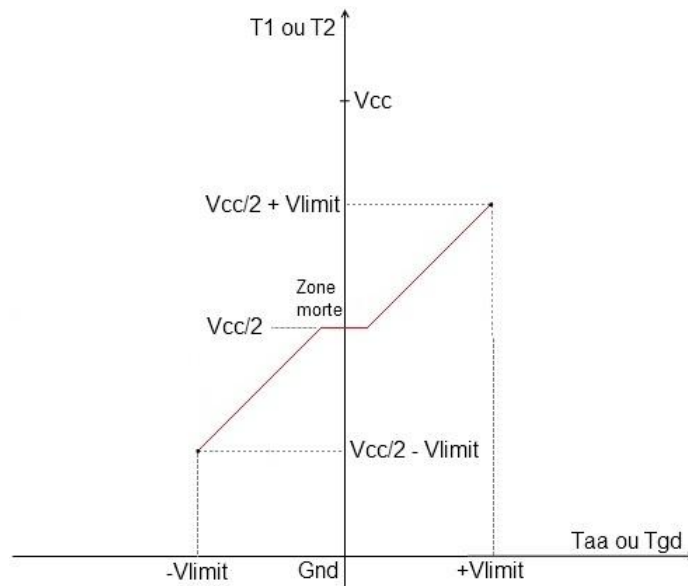


Fig. B.3 : Correspondance entre la tension T_{aa} et T_1 ou T_{gd} et T_2 .

REFERENCES

- Agostini, Y. 1996. Architecture coopérative pour la commande d'un fauteuil roulant robotisé. Metz: Université Paul Verlaine.
- Argyros, A., P. Georgiadis, P. Trahanias, et D. Tsakiris. 2002. « Semi-autonomous navigation of a robotic wheelchair ». *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 34 (3): 315–329.
- Barea, R., L. Boquete, M. Mazo, et E. López. 2002. « Wheelchair guidance strategies using EOG ». *Journal of intelligent and robotic systems* 34 (3): 279–299.
- Bien, Z., M. J Chung, P. H Chang, D. S Kwon, D. J Kim, J. S Han, J. H Kim, et al. 2004. « Integration of a rehabilitation robotic system (KARES II) with human-friendly man-machine interaction units ». *Autonomous robots* 16 (2): 165–191.
- Blatt, R., S. Ceriani, B. Dal Seno, G. Fontana, M. Matteucci, et D. Migliore. 2008. Brain control of a smart wheelchair. Dans *10th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*.
- Borenstein, J., et Y. Koren. 1991. « The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots ». *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 7 (3): 278–288.
- Bouchon-Meunier, B., et L. A Zadeh. 1995. *La logique floue et ses applications*. Addison-Wesley France.
- Bourhis, G., et Y. Agostini. 1998. « Man-machine cooperation for the control of an intelligent powered wheelchair ». *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 22 (3): 269–287.
- Bourhis, G., O. Horn, O. Habert, et A. Pruski. 2001. « An autonomous vehicle for people with motor disabilities ». *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 8 (1): 20–28.
- Braga, R. A. M., M. Petry, A. P. Moreira, et L. P. Reis. 2008. Intellwheels: A Development PlatForm for Intelligent Wheelchairs for Disabled People. Dans *Proc. of the 5th Int. Conf. on Inf. in Control, Aut. and Robotics*, 1:115–121.
- Brochard, S., J. P Pedelucq, A. Cormerais, M. Thiebaut, et O. Remy-Neris. 2007. Enquête de satisfaction sur l'équipement technologique des personnes tétraplégiques par blessure medullaire. Dans *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 50:78–84.
- Carlson, T., et Y. Demiris. 2008. Human-wheelchair collaboration through prediction of intention and adaptive assistance. Dans *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, 3926–3931.
- Cheng, G., et A. Zelinsky. 1996. Real-time visual behaviours for navigating a mobile robot. Dans *Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, 2:973–980.
- Coelho, L., et D. Braga. 2009. ezGo: A Voice Operated Wheelchair with Biosignal Monitoring for Home Environments. Dans Porto Salvao, Portugal.
- Connell, J., et P. Viola. 1990. Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot. Dans

Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on, 1118–1121.

Craig, I., P. Nisbet, P. Odor, et M. Watson. 1993. Evaluation methodologies for rehabilitation technology. Dans *Rehabilitation technology: strategies for the European Union: proceedings of the 1st TIDE Congress, 6-7 April 1993, Brussels*, 238.

Crisman, J., et M. Cleary. 1998. « Progress on the deictic controlled wheelchair ». *Assistive Technology and Artificial Intelligence*: 137–149.

Fehr, L., W. E Langbein, et S. B Skaar. 2000. « Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: A clinical survey ». *Development* 37 (3): 353–360.

Felzer, T., et R. Nordmann. 2007. « Alternative wheelchair control ». *Proc. RAT* 7: 67–74.

Fezari, M., et A. E Khati. 2009. New speech processor and ultrasonic sensors based embedded system to improve the control of a motorised wheelchair. Dans *Design and Test Workshop, 2008. IDT 2008. 3rd International*, 345–349.

Filliat, David. 2004. *Robotique Mobile, cours C10-2 ENSTA*.

Gao, C., M. Sands, et J. Spletzer. 2010. Towards autonomous wheelchair systems in urban environments. Dans *Field and Service Robotics*, 13–23.

Gao, X., H. Hu, Q. Jia, H. Sun, et J. Song. 2011. « 3D augmented reality teleoperated robot system based on dual vision ». *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 18 (1): 105–112.

Gomi, T. 1996. « The TAO project: intelligent wheelchairs for the handicapped ». *Mittal et al.*[29].

Gomi, T., et A. Griffith. 1998. « Developing intelligent wheelchairs for the handicapped ». *Assistive Technology and Artificial Intelligence*: 150.

Grasse, Régis. 2007. Aide à la navigation pour les personnes handicapées: reconnaissance de trajets. Metz: Université Paul Verlaine.

Green, S. A, M. Billingham, X. Q Chen, et G. J. Chase. 2008. « Human-robot collaboration: A literature review and augmented reality approach in design ». *International Journal of Advanced Robotic Systems* 5 (1): 1–18.

Green, S. A, X. Q Chen, M. Billingham, et J. G Chase. 2008. Collaborating with a mobile robot: An augmented reality multimodal interface. Dans *Seoul, Korea: 17th International Federation of Automatic Control World Congress*, 6–11.

Hadj Abdelkader, Mohammed Amine. 2011. Interface Haptique en tâche de contrôle pour personnes handicapées moteurs. Metz: Université Paul Verlaine.

Han, J. S, Z. Bien, D. J Kim, H. E Lee, et J. S Kim. 2003. Human-machine interface for wheelchair control with EMG and its evaluation. Dans *Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE*, 2:1602–

1605.

Hoare, C.A.R. 1962. « Quicksort ». *The Computer Journal* 5 (1): 10.

Hollander, M., et D.A. Wolfe. 1999. « Nonparametric Statistical Methods. 1999 ». NY *John Wiley & Sons*.

Horn, O., A. Courcelle, et M. Kreutner. 2000. « Le projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapés Moteur) : la localisation ». *Revue Traitement du signal* vol. 17 (num. 3): pp 221-232.

Horn, O., et G. Riemer. 1994. « Dynamic location method for the V.A.H.M. » *IMACS International Symposium on Signal Processing. Robotics and Neural Networks*: pp. 512-516.

Huo, X., J. Wang, et M. Ghovanloo. 2008. Wireless control of powered wheelchairs with tongue motion using tongue drive assistive technology. Dans *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 4199–4202.

Index, N. T.L. 1986. « NASA Task Load Index (TLX) Computerized Version-v. 1.0 ». *Human Performance Research Group. NASA Ames Research Center. Moffett Field, California*.

Iturrate, I., J. M Antelis, A. Kubler, et J. Minguez. 2009. « A noninvasive brain-actuated wheelchair based on a p300 neurophysiological protocol and automated navigation ». *Robotics, IEEE Transactions on* 25 (3): 614–627.

Leishman, F., O. Horn, et G. Bourhis. 2010. « Smart wheelchair control through a deictic approach ». *Robotics and Autonomous Systems* 58: 1149-1158.

Leroux, C., I. Laffont, N. Biard, S. Schmutz, J.F. Desert, G. Chalubert, et Y. Measson. 2007. Robot grasping of unknown objects, description and validation of the function with quadriplegic people. Dans *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on*, 35–42.

Levine, S. P, D. A Bell, L. A Jaros, R. C Simpson, Y. Koren, et J. Borenstein. 1999. « The NavChair assistive wheelchair navigation system ». *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* 7 (4): 443–451.

Matsumoto, Y., T. Ino, et T. Ogasawara. 2001. Development of intelligent wheelchair system with face and gaze based interface. Dans *Robot and Human Interactive Communication, 2001. Proceedings. 10th IEEE International Workshop on*, 262–267.

Mazo, M., J. C. Garcia, F. J Rodríguez, J. Ure\ na, J. L Lázaro, et F. Espinosa. 2000. « Integral system for assisted mobility ». *Information Sciences* 129 (1-4): 1–15.

Mestre, D. R., J. M. Pergandi, et P. Mallet. 2007. « Designing a navigation aid for a smart wheelchair ». *AMSE Journals*.

Miller, D. P, et M. G Slack. 1995. « Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype ». *Autonomous Robots* 2 (1): 77–88.

Montesano, L., M. Díaz, S. Bhaskar, et J. Minguez. 2010. « Towards an intelligent wheelchair system for users with cerebral palsy ». *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* 18 (2): 193–202.

Morere, Y., et A. Pruski. 2004. A multi-agent control structure for intelligent wheelchair and Aided navigation for disabled people. Dans *Proceedings of the 2004 International Symposium on Robotics (ISR 2004)*, 23–26.

Nadrag, Paul. 2011. Faciliter la téléopération d'un robot mobile non-holonyme, Application au maintien à domicile des personnes âgées. Université d'Evry-Val d'Essonne.

Nisbet, P. D. 2002. Who's intelligent? Wheelchair, driver or both? Dans *IEEE Conference on Control Applications- Proceedings. The 2002 IEEE International Conference on Control Applications*, 760–765.

Ohmori, K., et K. Sakamoto. 2010. « Automatic mobile robot control and indication method using augmented reality technology ». *Entertainment Computing-ICEC 2010*: 464–467.

Parikh, S. P, V. Grassi Jr, V. Kumar, et J. Okamoto Jr. 2004. Incorporating user inputs in motion planning for a smart wheelchair. Dans *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, 2:2043–2048.

———. 2005. Usability study of a control framework for an intelligent wheelchair. Dans *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 4745–4750.

Pashler, H. 1994. « Dual-task interference in simple tasks: Data and theory ». *Psychological Bulletin* 116: 220–220.

Pergandi, J. M, P. Mallet, et D. Mestre. 2006. Evaluation d 'une aide à la navigation d 'un fauteuil «intelligent». Dans *Proc. Handicap*. Vol. 2006.

Pires, G., R. Araujo, U. Nunes, et A. T. De Almeida. 1998. RobChair a semi autonomous wheelchair for disabled people. Dans *Proc. 3rd IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, IAV*, 98:648–652.

Pires, G., et U. Nunes. 2002. « A wheelchair steered through voice commands and assisted by a reactive fuzzy-logic controller ». *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 34 (3): 301–314.

Premebida, C., et U. Nunes. 2005. « Segmentation and geometric primitives extraction from 2d laser range data for mobile robot applications ». *Robótica*: 17–25.

Pruski, A., et G. Bourhis. 1991. « Le projet VAHM (véhicule autonome pour handicapé moteur): mobilité et stratégie= The VAHM Project (autonomous vehicle for the disabled): mobility and strategy ». *Innovation et technologie en biologie et médecine* 12 (6): 694–705.

Rao, R. S., K. Conn, S. H Jung, J. Katupitiya, T. Kientz, V. Kumar, J. Ostrowski, S. Patel, et C. J Taylor. 2002. Human robot interaction: application to smart wheelchairs. Dans *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, 4:3583–3588.

- Rebsamen, B., E. Burdet, C. Guan, H. Zhang, C. L. Teo, Q. Zeng, M. Ang, et C. Laugier. 2006. A brain-controlled wheelchair based on P300 and path guidance. Dans *Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*, 1101–1106.
- Samet, L., N. Masmoudi, M.W. Kharrat, et L. Kamoun. 1997. Un PID discret à 3µs de temps de calcul. Dans *Conférence Internationale JTEA '97*. Nabeul, Tunisie.
- Sekimoto, T., T. Tsubouchi, et S. Yuta. 1997. A simple driving device for a vehicle implementation and evaluation. Dans *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*, 1:147–154.
- Sentouh, C., P. Chevrel, F. Mars, et F. Claveau. 2010. « Modélisation du conducteur pour le contrôle de la trajectoire d'un véhicule automobile ».
- Sharma, V., R. Simpson, E. LoPresti, et M. Schmeler. 2010. « Evaluation of semiautonomous navigation assistance system for power wheelchairs with blindfolded nondisabled individuals ». *Evaluation* 47 (9): 877–890.
- Simpson, R. C. 2005. « Smart wheelchairs: A literature review. » *Journal of rehabilitation research and development* 42 (4): 423.
- Simpson, R. C., E. F. LoPresti, et R. A. Cooper. 2008. « How many people would benefit from a smart wheelchair? » *Journal of Rehabilitation Research and Development* 45 (1): 53.
- Simpson, R. C., E. LoPresti, S. Hayashi, I. Nourbakhsh, et D. Miller. 2004. « The smart wheelchair component system ». *Journal of Rehabilitation Research and Development* 41 (3B): 429–442.
- Simpson, R. C., D. Poirot, et M. F. Baxter. 1999. Evaluation of the Hephaestus smart wheelchair system. Dans *Proceedings of the 6th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 99–105.
- Stefanov, D., A. Avtanski, et Z. Zenn Bien. 2004. « A concept for control of indoor-operated autonomous wheelchair ». *Lecture notes in control and information sciences*: 253–298.
- Tarca, R., L. Csokmai, T. Vesselenyi, I. Tarca, et F. P. Vladicescu. 2010. « Augmented Reality Used to Control a Robot System via Internet ». *Technological Developments in Education and Automation*: 539–544.
- Trahanias, P.E., M. I. A. Lourakis, S. A. Argyros, et S. C. Orphanoudakis. 1997. Navigational support for robotic wheelchair platforms: an approach that combines vision and range sensors. Dans *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, 2:1265–1270.
- Tsui, C. S.L, P. Jia, J. Q. Gan, H. Hu, et K. Yuan. 2007. EMG-based hands-free wheelchair control with EOG attention shift detection. Dans *Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on*, 1266–1271.
- Urdiales, C., J. M. Peula, C. Barrué, U. Cortés, F. Sandoval, C. Caltagirone, et R. Annicchiarico. 2008. An adaptive scheme for wheelchair navigation collaborative control. Dans *Proc. of 2008 Fall Symposium of the Association for the Advancement of Artificial*

Intelligence (AAAI 2008), Arlington, USA.

Yanco, H. 1998. « Wheellesley: A robotic wheelchair system: Indoor navigation and user interface ». *Assistive technology and artificial intelligence*: 256–268.

Zeng, Q., E. Burdet, et C. L Teo. 2008. User evaluation of a collaborative wheelchair system. Dans *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 1956–1960.

Liste des publications

- [1] F. Leishman, O. Horn and G. Bourhis, “Multimodal laser vision approach for the deictic control of a smart wheelchair”, ICOST 2009, LNCS, vol. 5597, pp98-107, 2009.
- [2] F. Leishman, O. Horn and G. Bourhis, “Smart wheelchair control through a deictic approach”, Robotics and Autonomous Systems, vol. 58, issue 10, 31 October 2010.
- [3] F. Leishman, V. Monfort, O. Horn et G. Bourhis, “Assistance à la conduite par approche déictique pour fauteuil intelligent”, IFRATH 2011, Juin 2011.
- [4] F. Leishman, V. Monfort, O. Horn and G. Bourhis, “Assessment of the Human-Machine Association on a Smart Wheelchair”, AAATE 2011, Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe 11th European, Maastricht, the Netherlands, August 2011.
- [5] O. Horn, M. A. Hadj Abdelkader, F. Leishman et G. Bourhis, “Modes de commande intuitifs pour l’assistance robotisée aux déplacements”, Conférence Handicap 2010, 9-11 Juin 2010.
- [6] O. Horn, M. A. Hadj Abdelkader, F. Leishman and G. Bourhis, “Intuitive command modes for robotics assistance to mobility”, AMSE Journals, vol.71, N° 3, pp 100-109, 2010.

Résumé

Les fauteuils roulants « intelligents » dotés de facultés de navigation autonomes visent à soulager les personnes handicapées moteurs ayant des difficultés à conduire un fauteuil électrique standard. Depuis les années 80, de nombreuses études ont été menées pour réaliser de tels prototypes mais très peu ont abouti à de réels progrès pour les utilisateurs et ce uniquement pour des fonctionnalités simples. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment la sous-estimation des contraintes d'acceptabilité et d'adaptabilité.

Dans ce contexte, notre objectif est de concevoir une assistance à la conduite sous respect de ces contraintes. Pour cela, nous réalisons un système léger, composé de trois capteurs laser, d'une caméra et d'un micro-ordinateur. Il est susceptible de s'adapter sur tout type de fauteuil électrique et nous a permis de développer les fonctionnalités de franchissement de passage étroit et de suivi de mur ainsi qu'une interface humain-machine ergonomique. Celle-ci est établie par une commande « déictique » qui consiste à fournir un aperçu de l'environnement sur lequel l'utilisateur désigne la tâche autonome choisie par son lieu d'application, le fauteuil réalisant automatiquement l'action correspondante. Tout contact sur le joystick rend immédiatement le contrôle du fauteuil à l'utilisateur afin qu'il ne se sente pas prisonnier de l'assistance, ainsi le pilotage se compose d'une alternance de commandes manuelles et d'indications sur l'interface.

Ensuite, l'évaluation de notre assistance à la conduite s'est déroulée en trois étapes. La première, qualitative, a consisté à présenter et à faire essayer le système à des utilisateurs potentiels. Dans un second temps nous avons comparé quantitativement les performances de la conduite assistée avec celles d'une conduite manuelle sur un panel de sujets valides (temps de parcours, nombre d'actions réalisées, indice de confort...). La troisième étape a consisté à évaluer la charge cognitive des utilisateurs dans les deux modes de conduite en mesurant la charge attentionnelle et la capacité décisionnelle à partir d'une méthode de double tâche.

Abstract

The Smart Wheelchairs, that are equipped of autonomous navigation functionalities, aim to relieve the physically handicapped persons who have difficulty to drive a standard electric wheelchair. Since the 80s, many studies have been conducted to design such prototypes but very few have led to real progress for users and only for simple functionalities. This can be explained by several factors, including the underestimation of the constraints of acceptability and adaptability.

In this context, our goal is to provide a driving assistance in respect of these constraints. For this, we design a lightweight system, consisting of three laser sensors, a camera and a computer. It is adaptable to any type of electric wheelchair and allowed us to develop the functionalities of passing through of the narrow passages and wall following, as well as an ergonomic human-machine interface. This latter is established by a deictic command which consists in to provide an overview of the environment where the user indicates the chosen

autonomous task by his application location, and then the wheelchair performs the corresponding action automatically. Moreover, all contact with the joystick gives back the control to the user so that he does not feel a prisoner of assistance; well the driving is composed of alternating manual controls and indications on the interface.

Finally, the evaluation of our assistance in the conduct took place in three stages. The first, qualitative, is to present and to do try the system to potential users. In a second step, we compare quantitatively the performance of the assistance driving with those of a manual driving on a panel of valid persons (travel time, number of actions, discomfort index ...). The third step is to assess the cognitive load of users in both driving modes by measuring the attentional load and decision-making capacity from a dual task method.

