

UNIVERSITE D'EVRY – VAL D'ESSONNE  
ECOLE DOCTORALE SITEVRY

# THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'EVRY**

*Spécialité : Robotique*

présentée et soutenue publiquement

par

**Khiar NAIT CHABANE**

le 30 novembre 2006

Exploitation de la redondance pour la commande coordonnée d'un  
manipulateur mobile d'assistance aux personnes handicapées

---

*Directeur de thèse : Etienne COLLE*

---

## JURY

P. Gorce	, Professeur Université de Toulon	, Rapporteur
A. Pruski	, Professeur Université de Metz	, Rapporteur
E. Colle	, Professeur Université d'Evry	, Directeur de thèse
P. Hoppenot	, Maître de Conférences Université d'Evry	, Examineur
G. Poisson	, Professeur Université d'Orléans	, Examineur

# REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes, IBISC-CNRS, au sein de l'équipe Hands. Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Monsieur Etienne Colle, professeur à l'Université d'Evry Val d'Essonne et Directeur du Laboratoire IBISC d'avoir accepté de diriger cette thèse et de m'avoir soutenu tout au long de ce travail et de n'avoir jamais manqué de m'orienter et de me conseiller. Tous ses commentaires critiques, pertinents m'ont permis d'avancer dans mes recherches et grâce auxquels j'ai pu aboutir à l'achèvement de ce manuscrit.

Je tiens à remercier monsieur Philippe Hoppenot, Maître de Conférences à l'Université d'Evry Val d'Essonne, pour son encadrement scientifique et sa participation active dans le projet. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Philippe Gorce, Professeur à l'Université de Toulon, et Alain Pruski, Professeur à l'Université de Metz, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi que leurs lectures pertinentes du manuscrit.

Mes remerciements vont également à monsieur Gérard Poisson, Professeur à l'Université d'Orléans pour avoir accepté de juger ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et ma profonde reconnaissance.

Que tous les membres du Laboratoire et de l'UFR S&T trouvent ici ma gratitude pour leur aide, leurs conseils ou tout simplement pour leur amitié, leur gentillesse et leur générosité notamment Madjid, Nassima, Sébastien, Souhila, Kamel, Kadda, Hamid, Alexie, Laamri, Aurélien..., doctorants au Laboratoire. Je m'excuse par avance auprès de ceux que j'aurais oublié.

J'adresse mes remerciements à Mme Nabila Zbiri et Fakhr-eddine Ababsa, Maîtres de Conférences à l'Université d'Evry Val d'Essonne pour leurs conseils et soutien durant cette thèse.

Je ne peux oublier de remercier mes parents et toute ma famille (Makhlouf, Meriem, Andromède, Akli,...) pour leur soutien durant cette formation, et tous mes amis (es) et collègues, en particulier Frederic Davesne, Djaber, Christophe, Ahmed, Salim, Djamel, Jean-Yves.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse.



# Tables des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : État de l'art .....</b>	<b>7</b>
1 Introduction .....	9
2 Robotique d'aide à la manipulation .....	11
2.1 Stations de travail fixes .....	13
2.2 Bras manipulateurs montés sur un fauteuil électrique .....	15
2.3 Bras manipulateurs montés sur un porteur / plate-forme mobile .....	17
3 Schémas de contrôle: Inversion cinématique pour l'exploitation de la redondance .....	22
3.1 Méthodes basées sur l'augmentation de l'espace de la tâche.....	22
3.2 Méthodes basées sur l'optimisation de contraintes .....	23
4 Manipulabilité des bras manipulateurs et des manipulateurs mobiles .....	28
4.1 Manipulabilité des bras manipulateurs.....	28
4.1.1 Mesures de manipulabilité .....	30
4.1.2 Application de la manipulabilité des bras manipulateurs.....	32
4.1.3 Applications de la manipulabilité des bras manipulateurs pour les manipulateurs mobiles .....	34
4.2 Manipulabilité des manipulateurs mobiles.....	36
5 Conclusion.....	38
<b>Chapitre 2 : Modélisation .....</b>	<b>41</b>
1 Introduction .....	43
2 Description du système ARPH.....	43
3 Modélisation des bras manipulateurs .....	44
3.1 Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces	45
3.1.1 Modèle Géométrique Direct (MGD).....	45
3.1.2 Modèle Géométrique Inverse (MGI).....	45
3.1.3 Modèle Différentiel Direct (MDD) .....	45
3.1.4 Modèle Différentiel Inverse (MDI).....	46
3.2 Redondance et configurations singulières .....	46
4 Modélisation du Manus .....	47
4.1 Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces..	47
4.1.1 Modèle Géométrique Direct (MGD).....	47

4.1.2	Modèle Géométrique Inverse (MGI).....	51
4.1.3	Modèle Différentiel Direct (MDD).....	51
4.1.4	Modèle Différentiel Inverse (MDI).....	52
4.2	Redondance et configurations singulières.....	52
5	Modélisation de la plate-forme mobile ARPH.....	53
6	Modélisation du manipulateur mobile ARPH.....	55
6.1	Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces	55
6.1.1	Modèle Géométrique Direct (MGD).....	57
6.1.2	Modèle Différentiel Direct (MDD).....	58
6.1.3	Modèle Différentiel Direct Réduit (MDDR).....	59
6.1.4	Modèles Différentiels inverses (MDI et MDIR).....	60
6.2	Redondance et singularité du manipulateur mobile ARPH .....	61
6.2.1	Redondances.....	61
6.2.2	Singularités.....	61
7	Validation des modèles sur le système réel.....	62
8	Conclusion.....	66
 <b>Chapitre 3 : Manipulabilité.....</b>		<b>67</b>
1	Introduction .....	69
2	Mesures de manipulabilité des bras manipulateurs.....	69
2.1	Rappel sur les mesures de manipulabilité et leurs limites.....	69
2.1.1	Définition de la manipulabilité.....	69
2.1.2	Limites des mesures existantes .....	70
2.2	Manipulabilité directionnelle .....	72
2.2.1	Définition de $w_{Bdir}$ .....	72
2.2.2	Exemple.....	73
2.2.3	Discussion .....	74
3	Mesures de manipulabilité des manipulateurs mobiles.....	75
3.1	Rappel de la définition .....	75
3.2	Améliorations proposées .....	76
3.2.1	Normalisation.....	76
3.2.2	Manipulabilité directionnelle du manipulateur mobile .....	77
3.2.3	Exemple.....	77
3.2.4	Discussion .....	79

4 Application de la manipulabilité à la commande des manipulateurs mobiles .....	81
4.1 Rappel du principe .....	81
4.1.1 Modèle cinématique inverse d'un manipulateur mobile .....	82
4.1.2 Calcul du gradient de la fonction à optimiser .....	82
4.2 Simulation .....	83
4.3 Discussion .....	88
4.4 Exemples sur le robot réel .....	90
5 Conclusion.....	92
<b>Chapitre 4 : Stratégie d'approche pour la saisie.....</b>	<b>95</b>
1 Introduction .....	97
2 Stratégie de saisie .....	98
2.1 Modes de commande.....	98
2.2 Scénario de saisie .....	99
2.3 Phases.....	101
2.3.1 Objectif éloigné .....	101
2.3.2 Objectif proche .....	102
3 Méthodes de résolution selon les phases.....	103
3.1 Phase : objectif éloigné .....	103
3.1.1 Zone : obstacle éloigné.....	103
3.1.2 Zone : obstacle proche.....	104
3.2 Phase : objectif proche .....	108
3.2.1 Zone : obstacle éloigné.....	108
3.2.2 Zone : obstacle proche.....	110
4 Résultats de simulations. ....	111
4.1 Phase : objectif loin .....	112
4.1.1 Protocole expérimental.....	112
4.1.2 Simulation .....	113
4.1.3 Discussion .....	114
4.2 Phase : objectif proche .....	115
4.2.1 Zone : obstacle éloigné.....	115
4.2.2 Zone : obstacle proche.....	119
4.2.3 Phase proche : changement de zone.....	127
4.3 Exemple complet.....	129
4.3.1 Protocole expérimental.....	129

4.3.2 Simulation .....	129
4.3.3 Discussion .....	130
5 Conclusion.....	131
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>133</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>139</b>
A.1 Inversion matricielle.....	141
A.2 Résolution d'un système linéaire .....	141
A.3 Décomposition en valeurs singulières .....	143
B.1 Calcul des modèles géométrique du bras manipulateur .....	145
B.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du bras manipulateur .....	145
B.1.2 Calcul du modèle géométrique inverse du bras manipulateur.....	146
B.2 La contrainte de non holonomie de la plate-forme .....	149
B.3 Les matrices de passages entre les principaux repères liés au manipulateur mobile...	150
C.1 Phase objectif loin .....	151
C.2 Phase objectif proche.....	151

## Tables des figures

Figure 1. Terminologie de la Classification Internationale du Fonctionnement.....	1
Figure 1-1: Statique UNECE et IFR 2003 sur la robotique de service. ....	9
Figure 1-2: Système du projet FRIEND.....	16
Figure 1-3 : Manipulateur mobile TOURO.....	18
Figure 1-4 : Unité mobile de MOVAID et son interface utilisateur. ....	18
Figure 1-5 : Prototype URMAD.....	19
Figure 1-6 : Manipulateur mobile MOVAR. ....	20
Figure 1-7 : Manipulateur mobile Walky.....	20
Figure 1-8 : Care-O-botII. ....	21
Figure 1-9 : Application linéaire entre l'espace des vitesses articulaires et opérationnelles...	24
Figure 1-10 : Ellipsoïde de manipulabilité en 3D. ....	30
Figure 1-11 : Bras manipulateur plan à deux liaisons rotoïdes. ....	31
Figure 1-12 : Ellipses et mesure de manipulabilité d'un bras plan. ....	33
Figure 1-13: Manipulateur du GRASP.....	32
Figure 1-14 : Manipulateur mobile utilisé par Nagatani et al. ([Nagatani02], [Nagatani96])	35
Figure 1-15 : Manipulateur mobile du LAAS.....	37
Figure 2-1 : Manipulateur mobile ARPH.....	44
Figure 2-2 : Repères liés au bras manipulateur .....	48
Figure 2-3 : Modélisation du bras Manus. ....	49
Figure 2-4 : Les angles d'Euler.....	50
Figure 2-5 : Le repérage de la plate-forme mobile par rapport au repère du monde. ....	54
Figure 2-6 : Les repères liés au systèmes mécanique.....	56
Figure 2-7 : Déplacement de la pince du bras manipulateur suivant l'axe $x_B$ avec une vitesse de 5 mm/cycle. ....	64
Figure 2-8 : Déplacement de la pince du bras manipulateur suivant l'axe $x_B$ avec une vitesse de 1mm/cycle. ....	65
Figure 2-9 : Trajectoire de l'organe terminal pour un déplacement en ligne droite suivant l'axe $x$ du repère du monde. ....	65
Figure 3-1 : Structure générale d'un bras manipulateur. ....	70
Figure 3-2 : a) Ellipses de manipulabilité et b) mesure de manipulabilité $w_B$ dans le plan pour Manus. ....	71

Figure 3-3 : Ellipses de manipulabilité pour un manipulateur à deux dimensions. ....	72
Figure 3-4 : a) Ellipses et b) mesures de manipulabilité du double pendule inversé. ....	74
Figure 3-5 : Manipulabilité du manipulateur mobile $w_5$ : a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme. ....	78
Figure 3-6 : Mesures normalisées de la manipulabilité du manipulateur mobile :	
a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme. ....	79
Figure 3-7 : Mesures normalisées de la manipulabilité du manipulateur mobile :	
a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme. ....	81
Figure 3-8: Conditions de simulation. ....	83
Figure 3-9 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du bras $w_B$ : a) évolution de la mesure de manipulabilité, b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	85
Figure 3-10 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du bras $w_{Bdir}$ : a) évolutions des mesures de manipulabilité $w_{Bdir}$ et $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	86
Figure 3-11 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du manipulateur mobile $w$ :	
a) évolutions des mesures de manipulabilité $w$ et $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	86
Figure 3-12: Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité normalisée du manipulateur mobile a) évolution de la mesure de manipulabilité, b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	87
Figure 3-13 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile a) évolutions des mesures de manipulabilité et $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	88
Figure 3-14 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité $w_B$ du bras manipulateur :	
a) évolution de la mesure $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	91
Figure 3-15 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité $w_{Bdir}$ du bras manipulateur a) évolution de la mesure $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT. ....	92

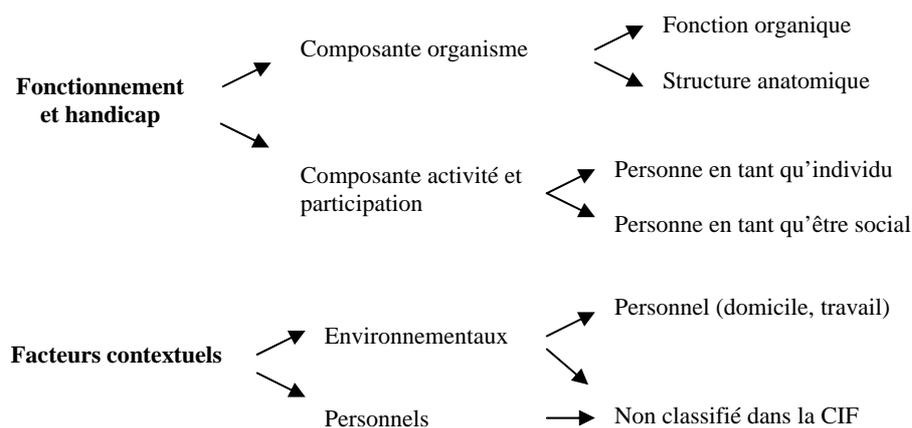
Figure 4-1 : Commande du robot par téléopération : un opérateur génère des commandes depuis une station de contrôle et reçoit des retours d'informations sur une interface graphique. ....	99
Figure 4-2 : Objectif éloigné. ....	102
Figure 4-3 : Objectif proche. ....	103
Figure 4-4 : Navigation à base d'un contrôleur flou : a) SIF, b) évolution de la partition de l'univers de discours .....	105
Figure 4-5 : Tables de règles pour la détermination des coefficients des vitesses :.....	106
Figure 4-6 : Situation de convergence vers le but. ....	106
Figure 4-7 : Navigation lorsque l'objectif est loin : a) configurations initiale et finale du manipulateur mobile, b) trajectoires de l'OT et de la plate-forme. ....	113
Figure 4-8 : Navigation dans le cas où objectif final est loin : a) configurations initiale et finale du manipulateur mobile, b) trajectoires de l'OT et de la plate-forme. ....	114
Figure 4-9 : État initial de la simulation. ....	116
Figure 4-10 : Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$ et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	116
Figure 4-11 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$ et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	117
Figure 4-12 : Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	118
Figure 4-13 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile et évitement d'obstacle: a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	118
Figure 4-14 : Plate-forme mobile à 5 cm d'une table de saisie. ....	120
Figure 4-15 : Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$ : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	121
Figure 4-16 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$ : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	122
Figure 4-17 : optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	122
Figure 4-18 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	123

Figure 4-19 : Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$ : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	124
Figure 4-20 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$ : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	124
Figure 4-21 : Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	125
Figure 4-22 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité $w_B$ et de l'orientation de la plate-forme. ....	126
Figure 4-23 : Phase de manipulation et de saisie d'un objet : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	128
Figure 4-24 : Exemple complet : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité $w_B$ . ....	129

# Introduction générale

## Introduction générale

Dans le domaine du handicap, la classification internationale CIH<sup>1</sup> de l'OMS<sup>2</sup>, basée sur le modèle de WOOD<sup>3</sup>, distingue trois notions : la déficience, l'incapacité et le handicap. La déficience est une altération ou une absence d'une fonction ou d'une structure anatomique, psychologique ou physiologique qui est pour une grande part du ressort de la médecine. L'incapacité correspond à une limitation des capacités fonctionnelles pour accomplir une activité normale alors que le handicap est la limitation de la personne en tant qu'acteur social. La nouvelle classification internationale CIF<sup>4</sup> élaborée dans les années 90 insiste sur la notion fondamentale de situation de handicap qui résulte de la confrontation d'un individu avec ses incapacités à un environnement non favorable.



**Figure 1. Terminologie de la Classification Internationale du Fonctionnement.**

La figure 1 précise la terminologie employée dans CIH-2 :

- Les fonctions organiques désignent les fonctions physiologiques des systèmes organiques (y compris les fonctions psychologiques).
- Les structures anatomiques désignent les parties anatomiques du corps, telle que les organes, les membres et leurs composantes.
- L'activité désigne l'exécution d'une tâche par une personne.

<sup>1</sup> Classification Internationale des Handicaps déficiences incapacités, désavantages, 1980

<sup>2</sup> Organisation Mondiale de la Santé

<sup>3</sup> Philippe WOOD rhumatologue anglais chargé par l'OMS d'élaborer une CIH.[WOOD88]

<sup>4</sup> Classification Internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIH-2, 2000)

- La participation désigne l'implication d'une personne dans une situation de vie réelle.
- Les facteurs environnementaux désignent l'environnement physique, social et attitudinal dans lequel les gens vivent et mènent leur vie.

La notion de déficience introduite ci-dessus désigne des problèmes dans la fonction organique ou la structure anatomique tels un écart ou une perte importante. Le handicap résulte quant à lui d'une part, des limitations d'activité désignant les difficultés que rencontre une personne dans l'exécution de certaines activités et, d'autre part, des restrictions de participation désignant les problèmes qu'une personne peut rencontrer en s'impliquant dans une situation de vie réelle.

L'introduction de la notion de situation de handicap a le mérite d'impliquer que toute personne peut à un moment donné se trouver en situation de handicap. La réduction de la situation de handicap peut être évaluée en termes d'activité de la personne et de participation ou d'implication dans la vie sociale.

Les sciences et technologies proposent plusieurs voies pour réduire le désavantage provoqué par une situation de handicap. Le domaine d'intervention se situe au niveau de l'environnement et/ou de l'individu. En restant au niveau de l'individu, si le but est de réduire l'incapacité plutôt que la déficience, les projets cherchent à restaurer une partie des capacités fonctionnelles perdues en s'appuyant sur une aide technique. Ce mémoire traite des machines complexes innovantes destinées à la suppléance fonctionnelle conçues à partir des méthodes et des techniques développées en robotique. La particularité de ces machines est de posséder des capacités de perception, d'action et de traitement de l'information. Cette dernière aptitude confère à la machine, dans une certaine mesure, la possibilité de diagnostic, de prise de décision et surtout d'interaction avec la personne au sens d'influence réciproque de ces deux entités. L'objectif n'est pas de réaliser une machine autonome mais au contraire, autant que faire se peut, de favoriser une coopération entre l'homme et la machine dans le but principal de rendre service à cette personne.

En France 11,6 % de la population utilise une aide technique. Les besoins en aides techniques qu'on peut appeler complexes et innovantes pour réduire une situation de handicap de mobilité ou de manipulation sont encore mal satisfaits. On peut estimer à 59% le taux de non satisfaction en fauteuil roulant électrique (ce qui concerne environ 17000 personnes), 35,3%

le taux de non satisfaction pour la manipulation à distance (~ 57000 personnes) et 17,3% le taux de non satisfaction pour la manipulation de livres (~ 40700 personnes). Le besoin d'une aide complexe lourde nécessitant l'utilisation de moyens robotiques ne concerne que quelques milliers de personnes voire quelques dizaines de milliers. C'est une constatation que le concepteur de l'aide doit garder à l'esprit. On ne peut pas compter sur un effet d'échelle pour réduire les coûts si on limite l'application à la seule suppléance fonctionnelle.

Depuis plusieurs années la robotique, jusque-là confinée au secteur industriel manufacturier, tend à s'ouvrir à d'autres secteurs comme la robotique de service. Les principaux usages dans le monde professionnel sont l'exploration, le nettoyage, le domaine médical (chirurgie téléopérée), la robotique sous-marine, la robotique spatiale, la sécurité civile etc. L'usage personnel de la robotique de service a tendance à se développer. On peut citer les robots de compagnie, les robots d'assistance, les robots de service (robots infirmiers, robots interlocuteurs pour les visites guidés de musées, robots déambulateurs,...).

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ARPH - Assistant Robotisé pour Personne Handicapée moteur - qui a pour objectif principal de concevoir une aide complexe innovante. Cette assistance permet à la personne d'aller chercher des objets à distance et de les manipuler. Elle est constituée d'un bras manipulateur embarqué sur une plate-forme mobile. Le bras, de type Manus<sup>®</sup>, a six degrés de liberté : 3 en position et 3 en orientation. Plusieurs capteurs renseignent sur l'état du système et son environnement. L'odométrie de la plate-forme mobile donne une indication sur sa position. Chaque articulation du bras manipulateur est équipée d'un codeur qui permet récupérer la valeur articulaire directement ou la position et l'orientation dans un repère lié au bras. Des capteurs à ultrasons équipent la base mobile et lui permettent de détecter des obstacles. Enfin, une caméra orientable en site et en azimut permet de renvoyer à l'opérateur humain une vue de la scène. La mobilité de la plate-forme est assurée par deux roues motrices indépendantes avec les problèmes de non holonomie qui y sont liés. Le bras est commandable axe par axe ou en coordonnées cartésiennes. La caméra introduite précédemment sert aussi d'organe de contrôle du mouvement de la plate-forme mobile. L'ensemble est commandé par un système client/serveurs développé sur un PC embarqué sur le système. Il communique avec un poste de supervision par une liaison TCP/IP HF.

Les problèmes de la stratégie de commande et de l'exécution d'une tâche par la coordination de la plate-forme mobile et du bras manipulateur, pour lesquels on trouve finalement peu de solutions dans la littérature, constituent le fil conducteur de ce mémoire. Ils correspondent à des préoccupations tout à fait concrètes dans le domaine de l'assistance à la manipulation. L'usage d'un manipulateur mobile représente une certaine source d'autonomie pour les personnes handicapées, permettant à ces personnes d'interagir avec leur environnement et d'alléger leur dépendance vis-à-vis de leur entourage. Un assistant robotisé à base d'un bras manipulateur embarqué sur une plate-forme mobile offre des possibilités accrues pour la locomotion et la manipulation. Malgré son grand intérêt, il présente néanmoins un certain nombre d'inconvénients dus à la complexité de sa commande et à la variabilité de l'environnement dans lequel il évolue. Les travaux de la littérature se focalisent généralement sur l'aspect interface homme-machine pour la commande et l'automatisation de certaines tâches particulières, mais peu de recherches abordent la stratégie d'exécution des tâches et de la coordination de la plate-forme et du bras manipulateur en tenant compte de l'environnement et de l'utilisateur. Les travaux de cette thèse s'intéressent, d'une part, à l'élaboration d'une stratégie capable d'amener le système dans les meilleures conditions pour une saisie de l'objet et, d'autre part, à l'exploitation de la redondance générée par l'association des degrés de liberté de la plate-forme et du bras manipulateur.

Pour mener à bien notre travail, nous avons commencé par établir les modèles nécessaires pour le développement de notre stratégie et qui n'étaient pas connus lors de l'achat du matériel. Nous avons premièrement défini et validé les modèles géométriques et cinématiques pour la partie bras manipulateur, la partie la plus importante pour la manipulation, ensuite pour l'ensemble du système qui tient compte de la mobilité de la plate-forme. La présence de la plate-forme mobile qui est non holonome fait intervenir un nouveau type de contraintes d'ordre différentiel dont il a fallu tenir compte. L'association des degrés de liberté du bras manipulateur et de la plate-forme mobile offre une flexibilité et plusieurs solutions pour exécuter une tâche opérationnelle. Pour placer le système dans les meilleures configurations possibles en terme de capacité de manipulation pour effectuer la tâche finale, nous avons utilisé le concept d'ellipsoïde de manipulabilité et les mesures basées sur son principe. Nous avons proposé de nouvelles mesures pour mieux évaluer la capacité de manipulation du système pour l'exécution de la tâche opérationnelle imposée à la pince. Pour respecter les principes qui permettent de faciliter la coopération homme-machine et d'exploiter la redondance du système, nous nous sommes inspirés du comportement humain

pour établir une stratégie qui prend en compte à la fois la volonté de l'utilisateur et la présence ou non des obstacle dans l'environnement.

Le mémoire est partagé en quatre chapitres. Le premier chapitre commence par présenter un aperçu des différents travaux dans le domaine de la robotique de la réhabilitation en générale, et l'utilisation des manipulateurs mobiles pour l'assistance en particulier. Ensuite, il rappelle les méthodes d'inversion du modèle cinématique pour l'exploitation de la redondance de ce type d'assistant. Le concept de manipulabilité des mécanismes et les mesures basées sur son principe sont abordés à la fin du chapitre. Ce concept introduit initialement pour les bras manipulateurs, puis étendu pour les manipulateurs mobiles, permet de mesurer la capacité de manipulation autour d'une configuration donnée. La thèse développe une approche basée sur ce type de mesures.

Le deuxième chapitre présente les modèles géométriques et cinématiques du système ARPH. Ces modèles sont nécessaires à la commande du robot et de son organe terminal afin de permettre la réalisation des tâches de saisie et de manipulation. Après un rappel synthétique des principes d'obtention des modèles des bras manipulateurs et du modèle retenu pour la plate-forme mobile ARPH, nous définissons les modèles géométriques et cinématiques du bras Manus, puis les modèles globaux de l'ensemble du manipulateur mobile. L'utilisation des modèles cinématiques réduits permet d'inclure la contrainte de non holonomie de la plate-forme dans les modèles.

Le troisième chapitre propose d'une part de nouvelles mesures de manipulabilité et évalue leurs apports pour la commande des manipulateurs mobiles. D'autre part, il présente notre contribution à l'amélioration des mesures de manipulabilité existantes pour les manipulateurs mobiles. Ensuite, la manipulabilité est appliquée à la commande du manipulateur mobile dans un environnement libre. Les résultats obtenus en simulation et sur le système réel permettent de comparer les différentes mesures de manipulabilité.

Le quatrième chapitre propose une stratégie permettant de répondre à un scénario usuel de saisie d'un objet par une personne distante. Le chapitre commence par décrire les différents types de modes de commande mis à la disposition de la personne pour interagir avec le manipulateur mobile. Puis sont dégagées, les principales étapes mises en jeu lors d'une tâche de saisie. La redondance du manipulateur mobile peut être exploitée pour répondre à des contraintes spécifiques. Nous précisons pour chaque situation les tâches et les contraintes permettant de calculer les commandes à envoyer au manipulateur mobile. Enfin nous montrerons les résultats de simulation qui permettront, d'une part, de comparer les

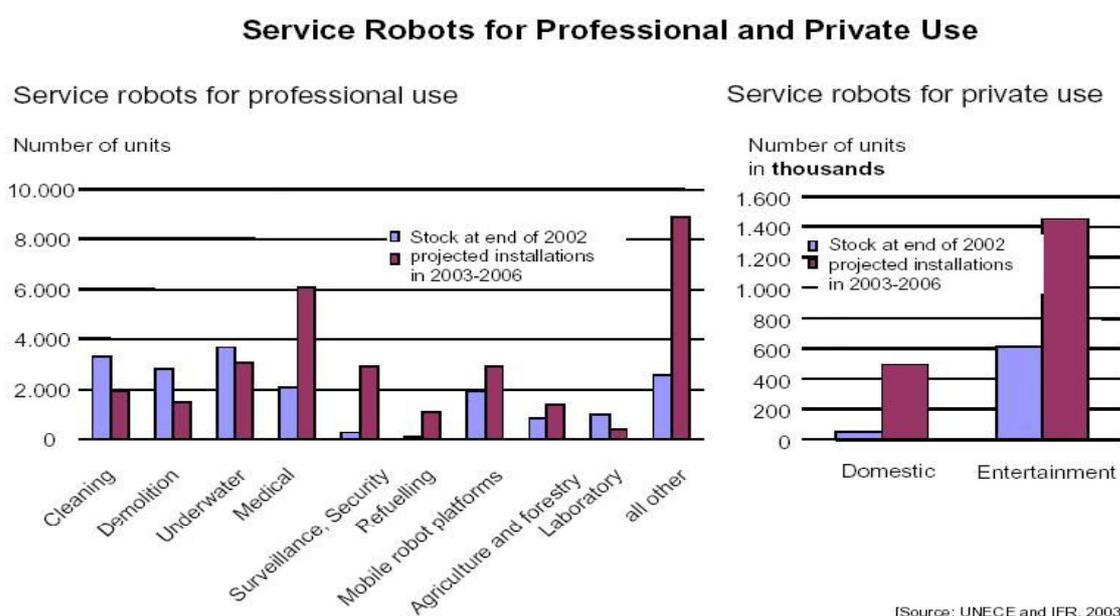
indices de manipulabilité présentés au chapitre 3, notamment l'indice de manipulabilité directionnelle et, d'autre part, de vérifier la validité et les limites de la stratégie de saisie proposée.

# Chapitre 1 : État de l'art



## 1 Introduction

Depuis plusieurs années, la robotique jusque-là confinée au secteur industriel manufacturier tend à s'ouvrir à d'autres secteurs comme la robotique de service. La figure 1-1 « statistique UCE/STAT/03/P01 » en donne les principaux usages dans le monde professionnel. L'usage personnel de la robotique de service a tendance à se développer. On peut citer les robots de compagnie, les robots d'assistance (robots infirmiers, robots interlocuteurs pour les visites guidés, robots déambulateurs).



**Figure 1-1: Statique UNECE<sup>1</sup> et IFR 2003 sur la robotique de service.**

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le projet ARPH pour Assistant Robotisé pour Personne Handicapée moteur, qui a pour objectif principal de concevoir une aide complexe innovante. Cette assistance permet à la personne d'aller chercher des objets à distance, de les manipuler.

Les tableaux suivants dressent un panorama des besoins de la population française à partir d'une étude réalisée en 1998 et 1999. Le Tableau 1-1<sup>2</sup> fait ressortir l'importance de la population concernée par une déficience.

<sup>1</sup> UNECE : United Nations Economic Commission for Europe

IFR : International Federation of Robotics

<sup>2</sup> Les tableaux sont tirés de l'ouvrage « le handicap en chiffres » Synthèse réalisée par Cécile BROUARD (CTNERHI), en coordination avec les membres du comité de pilotage : Nathalie DUTHEIL, Pascale GILBERT, Hélène MICHAUDON, Solveig VANOVERMEIR (DREES), Pierrette TISSERAND et Catherine VASLIN (DGAS), Marc MAUDINET, Annick PIQUET et Jésus SANCHEZ (CTNERHI).

**Tableau 1-1 : Population concernée par une déficience.**

Personne déclarant (% de la population)	
Être affectée d'une déficience	40,4
Recourir à une aide technique	11,6
Recourir à une aide humaine	10,3

Le Tableau 1-2 précise les besoins en aides techniques qui s'adressent aux personnes handicapées moteur. On se rend compte que le besoin pour des aides complexes est peu satisfait. Dans le meilleur des cas, le fauteuil roulant électrique, on atteint un taux de satisfaction de 59%.

**Tableau 1-2 : Les besoins en aides techniques complexes pour la mobilité et la manipulation.**

Besoin en aide	Besoin satisfait	Besoin non satisfait	Satisfaction (%)
Mobilité/Déambulateur	149 900	17500	90
Mobilité/Fauteuil roulant	189 700	19400	91
Mobilité/Fauteuil roulant électrique	24 900	17100	59
Manipulation à distance	31200	57100	35,3
Manipulation de livre	8500	40700	17,3

Ce même tableau fait apparaître un besoin important pour une assistance à la manipulation. Cependant d'autres études soulignent que le besoin d'une aide complexe lourde nécessitant l'utilisation de moyens robotiques ne concerne que quelques milliers de personnes voire quelques dizaines de milliers. C'est une constatation que le concepteur de l'aide doit garder à l'esprit. On ne peut pas compter sur un effet d'échelle pour réduire les coûts si on limite l'application à la seule suppléance fonctionnelle. Il est indispensable d'élargir le champ des applications potentielles d'une telle aide et donc de prévoir un système très modulaire capable de s'adapter à des besoins variés.

---

Les données chiffrées des tableaux présentés dans ce document proviennent de deux enquêtes :  
 [Goillot2002] Goillot C., Mormiche P., Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» auprès des personnes vivant à domicile en 1999, INSEE Résultats, collection Société, n°6, 2002.  
 [Goillot2001] Goillot C., Mormiche P., Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» en institution en 1998, INSEE Résultats, collection Démographie-Société, n°83-84, 2001.

Le Tableau 1-3 rappelle que souvent le handicap se conjugue au pluriel. Il se posera la question de l'interopérabilité avec d'autres systèmes d'assistance à des fonctions vitales, de communication ou encore de perception.

**Tableau 1-3 : Pluridéficiences.**

Lieu	Monodéficiences (%)	Pluridéficiences (%)	Déficiences non précisées (%)	Sans (%)	Population (millions)
Domicile	18	10	11	61	57,41
Institution	42	53	3	2	0,66

L'aide du projet ARPH s'appuie sur de moyens robotiques. Le concept originel est une main mobile capable d'aller chercher un objet n'importe où dans le domicile de la personne qu'elle soit ou non dans la même pièce. Le passage de l'idée de main mobile à sa réalisation s'est traduit par un bras manipulateur semi-autonome ([Hoppenot02], [Colle00], [Rybarczyck04b]). Le projet s'intéresse donc à deux axes : la robotique pour une certaine autonomie et la coopération homme-machine. Les travaux de la thèse se sont focalisés sur l'élaboration d'une stratégie destinée à placer le bras manipulateur dans de bonnes conditions pour la saisie future de l'objet en exploitant quand c'est possible la redondance du système. Ce chapitre rappelle les différentes configurations d'aides robotisées permettant la manipulation d'objets. Puis il dresse un bilan des méthodes d'inversion du modèle cinématique et présente la notion de manipulabilité. Ces connaissances seront utilisées dans les chapitres suivants pour l'élaboration de la stratégie.

## 2 Robotique d'aide à la manipulation

Le principe de l'assistance robotique est d'offrir à la personne handicapée un moyen d'interagir avec son environnement en mettant à sa disposition certaines capacités d'action, de perception et dans une moindre mesure d'aide à la décision. Trois configurations de systèmes robotisés peuvent être considérées :

- **Stations de travail à poste fixe** : ces stations sont constituées d'un bras manipulateur, généralement industriel, et d'un environnement de travail prédéfini et structuré. Les objets sont identifiés et accessibles à l'intérieur du champ de travail du robot. Ces systèmes sont dédiés à la bureautique. Ils ont été élaborés sur la base de la conception des cellules de travail ou d'assemblage industriel. Le robot est commandé avec des interfaces standards. Ces bras

permettent d'exécuter des tâches prédéfinies en mode automatique. Les principaux inconvénients de ce type de systèmes sont : leur espace de travail borné, ce qui diminue la flexibilité et le nombre de tâches possibles à réaliser, la position des objets de l'environnement qui doit être fixe.

- **Bras manipulateurs embarqués sur un fauteuil roulant :** coupler un bras manipulateur avec un fauteuil roulant augmente l'espace de travail du bras manipulateur. Contrairement aux stations de travail, les bras manipulateurs évoluent dans un environnement non-structuré et leurs tâches ne sont plus limitées aux seules fonctions bureautiques. Leur espace de travail devient ainsi plus important et les tâches à réaliser plus diversifiées. Du fait de leur mobilité et de leur proximité des humains, ces systèmes doivent avoir des propriétés intrinsèques et extrinsèques qui leur permettent d'interagir avec l'utilisateur et son environnement. La conception des systèmes tient compte de l'aspect sécurité et ergonomie.
- **Manipulateurs mobiles :** ce sont des bras manipulateurs embarqués sur des plates-formes mobiles. Ils sont commandés à distance. Ils ont l'avantage d'exécuter les tâches dans un environnement ouvert (comme ceux de la deuxième classe) ; de plus leur indépendance par rapport à un fauteuil facilite leur mobilité. Ils constituent la solution la plus flexible afin d'améliorer l'autonomie de la robotique d'assistance, mais ils sont plus complexes et difficiles à commander.

Les premiers travaux dans le domaine de la robotique de la réhabilitation (d'aide aux personnes handicapées) datent du début des années 60 ([Hillman03]). Certains projets ont abouti à des produits commercialisables ([Mahoney97]). En France, la robotique d'aide aux personnes handicapées motrice est apparue en 1985 avec le projet Spartacus ([Kwe85], [Kwe95]). Le but du projet était d'étudier la faisabilité de l'utilisation de robots manipulateurs par des personnes tétraplégiques. Une station de travail robotique, basée sur le télémanipulateur MAT2 du CEA<sup>3</sup>, a été installée et évaluée au sein de l'hôpital Raymond Poincaré de Garches. Ce travail a mené aux projets Manus en Hollande et Master en France ([Hillman99]). En 1987, en Grande-Bretagne est né, à l'université de Staffordshire, un important projet dans le but d'aider un enfant tétraplégique de 13 ans à manger de façon autonome. De cette idée est née la société Rehab qui est aujourd'hui la société qui vend le

---

<sup>3</sup> CEA : Commissariat de l'Énergie Atomique

plus grand nombre de robots pour personnes handicapées ([Topping01]). En Europe, une bonne partie des projets a été financée par la communauté Européenne essentiellement via les programmes Esprit et TIDE<sup>4</sup>.

## 2.1 Stations de travail fixes

Actuellement les stations de travail robotiques les plus répandues dans le monde sont : MASTER-RAID, MASTER-RAID II en Europe, AFMA MASTER en France, Devar/ Provar aux Etats-Unis.

**MASTER<sup>5</sup>-RAID<sup>6</sup>** : en 1985, le CEA s'est lancé suite aux enseignements du projet Spartacus dans le développement d'une station de travail composée d'un bras robotique de type RTX se déplaçant sur des rails. L'environnement structuré de la station est constitué de divers espaces de rangement, d'un bureau, de divers périphériques de communication (téléphone, télécopieur, imprimante) et d'un ordinateur personnel pour la gestion des différentes interfaces de commande. Des améliorations ont été apportées lors du projet Européen EPI et ont donné naissance à la station Master2.

Des améliorations ont été apportées lors du projet Européen RAID (1991-1993) issu du programme TIDE et qui a regroupé plusieurs équipes de recherches et d'industriels. Cette station est équipée d'un bras RTX modifié (RT100) monté sur un rail linéaire.

**MASTER-RAID II** : la station a été ensuite développée par différents groupes de recherche sous le programme TIDE : le CEA en France (1993-1999), Papworth Group en Grande-Bretagne et CERTEC de l'université de Lund en Suède. Des améliorations apportées dans ce projet sont : la réduction de l'espace occupé par la station RAID, l'utilisation du robot RT200 et des versions améliorées des organes terminaux. L'interface homme-machine est celle de Master1.

**AFMA MASTER** : l'Association pour la **P**romotion des **P**late-forme **R**obotique **C**oncernant les personnes **H**andicapées (APPROCHE) a confié la fabrication d'une station similaire à RAID-MASTER à une entreprise française « AFMA-ROBOTICS » ([W-Afma]). La station utilise un robot SCARA fabriqué à la place du robot RTX. Cette station s'appelle désormais AFMASTER.

---

<sup>4</sup> TIDE : Technology Initiative fo Disbled and Elderly people

<sup>5</sup> MASTER : Manipulator Autonomous at Service of Tetraplegics for Environnement and Rehabilitation

<sup>6</sup> RAID Robot to Assist the Integration of Disabled

**DeVAR<sup>7</sup> / ProVAR<sup>8</sup>** : le projet DeVAR a été développé de 1989 à 1994 dans un programme de recherche initié par l'université de Stanford en collaboration avec le centre médical VA. DeVAR ([Van der Loos95]) utilise un PUMA-260 monté à l'envers au dessus du bureau sur un rail autorisant une translation de façon à maximiser sa zone de travail sur le bureau. Le bras manipulateur est équipé d'une pince de type Otto-Bock Greifer pour assurer la fonction de préhension. DeVAR permet également d'utiliser le téléphone et d'agir sur la domotique du bureau par le biais du système de reconnaissance vocal. Le projet DeVAR, renommé ProVar (1996-1999), a permis d'améliorer et de finaliser la version commercialisable en permettant l'accès à internet ([Hillman99]).

**CAPDI** : le projet de CAPDI (cuisine adaptée pour l'handicapé) vise à développer un poste de travail fixe dans une cuisine ([Casals00]). Ce projet est composé d'une partie mécanique ainsi que d'une partie logicielle. Le système se compose d'un robot manipulateur monté sur une voie accomplissant des tâches typiques dans un environnement de cuisine. Afin de faciliter la tâche au robot et à l'utilisateur, une partie des composants de cuisine ont été motorisés. L'interface permet un usage intuitif du robot. Elle permet de sélectionner chaque élément de façon simple. La distribution des caméras autour de la cuisine facilite le repérage automatique des éléments à manipuler.

**Handy** : le robot Handy ([Topping99]) a été développé en 1987 pour apporter une certaine autonomie aux personnes handicapées et plus particulièrement pour leur permettre de manger et de boire sans l'assistance d'une tierce personne. Les tâches exécutées par le robot sont automatiques. Des tâches programmées de nutrition peuvent être activées à l'aide d'une commande à un seul contacteur. Avec plus de 300 utilisateurs, c'est actuellement l'aide technique robotique la plus utilisée. L'utilisateur dispose pour chaque application d'un plateau auquel est associé un certain nombre de tâches programmées. Sur un petit panneau placé en face de l'utilisateur, une lumière scrute en continu les fonctions disponibles ; et au passage de la lumière par témoin de la fonction désirée, l'utilisateur pousse le contacteur qui déclenche la tâche ([Topping01]).

---

<sup>7</sup> DeVar : Desktop Vocational Assistant Robot

<sup>8</sup> ProVar : PROfessional Vocational Assistant Robot

**My Spoon** : c'est un robot à 5 degrés de liberté, de petite taille (28cm × 37cm × 25cm) et le petit poids (6 kg) ([W-Secom]), conçu pour aider les utilisateurs à mobilité réduite à manger. Il a été développé au Japon dans le Laboratoire de Systèmes Intelligents (IS) à SECOM ([Ishii95]). Les aliments sont placés dans un plateau à compartiments. L'organe terminal du bras, formé par une spatule et une cuillère, est commandé par l'utilisateur à l'aide d'un pointeur optique monté sur la tête qu'il dirige sur un petit panneau à cellules photoélectriques. A partir de mai 2002 une version finale de My Spoon a été commercialisée au Japon. Cette version est manipulée par un simple contacteur ou un joystick 4 directions placé près du menton de l'utilisateur.

Certains auteurs classent ce type de robots (Handy et My spoon) dans une quatrième catégorie, appelée « **robots à tâche spécifique ou uni-fonction** » ([Abdul-Razak04]). Cette catégorie regroupe les systèmes légers conçus pour réaliser une seule tâche et sont donc simplifiés par rapport aux autres systèmes d'aide à la manipulation.

## **2.2 Bras manipulateurs montés sur un fauteuil électrique**

**Manus** : actuellement, le bras manipulateur embarqué le plus répandu sur le marché est le robot Manus, fabriqué par Exact dynamics ([W-Exact]) en Hollande avec plus de 200 unités vendues dans le monde. C'est un bras manipulateur à six degrés de liberté, avec une pince à l'extrémité du bras qui autorise la saisie des objets dont le poids ne dépasse pas 1.5 Kg et de diamètre allant jusqu'à 9 cm. L'ensemble du système est commandé principalement par un clavier à 16 touches (Keypad 4×4), par une seule touche d'un clavier, par un joystick ou en mode transparent via un ordinateur. Dans la version de base du Manus commercialisée actuellement, le logiciel de contrôle permet de choisir 5 modes de commandes : modes pliage et dépliage, mode cartésien, mode articulaire et le mode principal qui sert de menu de base. Des travaux récents ont porté sur l'amélioration de l'interface homme machine et le développement de nouveaux modes de commande : mode point à point, mode relatif, mode pilot ([Abdul-Razak04], [Abdul-Razak03], [Mokhtari03]).

**FRIEND** : le projet FRIEND cherche à procurer une commande facile d'un bras Manus embarqué sur un fauteuil ([Martens01]) (Figure 1-2). Pour cela un ensemble d'actions est préenregistré, puis répété ensuite par le système contrôlant le bras Manus. Les actions sont enregistrées par l'intermédiaire d'un gant dont les positions sont enregistrées puis ensuite le

système lit cet ensemble de positions en plaçant la pince du bras Manus aux mêmes positions. L'opérateur utilise donc le bras Manus en accédant à une bibliothèque d'actions.

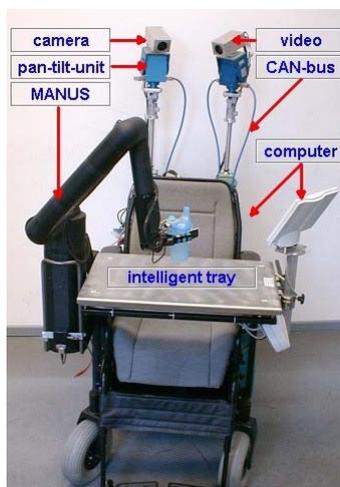


Figure 1-2: Système du projet FRIEND.

**RAPTOR** : Raptor est conçu en 2000 par Applied Resources Corp. (RTD-ARC, New Jersey, aux Etats-Unis) ([Mahoney01]). Raptor est un robot à 4 degrés de liberté plus une pince pour la préhension des objets. Il est embarqué sur un fauteuil électrique qui lui permet d'augmenter son espace de travail et l'accès aux objets. De la même façon que Manus il peut être commandé au clavier, au joystick et au simple clic. Son avantage par rapport à Manus est son prix: 10.000\$.

**WESTON** : BIME (Bath Institute of Medical Engineering) s'est lancé dans le développement d'un manipulateur monté sur un fauteuil roulant électrique ([Hagan97]), ([Hillman02]). Un bras de type SCARA est monté sur un rail vertical à l'arrière d'un fauteuil. Le bras manipulateur est équipé d'une pince symétrique ayant des caractéristiques de compliance. Le choix de la position du manipulateur est justifié par la volonté d'obtenir un maximum de visibilité. Le bras est commandé par un joystick. Certaines tâches du bras sont automatisées.

**KARES** : depuis 1997 des équipes du KAIST (Korean advanced Institute of Science and Technology) ont lancé un programme de recherche de neuf ans dans le domaine ([Jung99]). Le développement de Kares a commencé en 1996 au laboratoire d'ingénierie électronique à KAIST. Le système est composé d'un fauteuil électrique sur lequel est embarqué un bras manipulateur à 6 degrés de liberté équipé d'un poignet sensible et d'une pince à deux mors

symétriques sur laquelle est montée une caméra. Les principaux inconvénients de ce bras manipulateur sont sa charge utile maximale de 500g et son poids de 22.9 Kg.

### **2.3 Bras manipulateurs montés sur un porteur / plate-forme mobile**

**TAURO** : les travaux sur le robot mobile TAURO ([Matiskis02], [Matiskis03], [W-Tauro]) ont été menés au département d'informatique de l'université de technologies d'Aachen en Allemagne (Aix la chapelle). Le système est développé pour des tâches d'inspection, d'inventaire et de documentation dans les environnements d'intérieur. Il est conçu pour aider la personne par l'automatisation des tâches uniformes et répétitives. Le système est conçu à base de composants standards, tels qu'une base correspondant à un châssis de fauteuil roulant électrique, une caméra CCD, des capteurs ultrasons et deux PCs communs. L'architecture logicielle de TAURO est basée sur le concept de tableau pour la communication entre différents modules. Chacun de ces modules est un expert en matière de sous-ensemble spécifique du problème général de commande du robot. Une base de données commune, la base des connaissances, est employée pour stocker les données fournies par chaque expert et par les capteurs du robot. Les données stockées peuvent alors être traitées par d'autres modules pour résoudre un sous-ensemble, contribuant à la solution générale. Un module spécial, l'unité de commande du tableau, est responsable de l'activation et de la coordination des experts et de leur fournir les données exigées. Les recherches menées dans ce projet concernent l'exploration autonome, la planification de trajectoire et la construction de cartes aussi bien que le développement de nouveaux concepts de capteurs pour l'acquisition d'informations 3D. Des travaux en cours sur le même projet portent sur l'utilisation d'un modèle virtuel du système et l'utilisation des réseaux de neurones. Outre la navigation, TAURO apporte une aide à la préhension. Il suffit de cliquer sur un objet dans une image pour qu'il soit saisi automatiquement. Cette fonctionnalité est complètement basée sur de la vision et ne fonctionne que dans certains cas où l'objet se démarque très fortement du fond.



Figure 1-3 : Manipulateur mobile TAURO.

**NOMAD / Manus** : l'équipe Italienne du RIMLab ([W-RIMLAB]) développe actuellement une application utilisant les connaissances liées au pilotage du Nomad, robot de développement bien connu. Sur celui-ci a été monté une version sans élévateur du bras Manus.

**MOVAID**<sup>9</sup> : le projet européen TIDE MOVAID (1994-1997) est une assistance à domicile déjà évaluée chez des particuliers en Italie. Ce robot effectue de nombreuses tâches, il peut laver des surfaces au sol, chercher des plats dans le micro onde, assister une personne handicapée pour manger. Movaid navigue en évitant les obstacles grâce aux échanges de données entre la base et les stations. Il se recharge tout seul en rejoignant une balise l'alimentant. La base est un véhicule à trois roues, dont deux motrices, et est équipée entre autres de capteurs ultrasonores, d'un bras Dexter se terminant par une main Marcus, et d'une caméra pan-tilt. Divers degrés d'autonomie ([Laschi01]) existent qui vont de la réalisation d'une tâche préprogrammée par le robot seul à une téléopération complète par l'utilisateur.

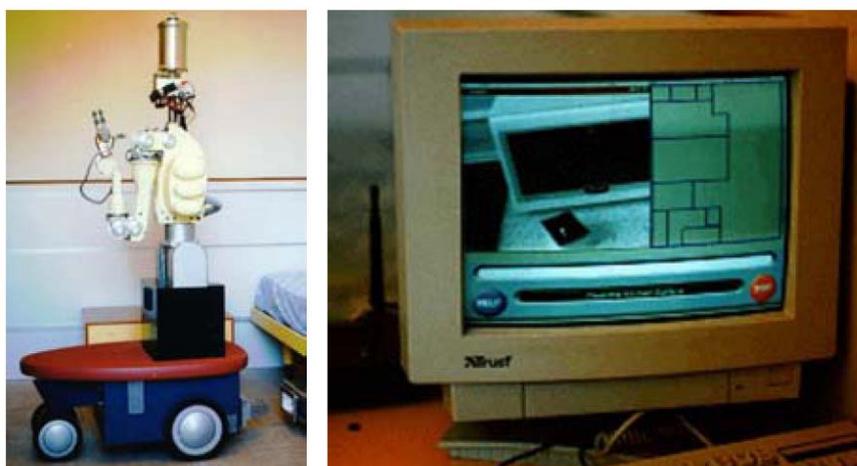


Figure 1-4 : Unité mobile de MOVAID et son interface utilisateur.

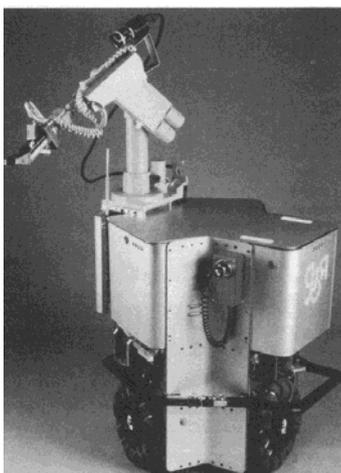
<sup>9</sup> Movaid : MObility and actiVity AssIstance system for the Disabled

**URMAD** : le projet URMAD (1991-1994) s'adresse aux personnes handicapées ainsi qu'aux personnes âgées. URMAD ([Gugliemelli94]) est un acronyme dérivé des mots Italiens pour « Unit & Robotica Mobile per l'Assistenza ai Disabili » qui signifie unité robotique mobile pour l'assistance aux handicapés. Il propose une solution robotique pour réaliser des tâches quotidiennes. Équipé de capteurs ultrasons et de deux caméras fixes sur la plate-forme, il est capable de naviguer dans un milieu partiellement structuré d'un point à un autre de l'appartement en évitant les obstacles. Une troisième caméra pan-tilt est utilisée pour la reconnaissance des objets connus. Un manipulateur redondant à huit degrés de liberté est embarqué sur la plate-forme mobile. L'organe Terminal du bras manipulateur est une pince à trois doigts munie de capteurs tactiles. Des facilités sont intégrées pour la préhension des objets au sol et sur les tables.



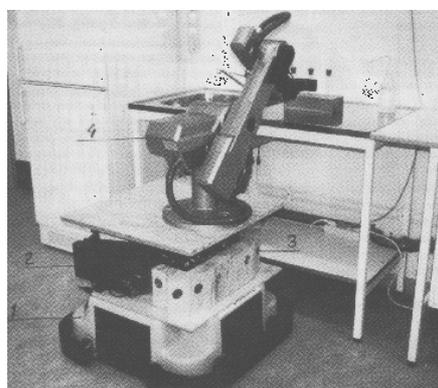
**Figure 1-5 : Prototype URMAD.**

**MoVAR** : le projet MoVAR (1983-1988) ([Van der Loos95]) utilise une plate-forme mobile omnidirectionnelle originale à 3 roues. Le bras robot monté sur la plate-forme mobile est un robot industriel de type PUMA-250. L'architecture générale a été conçue pour passer les portes et de façon que le bras robot soit à hauteur de bureau. La plate-forme mobile comporte un pare-choc permettant de réagir face aux obstacles touchés. La pince est dotée d'un système original: des capteurs de proximité pour faciliter la saisie d'objets, ainsi qu'un capteur de pression pour la pince. Une caméra filme également la pince. La console de contrôle du robot est composée de trois moniteurs: le premier comporte la planification de trajectoire, le second l'état des divers éléments du robot, et le troisième comporte la vue de la caméra. Le robot peut être commandé au clavier, à la voix ou avec les mouvements de la tête.



**Figure 1-6 : Manipulateur mobile MOVAR.**

**WALKY :** Walky est un manipulateur mobile constitué d'un robot manipulateur de type SCOROBOT ER VII à 5 degrés de liberté, embarqué sur la plate-forme mobile LabMate ([Neveryd98]). Le système est basé sur des capteurs à ultrasons. Il a été conçu pour aider des personnes handicapées à travailler dans des lieux tels que des laboratoires de chimie, de biologie ou de médecine. Cette base est capable d'éviter les obstacles en utilisant les ultrasons. Toutefois si un obstacle est touché, le pare choc déclenche l'arrêt d'urgence.



**Figure 1-7 : Manipulateur mobile Walky.**

**Care-O-bot I /II :** Care-O-bot est un robot mobile de service développé par le Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (IPA) de Stuttgart (Allemagne) ([Schaeffer99]). La première plate-forme mobile a été construite en 1998. La plus fameuse application de ce robot est celle de guide au Musée de la Communication de Berlin. Initialement, il n'est pas désigné pour des handicaps lourds : il peut servir de déambulateur intelligent mais son rôle est principalement celui d'interlocuteur grâce notamment à un système de reconnaissance vocale de mots-clefs. Ses champs d'application restent

principalement des environnements fortement perturbés par la présence d'un public nombreux tels des musées, des halls d'exposition ou des parcs à thème. La version la plus récente de ce robot est équipée d'un bras manipulateur (Care-O-bot II) pour permettre la manipulation d'objets ([Graf02]). Dans ce cas, le robot remplit sa mission de manière parfaitement autonome dans la mesure où sa mission est compréhensible et réalisable. Du point de vue conceptuel, le robot est non-holonome. Il est équipé de deux roues motrices et de quatre roues stabilisatrices. Les capteurs qui l'équipent sont, outre l'odométrie des roues motrices, un gyroscope et une caméra laser 2D. La localisation du robot dans son environnement est assurée par les données odométriques qui fournissent sa position absolue et par le gyroscope qui indique son orientation. La caméra laser est utilisée activement pour la navigation et l'évitement d'obstacles. Le système de navigation de Care-O-bot est basé sur le concept de bande élastique (elastic band) ([Quinlan93]) développée initialement pour des systèmes holonomes, puis adaptée aux robots tels Care-O-bot ([Wandosell02]). La bande élastique désigne un chemin déformable évitant les obstacles et soumis à des forces artificielles. Ce chemin est représenté à travers une séquence de bulles connectées entre elles. Ces bulles sont créées en examinant les espaces libres le long de la trajectoire préétablie du robot. La bande élastique se déforme en temps réel pour prendre en compte un éventuel obstacle et le contourner.



**Figure 1-8 : Care-O-botII.**

### 3 Schémas de contrôle: Inversion cinématique pour l'exploitation de la redondance

L'exploitation de la redondance est importante pour acquérir plus de dextérité lors de l'exécution des tâches de manipulation (une manipulation plus appropriée). Les degrés de liberté peuvent conventionnellement être exploités pour satisfaire des contraintes supplémentaires tels que l'évitement des singularités ([Marani02], [Yoshikawa90]), l'évitement des obstacles ([Sciavicco88], [Baillieul86]), la réduction de l'effet inertiel ([Kang01a]).

Généralement il existe deux possibilités pour résoudre le problème de redondance au niveau différentiel (vitesses). La première approche consiste à augmenter l'espace de la tâche, alors que la deuxième approche consiste à rajouter un terme d'optimisation locale d'une contrainte scalaire à la solution obtenue par la pseudo inverse. Par conséquent le critère est proportionnel au gradient du critère projeté sur le noyau de la matrice jacobienne pour ne pas affecter l'exécution de la tâche opérationnelle.

Nous utilisons dans la suite de ce mémoire les indices  $_B$  pour les mesures et les grandeurs liées aux bras manipulateurs pour les distinguer des celles liées aux manipulateurs mobiles.

#### 3.1 Méthodes basées sur l'augmentation de l'espace de la tâche

Une technique effective pour résoudre la redondance est d'étendre la dimension de l'espace de la tâche originale en imposant un nombre de contraintes décrites en fonction de variables de configuration ([Sciavicco88], [Seraji93]). Pour résoudre la redondance des robots manipulateurs, Sciavicco et Siciliano ([Sciavicco88]) utilisent deux contraintes additionnelles pour l'évitement d'obstacles et des limites articulaires. Dans le cadre de la commande d'un manipulateur mobile, Seraji ([Seraji93], [Seraji95]) adopte une approche de commande de configuration dans laquelle un mouvement articulaire approprié est choisi parmi les solutions possibles qui permet au système robotique d'accomplir une tâche additionnelle spécifiée par l'utilisateur en plus de la tâche opérationnelle. Cette tâche additionnelle est effectuée directement en définissant un ensemble de  $r = n - m$  ( $r$ : degré de redondance) fonctions  $\phi = g(q)$  contrôlant bien le mouvement de l'OT.

Le principe de l'approche consiste à augmenter les  $m$  coordonnées opérationnelles  $x$  de l'organe terminal par  $r$  fonctions cinématiques  $\phi$  pour obtenir un vecteur de configuration  $X$  de dimension  $n$  tel que :

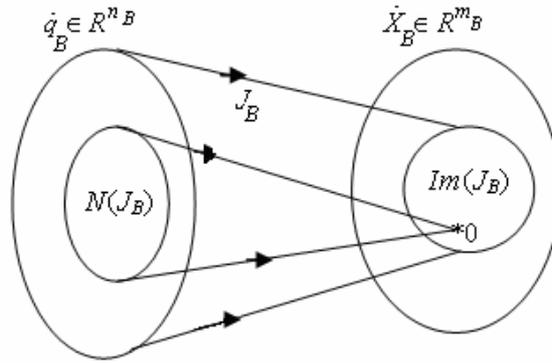
$$X = \begin{pmatrix} x \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(q) \\ g(q) \end{pmatrix} = h(q) \quad (1)$$

En dérivant l'équation (1), on obtient la cinématique augmentée du système robotique composé. Cette approche de résolution de la redondance est générale puisque chaque fonction cinématique  $\{\phi(t)\}$  peut représenter une variable géométrique (par exemple : les coordonnées d'un point du robot), une variable physique (tel que le moment de gravité de l'articulation) ou une fonction mathématique abstraite (ex : projection du gradient d'une fonction objective). Cependant, l'utilisateur n'est pas obligé de fixer un ensemble de fonctions cinématiques, il peut sélectionner différents  $\{\phi(t)\}$  dépendants des exigences de la tâche durant l'exécution du mouvement de l'OT. Une fois que les fonctions cinématiques  $\{\phi(t)\}$  ont été sélectionnées, l'utilisateur définit les variations désirées dans le temps de ces fonctions  $\{\phi_{ii}(t)\}$ . Dans ce cas la redondance est utilisée pour satisfaire certaines contraintes cinématiques.

L'inconvénient principal de cette technique est dû aux nouvelles singularités qui surviennent dans des configurations pour lesquelles la matrice jacobienne est de rang plein. Ces singularités, appelées singularités algorithmiques, se produisent quand la tâche supplémentaire est en conflit avec la tâche de l'OT ou les contraintes elles-mêmes sont en conflit. Une approche semblable, avec le même inconvénient, est l'approche de la jacobienne étendue ([Tchon02], [Baillieul86]). Pour remédier à ce problème, une autre stratégie est utilisée. Cette stratégie, appelée stratégie de priorité des tâches, a été initialement proposée par Hanafusa et al. ([Hanafusa81], [Yoshikawa84]) pour l'exécution d'une tâche opérationnelle et pour assurer une contrainte supplémentaire lorsque la redondance le permet.

### **3.2 Méthodes basées sur l'optimisation de contraintes**

Le principe développé initialement pour les bras manipulateurs consiste à exploiter le noyau de l'application linéaire liant les vitesses opérationnelles et généralisées (Figure 1-9) pour optimiser une ou plusieurs fonctions dépendant des configurations du système.



**Figure 1-9: Application linéaire entre l'espace des vitesses articulaires et opérationnelles.**

Dans les cas redondants ( $m_B < n_B$ ), une solution plus générale consiste à projeter un vecteur arbitraire  $Z$  (dans l'espace articulaire) sur le noyau de  $J_B$  permettant ainsi de sélectionner une solution parmi les autres :

$$\dot{q}_B = J_B^+ \dot{X}_B + (I_{n_B} - J_B^+ J_B) Z \quad (2)$$

Où :  $\dot{q}_B$  est le vecteur des vitesses articulaires,  $\dot{X}_B$  est le vecteur des vitesses opérationnelles, et  $Z$  est un vecteur arbitraire de dimension  $n_B$  et  $J_B^+$  est la pseudo inverse de la matrice jacobienne du bras (voir annexe A).

Le vecteur  $Z$  peut être exploité pour optimiser un critère désiré sans affecter la tâche principale. Plusieurs propositions ont été faites : évitement d'obstacles ([Yoshikawa90]), évitement des butées articulaires et des singularités ([Baerlocher98], [Sciavicco88]). Plusieurs critères normalisés peuvent être fusionnés en un seul critère ([Cleary90]).

Lorsqu'un conflit entre les tâches survient, un compromis est trouvé entre les tâches ayant la même priorité, mais aucune n'est réalisée. Pour les manipulateurs fortement redondants qui peuvent accomplir plusieurs tâches (contraintes) simultanément, il est intéressant d'avoir des niveaux de priorités tel que lorsqu'il y a un conflit, une tâche sera favorisée par rapport aux autres. Cette méthode a été proposée par Yoshikawa et al. ([Yoshikawa84]) pour deux tâches et utilisée pour la commande avec évitement de collision ([Yoshikawa90]).

Soient deux tâches  $T_1 = (J_{B1}, \dot{X}_{B1})$ ,  $T_2 = (J_{B2}, \dot{X}_{B2})$  telle que  $T_1$  est prioritaire par rapport  $T_2$ .

En remplaçant la solution  $\dot{q}_B$  donnée par l'équation 2 dans celle de la deuxième tâche qu'on désire approximer le plus sans perturber l'exécution de la tâche principale ( $\dot{X}_2 = J_{B2} \dot{q}_B$ ), on obtient l'équation suivante :

$$\dot{X}_{B2} = J_{B2} J_{B1}^+ \dot{X}_{B1} + J_{B2} (I - J_{B1}^+ J_{B1}) Z \quad (3)$$

D'où on détermine la valeur de  $Z$  :

$$Z = [J_{B2} (I - J_{B1}^+ J_{B1})]^+ (\dot{X}_{B2} - J_{B2} J_{B1}^+ \dot{X}_{B1}) \quad (4)$$

Ainsi après remplacement dans l'équation 2 et simplification, on obtient la solution suivante :

$$\dot{q}_B = J_{B1}^+ \dot{X}_{B1} + [J_{B2} (I - J_{B1}^+ J_{B1})]^+ (\dot{X}_{B2} - J_{B2} (J_{B1}^+ \dot{X}_{B1})) \quad (5)$$

Le point difficile de cette formulation est le besoin de calculer l'inverse de  $J_{B2} (I - J_{B1}^+ J_{B1})$ . Cette matrice donne la possibilité d'exécuter la deuxième tâche sans affecter la tâche principale. Elle devient singulière lorsque la réalisation de la deuxième tâche s'oppose à l'exécution de la tâche principale. Donc, dans les situations de conflit entre les tâches principale et secondaire, la matrice  $J_{B2} (I - J_{B1}^+ J_{B1})$  devient singulière. Ce type de singularité est appelé singularités algorithmiques. Pour limiter ce problème, plusieurs auteurs ([Nakamura91], [Maciejewski90]) ont utilisé une technique de régularisation appelée méthode des moindres carrés amortis, qui borne la norme de la solution, mais qui engendre une erreur de poursuite. Ainsi, il est nécessaire de faire un compromis entre la précision et la norme de la solution.

Siciliano ([Siciliano91]) a généralisé cette approche initiale pour un nombre arbitraire de tâches. Bayle et al. ([Bayle00a], [Bayle00b]) a utilisé la formulation initiale à deux tâches pour l'exploitation de la redondance d'un manipulateur mobile non holonome.

La deuxième possibilité d'exprimer la priorité entre deux tâches est donnée par la formule suivante ([Chiaverini97], [Antonelli03]) :

$$\dot{q}_B = J_{B1}^+ \dot{X}_{B1} + (I - J_{B1}^+ J_{B1}) (J_{B2}^+ \dot{X}_{B2}) \quad (6)$$

Dans cette formulation, le projecteur sur le noyau ne comportant pas d'inversion compliquée par rapport à la formulation précédente il n'y a pas de singularités cinématiques, mais l'erreur de poursuite de la tâche secondaire est importante.

Baerlocher et al. ([Baerlocher01], [Baerlocher00] [Boulic03]) utilisent l'approche de la cinématique inverse développée en robotique pour les bras manipulateur ([Nakamura91], [Yoshikawa90]) pour la manipulation interactive des figures articulées complexes par le biais de contraintes géométriques (appelées *tâches*), dans le but de contrôler et d'éditer leur posture. Il s'agit de déterminer une posture satisfaisant un ensemble de tâches imposées,

typiquement exprimées dans l'espace cartésien. Les tâches sont de nature et de fonctions différentes: elles peuvent contrôler des extrémités telles que les mains ou les pieds (pour atteindre un but ou supporter le poids), mais aussi le centre de masse, pour garantir l'équilibre. Les tâches peuvent aussi être utilisées pour éviter les collisions avec les obstacles environnants. La résolution simultanée de plusieurs tâches conduit inévitablement à des conflits, qui doivent être résolus par une stratégie appropriée. Les auteurs proposent une méthode qui intègre les deux stratégies pour la résolution de conflits entre les tâches : en premier lieu, les priorités affectées aux tâches sont respectées et, en deuxième lieu, la pondération de tâches ayant la même priorité est prise en compte. Les auteurs se sont focalisés sur la stratégie à base de priorités pour la résolution des conflits. Avec cette politique, une tâche n'est pas affectée par des tâches de plus basse priorité, et en même temps elle est satisfaite au mieux sans pour autant perturber les tâches de plus haute priorité. La priorité relative entre deux tâches est donc strictement imposée, ce qui est plus approprié pour des situations qui ne tolèrent pas de compromis. Par exemple, rester en équilibre est plus important que d'atteindre un objet avec la main, et éviter les interpénétrations d'objets est certainement plus important que toute autre tâche. Les priorités sont bien adaptées à l'expression de telles relations hiérarchiques entre tâches. Des améliorations du point de vue temps de calcul ont été proposées par les auteurs.

G. Antonelli et S. Chiaverini ([Antonelli03]) utilisent une approche d'inversion cinématique, inspirée des travaux de Chiaverini ([Chiaverini97]), et basée sur la priorité des tâches pour la résolution de la redondance et la coordination de mouvement entre le véhicule et le manipulateur d'un sous-marin (UVMS). La résolution de la redondance est fusionnée avec une technique floue pour gérer la coordination du véhicule et du bras manipulateur.

Pour la distribution de mouvements entre le bras manipulateur et le véhicule, les auteurs introduisent la notion de pseudo inverse pondérée :

$$J_w^+ = W^{-1} J^T (JW^{-1} J^+)^{-1} \quad (7)$$

Où :  $W^{-1}(\beta) = \begin{bmatrix} (1-\beta)I_6 & 0_{6 \times n} \\ 0_{n \times 6} & \beta I_n \end{bmatrix}$ , telle que  $\beta \in [0 \ 1]$  est un facteur de pondération qui définit la

distribution des mouvements entre le bras manipulateur et le véhicule.  $\beta=0$  correspond au mouvement du véhicule tout seul et  $\beta=1$  correspond au mouvement du bras manipulateur tout seul.

Pour permettre la gestion de plusieurs tâches secondaires, les auteurs introduisent la technique floue. Des facteurs  $\alpha_i$  permettant d'activer les tâches secondaires ( $w_{S,i}$ ) sont déterminés par un système d'inférence floue. Le schéma d'inversion cinématique utilisé est donné par :

$$\zeta = J_W^+(\dot{x}_{E,d} + K_E e_E) + (I - J_W^+ J_W) \left( \sum_i \alpha_i J_{S,i}^+ w_{S,i} \right) \quad (8)$$

où :  $\dot{x}_{E,d}$  désigne la tâche opérationnelle désirée,  $K_e$  une constante positive pour faire converger l'erreur commise ( $e_E$ ) vers zéro,  $J_W^+$  est une pseudo inverse pondérée définie par (20) et  $J_{S,i}$  sont les matrices jacobiennes correspondant aux tâches secondaires  $w_{S,i}$ .

Kang et al. ([Kang01a], [Kang01b]) présentent l'utilisation de l'effet de l'inertie en commande de la configuration d'un manipulateur mobile. L'objectif de leur travail était de réduire la force de contact de l'organe terminal d'un manipulateur mobile avec son environnement. Les auteurs utilisent un manipulateur mobile appelé M3 et développé au laboratoire de mécanique (Mechanical Engineering Laboratory of Japan). Le manipulateur mobile est composé d'une plate-forme mobile omnidirectionnelle et d'un bras manipulateur à 7 degrés de liberté (Mitsubishi-PA10).

Une faible inertie a l'avantage de réduire la force de contact au moment de la collision. Pour trouver la configuration  $q_m$  qui correspond à une inertie minimale, les auteurs utilisent un algorithme de minimisation sous contrainte, où la fonction à minimiser est donnée par l'équation :

$$M_u(q) = \frac{1}{u^T \Lambda^{-1}(q) u} \quad (9)$$

qui représente l'inertie suivant une direction  $u$  de l'espace opérationnel et  $\Lambda(q)$  est la matrice d'inertie dans l'espace opérationnel.

Les contraintes utilisées dans la résolution du problème d'optimisation sont constantes. Elles correspondent à des positions et des orientations de l'organe terminal de l'espace opérationnel.

Une fois que la configuration  $q_m$  correspondant à une inertie minimale est trouvée, elle est utilisée dans les équations d'inversion cinématique pour trouver les vitesses généralisées permettant de faire évoluer la configuration initiale  $q_i$  du système vers la configuration  $q_m$ .

La solution d'inversion cinématique est donnée par :

$$\dot{q} = J^+(q)v + [I - J^{\#}(q)J(q)]\Gamma \quad (10)$$

où  $J^+$  la pseudo inverse du manipulateur mobile et  $\Gamma = -k\nabla V$ . Le vecteur  $\Gamma$  de l'équation 10 est défini par l'opposé du gradient de la fonction  $V = \sum_{i=1}^n (q_i - q_{m_i})^2$  dans laquelle  $k$  est un gain et  $n$  est le nombre de degrés de liberté.

## 4 Manipulabilité des bras manipulateurs et des manipulateurs mobiles

### 4.1 Manipulabilité des bras manipulateurs

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors du choix du mécanisme et de la taille du robot manipulateur durant la phase de conception, ou lors de la détermination de la posture du manipulateur dans l'espace de travail pour effectuer une tâche opérationnelle. Un facteur important parmi ceux ci est la facilité de changement arbitraire de la position et de l'orientation de l'organe terminal. Yoshikawa ([Yoshikawa90], [Yoshikawa84], [Yoshikawa85]) a développé une approche pour l'évaluation quantitative de la capacité du manipulateur des points de vues cinématique et dynamique. L'auteur a introduit le concept de l'ellipsoïde de manipulabilité à partir duquel il a défini quelques mesures pour caractériser la capacité de manipulation. Nous exposons dans un premier temps le principe de l'approche. Ensuite, nous présentons les différents travaux basés sur cette approche.

#### **Théorème :**

Considérons l'ensemble des vitesses opérationnelles réalisables  $\dot{X}_B$  par les vitesses articulaires  $\dot{q}_B$  telle que la norme Euclidienne  $\|\dot{q}_B\| \leq 1$ , avec :  $\|\dot{q}_B\| = (\dot{q}_{B1}^2 + \dot{q}_{B2}^2 + \dots + \dot{q}_{Bn_B}^2)^{1/2}$ . Cet ensemble est un ellipsoïde dans l'espace Euclidien de dimension  $m_B$ .

#### **Démonstration :**

La solution générale d'inversion du modèle cinématique direct d'un manipulateur ( $\dot{X}_B = J_B(q_B)\dot{q}_B$ ) est donnée par l'équation 2.

Yoshikawa ([Yoshikawa90]) a montré que la condition  $\|\dot{q}_B\|^2 = \dot{q}_B^T \dot{q}_B \leq 1$  est équivalente à  $\dot{X}_B^T (J_B^+)^T J_B^+ \dot{X}_B \leq 1$ , qui représente un ellipsoïde de l'espace des vitesses opérationnelles.

Pour compléter la démonstration, on utilise la décomposition en valeurs singulières. Soit  $J_B = U_B \Sigma_B V_B^T$  la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice  $J_B$ , où :  $U_B \in R^{m \times m}$  et  $V_B \in R^{n \times n}$  des matrices orthogonales, et

$$\Sigma_B = \begin{bmatrix} \sigma_{B_1} & & & 0 & \vdots & & \\ & \sigma_{B_2} & & & \vdots & & \\ & & \ddots & & \vdots & & \\ & & & & \vdots & 0 & \\ 0 & & & & & & \vdots \\ & & & & & & \sigma_{B_{m_B}} \end{bmatrix} \in R^{m_B \times n_B} \quad (11)$$

où les scalaires  $\sigma_{B_1} \geq \sigma_{B_2} \geq \dots \geq \sigma_{B_{m_B}}$  sont appelés les valeurs singulières de  $J_B$ .

Les  $u_{B_i}$  sont les vecteurs colonnes de la matrice  $U_B$ .

### Théorème :

Les axes principaux de l'ellipsoïde de manipulabilité sont donnés par les vecteurs  $\sigma_{B_1} u_{B_1}, \sigma_{B_2} u_{B_2}, \dots, \sigma_{B_{m_B}} u_{B_{m_B}}$ .

**Démonstration :** appliquons la SVD de  $J_B$  à la formule  $\dot{X}_B^T (J_B^+)^T J_B^+ \dot{X}_B \leq 1$  de l'ellipsoïde. La pseudo inverse de  $J_B$  s'écrit :  $J_B^+ = V_B \Sigma_B^+ U_B^T$ .

avec :

$$\Sigma_B^+ = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{B_1} & 0 & \dots & & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{B_2} & \dots & & & 0 \\ & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & & & & 1/\sigma_{B_{m_B}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & 0 & & \end{bmatrix} \quad (12)$$

En remplaçant ces deux expressions dans la formule de l'ellipsoïde, on obtient :

$$(U_B^T \dot{X}_B)^T (\Sigma_B^+)^T V_B^T V_B \Sigma_B^+ (U_B^T \dot{X}_B) \leq 1 \quad (13)$$

Puisque la matrice  $V_B$  est orthogonale, l'expression se simplifie en :

$$\dot{\Xi}_B^T (\Sigma_B^+)^T \Sigma_B^+ \dot{\Xi}_B \leq 1 \quad (14)$$

avec  $\dot{\Xi}_B = U_B^T \dot{X}_B$ .

Qui s'écrit aussi sous la forme suivante :

$$\sum_i \left( \frac{(\dot{\Xi}_B)_i}{\sigma_{Bi}} \right)^2 \leq 1 \quad (15)$$

La forme de l'ellipsoïde donne des indications sur la capacité de l'organe terminal à se déplacer dans les différentes directions de l'espace opérationnel. Dans la direction de l'axe majeur de l'ellipsoïde, l'organe terminal peut se déplacer à une grande vitesse. D'un autre côté, dans la direction de l'axe mineur de l'ellipsoïde de manipulabilité, l'organe terminal peut se déplacer à faible vitesse. Si l'ellipsoïde tend vers une sphère, l'organe terminal peut se déplacer dans toutes les directions uniformément. Puisque l'ellipsoïde représente la capacité de manipulation, il est appelé ellipsoïde de manipulabilité (voir Figure 1-10).

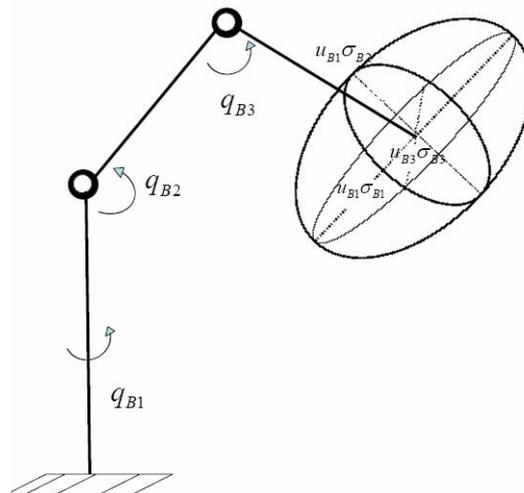


Figure 1-10 : Ellipsoïde de manipulabilité en 3D.

Des mesures de manipulabilité tirées du concept de manipulabilité sont définies pour caractériser la capacité de manipulation des robots manipulateurs.

#### 4.1.1 Mesures de manipulabilité

Une des mesures de manipulabilité la plus courante, dérivée de l'ellipsoïde de manipulabilité, est :

$$w_B = \sqrt{\det(J_B(q_B)J_B^T(q_B))} \quad (16)$$

qui s'écrit en fonction des valeurs singulières de  $J_B$  sous la forme :

$$w_B = \sigma_{B1}\sigma_{B2}\cdots\sigma_{Bm_B} \quad (17)$$

Cette mesure est proportionnelle au volume de l'ellipsoïde donnée par :

$$c_{m_B} w_B \quad (18)$$

avec :  $c_m$  est une constante telle que :

$$c_{m_B} = \begin{cases} (2\pi)^{m_B/2} / [2.4.6\cdots(m_B-2).m_B] & \text{si } m_B \text{ est un nombre pair} \\ 2(2\pi)^{(m_B-1)/2} / [1.3.5\cdots(m_B-2).m_B] & \text{si } m_B \text{ est un nombre impair} \end{cases}$$

Dans le cas des manipulateurs non redondants i.e.  $m_B=n_B$ , l'expression de la mesure de manipulabilité  $w_B$  se réduit à :

$$w_B = |\det(J_B(q_B))| \quad (19)$$

Dans la littérature, plusieurs autres indices de manipulabilité cinématique ont été tirés du concept de l'ellipsoïde de manipulabilité ([Nakamura91], [Lee97], [Bayle01a]), parmi lesquels on cite :

$$w_{B2} = \frac{\sigma_{Bm_B}}{\sigma_{B1}} \in [0, 1] \quad (20)$$

qui exprime le rapport entre les longueurs du demi-petit axe et demi-grand axe de l'ellipsoïde. T. Yoshikawa rappelle qu'il s'agit du nombre de conditionnement de la matrice jacobienne  $J_B$ , ([Salisbury82]) qui est un indice numérique intéressant pour évaluer la distance aux singularités.

Deux autres indices ont été définis par Yoshikawa. Le premier se résume à la plus faible valeur singulière de la matrice  $J_B$ , il s'écrit sous la forme suivante :

$$w_{B3} = \sigma_{Bm_B} \quad (21)$$

Le second est une mesure quantitative qui est en fonction de  $w_B$ . Elle est donnée par la formule suivante :

$$w_{B4} = (\sigma_{B1}\sigma_{B2}\cdots\sigma_{Bm_B})^{1/m_B} = (w_B)^{1/m_B} \quad (22)$$

Bayle ([Bayle01]) a défini une nouvelle mesure de manipulabilité en généralisant la notion d'excentricité d'une ellipse. Cette mesure est donnée par :

$$w_{B5} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{BmB}^2}{\sigma_{B1}^2}} \in [0, 1] \quad (23)$$

Cette grandeur donne des indications sur la forme de l'ellipsoïde de manipulabilité.

Dans le cas où la tâche opérationnelle est de dimension 2,  $w_{B5}$  qui tend vers 0 signifie que l'ellipse tend vers un cercle i.e. l'OT peut se déplacer sans direction préférentielle. Au contraire,  $w_{B5}$  qui tend vers 1, signifie que l'ellipse tend à s'aplatir i.e. l'OT possède des directions préférentielles pour son déplacement (répartition des vitesses généralisées non isotrope).

**Remarque :** parmi les indices présentés ci-dessus, les plus couramment utilisés sont :  $w_B$ ,  $w_{B2}$  et  $w_{B5}$ . L'indice  $w_B$  donne des informations quantitatives sur l'ellipsoïde de manipulabilité alors que les deux autres indices ( $w_{B2}$  et  $w_{B5}$ ) fournissent le même type d'informations qualitatives sur la forme de l'ellipsoïde de manipulabilité. Les indices  $w_{B5}$  et  $w_{B2}$  évoluent inversement.

#### 4.1.2 Application de la manipulabilité des bras manipulateurs.

Une des applications principales de la manipulabilité est l'analyse de la cinématique des mécanismes. Pour illustrer les différentes notions décrites ci-dessus, nous considérons le bras manipulateur plan à deux liaisons rotoïdes, donné sur la figure 1-11.

Cet exemple est choisi par rapport à sa simplicité et au grand nombre travaux qui l'utilisent. On le trouve dans presque tous les livres de robotique ([Khali99], [Sciavicco96]).

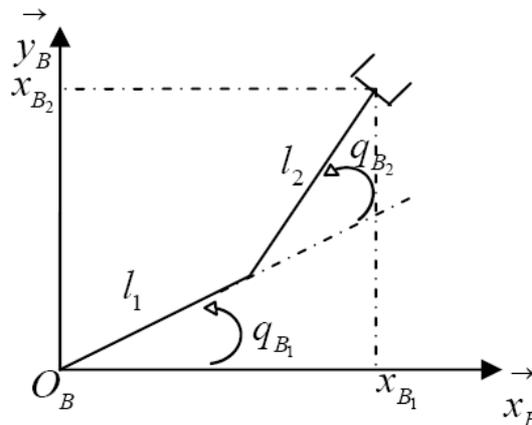


Figure 1-11 : Bras manipulateur plan à deux liaisons rotoïdes.

La configuration du bras manipulateur plan est donnée par les angles de rotation  $q_{B_1}$  et  $q_{B_2}$  des deux liaisons.

Si l'on considère uniquement la position de l'organe terminal (OT), donnée par :

$$\begin{cases} x_{B_1} = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \\ x_{B_2} = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \end{cases} \quad (24)$$

avec  $C_i = \cos(q_{B_i})$ ,  $S_i = \sin(q_{B_i})$ ,  $C_{12} = \cos(q_{B_1} + q_{B_2})$ ,  $S_{12} = \sin(q_{B_1} + q_{B_2})$ ,  $l_1$  et  $l_2$  les longueurs des axes,

la matrice jacobienne du bras est donc :

$$J_B(q_B) = \begin{bmatrix} -(l_1 S_1 + l_2 S_{12}) & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix} \quad (25)$$

On examine l'évolution de la manipulabilité quand la position de l'OT suit une ligne droite depuis une configuration étendue ( $q_{B_1} = q_{B_2} = 0$  en rad) à une configuration repliée ( $q_{B_1} = \frac{\pi}{2}$ ,  $q_{B_2} = -\pi$  en rad) (exemple de Yoshikawa repris par Bayle).

La figure 1-12 montre respectivement les ellipses de manipulabilité et l'évolution de la mesure  $w_{B5}$ , en fonction de l'extension du bras.

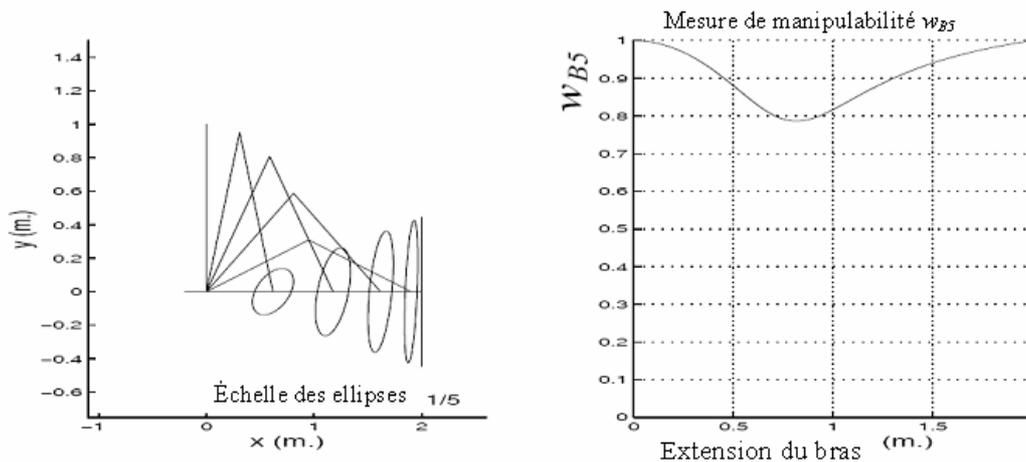


Figure 1-12 : Ellipses et mesure de manipulabilité d'un bras plan (tirée de [Bayle01b])

La mesure  $w_{B5}$  affichée donne des renseignements sur la forme des ellipses de manipulabilité. Elle est égale à 1 lorsque l'ellipse est dégénérée (plate), ce qui correspond à une configuration singulière, et tend vers 0 lorsque la forme de l'ellipse se rapproche d'un cercle.

La mesure de manipulabilité  $w_B$  du mécanisme vaut :  $w_B = |J_B(q_B)| = l_1 l_2 S_2$ , elle s'annule si et seulement si  $q_{B_2} = 0$  ou  $\pi$  (bras étendu ou replié).  $w_B$  est maximale pour toutes les configurations telles que  $q_{B_2} = \pi/2$ . Yoshikawa appelle ces configurations «configuration optimales».

En plus de l'analyse cinématique des mécanismes, la manipulabilité des bras manipulateurs a été utilisée dans d'autres applications telles que la planification de trajectoire et le contrôle des robots manipulateurs redondants ([Sciavicco96], [Nakamura91]). Il existe des applications où la manipulabilité est utilisée dans la coopération de plusieurs manipulateurs ([Abou-Samah01]) ou pour la coordination de mouvement d'une plate-forme mobile et d'un bras manipulateur ([Chuitan94]).

Nous allons présenter dans le paragraphe suivant les principaux travaux qui utilisent la manipulabilité des bras manipulateur pour des manipulateur mobiles.

### 4.1.3 Applications de la manipulabilité des bras manipulateurs pour les manipulateurs mobiles

Dans le cadre des manipulateurs mobiles, Y. Yamamoto et X. Yun ([Yamamoto94], [Yamamoto87]) du laboratoire GRASP de l'université de Pennsylvanie, ont développé un algorithme de contrôle pour une plate-forme mobile de manière à ce que le bras soit toujours positionné dans des configurations optimales mesurées par l'indice de manipulabilité  $w_B$ . Un retour d'état non linéaire compense l'interaction entre la plate-forme mobile et le manipulateur. Le manipulateur mobile utilisé est composé d'un bras manipulateur PUMA 250 à 6 liaisons et d'une plate-forme mobile LABMATE non holonome à roues (figure 1-13). En utilisant une hypothèse simplificatrice qui permet de séparer la position de l'organe terminal de son orientation, les auteurs calculent les maxima de l'indice  $w_B$  du bras pour les trois premières liaisons pour définir les zones de travail opérationnelles. Pour le bras manipulateur considéré, cela consiste à prendre les deux premières articulations fixes et la troisième articulation libre. Dans [Yamamoto95], les auteurs traitent aussi l'évitement des obstacles pour la partie bras manipulateur. Le schéma d'évitement d'obstacles y est basé sur des fonctions de potentiel superquadrique ([Volpe90]) et les obstacles traités sont de forme rectangulaire.

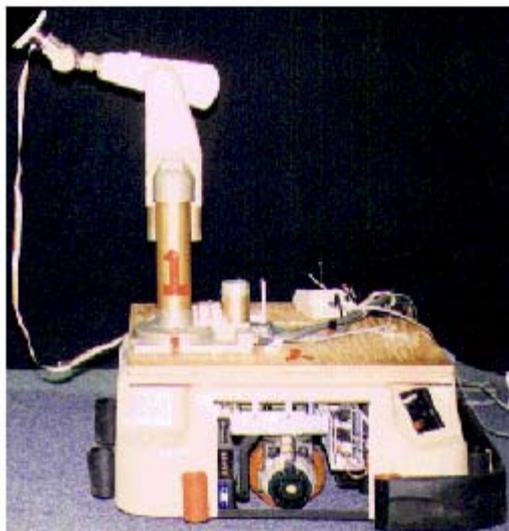
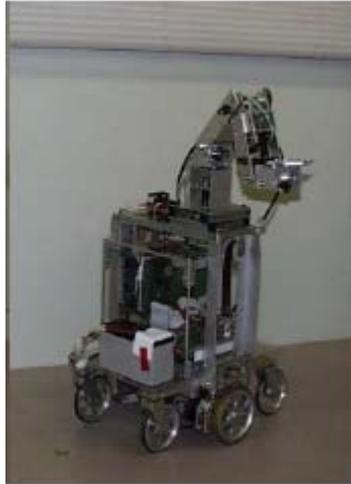


Figure 1-13: Manipulateur du GRASP.

Nagatani et al. ([Nagatani02]) ont proposé une approche pour planifier la trajectoire de la plate-forme mobile qui assure de bonnes valeurs à la manipulabilité du manipulateur embarqué. Le manipulateur mobile est formé d'un bras manipulateur à 6 liaisons, embarqué sur une plate-forme mobile (figure 1-14). Les contrôleurs utilisés pour la manipulation et la locomotion sont indépendants. Dans cette recherche, la tâche opérationnelle est spécifiée. Elle consiste à dessiner un segment de droite sur un mur. Les auteurs utilisent l'indice  $w_B$  manipulabilité du bras pour la planification de mouvement du manipulateur mobile, afin de compenser les erreurs de position de la base. Pour une position donnée de l'organe terminal, la manipulabilité du bras est calculée pour un certain nombre de poses  $(x, y)$  de la plate-forme. Une courbe 3D des valeurs de manipulabilité en fonction des positions  $(x, y)$  de la base est formée. Cette courbe porte le nom de distribution de manipulabilité. Pour déterminer la surface dans le plan  $xy$  à l'intérieur de laquelle la base doit être positionnée, on considère l'intersection de la distribution de manipulabilité avec un plan horizontal dont la cote est définie par le seuil de manipulabilité désiré. La surface ainsi obtenue est appelée surface de manipulabilité « Manipulability Area (MA) ». Les surfaces MA sont déterminées pour les différentes positions désirées de l'organe terminal. L'ensemble des surfaces MA empilées forment un volume appelé « Layer Manipulability Area (LMA) ». La planification de trajectoire de la plate-forme revient donc à choisir des points de départ et d'arrivée qui appartiennent au volume LMA et de les relier par une trajectoire de distance minimale et qui doit être dans le volume.

Dans un des ces travaux antérieurs, Nagatani ([Nagatani96]) utilise une approche heuristique pour réaliser un mouvement d'ouverture d'une porte par un manipulateur mobile. L'auteur définit une succession de primitives (identification de la poignée de la porte, la saisir, et passer à travers la porte) pour la réalisation de la tâche.



**Figure 1-14 : Manipulateur mobile utilisé par Nagatani et al. ([Nagatani02], [Nagatani96]).**

Les travaux présentés ici ne tiennent compte que de la capacité de manipulation du bras manipulateur. Nous allons voir l'extension de la manipulabilité des bras manipulateurs aux cas des manipulateurs mobiles.

## 4.2 Manipulabilité des manipulateurs mobiles

La manipulabilité des manipulateurs mobiles a été étudiée par un petit nombre de groupes de recherches. ([Seraji93]) a étudié l'effet de la mobilité de la plate-forme sur l'indice de manipulabilité. Quand la mobilité de la plate-forme est introduite, la matrice jacobienne de l'OT change de  $J_B$  à  $J = [J_B \quad \vdots \quad J_P]$ , et l'indice de manipulabilité dû aux articulations du bras manipulateur et à la base ( $q = \{q_B, q_P\}$ ) est donné par :

$$\mu(q) = \left\{ \det[J(q)J^T(q)] \right\}^{1/2} = \left\{ \det[J_B(q)J_B^T(q) + J_P(q)J_P^T(q)] \right\}^{1/2} \quad (26)$$

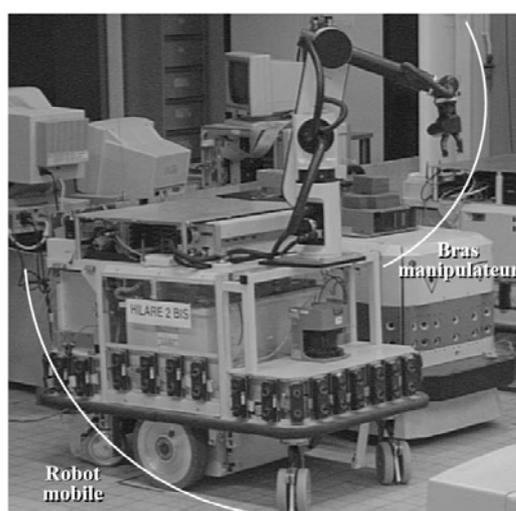
La mesure est utilisée dans une commande cinématique du manipulateur mobile. L'auteur a développé une méthode de commande cinématique qui définit la relation mathématique entre les vitesses généralisées cherchées et les vitesses opérationnelles désirées ([Seraji93], [Seraji95]). La méthode est basée sur la formulation des tâches additionnelles pour rendre le

système non redondant. La résolution du système d'équations est obtenue en utilisant la pseudo inverse où sont définies des matrices de pondération en fonction de la manipulabilité du système et de critères sur les vitesses limites sur chaque liaison.

Yamamoto et Yun ([Yamamoto99]) ont traité aussi la manipulation et la locomotion ensemble dans un même cadre du point de vue espace de la tâche. Ils ont présenté les contributions cinématique et dynamique du manipulateur et de la plate-forme par ce qu'ils appellent ellipsoïde de l'espace de la tâche. Le système étudié par les auteurs est constitué de deux manipulateurs embarqués sur une plate-forme mobile et qui manipulent un objet commun.

Gardner et Valinsky ([Gardner00]) ont utilisé la manipulabilité du manipulateur mobile dans le but de la conception. Les auteurs ont introduit des comparaisons numériques qui permettent de choisir la pose d'un bras anthropomorphe à trois liaisons (3DDL) sur une plate-forme mobile de type Hilare. Leur système est destiné à réaliser une tâche spécifiée qui consiste à tracer un marquage en ligne droite sur une autoroute.

Le LAAS-CNRS (Toulouse, France) dispose d'un manipulateur mobile H2bis (figure 1-15) constitué d'une plate forme non holonome de type HILARE à deux roues motrices indépendantes portant un bras GT6A. Ce robot est utilisé dans l'étude de la coordination de mouvements de la plate-forme et bras. Plusieurs travaux ont porté sur le problème de la commande et de génération des mouvements ([Foulon98], [Bayle01c])



**Figure 1-15 : Manipulateur mobile du LAAS.**

Bayle et al. ([Bayle01b], [Bayle01c]) ont étendu la définition de la manipulabilité aux cas des manipulateurs mobiles non holonomes décrit par le modèle cinématique direct réduit

([Foulon98]). Par analogie aux cas des bras manipulateurs, les auteurs ont défini la mesure de manipulabilité pour manipulateur mobile comme suit :

$$w = \sqrt{\det(\bar{J}(q)\bar{J}^T(q))} \quad (27)$$

où  $\bar{J}(q)$  est une matrice définie par le modèle réduit. (cf. chapitre3, paragraphe 3.2).

Les auteurs ont étudié l'effet de la contrainte de non holonomie de la plate-forme sur les capacités de manipulation d'un manipulateur mobile, composé d'un bras manipulateur plan (cf. 4.2.1) et d'une plate-forme mobile de types voiture et Hilare. Ensuite ils ont proposé l'application de ses mesures de manipulabilité à la commande. Leur schéma d'inversion est basé sur l'optimisation de la mesure de manipulabilité du bras manipulateur et / ou du manipulateur mobile.

## 5 Conclusion

Le chapitre fournit un besoin chiffré en aides techniques innovantes. On peut raisonnablement estimer qu'en France la limite supérieure ne dépasse pas quelques milliers. La première partie du chapitre a présenté les principaux travaux dans le domaine de la robotique en générale et de l'aide à la manipulation en particulier. Le nombre de projets de recherche montre l'intérêt que porte la communauté scientifique au développement de tels systèmes. Parmi les solutions possibles, le principe du manipulateur mobile répond de façon efficace aux besoins formulés par les utilisateurs. Par l'association des capacités de manipulation d'un bras manipulateur et de locomotion d'une plate-forme, les manipulateurs mobiles offrent une grande flexibilité dans la réalisation des tâches. Pour diverses raisons ([Rybarczyk02a], [Rybarczyk02b], [Colle02]), il est préférable de développer un système semi-autonome. Dans la littérature, les travaux de recherche de la robotique de réhabilitation se focalisent plus souvent sur l'aspect interface homme machine que sur la commande coordonnée et les stratégies de commande. Peu de travaux de recherche portent sur la commande coordonnée des manipulateurs mobiles et sur l'exploitation des possibilités offertes par ces systèmes pour la réalisation des tâches opérationnelles.

La deuxième partie du chapitre a rappelé les méthodes d'inversion cinématique utilisées pour l'exploitation de la redondance des systèmes mécaniques. Ces méthodes sont principalement appliquées aux bras manipulateurs pour des tâches complètement automatiques. Ces méthodes nécessitent une adaptation pour tenir compte de la contrainte de non holonomie de la plate-forme et la variabilité de l'environnement.

La troisième partie du chapitre a traité le concept de manipulabilité pouvant être utilisé dans le processus d'inversion. Les mesures basées sur le concept de manipulabilité ont pour rôle de caractériser les capacités de manipulation en une configuration donnée du système. Pour la réalisation d'une tâche opérationnelle, il est intéressant de garder le système dans ces meilleures postures pour la manipulation. La thèse développe une approche basée sur ce type de mesure.

Les travaux de cette thèse s'intéressent à l'un des aspects de l'autonomie qui est la commande coordonnée du bras manipulateur et plus largement l'élaboration d'une stratégie capable d'amener le système dans les meilleures conditions pour une saisie de l'objet tout en restant dans le contexte de la coopération homme-machine. Le robot ne réalise pas la tâche de façon complètement automatique. Notre objectif est de choisir une solution parmi les solutions possibles pour l'exécution de la tâche qui soit en adéquation avec la situation donnée par l'environnement et le désir de la personne.



## **Chapitre 2 : Modélisation**



# 1 Introduction

Quel que soit l'objectif qu'on se fixe, concevoir, simuler ou commander un système mécanique, il est nécessaire, entre autres, de disposer de modèles du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles, qui dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée : modèles géométriques, différentiels ou dynamiques.

Le sujet de cette thèse porte sur la commande coordonnée du manipulateur mobile d'assistance aux personnes handicapées ARPH (Assistance Robotisée pour Personnes Handicapées) ([Hoppenot02]), constitué d'un bras manipulateur et d'une plate-forme mobile qui permet d'augmenter l'espace des positions accessibles du bras manipulateur. Ce chapitre présente les modèles géométriques et cinématiques du système ARPH. Ces modèles sont nécessaires à la commande du robot et de son organe terminal afin de permettre la saisie d'un objet.

Après avoir décrit le système ARPH en début de chapitre, un rappel synthétique des principes d'obtention des modèles des robots manipulateurs est donné. Puis, à partir des notions introduites, nous définissons les modèles géométriques et cinématiques du bras manipulateur utilisé dans le projet ARPH. La section suivante présente le modèle retenu pour la plate-forme mobile du système ARPH. Après avoir étudié séparément les modèles du bras manipulateur et du véhicule qui lui est associé, nous définissons les modèles globaux de l'ensemble du système. Ces modèles seront utilisés dans les chapitres 3 et 4.

## 2 Description du système ARPH

Le manipulateur mobile ARPH est composé d'une plate-forme mobile, conçue au laboratoire IBISC (Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes), sur laquelle est embarqué un bras manipulateur de type Manus, fabriqué par une entreprise Néerlandaise Exact Dynamics ([W-Exac]) (Figure 2-1). Ce bras manipulateur est destiné à être embarqué sur le fauteuil roulant de la personne handicapée. Le robot est également équipé d'une caméra orientable en site et en azimut commandée par l'intermédiaire d'une liaison série. Ce capteur permet, entre autres fonctions, de retourner à l'opérateur une image de l'environnement dans lequel le robot évolue. La plate-forme mobile est dotée d'une ceinture de capteurs ultrasons pour la détection des obstacles de l'environnement. L'ensemble du système est piloté par un PC embarqué sur le robot. Ce dernier est relié à un PC de commande (serveur) par

l'intermédiaire d'une liaison TCP/IP HF. Une architecture client/serveurs structure la partie informatique.



**Figure 2-1: Manipulateur mobile ARPH.**

Pour éviter la confusion entre les grandeurs liées au bras manipulateur et celles liées à la plate-forme mobile, on introduit les indices «.B», «.P» pour désigner leurs grandeurs respectives. Pour la modélisation du système mécanique, nous avons besoin de définir quatre principaux repères.

- un repère du monde, noté  $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ ,
- un repère mobile lié au centre de l'axe des roues de la plate-forme, noté  $(O_P, \vec{x}_P, \vec{y}_P, \vec{z}_P)$ ,
- un repère lié à la base du bras manipulateur, noté  $(O_B, \vec{x}_B, \vec{y}_B, \vec{z}_B)$ ,
- un repère lié à l'organe terminal, noté  $(O_T, \vec{x}_T, \vec{y}_T, \vec{z}_T)$ .

### 3 Modélisation des bras manipulateurs

Un manipulateur est constitué de deux sous-ensembles distincts : un (ou plusieurs) organe terminal et une structure mécanique articulée. L'organe terminal est le dispositif d'interaction, fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique. Il est désigné par différentes appellations : préhenseur, outil, effecteur, organe terminal (OT) ou pince lorsque il s'agit d'une pince. La structure cinématique articulée est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides, assemblées par des articulations. Les chaînes peuvent être ouvertes ou fermées. Le rappel se limite aux manipulateurs à chaîne cinématique ouverte simple. Le rôle de la structure mécanique articulée est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données.

### 3.1 Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces

**Définition1** : on appelle espace de configuration articulaire d'un robot manipulateur (ou simplement configuration) l'état du robot représentant la situation de ses différents corps. Les variables ou coordonnées articulaires sont aussi appelées coordonnées généralisées. L'espace de ces variables noté  $N_B$ , est appelé espace articulaire ou espace des configurations.

**Définition2** : l'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal. Les variables ou coordonnées au nombre minimum permettant de définir la situation de l'OT sont appelées les coordonnées opérationnelles. L'espace opérationnel de dimension  $m$  est noté  $M_B$ .

#### 3.1.1 Modèle Géométrique Direct (MGD)

Le modèle géométrique direct (MGD) permet d'exprimer la situation de l'OT en fonction de la configuration (exprimer les coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées généralisées). Le MGD est l'application :

$$\begin{aligned} f : N_B &\rightarrow M_B \\ q_B &\mapsto X_B = f(q_B) \end{aligned} \quad (1)$$

#### 3.1.2 Modèle Géométrique Inverse (MGI)

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet d'exprimer la configuration du robot en fonction de la situation de l'OT. C'est l'application inverse de MGD, définie par :

$$\begin{aligned} f^{-1} : M_B &\rightarrow N_B \\ X_B &\mapsto q_B = f^{-1}(X_B) \end{aligned} \quad (2)$$

#### 3.1.3 Modèle Différentiel Direct (MDD)

Le modèle différentiel direct (MDD) est le modèle qui permet d'exprimer la différentielle de la situation de l'OT en fonction de la différentielle de configuration (les différentielles des coordonnées opérationnelles en fonction des différentielles des coordonnées généralisées).

En différentiant l'expression du modèle géométrique, donnée par l'équation 1, on obtient :

$$dX_B = \left( \frac{\partial f}{\partial q_B} \right) dq_B \quad (3)$$

On pose  $J_B(q_B) = \frac{\partial f}{\partial q_B}$ . Cette matrice de dimension  $(m_B \times n_B)$  est nommée « jacobien » (différentiel) ou « matrice jacobienne » (différentielle) du bras manipulateur.

Le modèle différentiel s'écrit sous la forme suivante :

$$dX_B = J_B(q_B) dq_B \quad (4)$$

On appelle alors « modèle différentiel direct » (MDD) d'un manipulateur (ou modèle variationnel ou modèle incrémental), l'application linéaire entre l'espace tangent à l'espace généralisé en une configuration particulière et l'espace tangent à l'espace opérationnel en la situation qui correspond (par le MGD) à la configuration particulière.

### 3.1.4 Modèle Différentiel Inverse (MDI)

On appelle « modèle différentiel inverse » (MDI), l'application inverse de la précédente (MDD), donnant  $dq_B$  en fonction de  $dX_B$  :

$$dq_B = [J_B(q_B)]^{-1} dX_B \quad (5)$$

Ce modèle est calculable à condition que  $J_B(q_B)$  soit inversible. En fonction des valeurs de  $q_B$  cette condition peut être vérifiée, ou jamais vérifiée, ou encore non vérifiée sur quelques points seulement, correspondant à des postures (valeurs de  $q_B$ ) singulières.

## 3.2 Redondance et configurations singulières

Un bras manipulateur est redondant lorsque le nombre d'articulations motorisées est supérieur au nombre de degrés de liberté de l'organe terminal. Nous rappelons que le calcul du MGI peut conduire à une infinité de solutions dans deux cas :

- soit le bras est redondant vis-à-vis de la tâche à réaliser,
- soit le manipulateur se trouve dans une certaine configuration, générant une perte d'un ou de plusieurs degrés de liberté (ddl).

Dans ce dernier cas, la posture correspondante est dite **singulière**.

L'analyse des configurations repose donc, sur le plan mathématique, sur le calcul du MGI c'est-à-dire la résolution de  $m_B$  équations à  $n_B$  inconnues ( $n_B$  étant le nombre d'axes du bras manipulateur). Nous allons plutôt examiner les singularités sur le modèle différentiel, qui est

linéaire contrairement au modèle géométrique. Une configuration singulière est une configuration  $q_B$  pour laquelle :

$$r(q_B) = \text{rang}(J_B(q_B)) < \Delta \quad (6)$$

avec :  $\Delta = \max_{q_B \in N_B} (r(q_B))$ .

L'ordre de la singularité est :  $\Delta - r(q_B)$ .

Pour qu'une matrice soit de rang  $r$ , il suffit qu'un seul des déterminants d'ordre  $r$  soit différent de zéro. Le calcul des configurations singulières par le déterminant de la matrice jacobienne peut parfois être fastidieux pour des structures complexes.

## 4 Modélisation du Manus

Le mode cartésien fourni par le constructeur permet la réalisation d'une tâche opérationnelle. Cependant notre objectif n'est pas seulement la réalisation d'une tâche opérationnelle, mais la manière dont elle doit être réalisée. Pour choisir les configurations du bras manipulateur ou de l'ensemble du système, il est nécessaire d'avoir la relation entre les espaces, opérationnel et de configuration.

### 4.1 Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces

Le bras Manus est composé d'un porteur de structure anthropomorphe, c'est-à-dire de type RRR, et d'un poignet à trois articulations d'axes concourants. À cet ensemble s'ajoute une articulation optionnelle (lift-unit) pour la translation verticale du robot. La manipulation de cet axe de translation n'est pas conseillée durant la manipulation i.e. l'articulation doit être soit en butée haute ou basse. De ce fait, on peut considérer notre manipulateur comme un  $6R$  (6 articulations rotoïdes). On définit donc la configuration du Manus par le vecteur :

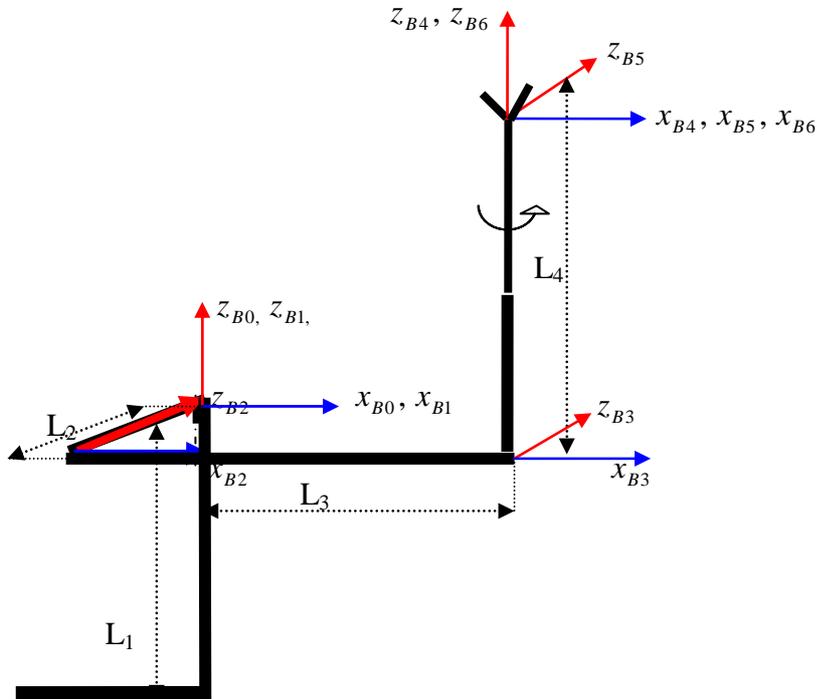
$$q_B = [q_{B1}, q_{B2}, \dots, q_{B6}]^T \quad (7)$$

L'espace des configurations du bras Manus, noté  $N_B$  est défini par  $n_B=6$  coordonnées généralisées. Son espace opérationnel, noté  $M_B$ , est décrit par  $m_B=6$  coordonnées opérationnelles.

#### 4.1.1 Modèle Géométrique Direct (MGD)

Pour la modélisation du bras manipulateur, nous appliquons le formalisme de Denavit Hartenberg modifié ([Khalil99]). On associe à chacun des corps  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, 6$ ) du bras

manipulateur un repère  $R_{B_i} = (O_i, \vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i)$  (Figure 2-2). Ensuite, on détermine les matrices de passage des repères  $R_{B_{i-1}}$  aux repères  $R_{B_i}$ , exprimées par les matrices homogènes  ${}^{i-1}T_i$ .



**Figure 2-2 : Repères liés au bras manipulateur**

Le produit des matrices de transformation homogène donne  ${}^0T_6$ , qui exprime le repère de l'organe terminal du bras manipulateur dans le repère de la base (voir le développement des calculs en annexe B.1.1).

Les axes 2 et 3 du bras manipulateur ne sont pas indépendants, ils sont soumis à une contrainte. Le mouvement de l'axe 2 engendre la rotation de l'axe 3 avec un même angle dans le sens opposé, mais l'inverse n'est pas vrai, ce qui nous a amené à exprimer la matrice  ${}^2T_3$  en fonction de  $q_{B2}$  et  $q_{B3}$ .

Le mouvement de l'effecteur (pince) dans l'espace (espace de la tâche) est totalement décrit par l'évolution de 6 paramètres (3 pour la position et 3 pour l'orientation), chacun représentant alors une coordonnée opérationnelle, regroupés en un vecteur colonne (6x1) noté :

$$X_B = [x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}, x_{B4}, x_{B5}, x_{B6}]^T = [x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}, \phi_B, \theta_B, \psi_B]^T \quad (8)$$

Les trois premières coordonnées opérationnelles  $x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}$  représentent les coordonnées cartésiennes en position de l'organe terminal. Elles sont déduites directement de la matrice homogène  ${}^0T_6$ , dont la forme générale est donnée ci-dessous :

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} \vdots & & & & & \\ & R & \vdots & P & & \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} P : \text{donne de la position de l'OT} \\ \text{où } R : \text{donne l'orientation de l'OT} \end{array}$$

La situation en position de l'OT est donnée par les équations suivantes :

$$X_B = \begin{cases} x_{B1} = (L_4 c_3 + L_3 c_2) c_1 - L_2 s_1 \\ x_{B2} = (L_4 c_3 + L_3 c_2) s_1 + L_2 c_1 \\ x_{B3} = L_4 s_3 + L_3 s_2 \end{cases} \quad (9)$$

où les constantes  $L_1, L_2, L_3, L_4$  représentent les longueurs des axes du manipulateur (Figure 2-3) et  $c_i = \cos(q_{Bi})$ ,  $s_i = \sin(q_{Bi})$ .

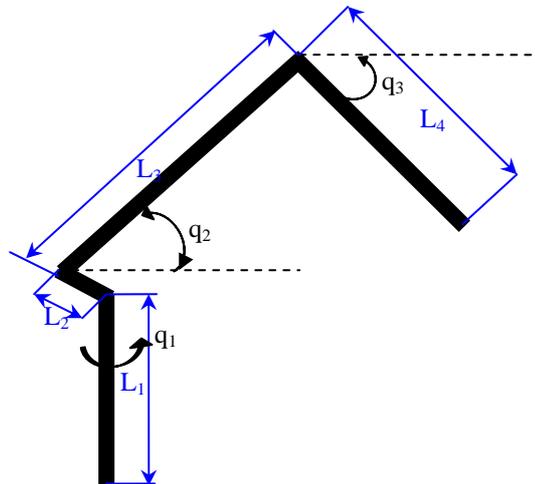


Figure 2-3: Modélisation du bras Manus.

L'orientation du repère  $R_T$  (la pince) par rapport au repère de base du bras manipulateur  $R_B$  est déterminée par la spécification de trois angles  $\phi_B, \theta_B, \psi_B$  qui

représentent les angles d'Euler du système. Ils sont appelés respectivement lacet, tangage et roulis. Comme dans la littérature plusieurs définitions sont proposées nous avons préféré rappeler celle que nous avons adoptée.

Les angles d'Euler adoptés ici (Figure 2-4) correspondent à une première rotation autour de  $z$ , suivie d'une rotation autour du nouvel axe  $y'$  suivie d'une dernière rotation autour du nouvel axe  $z''$  ([Yoshikawa90]).

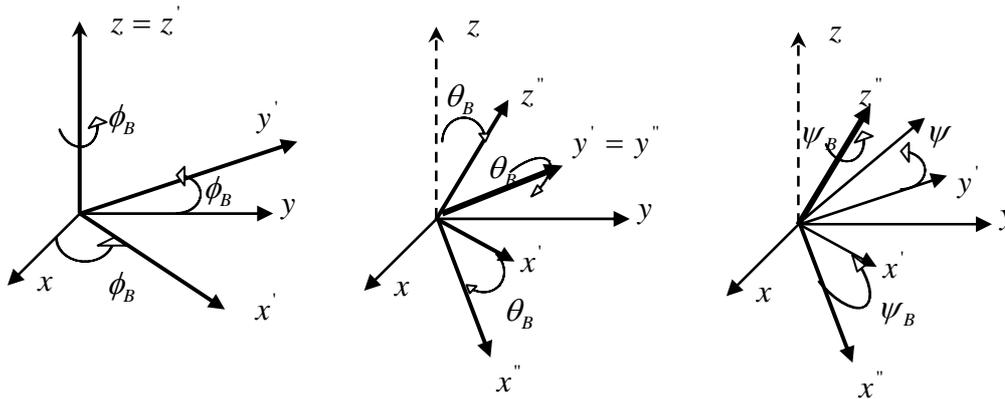


Figure 2-4 : Les angles d'Euler.

La matrice obtenue par les trois rotations successives décrites ci-dessus est donnée par l'équation suivante :

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) - \sin(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) - \sin(\phi_B) \cos(\psi_B) & \cos(\phi_B) \sin(\theta_B) \\ \sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) + \cos(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) + \cos(\phi_B) \cos(\psi_B) & \sin(\phi) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta_B) \cos(\psi_B) & \sin(\theta_B) \sin(\psi_B) & \cos(\theta_B) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

En faisant une identification terme à terme de la matrice donnée par l'équation 10 et la matrice  $R$ , extraite de  ${}^0T_6$ , nous avons retenu la solution suivante :

$$\begin{aligned} \phi_B &= \text{atan2}(R_{23}, R_{13}) \\ \theta_B &= \text{atan2}(-\sqrt{R_{13}^2 + R_{23}^2}, R_{33}) \\ \psi_B &= \text{atan2}(-R_{32}, -R_{31}) \end{aligned} \quad (11)$$

où **atan2** est une fonction qui calcule l'arc tangente à partir de la donnée de deux arguments. Les avantages de cette fonction est qu'elle renvoie l'angle entre  $-\pi$  et  $\pi$ , et détermine son quadrant à partir de l'examen des signes des arguments passés en paramètres.

### 4.1.2 Modèle Géométrique Inverse (MGI)

Le MGI est la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles pour  $q_B$  correspondant à un  $X_B$  fixé. Son problème général réside dans le fait que le MGD soit non linéaire (il contient des fonctions trigonométriques) et difficile à inverser directement. Pour trouver la solution du problème d'inversion du modèle géométrique, nous appliquons une méthode générale proposée par Paul ([Paul81]). La méthode consiste à prémultiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices  ${}^i T_{i-1}$  pour  $i$  variant de 1 à 3 (si on tient en considération uniquement de la position). Cette opération permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre, les variables articulaires (voir le développement des calculs en annexe B.1.2).

### 4.1.3 Modèle Différentiel Direct (MDD)

On obtient le modèle différentiel direct (MDD) en différentiant l'expression du modèle géométrique, donnée par:

$$X_B = \begin{cases} x_{B1} = (L_4 c_3 + L_3 c_2) c_1 - L_2 s_1 \\ x_{B2} = (L_4 c_3 + L_3 c_2) s_1 + L_2 c_1 \\ x_{B3} = L_4 s_3 + L_3 s_2 \\ x_{B4} = \phi_B \\ x_{B5} = \theta_B \\ x_{B6} = \psi_B \end{cases} \quad (12)$$

avec :  $c_i = \cos(q_{Bi})$ ,  $s_i = \sin(q_{Bi})$

Le terme général de  $J_B$ , noté  $J_{Bij}$

$$J_{Bij} = \left( \frac{\partial f_i}{\partial q_{Bj}} \right) \quad (13)$$

Certains éléments de la matrice  $J_B$  sont nuls comme le montre l'équation suivante :

$$J_B = \begin{bmatrix} J_{B11} & J_{B12} & J_{B13} & 0 & 0 & 0 \\ J_{B21} & J_{B22} & J_{B23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{B32} & J_{B33} & 0 & 0 & 0 \\ J_{B41} & J_{B42} & J_{B43} & J_{B44} & J_{B45} & J_{B46} \\ J_{B51} & J_{B52} & J_{B53} & J_{B54} & J_{B55} & J_{B56} \\ J_{B61} & J_{B62} & J_{B63} & J_{B64} & J_{65} & J_{B66} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Si on ne s'intéresse qu'au positionnement de l'OT, donc  $X_B = [x_{B1}, x_{B2}, x_{B3}]^T$ , la matrice jacobienne associée sera donnée par :

$$J_B = \begin{bmatrix} -(L_4 c_3 + L_3 c_2) s_1 - L_2 c_1 & -L_3 c_1 s_2 & -L_4 c_1 s_3 \\ (L_4 c_3 + L_3 c_2) c_1 - L_2 s_1 & -L_3 s_1 s_2 & -L_4 s_3 s_1 \\ 0 & L_3 c_2 & L_4 c_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} J_{B11} & J_{B12} & J_{B31} \\ J_{B21} & J_{B22} & J_{B32} \\ J_{B31} & J_{B32} & J_{B33} \end{bmatrix}$$

avec  $c_i = \cos(q_{Bi})$ ,  $s_i = \sin(q_{Bi})$ .

Les autres coefficients ayant une expression compliquée ne sont pas donnés dans ce mémoire.

#### 4.1.4 Modèle Différentiel Inverse (MDI)

L'inversion analytique du MGD est complexe, on peut calculer  $q_B$  en fonction de  $X_B$  par l'inversion numérique en utilisant le MDI. Le calcul du « modèle différentiel inverse (MDI) », revient à chercher l'inverse de la matrice carrée  $J_B$  de dimension  $(6 \times 6)$ , donnée par l'équation 16. Le MDD n'est pas inversible si  $\det(J_B(q_B))=0$ .

Si on ne considère que les trois premiers axes du bras manipulateur, dont le modèle différentiel direct est défini par la matrice  $J_B$  de l'équation 17, le calcul du déterminant de la matrice jacobienne  $J_B(q_B)$  permet d'étudier l'existence du MDI et la détermination des singularités.

$$\det(J_B) = L_4 L_3 \sin(q_{B2} - q_{B3}) (L_3 \cos(q_{B2}) + L_4 \cos(q_{B3}))$$

$$\det(J_B) = 0 \text{ si } L_4 L_3 \sin(q_{B2} - q_{B3}) = 0 \text{ ou } (L_3 \cos(q_{B2}) + L_4 \cos(q_{B3})) = 0$$

Ce qui donne les configurations singulières suivantes :

$$L_4 L_3 \sin(q_{B2} - q_{B3}) = 0 \Rightarrow \begin{cases} q_{B2} - q_{B3} = 0 \Rightarrow q_{B2} = q_{B3} \\ \text{ou} \\ q_{B2} - q_{B3} = \pi \end{cases}$$

$$\text{où } (L_3 \cos(q_{B2}) + L_4 \cos(q_{B3})) = 0 \Rightarrow \cos(q_{B2}) = \frac{-L_4 \cos(q_{B3})}{L_3}$$

## 4.2 Redondance et configurations singulières

Le bras manipulateur n'est pas redondant pour positionner et orienter un objet dans l'espace 3D.

La structure du bras manipulateur permet de diviser le problème du calcul des singularités en deux sous problèmes :

- le calcul des singularités résultantes du mouvement des trois premiers axes (étude ci-dessus),
- le calcul des singularités du poignet : pour le poignet, si deux axes se trouvent confondus alors il y a une singularité.

## 5 Modélisation de la plate-forme mobile ARPH

La plate-forme a deux roues motrices indépendantes et une roue folle à l'avant de la structure pour garder l'équilibre du système. Il est noté que ces roues sont toujours considérées comme indéformables, de rayon  $r$ , ce qui est généralement raisonnable dans le contexte de la robotique de service. De plus on supposera toujours qu'il y a roulement sans glissement (r. s. g.) des roues sur le sol. Le modèle de la plate-forme se construit à partir de la connaissance de sa géométrie et du nombre de roues dont elle dispose. La situation de la plate-forme est définie par :

$$X_p = [x_p, y_p, \theta_p]^T \quad (16)$$

La figure 2-5 montre le repère lié à la plate-forme mobile et les coordonnées opérationnelles qui lui sont associées. Il est pratique de définir les coordonnées généralisées de la plate-forme égales aux trois coordonnées opérationnelles, deux pour la position et une pour l'orientation :

$$q_p = [q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}]^T = [x_p, y_p, \theta_p]^T, \quad (17)$$

où  $x_p, y_p$  sont l'abscisse et l'ordonnée du point  $O_p$  lié au repère de la plate-forme mobile, exprimées dans le repère de référence  $R_r$  et  $\theta_p$  exprime l'angle d'orientation, formé par les vecteurs  $\vec{x}_p$  et  $\vec{x}$ .

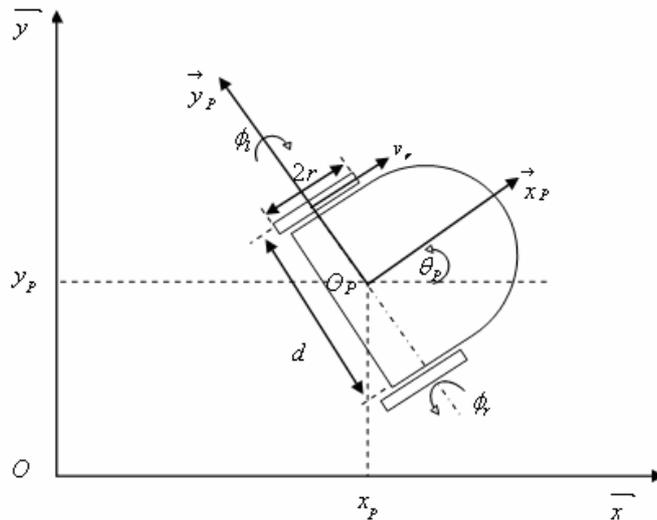


Figure 2-5 : Le repérage de la plate-forme mobile par rapport au repère du monde.

### Contrainte de non holonomie :

Les conditions r. s. g. des roues sur le sol, conduisent à une vitesse du point  $O_p$  portée par l'axe  $\mathbf{x}_p$ . Si  $v$  désigne la vitesse longitudinale de la plate-forme et  $\omega$  sa vitesse angulaire, on a :

$$\begin{cases} v = \dot{x}_p \cos(\theta_p) + \dot{y}_p \sin(\theta_p) \\ \omega = \dot{\theta}_p \end{cases} \quad (18)$$

avec  $v = \frac{v_r + v_l}{2}$  et  $\dot{\theta}_p = \frac{v_l - v_r}{d}$ .

Les conditions précédentes s'expriment en écrivant que les vitesses des points fixes des roues en contact avec le sol sont nulles. Pour chaque roue, il en découle deux équations qui expriment la nullité des vitesses correspondantes ([Laumand01], [Bayle01c]). La contrainte de non holonomie de la plate-forme est décrite par l'équation suivante :

$$\sin(\theta_p)\dot{x}_p - \cos(\theta_p)\dot{y}_p = 0 \quad (19)$$

La démonstration de l'équation 19 est donnée en annexe B.2.

Le degré de mobilité de la plate-forme est égal à 2, donc on peut définir un vecteur de commande de dimension 2 dans l'espace des vitesses généralisées, ce qui permet d'exprimer le modèle cinématique de la plate forme en fonction du vecteur de mobilité :

$$\dot{q}_p = S_p(\theta_p) u_p \quad (20)$$

avec  $S_p(\theta_p) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & 0 \\ \sin(\theta_p) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , et  $u_p = \begin{bmatrix} u_{p1} \\ u_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$  dans lequel  $v$  et  $\omega$  sont respectivement les

vitesses linéaire et angulaire de la plate-forme.

## 6 Modélisation du manipulateur mobile ARPH

Le manipulateur mobile ARPH est composé d'une plate-forme mobile sur laquelle est embarqué un bras manipulateur Manus.

### 6.1 Espace articulaire, espace opérationnel et modèle de transformation entre les espaces

La configuration du manipulateur mobile est définie sur l'espace des configurations  $N$  de dimension  $n$ . Elle est donnée par  $n$  coordonnées généralisées :

$$q = [q_p^T, q_B^T]^T = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \theta_p \\ q_{B1} \\ \vdots \\ q_{B6} \end{bmatrix} \quad (21)$$

On remarque que  $n = n_p + n_B$ , où  $n_B$  et  $n_p$  sont respectivement les dimensions des espaces généralisés du bras manipulateur et de la plate-forme.

Avec :  $n_p=3$  et  $n_B=6$ , donc  $n=9$ .

La situation de l'OT du manipulateur mobile donne la *position* du point  $O_T$ , centre de l'OT, et l'*orientation* du repère  $R_T$  qui lui est associé par rapport au repère du monde  $R$  (Figure 2-6).

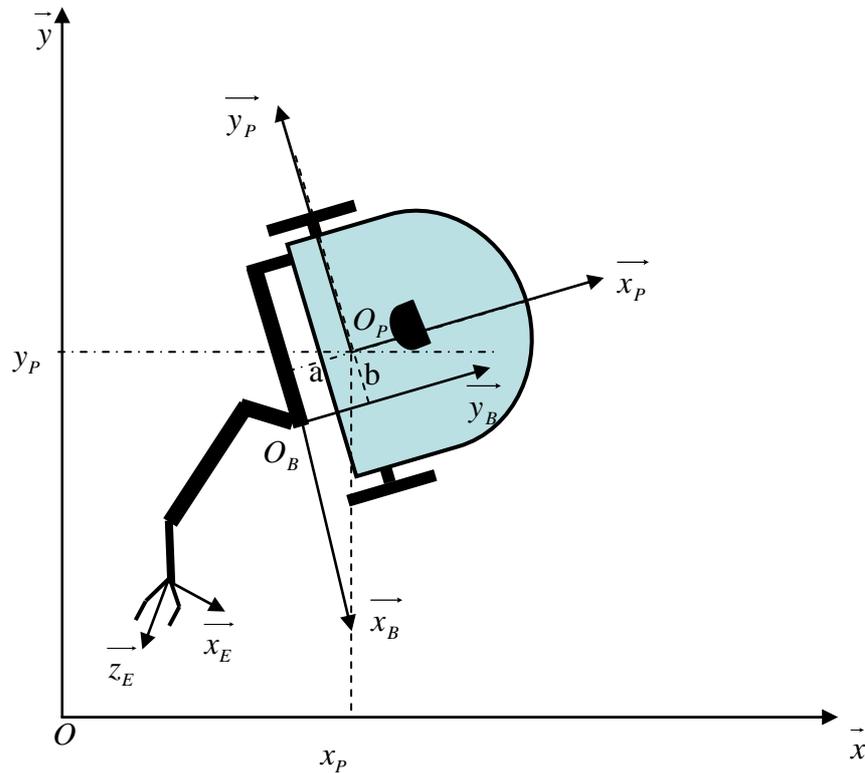


Figure 2-6: Les repères liés au systèmes mécanique.

- le repère  $R_T$  de l'OT est lié au repère  $R_B$  de la base du bras manipulateur par la matrice de transformation homogène  ${}^B T_T(q_B)$  (exprime les coordonnées dans le repère  $R_B$  en fonction des coordonnées dans le repère  $R_T$ )
- le repère  $R_B$  de la base du bras manipulateur est lié au repère  $R_P$  de la plate-forme mobile par la matrice de transformation homogène  ${}^P T_B(q_B)$
- le repère  $R_P$  de la plate-forme mobile est lié au repère du monde  $R$  par la matrice de transformation homogène  ${}^O T_P(q_B)$

La matrice de passage entre le repère lié à la plate-forme mobile et le repère du monde est donnée par :

$${}^O T_P = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & -\sin(\theta_p) & 0 & x_p \\ \sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Par conséquent, le repère  $R_T$  de l'OT est lié au repère du monde par une matrice de passage :

$${}^0T_T = {}^0T_P(q_P) \times {}^PT_B \times {}^BT_T(q_B) = \begin{pmatrix} R & \vdots & P \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \\ & \vdots & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

où  $P$  définit la position de l'organe terminal par rapport au repère du monde et  $R$  définit la rotation de l'OT par rapport au repère du monde.  ${}^BT_T(q_B)$  et  ${}^PT_B(q_B)$  sont données en annexe B.3.

### 6.1.1 Modèle Géométrique Direct (MGD)

Le modèle géométrique permet d'exprimer les coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées généralisées. Le MGD est l'application :

$$\begin{aligned} f : N &\rightarrow M \\ q &\mapsto X = f(q) \end{aligned} \quad (24)$$

La situation de l'organe terminal du manipulateur mobile, définie sur l'espace  $M$ , est donnée par le vecteur  $X$  des  $m$  coordonnées opérationnelles :

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \quad (25)$$

Pour le système étudié  $m=6$ .

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \phi \\ \theta \\ \Psi \end{bmatrix} \quad (26)$$

Les trois premières composantes du vecteur de coordonnées opérationnelles, donnant la position du centre de la pince par rapport au repère du monde  $R$ , sont données par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} x_1 = x_P + (x_{B2} + a) \cos(\theta_P) - (b - x_{B1}) \sin(\theta_P) \\ x_2 = y_P + (x_{B2} + a) \sin(\theta_P) + (b - x_{B1}) \cos(\theta_P) \\ x_3 = x_{B3} + c \end{cases} \quad (27)$$

où  $(a, b, c)$  sont les coordonnées cartésiennes du point  $O_B$ , origine du repère  $R_B$  par rapport au repère  $R_P$  lié à la plate-forme.

L'orientation de la pince par rapport au repère du monde  $R$  est donnée par les trois dernières coordonnées opérationnelles. Elle est exprimée par les équations ci-dessous :

$$\begin{cases} x_4 = x_{B4} + \theta_p - \frac{\pi}{2} = \phi_B + \theta_p - \frac{\pi}{2} \\ x_5 = x_{B5} = \theta_B \\ x_6 = x_{B6} = \psi_B \end{cases} \quad (28)$$

La non linéarité des équations décrivant la géométrie du système mécanique complique leurs résolutions. C'est pour cette raison que généralement, on utilise le modèle différentiel et / ou cinématique qui sont linéaires.

### 6.1.2 Modèle Différentiel Direct (MDD)

C'est le modèle qui permet d'exprimer la différentielle de la situation de l'OT en fonction de la différentielle de configuration. Le MDD est une application linéaire  $J(q)$ , telle que :

$$dX = J(q)dq \quad (29)$$

La matrice jacobienne est de dimension  $(6 \times 9)$  dont les éléments  $J_{ij}(q) = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$  sont :

$$J_{11}=1, J_{12}=0, J_{13} = -(x_{B2} + a)s_{\theta_p} - (b - x_{B1})c_{\theta_p}, J_{14} = J_{B21}c_{\theta_p} + J_{B11}s_{\theta_p}, J_{15} = J_{B22}c_{\theta_p} + J_{B12}s_{\theta_p},$$

$$J_{16} = J_{B23}c_{\theta_p} + J_{B13}s_{\theta_p}, J_{17} = J_{18} = J_{19} = 0 ;$$

$$J_{21}=1, J_{22}=0, J_{23} = (x_{B2} + a)c_{\theta_p} - (b - x_{B1})s_{\theta_p}, J_{24} = J_{B21}s_{\theta_p} - J_{B11}c_{\theta_p}, J_{25} = J_{B22}s_{\theta_p} - J_{B12}c_{\theta_p},$$

$$J_{26} = J_{B23}s_{\theta_p} - J_{B13}c_{\theta_p}, J_{27} = J_{28} = J_{29} = 0 ;$$

$$J_{31} = J_{32} = J_{33} = 0, J_{34} = J_{B31}, J_{35} = J_{B32}, J_{36} = J_{B33}, J_{37} = J_{38} = J_{39} = 0 ;$$

$$J_{41} = J_{42} = 0, J_{43} = 1, J_{44} = J_{B41}, J_{45} = J_{B42}, J_{46} = J_{B43}, J_{47} = J_{B44}, J_{48} = J_{B45}, J_{49} = J_{B46} ;$$

$$J_{51} = J_{52} = J_{53} = 0, J_{54} = J_{B51}, J_{55} = J_{B52}, J_{56} = J_{B53}, J_{57} = J_{B54}, J_{58} = J_{B55}, J_{59} = J_{B56} ;$$

$$J_{61} = J_{62} = J_{63} = 0, J_{64} = J_{B61}, J_{65} = J_{B62}, J_{66} = J_{B63}, J_{67} = J_{B64}, J_{68} = J_{B65}, J_{69} = J_{B66} .$$

Si on ne s'intéresse qu'au positionnement de l'OT et donc  $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ , la matrice jacobienne associée sera donnée par :

$$J(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(x_{B2} + a)s_{\theta_p} - (b - x_{B1})c_{\theta_p} & J_{B21}c_{\theta_p} + J_{B11}s_{\theta_p} & J_{B22}c_{\theta_p} + J_{B12}s_{\theta_p} & J_{B23}c_{\theta_p} + J_{B13}s_{\theta_p} \\ 0 & 1 & (x_{B2} + a)c_{\theta_p} - (b - x_{B1})s_{\theta_p} & J_{B21}s_{\theta_p} - J_{B11}c_{\theta_p} & J_{B22}s_{\theta_p} - J_{B12}c_{\theta_p} & J_{B23}s_{\theta_p} - J_{B13}c_{\theta_p} \\ 0 & 0 & 0 & J_{B31} & J_{B32} & J_{B33} \end{bmatrix} \quad (30)$$

où  $J_{Bij}$  sont donnés par l'équation 15 et  $c_{\theta_p} = \cos(\theta_p)$  et  $s_{\theta_p} = \sin(\theta_p)$

### 6.1.3 Modèle Différentiel Direct Réduit (MDDR)

Le modèle différentiel réduit a été proposé par ([Foulon98], [Foulon99]). Les différentielles des coordonnées généralisées sont dépendantes ; elles sont liées par la contrainte non holonome étudiée précédemment. On peut faire intervenir une forme différentielle  $dp$  dont le nombre de composantes qui sont indépendantes correspond au degré de mobilité du système mécanique. Il suffit de choisir :

$$dp = (dp_1, dp_2, \dots, dp_{n-1})^T = (d\sigma, dq_3, \dots, dq_n)^T \quad (31)$$

où  $\sigma$  représente l'abscisse curviligne du point  $O_p$ .

La relation entre  $dq$  et  $dp$  ([Bayle00a]) est donnée par :

$$dq = M(\theta_p)dp \quad (32)$$

avec  $M(\theta_p) = \begin{bmatrix} S_p(\theta_p) & 0 \\ 0 & I_{nB} \end{bmatrix}$ , où  $I_{nB}$  est une matrice identité d'ordre  $n_B$  et  $S_p(\theta_p)$  donnée

par l'équation 20.

Le Modèle Différentiel Direct réduit (MDDR) est l'application linéaire  $\bar{J}(q)$ , telle que :

$$dX = \bar{J}(q)dp \quad (33)$$

La matrice réduite  $\bar{J}$  est de dimension  $(6 \times 8)$ . Ces éléments sont donnés par :

$$\bar{J}_{11} = c_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{12} = J_{13}, \quad \bar{J}_{13} = J_{14}, \quad \bar{J}_{14} = J_{15}, \quad \bar{J}_{15} = J_{16}, \quad \bar{J}_{16} = J_{17}, \quad \bar{J}_{17} = J_{18}, \quad \bar{J}_{18} = J_{19};$$

$$\bar{J}_{21} = s_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{22} = J_{23}, \quad \bar{J}_{23} = J_{24}, \quad \bar{J}_{24} = J_{25}, \quad \bar{J}_{25} = J_{26}, \quad \bar{J}_{26} = J_{27}, \quad \bar{J}_{27} = J_{28}, \quad \bar{J}_{28} = J_{29};$$

$$\bar{J}_{31} = 0, \quad \bar{J}_{32} = J_{33}, \quad \bar{J}_{33} = J_{34}, \quad \bar{J}_{34} = J_{35}, \quad \bar{J}_{35} = J_{36}, \quad \bar{J}_{36} = J_{37}, \quad \bar{J}_{37} = J_{38}, \quad \bar{J}_{38} = J_{39};$$

$$\bar{J}_{41} = 0, \quad \bar{J}_{42} = J_{43}, \quad \bar{J}_{43} = J_{44}, \quad \bar{J}_{44} = J_{45}, \quad \bar{J}_{45} = J_{46}, \quad \bar{J}_{46} = J_{47}, \quad \bar{J}_{47} = J_{48}, \quad \bar{J}_{48} = J_{49};$$

$$\bar{J}_{51} = 0, \quad \bar{J}_{52} = J_{53}, \quad \bar{J}_{53} = J_{54}, \quad \bar{J}_{54} = J_{55}, \quad \bar{J}_{55} = J_{56}, \quad \bar{J}_{56} = J_{57}, \quad \bar{J}_{57} = J_{58}, \quad \bar{J}_{58} = J_{59};$$

$$\bar{J}_{61}=0, \bar{J}_{62} = J_{63}, \bar{J}_{63} = J_{64}, \bar{J}_{64} = J_{65}, \bar{J}_{65} = J_{66}, \bar{J}_{66} = J_{67}, \bar{J}_{67} = J_{68}, \bar{J}_{68} = J_{69};$$

Si on ne s'intéresse qu'aux trois premières articulations du bras manipulateur, alors  $\bar{J}$  s'écrira :

$$\bar{J}(q) = \begin{bmatrix} c_{\theta_p} & -(x_{B2} + a)s_{\theta_p} - (b - x_{B1})c_{\theta_p} & J_{B21}c_{\theta_p} + J_{B11}s_{\theta_p} & J_{B22}c_{\theta_p} + J_{B12}s_{\theta_p} & J_{B23}c_{\theta_p} + J_{B13}s_{\theta_p} \\ s_{\theta_p} & (x_{B2} + a)c_{\theta_p} - (b - x_{B1})s_{\theta_p} & J_{B21}s_{\theta_p} - J_{B11}c_{\theta_p} & J_{B22}s_{\theta_p} - J_{B12}c_{\theta_p} & J_{B23}s_{\theta_p} - J_{B13}c_{\theta_p} \\ 0 & 0 & J_{B31} & J_{B32} & J_{B33} \end{bmatrix} \quad (34)$$

où  $J_{Bij}$  sont donnés par l'équation 15 et  $c_{\theta_p} = \cos(\theta_p)$  et  $s_{\theta_p} = \sin(\theta_p)$

Exprimer la dérivée de la situation de l'OT par rapport au temps (vitesses opérationnelles) en fonction de la dérivée de configuration par rapport au temps (vitesses généralisées), revient à calculer le modèle cinématique du système

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (35)$$

A cause de la non holonomie évoquée précédemment, on peut faire intervenir des vitesses généralisées indépendantes et écrire :

$$\dot{X} = \bar{J}(q)u \quad (36)$$

qui exprime le modèle cinématique réduit, où :  $u = (v, \omega, \dot{q}_{B1}, \dots, \dot{q}_{B6})^T$  est le vecteur des vitesses de commande du système, dans lequel les deux premières composantes sont les vitesses linéaire et angulaire de la plate-forme, et les autres composantes sont les vitesses de commande du bras.

#### 6.1.4 Modèles Différentiels Inverses (MDI et MDIR)

Le système ARPH étant redondant, les matrices qui définissent les deux modèles (MDD et MDDR) ne sont pas carrées. On peut par exemple ajouter des contraintes supplémentaires pour rendre le système carré et inversible. La difficulté est dans la définition des critères adéquats. On peut faire appel au calcul de la pseudo-inverse qui s'obtient mathématiquement par la minimisation d'un critère quadratique. Cette solution sera abordée au chapitre 3 pour exploiter la redondance du système pour l'optimisation d'un critère de manipulabilité.

## 6.2 Redondance et singularité du manipulateur mobile ARPH

### 6.2.1 Redondances

C'est une situation dans laquelle le nombre de ddl de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulations motorisées. Les systèmes redondants ont la possibilité d'effectuer une tâche opérationnelle tout en exécutant une ou plusieurs tâches additionnelles et/ou en respectant une ou plusieurs contraintes comme éviter des obstacles ([Yamamoto95], [Antonelli05]) s'éloigner des singularités et des butées articulaires ([Bayle00a], [Bayle01c]). En contre partie l'exploitation de la redondance complique la recherche d'une solution. Dans le cas des manipulateurs mobiles non holonomes, on distingue deux notions de redondance tirées des deux modèles, MDD et MDDR ([Foulon98]).

La notion de **redondance géométrique** ([Foulon97]) exprime le fait que le nombre de coordonnées généralisées est strictement supérieur au degré de liberté global de l'OT. On définit le degré de liberté local par  $r(q) = \text{rang}(J(q))$  et le degré de liberté global  $\Delta = \max_{q \in N} (r(q))$ .

L'ordre de redondance géométrique est égal à  $n - \Delta$ .

La notion de **redondance différentielle** ([Foulon97]) exprime le fait que le degré de mobilité, qui est égal à  $(n-1)$ , est strictement supérieur à  $\Delta' = \max_{q \in N} (r'(q))$ , avec  $r'(q) = \text{rang}(\bar{J}(q))$ .

L'ordre de redondance différentielle est égal à  $n - 1 - \Delta'$ .

La redondance géométrique du manipulateur mobile ARPH est égale à 3 ( $n-m$ ) et sa redondance différentielle est égale à 2.

### 6.2.2 Singularités

Des modèles de transformation, MDD et MDDR, présentés ci-dessus, on introduit aussi deux notions de configurations singulières :

Le système est dit dans une **configuration singulière géométrique** [Foulon97] si et seulement si :

$$r(q) = \text{rang}(J(q)) < \Delta \quad (37)$$

La différence entre le degré de liberté globale ( $\Delta$ ) et le degré de liberté locale ( $r(q)$ ) définit l'ordre de singularité géométrique.

Le système est dit dans une **configuration singulière différentielle** ([Foulon97]) si et seulement si :

$$r'(q) = \text{rang}(\bar{J}(q)) < \Delta' \quad (38)$$

La différence entre le degré de liberté global ( $\Delta'$ ) et le degré de liberté local ( $r'(q)$ ) définit l'ordre de singularité différentielle.

**Remarque** : Les notions de singularité différentielle et redondance différentielle n'ont d'objet que pour les systèmes non holonomes.

Des configurations singulières géométrique et différentielle du manipulateur mobile se présentent lorsque le bras manipulateur se trouve dans une configuration singulière lui interdisant un mouvement dans une direction dans laquelle la plate-forme ne peut pas se déplacer. C'est le cas lorsque le bras manipulateur se trouve tendu suivant l'axe vertical au sol ou parallèle à l'axe des roues.

La complexité des matrices  $\bar{J}(q)$  et  $J(q)$  rend le calcul littéral difficile. Les configurations singulières du manipulateur mobile ARPH peuvent être calculées numériquement à partir des rangs des matrices des modèles différentiels MDD et MDDR.

## 7 Validation des modèles sur le système réel

Afin de tester les modèles géométriques (MGD et MGI) du bras manipulateur, nous avons procédé par un jeu de tests aléatoires recueillis directement à partir des retours capteur du Manus dans ces deux modes cartésien et articulaire fournis par le constructeur. Ainsi en appliquant le modèle direct aux différentes configurations articulaires on a pu vérifier que les positions de la pince obtenues sont bonnes. Inversement, en appliquant au modèle inverse les positions de la pince, on a pu vérifier que les valeurs articulaires correspondaient à celle obtenues par les capteurs.

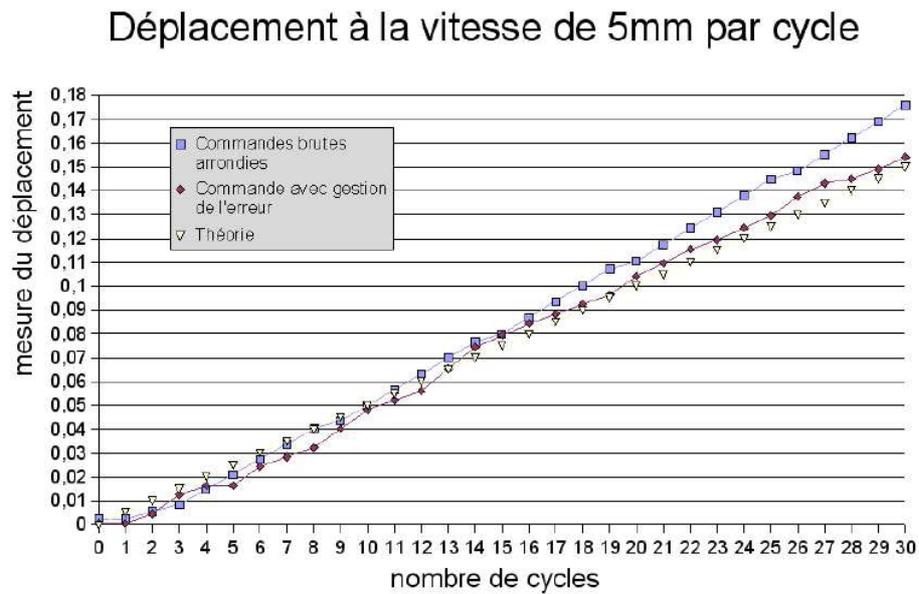
Pour le test des modèles différentiels, nous avons commencé par un jeu de tests pour vérifier que le MDI était toujours l'inverse du MDD. En imposant un déplacement cartésien à partir d'une configuration articulaire donnée (application du MDI) on a pu vérifier que le déplacement articulaire correspondant, génère le même déplacement cartésien en l'appliquant au MDD. Une fois ce test a été validé sur une seule itération, nous sommes passés à plusieurs itérations. À partir d'une configuration initiale donnée, on a appliqué itérativement le modèle différentiel inverse (MDI) pour déplacer la pince dans l'espace opérationnel. L'affichage du

modèle géométrique direct permettait de vérifier l'exécution de la tâche. Des tests pratiques ont été réalisés en boucle ouverte et en boucle fermée.

Le bras Manus est commandé par un nombre limité de vitesses discrètes, ce qui est un inconvénient majeur. Le tableau 2-1 affiche les commandes possibles. Puisqu'on ne dispose que d'un petit nombre de valeurs pour commander Manus, on doit arrondir les vitesses du modèle théorique le plus proche possible. Par conséquent ces erreurs d'arrondi engendrent forcément des erreurs sur la trajectoire désirée pour la pince. Afin de minimiser le problème des erreurs sur les vitesses de commande, nous retenons à chaque cycle l'erreur d'arrondi  $dq_{Berreur}$ . À la boucle suivante, on essaie d'effectuer le mouvement avec une commande tenant compte de l'erreur sur l'itération précédente ( $dq_B + dq_{Berreur}$ ). Ainsi, au fils des boucles les erreurs d'arrondi se compensent. Des tests comparatifs ont permis de mettre en évidence l'importance de cette gestion d'erreur. Pour cela, on a commandé un déplacement de la pince suivant l'axe  $x_B$ , puis on a observé le déplacement effectif de la pince pendant 30 cycles de 60 ms (figure 2-7). La vitesse imposée ici à la pince est de 5 mm par cycle. Dans ce cas les vitesses articulaires obtenues ont les bons ordres de grandeur, les erreurs d'arrondi sont faibles et la trajectoire de la pince est cohérente dans les deux cas (avec et sans gestion des erreurs). La trajectoire obtenue avec gestion de l'erreur se rapproche plus de la théorie.

**Tableau 2-1 : Vitesses de commande du Manus.**

Articulation	Unité	Vitesse min	Vitesse max
$q_{B1}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités
$q_{B2}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités
$q_{B3}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités
$q_{B4}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités
$q_{B5}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités
$q_{B6}$	0.1° par 60ms	-10 unités	10 unités



**Figure 2-7 : Déplacement de la pince du bras manipulateur suivant l'axe  $x_B$  avec une vitesse de 5 mm/cycle.**

Un autre exemple illustrant l'intérêt de la gestion de l'erreur sur les vitesses de commande est le suivant : si on commande la pince à une vitesse faible (1 mm par cycle), les vitesses articulaires théoriques sont proches de zéro. La figure 2-8 montre les trajectoires obtenues respectivement : avec le modèle théorique, commandes arrondies et commandes arrondies avec gestion des erreurs. Les arrondis donnent toujours zéro et donc la pince ne se déplace pas du tout. Avec la gestion des erreurs, la pince reste immobile au départ, mais commence à se déplacer dès que les erreurs d'arrondi cumulées dépassent 0,5. Ici la gestion des erreurs d'arrondi est indispensable pour déplacer la pince.

Les résultats obtenus avec la gestion de l'erreur sur les arrondis montrent des courbes proches de la théorie.

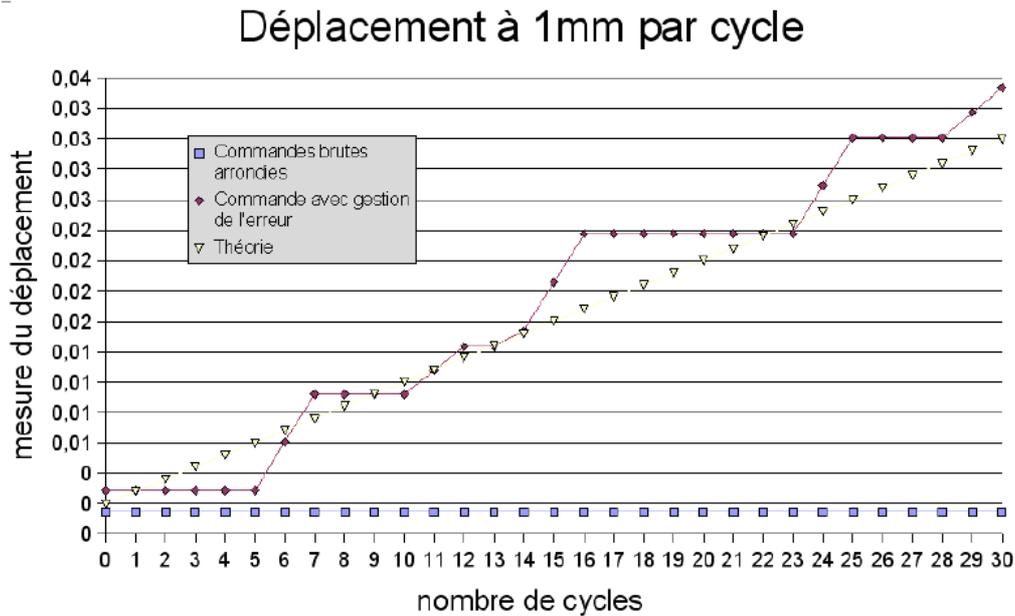


Figure 2-8 : Déplacement de la pince du bras manipulateur suivant l'axe  $x_B$  avec une vitesse de 1mm/cycle.

Après avoir effectué des tests sur le bras manipulateur, nous avons fait des tests sur l'ensemble du manipulateur mobile. Les déplacements réels engendrés par une tâche désirée semblent cohérents. Le seul moyen en notre possession pour tracer les trajectoires de la pince est d'utiliser les données fournies par l'odométrie. La figure 2-9 donne les trajectoires obtenues sur la base des données réelles et théoriques. La trajectoire calculée en utilisant le retour odométrique montre une erreur faible au départ puis qui augmente avec la distance parcourue. Cette erreur ne correspond pas complètement à celle commise sur l'exécution de la tâche, mais également aux erreurs de l'odométrie.

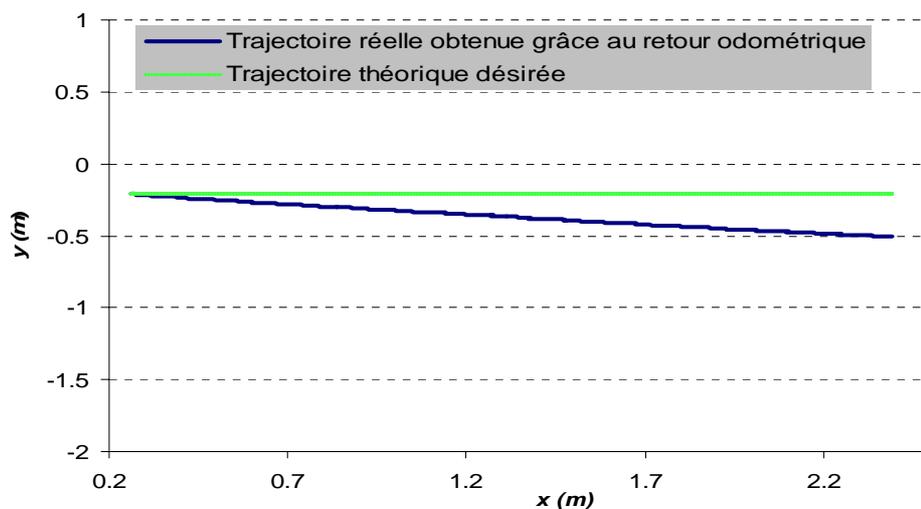


Figure 2-9 : Trajectoire de l'organe terminal pour un déplacement en ligne droite suivant l'axe x du repère du monde.

## 8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les modèles géométriques et différentiels (cinématiques) du bras manipulateur MANUS et du manipulateur mobile ARPH composé d'une plate-forme mobile et du bras manipulateur. Ces modèles seront utilisés dans la suite de ce mémoire pour le développement d'une commande coordonnée et d'une stratégie permettant de répondre à un scénario usuel de saisie d'un objet par une personne distante. L'objectif n'est pas la saisie mais le placement du système ARPH dans une configuration permettant une saisie aisée de l'objet. L'idée est, quand c'est possible, d'exploiter la redondance du système dans la méthode d'inversion du modèle cinématique.

Les modèles ont été évalués sur le système réel, ce qui a amené à s'intéresser à des problèmes concrets portant sur la cohérence des deux sous-systèmes : la plate-forme et le bras MANUS, composant ARPH notamment en termes de vitesses et de protocoles de communication.

## **Chapitre 3 : Manipulabilité**



# 1 Introduction

La manipulabilité est une quantité qui représente la capacité du manipulateur à se déplacer autour d'une configuration donnée. Elle permet d'analyser la cinématique des systèmes mécaniques. La manipulabilité est utilisée dans diverses applications : lors de la conception des mécanismes, dans la planification de trajectoire ou la commande des systèmes mécaniques.

L'objet de ce chapitre est de proposer de nouvelles mesures de manipulabilité et d'évaluer leur apport pour la commande d'un bras manipulateur. Dans un premier paragraphe, nous étudierons les bras manipulateurs et proposerons une mesure de manipulabilité permettant de prendre en compte non seulement la configuration du bras mais aussi la tâche que l'on souhaite exécuter. Le paragraphe suivant reprendra l'extension du concept de manipulabilité des bras manipulateurs aux manipulateurs mobiles. Deux voies d'améliorations sont présentées, l'une permettant d'homogénéiser les dimensions du système, l'autre s'inspirant de la première amélioration proposée en tenant compte de la direction de la tâche à réaliser. Dans le dernier paragraphe, nous étudierons l'application de la manipulabilité au contrôle des manipulateurs mobiles pour une tâche opérationnelle imposée, afin d'exploiter la redondance générée par l'association des capacités de manipulation et de locomotion du système. Cela nous permettra de comparer différentes mesures proposées dans la littérature et dans ce mémoire.

## 2 Mesures de manipulabilité des bras manipulateurs

### 2.1 Rappel sur les mesures de manipulabilité et leurs limites

#### 2.1.1 Définition de la manipulabilité

Le sous-ensemble des vitesses opérationnelles  $\dot{X}_B$  réalisables telles que les vitesses généralisées  $\dot{q}_B$  correspondantes vérifient  $\|\dot{q}_B\|^2 \leq 1$  est un ellipsoïde, appelé ellipsoïde de manipulabilité ([Yoshikawa85]). (cf. chapitre1, paragraphe 4.1).

On rappelle qu'une des mesures représentatives des capacités de manipulation des bras manipulateurs, tirée de l'ellipsoïde de manipulabilité, est donnée par :

$$w_B = \sqrt{J_B J_B^T} = \prod_{i=1}^{m_B} \sigma_{Bi} \quad (1)$$

où :  $J_B$  est la matrice jacobienne du bras manipulateur et les  $\sigma_{Bi}$  sont ses valeurs singulières.

La littérature propose plusieurs autres mesures basées sur le concept de l'ellipsoïde de manipulabilité (cf. chapitre 1, paragraphe 4.1.1). Elles exploitent généralement le produit ou le quotient des valeurs singulières du jacobien du bras manipulateur.

La structure des bras manipulateurs les plus couramment utilisés permet d'assurer le découplage entre la position et l'orientation (figure 3-1). Il est alors plus intéressant de décomposer l'étude des singularités et de la manipulabilité de ce type de systèmes en deux parties : le positionnement et l'orientation. Cette démarche permet de simplifier les calculs. Les singularités des poignets sont généralement connues.

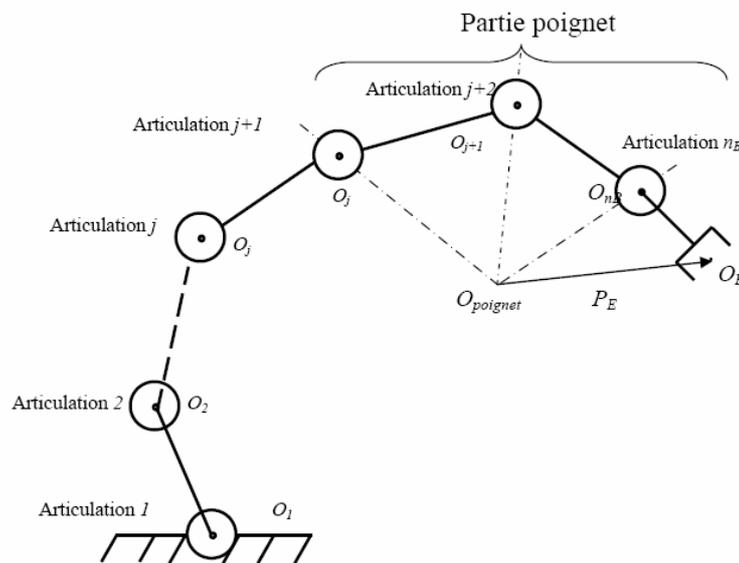


Figure 3-1 : Structure générale d'un bras manipulateur.

### 2.1.2 Limites des mesures existantes

Les mesures de manipulabilité basées sur le concept de l'ellipsoïde de manipulabilité sont de bons indicateurs des capacités propres de manipulation des bras manipulateurs. Comme il a été dit dans l'introduction, elles sont souvent utilisées dans la phase de conception des mécanismes, dans la planification de trajectoires, et dans la commande pour choisir les postures de manipulation. Cependant, la faiblesse de ces mesures est qu'elles ne tiennent pas compte de la tâche que le manipulateur doit réaliser.

Par exemple, considérons la tâche opérationnelle qui consiste à faire suivre par l'organe terminal (OT) du bras Manus (cf. chapitre 2) une ligne droite en partant d'une configuration

repliée pour atteindre une configuration étendue. La figure 3-2a montre les ellipses de manipulabilité formées respectivement par le plus grand et le plus petit vecteur singulier. La forme de l'ellipse donne des informations sur la distribution des vitesses. Les configurations singulières correspondent à des ellipses plates. La forme de l'ellipse de manipulabilité tend vers un cercle lorsque la capacité de déplacement est uniforme dans toutes les directions du plan du cercle.

La première articulation du Manus dont l'axe de rotation est perpendiculaire au sol ne possède pas de butée articulaire, ce qui nous permet d'imposer la même tâche opérationnelle dans les différentes directions du plan parallèle au sol. La figure 3-2b représente l'évolution de la mesure de manipulabilité du bras  $w_B$  (cf. équation 1) dans l'espace opérationnel lorsque  $x_{B3}=0$  (cf chapitre 2, paragraphe 4.1). Elle montre que la mesure de manipulabilité du bras ne dépend pas de l'orientation de l'axe 1. Pour une configuration donnée par  $q_{B2}$  et  $q_{B3}$  (cf. chapitre 2, paragraphe 4.1.4), la capacité de manipulation est la même quelle que soit la direction de la tâche.

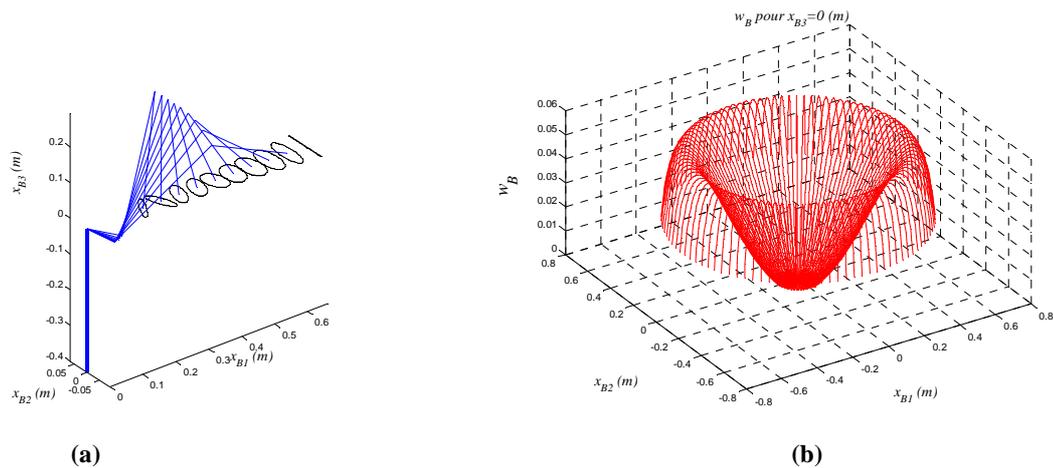


Figure 3-2 : a) Ellipses de manipulabilité et b) mesure de manipulabilité  $w_B$  dans le plan pour Manus.

Pour illustrer la faiblesse des mesures de manipulabilité existantes, prenons un exemple simple d'un manipulateur à deux dimensions. Les figures 3-3a et 3-3b montrent l'ellipse de manipulabilité pour deux configurations différentes d'un même manipulateur à deux axes.

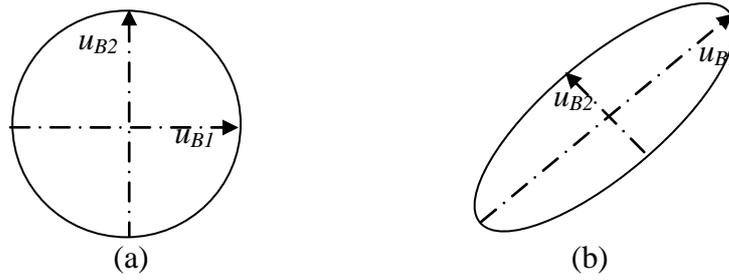


Figure 3-3 : Ellipses de manipulabilité pour un manipulateur à deux dimensions.

Les mesures de la littérature affichent que la configuration correspondant au premier cas (figure 3-3a) est meilleure que celle correspondant au deuxième cas (figure 3-3b). Alors que si la direction de la tâche que doit exécuter le manipulateur est donnée par la direction de  $u_{B1}$ , on s'aperçoit que la capacité de déplacement de l'organe terminal suivant cet axe est meilleure dans la deuxième configuration. De cet exemple simple, on peut déduire que les mesures de manipulabilité présentées dans la littérature (cf. chapitre 1) ne reflètent pas la capacité réelle d'un mécanisme à effectuer une tâche donnée. Le paragraphe suivant propose une solution pour prendre en compte non seulement les capacités intrinsèques du bras manipulateur, mais aussi la tâche à réaliser dans le calcul de la manipulabilité.

## 2.2 Manipulabilité directionnelle

### 2.2.1 Définition de $w_{Bdir}$

Soit la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice  $J_B$ , donnée par :

$$J_B = U_B \Sigma_B V_B^T \quad (2)$$

avec  $U_B = [u_{B1}, u_{B2}, \dots, u_{Bm_B}] \in R^{m_B \times m_B}$  et  $V_B \in R^{n_B \times n_B}$  deux matrices orthogonales, et  $\Sigma_B$  une matrice diagonale dont les éléments sont les valeurs singulières de  $J_B$ , données dans l'ordre décroissant :  $\sigma_{B1} \geq \sigma_{B2} \geq \dots \geq \sigma_{Bm_B}$ .

Les axes principaux de l'ellipsoïde de manipulabilité sont donnés par les vecteurs colonnes de la matrice  $U_B$  (figure 3-3) et son volume est proportionnel au produit  $\sigma_1 \times \sigma_2 \times \dots \times \sigma_{m_B}$ .

Nous proposons d'inclure des informations sur la direction de la tâche désirée pour connaître précisément la capacité de manipulation du bras manipulateur pour l'exécution de cette tâche opérationnelle.

On définit le vecteur unitaire qui donne la direction de la tâche dans l'espace opérationnel par  $d = \frac{\dot{X}_d}{\|\dot{X}_d\|}$  où  $\dot{X}_d$  est le vecteur des vitesses opérationnelles imposées à l'OT.

En utilisant les propriétés du produit scalaire et les valeurs singulières qui représentent les rayons de l'ellipsoïde, nous définissons une nouvelle mesure de manipulabilité comme étant la somme des valeurs absolues des produits scalaires du **vecteur directionnel de la tâche** par les **vecteurs singuliers** pondérés par leurs **valeurs singulières** correspondantes. Cette nouvelle mesure est notée  $w_{Bdir}$ .

$$w_{Bdir} = \sum_{i=1}^{m_B} |(d^T \cdot u_{Bi}) \sigma_{Bi}| \quad (3)$$

Cette mesure est maximisée lorsque la capacité de manipulation suivant la direction de la tâche imposée est maximale. Elle s'annule s'il n'y a pas de possibilité de déplacement suivant cette direction.

### 2.2.2 Exemple

Cette simulation permet d'illustrer l'intérêt de la mesure  $w_{Bdir}$  que nous proposons par rapport à  $w_B$ .

Considérons le bras manipulateur double pendule inversé, présenté au chapitre 1, paragraphe 4.1.2. Soit la tâche imposée qui consiste à suivre une ligne droite en partant d'une configuration complètement repliée ( $q_{Bi} = [\pi/2, -\pi]^T$  en rad) pour atteindre une configuration complètement étendue ( $q_{Bf} = [0, 0]^T$  en rad).

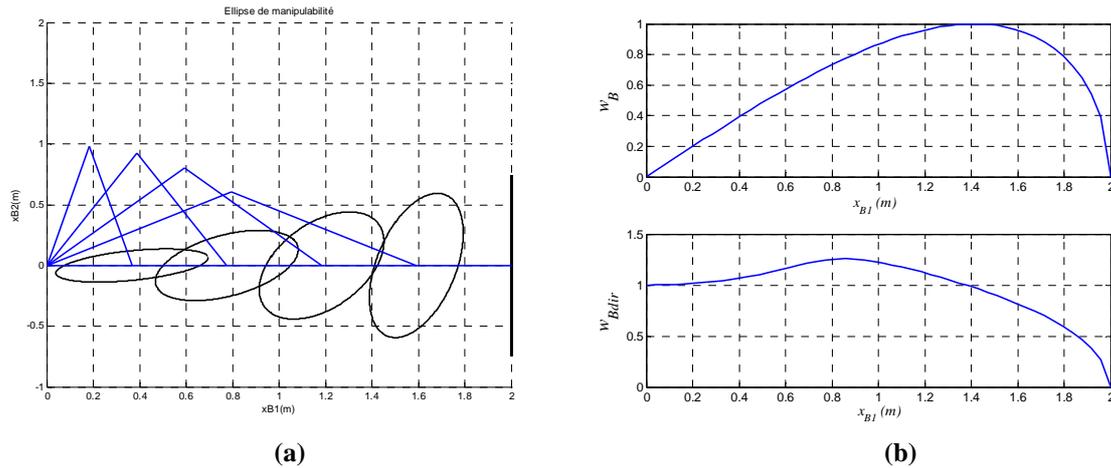


Figure 3-4: a) Ellipses et b) mesures de manipulabilité du double pendule inversé.

Sur la figure 3-4a sont représentées des configurations successives du bras manipulateur et les ellipses de manipulabilité correspondant à chaque configuration. La figure 3-4b donne les évolutions respectives des deux mesures ( $w_B$  et  $w_{Bdir}$ ). Il faut considérer que les mesures évoluent de la valeur zéro (manipulabilité minimale) à une valeur positive maximale (manipulabilité maximale) différente pour les deux mesures.

### 2.2.3 Discussion

Considérons la configuration initiale du bras manipulateur de l'exemple précédent. Le bras n'a pas la capacité de se déplacer dans la direction de  $x_{B2}$ . Cependant, il conserve sa capacité de déplacement suivant l'axe  $x_{B1}$  qui est la direction de la tâche. La mesure de manipulabilité  $w_B$  indique une configuration singulière ( $w_B=0$ ) qui masque cette possibilité de mouvement. Comme  $w_B$  est le produit des valeurs singulières, elle s'annule dès qu'une direction de mouvement est impossible. En revanche, la mesure que nous avons proposée montre que la capacité de déplacement suivant cette direction ( $x_{B1}$ ) n'est pas nulle.

Considérons la configuration finale qui est aussi une configuration singulière. Les deux mesures s'annulent :  $w_B$  parce qu'il y a une impossibilité de se déplacer dans au moins une direction,  $w_{Bdir}$  parce que il y a impossibilité de se déplacer dans la direction de la tâche.

Les mesures proposées dans la littérature n'indiquent pas la capacité réelle de manipulation dans une configuration donnée et pour une tâche bien définie. Elles représentent la capacité du manipulateur de se déplacer autour d'une configuration donnée dans toutes les directions. Elles prennent des valeurs particulières aux configurations singulières ( $w_B=0$ ,

$w_{B2}=0$  et  $w_{B5}=1$ ) pour afficher la perte d'un ou plusieurs degrés de liberté. Alors que la mesure que nous proposons ne s'annule que si la capacité réelle de déplacement est nulle.

### 3 Mesures de manipulabilité des manipulateurs mobiles

#### 3.1 Rappel de la définition

À la différence des bras manipulateurs à base fixe, les manipulateurs mobiles sont dotés d'une capacité de locomotion qui peut contribuer à l'exécution des tâches de manipulation. Bayle a généralisé la définition standard de la manipulabilité au cas d'un manipulateur mobile composé d'un bras manipulateur à  $n_B$  articulations et une plate-forme mobile non holonome ([Bayle01a], [Bayle01b]). On procède de la même manière que les bras manipulateurs mais en utilisant le formalisme du modèle cinématique réduit, rappelé au chapitre 2 paragraphe 6.1.3 ([Foulon98]).

Dans le cas d'un manipulateur mobile, la relation entre les vitesses opérationnelles  $\dot{X}$  et les vitesses de commande données par le vecteur  $u = [v, \omega, \dot{q}_{B1}, \dots, \dot{q}_{Bn_B}]^T$  peut être exprimée par le modèle cinématique réduit :

$$\dot{X} = \bar{J}(q)u \quad (4)$$

avec  $\bar{J}(q) = J(q)M(\theta_p)$  et  $\dot{q} = M(\theta_p)u$ .

La manipulabilité caractérise un sous ensemble  $\dot{X}$  de vitesses réalisables telles que les vitesses de commande  $u$  correspondantes vérifient la relation  $\|u\| \leq 1$ . Par conséquent, plusieurs mesures définies pour les bras manipulateurs peuvent être réutilisées dans le cas du manipulateur mobile en utilisant les valeurs singulières de la matrice  $\bar{J}(q)$ . Cependant cette généralisation de la définition de manipulabilité entraîne certains inconvénients.

Pour simplifier considérons le cas du positionnement de l'OT. Le vecteur des vitesses  $\dot{X}$  qui définit la tâche, est exprimé en  $m.s^{-1}$ , alors que le vecteur des vitesses de commande  $u$  est exprimé en  $m.s^{-1}$  pour la première composante (la vitesse linéaire de la plate-forme) et en  $rad.s^{-1}$  pour les autres composantes du vecteur. C'est une différence importante par rapport au cas des bras manipulateurs pour lequel tous les éléments de la matrice jacobienne  $J_B$  ont les mêmes unités. Cette hétérogénéité présente le risque de favoriser la prépondérance d'un des sous-systèmes (bras manipulateur ou plate-forme). Un autre inconvénient de cette formulation

est qu'elle ne prend pas en compte les vitesses limites des composants du système. Généralement les vitesses maximales des actionneurs sont différentes les unes des autres.

## 3.2 Améliorations proposées

### 3.2.1 Normalisation

Pour résoudre le problème lié aux unités de mesures et pour inclure les contraintes sur les limites en vitesses des différents actionneurs dans la mesure de manipulabilité, nous proposons d'introduire les vitesses normalisées dans  $\bar{J}(q)$

Posons :

$$u_N = \left[ \frac{v}{v_{\max}}, \frac{\omega}{\omega_{\max}}, \frac{\dot{q}_{B1}}{\dot{q}_{B1,\max}}, \dots, \frac{\dot{q}_{Bn_B}}{\dot{q}_{Bn_B,\max}} \right]^T \quad (5)$$

Ainsi :

$$u_N = R^{-1}u \quad (6)$$

où  $R = \text{diag}(v_{\max}, \omega_{\max}, \dot{q}_{B1,\max}, \dots, \dot{q}_{Bn_B,\max})$ .

Notons que  $\text{diag}(\cdot)$  est une matrice diagonale dont les éléments sont donnés en argument.

Avec ce nouveau vecteur de vitesses de commande, l'équation 4 du modèle cinématique direct réduit peut se réécrire comme suit :

$$\dot{X} = \bar{J}(q)u = (\bar{J}(q)R)u_N = \bar{J}_N(q)u_N \quad (7)$$

Avec cette nouvelle matrice réduite  $\bar{J}_N$ , on peut définir des mesures de manipulabilité inspirées de celles proposées dans la littérature pour les bras manipulateurs :

$$\tilde{w} = \tilde{\sigma}_1 \tilde{\sigma}_2 \cdots \tilde{\sigma}_m \quad (8)$$

$$\tilde{w}_2 = \frac{\tilde{\sigma}_m}{\tilde{\sigma}_1} \quad (9)$$

$$\tilde{w}_3 = \sqrt{1 - \frac{\tilde{\sigma}_m^2}{\tilde{\sigma}_1^2}} \quad (10)$$

dans lesquels les  $\tilde{\sigma}_i$  sont les valeurs singulières de  $\bar{J}_N$  pour  $1 \leq i \leq m$ .

### 3.2.2 Manipulabilité directionnelle du manipulateur mobile

Pour mesurer la capacité de manipulation du bras en tenant compte des capacités de locomotion de la plate-forme suivant la direction donnée par la tâche, nous définissons la mesure directionnelle globale (bras manipulateur + plate-forme) basée sur celle que nous avons proposée pour le bras manipulateur :

$$\tilde{w}_{dir} = \sum_{i=1}^m |(d^T \cdot u_i) \tilde{\sigma}_i| \quad (11)$$

où les  $\tilde{\sigma}_i$  sont les valeurs singulières de  $\bar{J}_N$  et les  $u_i$  sont les vecteurs colonnes de la matrice  $U$  des vecteurs singuliers, obtenus par la décomposition en valeurs singulières de  $\bar{J}_N$ .

### 3.2.3 Exemple

Pour illustrer l'intérêt de la normalisation proposée précédemment, considérons le bras Manus embarqué sur une plate-forme mobile. Le bras est fixé au centre de l'axe des roues (cf. chapitre 2, figure 2-7 avec  $a = b = 0$ ). Nous examinons l'évolution de la manipulabilité pour une tâche opérationnelle qui consiste à suivre une ligne droite le long de  $x_{B1}$  (perpendiculaire à la direction de déplacement de la plate-forme) à partir d'une configuration repliée (point de coordonnées opérationnelles  $(0, 0.12, 0)^T$  en m) vers une configuration étendue. Au cours de cette tâche, la plate-forme ne se déplace pas (le système n'est pas commandé mais le bras manipulateur est positionné en une succession de configurations pour lesquelles on calcule la manipulabilité) cependant sa capacité de déplacement est prise en compte dans le calcul de la manipulabilité.

La matrice du bras mobile est donnée par :

$$\bar{J}(q) = \begin{bmatrix} c_{\theta_p} & \bar{J}_{12} & \bar{J}_{13} & \bar{J}_{14} & \bar{J}_{15} \\ s_{\theta_p} & \bar{J}_{22} & \bar{J}_{23} & \bar{J}_{24} & \bar{J}_{25} \\ 0 & 0 & J_{a31} & J_{a32} & J_{a33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

où :

$$c_{\theta_p} = \cos(\theta_p), \quad s_{\theta_p} = \sin(\theta_p)$$

$J_{Bij} = J_B(i, j)$  : des éléments de la matrice jacobienne du bras

$$\bar{J}_{12} = -(x_{B2} + a)s_{\theta_p} - (b - x_{B1})c_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{13} = J_{B21}c_{\theta_p} + J_{B11}s_{\theta_p}$$

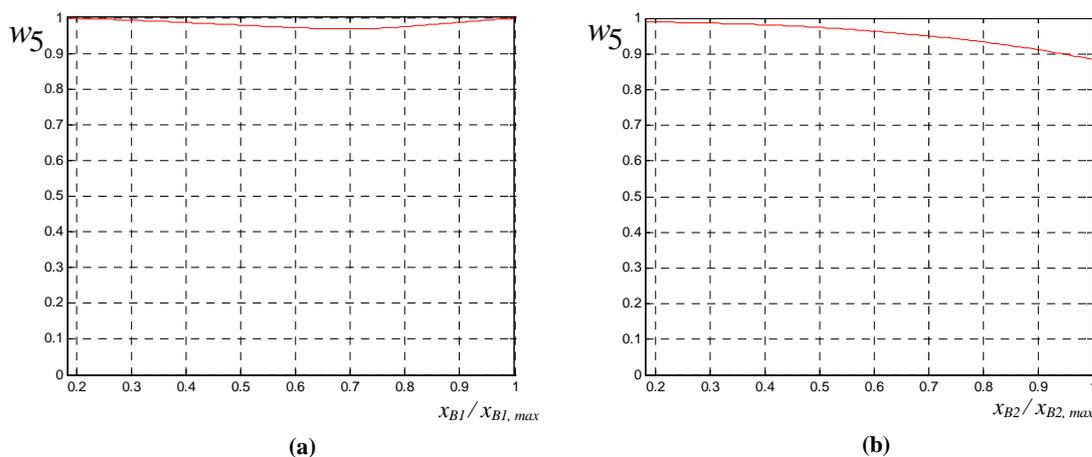
$$\bar{J}_{14} = J_{a22}c_{\theta_p} + J_{B12}s_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{15} = J_{B23}c_{\theta_p} + J_{B13}s_{\theta_p},$$

$$\bar{J}_{22} = (x_{B2} + a)c_{\theta_p} - (b - x_{B1})s_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{23} = J_{B21}s_{\theta_p} - J_{B11}c_{\theta_p},$$

$$\bar{J}_{24} = J_{B22}s_{\theta_p} - J_{B12}c_{\theta_p}, \quad \bar{J}_{25} = J_{B23}s_{\theta_p} - J_{B13}c_{\theta_p}.$$

Nous avons choisi d'illustrer l'intérêt de la normalisation sur la mesure  $w_5$  proposée dans la littérature. La figure 3-5a donne l'évolution de la mesure  $w_5$  pour un mouvement de l'organe terminal du bras perpendiculaire à l'axe de déplacement de la plate-forme mobile. Il faut considérer que la mesure peut évoluer de la valeur zéro (manipulabilité maximale) à la valeur un (manipulabilité minimale). La plate-forme mobile ne peut pas se déplacer instantanément dans la direction perpendiculaire à son principal axe de mouvement à cause de la contrainte de non holonomie. Par conséquent, la manipulabilité globale du système se réduit à celle du bras.

La figure 3-5b donne l'évolution de la mesure  $w_5$  alors que la tâche imposée à l'organe terminal est de suivre une ligne droite parallèle à l'axe de déplacement de plate-forme mobile. En fin d'exécution de la tâche, le bras est étendu mais la configuration du système global est considérée non singulière, la valeur de  $w_5$  décroît et s'éloigne de 1. C'est évidemment dû à la possibilité de déplacement offerte par la plate-forme.

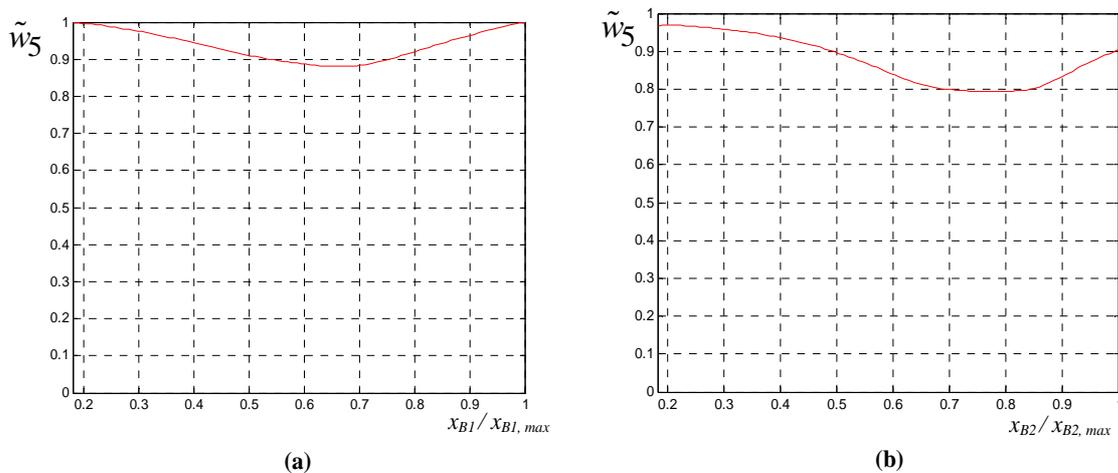


**Figure 3-5 : Manipulabilité du manipulateur mobile  $w_5$  : a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme.**

Nous présentons maintenant les résultats de simulation après normalisation. Les vitesses maximales du système réel (bras Manus + plate-forme) sont:

$$u_{\max} = [0.33, 0.55, \pi/3, \pi/3, \pi/3]^T \text{ (en m.s}^{-1}, \text{rad.s}^{-1}, \text{rad.s}^{-1}, \text{rad.s}^{-1}, \text{rad.s}^{-1}\text{)}.$$

La figure 3-6a donne l'évolution de la mesure de manipulabilité  $\tilde{w}_5$  du bras mobile. La plate-forme mobile ne peut pas se déplacer instantanément dans la direction perpendiculaire à son principal axe de mouvement à cause de la contrainte de non holonomie. Par conséquent, la manipulabilité globale du système se réduit à celle du bras. La figure 3-6b montre l'évolution de la manipulabilité  $\tilde{w}_5$  du manipulateur mobile mais la tâche imposée à l'organe terminal est de suivre une ligne droite parallèle à l'axe de déplacement de plate-forme mobile. Les effets de la plate-forme sur la forme de l'ellipsoïde et la mesure de manipulabilité sont significatifs. Comme pour  $w_5$ , la configuration étendue du bras devient non singulière pour le système global. Cependant l'évolution de  $\tilde{w}_5$  montre une dégradation en fin de tâche contrairement à celle de  $w_5$ .



**Figure 3-6 : Mesures normalisées de la manipulabilité du manipulateur mobile  $\tilde{w}_5$ . : a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme.**

### 3.2.4 Discussion

Nous avons présenté l'extension du concept de manipulabilité au cas d'un manipulateur mobile qui a une structure plus complexe qu'un simple bras manipulateur. La manipulabilité du manipulateur mobile prend en compte la contribution de chacune des composantes du

système, à savoir la plate-forme mobile et le bras manipulateur. Les mesures de manipulabilité du manipulateur mobile  $w$  et  $w_5$ , telles qu'elles sont définies, ne prennent pas en considération les limites réelles du système. Les mesures normalisées que nous proposons permettent d'inclure les valeurs maximales des vitesses dans la manipulabilité et résout le problème lié aux unités physiques.

L'évolution de la mesure de manipulabilité  $w_5$  du manipulateur mobile (figure 3-5b) montre que la configuration complètement étendue du bras, qui est singulière pour le bras manipulateur seul, ne l'est pas pour le manipulateur mobile. Alors que la mesure normalisée  $\tilde{w}_5$  (figure 3-6b), qui prend en considération les limites en vitesses du système, montre une détérioration de la mesure en cette configuration. Ce qui reflète mieux la réalité. On remarque que  $\tilde{w}_5$  privilégie les positions dans lesquelles le bras manipulateur est éloigné de ses configurations singulières.

La mesure est d'autant plus sensible à la normalisation que la disparité des deux sous systèmes composant le manipulateur mobile est plus marquée. Reprenons le même exemple précédent, avec le même bras manipulateur, mais plus rapide. Les vitesses limites du système sont :

$$u_{\max} = [0.33, 0.55, \pi, \pi, \pi]^T \text{ (en m.s}^{-1}, \text{ rad.s}^{-1}, \text{ rad.s}^{-1}, \text{ rad.s}^{-1}, \text{ rad.s}^{-1}\text{)}$$

La figure 3-7a montre l'évolution de la mesure de manipulabilité  $\tilde{w}_5$  pour un mouvement de l'organe terminal du bras perpendiculaire à l'axe de déplacement de la plate-forme mobile. La manipulabilité du manipulateur mobile est dans ce cas plus importante que les cas précédents (3-5a et 3-6a). Cela apparaît sur la courbe de la mesure  $\tilde{w}_5$  qui s'écarte plus de la valeur 1 (configurations singulières) que les courbes précédentes. La figure 3-7 donne l'évolution de la mesure  $\tilde{w}_5$  mais la tâche imposée à l'organe terminal est de suivre une ligne droite parallèle à l'axe de déplacement de la plate-forme mobile. La valeur de la mesure  $\tilde{w}_5$  est proche de 1 pour la configuration bras manipulateur complètement étendu. La capacité de manipulation du bras manipulateur dans ce cas est plus importante que celle de la plate-forme mobile.

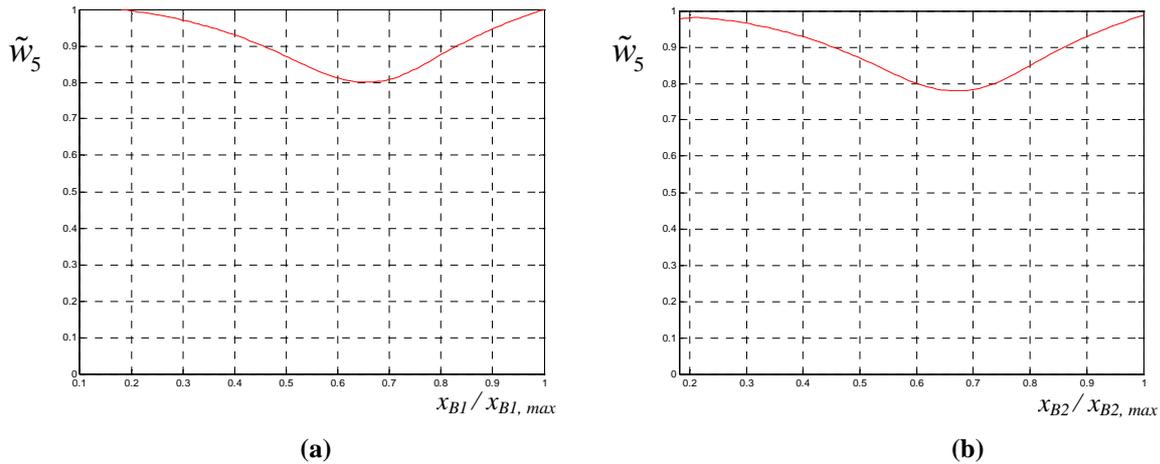


Figure 3-7 : Mesures normalisées de la manipulabilité du manipulateur mobile : a) mouvements de l'OT perpendiculaire à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme, b) mouvements de l'OT parallèle à l'axe de déplacement longitudinal de la plate-forme.

## 4 Application de la manipulabilité à la commande des manipulateurs mobiles

La redondance d'un manipulateur mobile peut être exploitée pour assurer une bonne manipulabilité du système pendant l'exécution d'une tâche. La section 4.1 rappelle les principes de mise en œuvre de l'approche basée sur l'utilisation de la pseudo-inverse avec un terme d'optimisation. La section 4.2 permet, à l'aide d'exemples de simulation, d'en montrer l'intérêt et de comparer plusieurs mesures de manipulabilité : celles tirées de la littérature et celles que nous avons proposées.

### 4.1 Rappel du principe

Pour la réalisation d'une tâche opérationnelle, il est nécessaire de chercher les mouvements des articulations du manipulateur et de la base mobile. On choisit une méthode de résolution basée sur la pseudo-inverse et l'optimisation d'une contrainte ([Khalil99], [Nakamura91]). Dans le cas des bras manipulateur la solution s'exprime sous la forme suivante :

$$\dot{q}_B = J_B^+ \dot{X}_d + k(I_{n_B} - J_B^+ J_B) \left( \frac{\partial P}{\partial q_B} \right)^T \quad (13)$$

où :

$J_B^+$  : la pseudo-inverse de la jacobienne du bras,

$\dot{q}_B$  : les vitesses articulaires du bras manipulateur,

$\dot{X}_d$  : les vitesses opérationnelles désirées,

$k$  : une constante de gain positive,

$P$  : la fonction à maximiser.

#### 4.1.1 Modèle cinématique inverse d'un manipulateur mobile

On reprend le principe précédent pour un manipulateur mobile en utilisant la notion de modèle réduit proposé par Foulon ([Foulon98]) et présenté dans le chapitre 2. Bayle ([Bayle01b]) l'a adapté pour prendre en compte les aspects cinématiques dans le terme d'optimisation.

$$u = \bar{J}^+ \dot{X}_d - k(I_{n-1} - \bar{J}^+ \bar{J}) \left( \frac{\partial P}{\partial q} M \right)^T \quad (14)$$

où :

$u = M^T \dot{q}$  : vitesses de commande du système (vitesses opérationnelles de la plateforme et articulaires du bras manipulateur),  $M$  étant la matrice qui lie les vitesses de commande aux vitesses généralisées du systèmes,

$$M(\theta_p) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & 0 & & \\ \sin(\theta_p) & 0 & 0_{3 \times n_B} & \\ 0 & 1 & & \\ 0_{n_B \times 2} & & I_{n_B \times n_B} & \end{bmatrix}$$

$k$  : une constante de gain positive,

$P$  : la fonction à optimiser (minimiser).

Le problème est de trouver une fonction  $P$  permettant d'obtenir des configurations répondant aux besoins de la tâche ([Baerlocher01], [Boulic03], [Bayle01c], [Nakamura91], [Sciavicco96]).

#### 4.1.2 Calcul du gradient de la fonction à optimiser

Il n'est pas possible d'établir une expression littérale de la fonction scalaire  $P$  qu'on souhaite minimiser ou maximiser. Elle dépend généralement des valeurs singulières qu'on ne

peut calculer que numériquement. Il faut donc utiliser une évaluation approchée (numérique) du gradient.

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P(q_1 + \Delta q_1, q_2, \dots, q_n) - P(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ &\vdots \\ \Delta P_i &= P(q_1, \dots, q_i + \Delta q_i, \dots, q_n) - P(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ &\vdots \\ \Delta P_n &= P(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n + \Delta q_n) - P(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned}$$

$$\text{grad}(P) = \left[ \frac{\Delta P_1}{\Delta q_1}, \dots, \frac{\Delta P_i}{\Delta q_i}, \dots, \frac{\Delta P_n}{\Delta q_n} \right]$$

## 4.2 Simulation

Nous considérons le bras Manus monté sur une plate-forme mobile non holonome actionnée par deux moteurs indépendants. La plate-forme mobile est initialement au repos à la position  $q_p = [0, 0, 0]^T$  et le bras est étendu de 40 cm vers l'avant de la plate-forme. Sa configuration initiale est donnée par  $q_B = [4.71, 2.35, 4.19]^T$  (en rad). Le bras est fixé sur la partie arrière de la plate-forme. Les coordonnées de sa base par rapport au repère lié à la plate-forme sont  $[-0.12, -0.12, 0.4]^T$  (en m).

On impose une tâche opérationnelle qui consiste à suivre une ligne droite suivant l'axe  $y$  du repère du monde. La vitesse de déplacement suivant cette droite est fixée à  $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (figure 3-8).

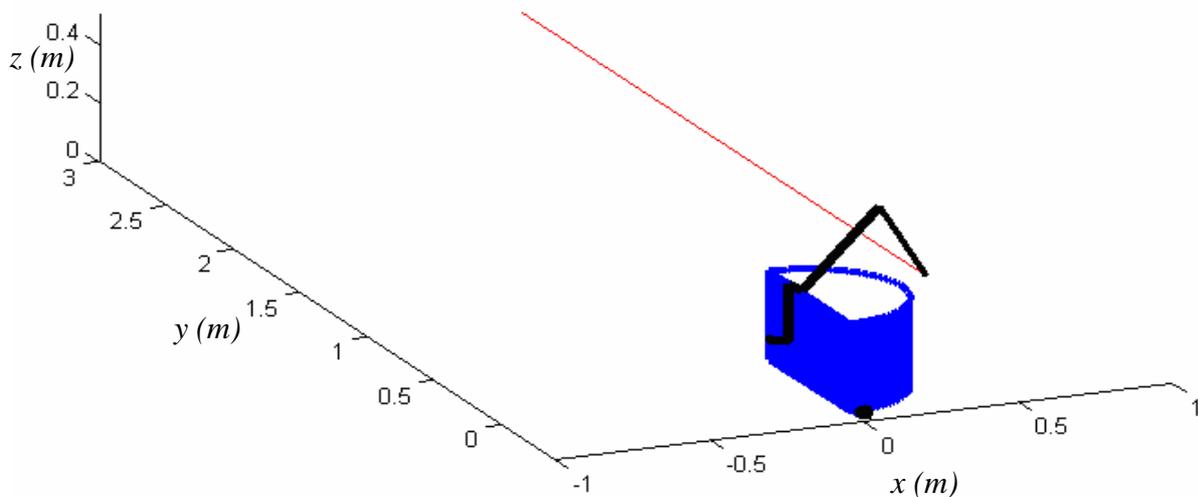


Figure 3-8: Conditions de simulation.

Afin de permettre une comparaison, les mesures de manipulabilité du bras manipulateur puis du manipulateur mobile sont utilisées comme critères à optimiser pour exploiter la redondance du système lors de l'exécution de la tâche opérationnelle imposée :

- optimisation de la mesure de manipulabilité du bras  $w_B$ ,
- optimisation de la mesure de manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$ ,
- optimisation de la mesure de manipulabilité du manipulateur mobile  $w$ ,
- optimisation de la mesure de manipulabilité normalisée du manipulateur mobile  $\tilde{w}$ ,
- optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile

$$\tilde{w}_{dir}.$$

Pour chaque mesure optimisée, sont données l'évolution de cette mesure au cours du temps, l'évolution de  $w_B$  comme élément de comparaison, et les trajectoires de l'OT et de la plate-forme.

La comparaison portera sur :

- l'allure de la trajectoire suivie par la plate-forme,
- un indicateur de l'énergie dépensée  $E$  pour la plate-forme,
- la capacité de manipulation du bras manipulateur en fin de tâche.

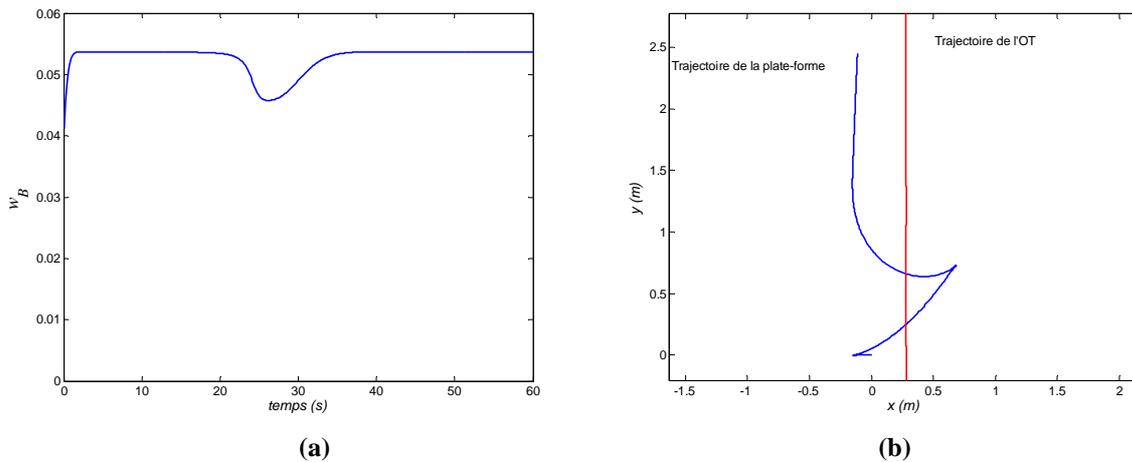
$E$  est défini par  $E = \sum v_g^2 + v_d^2$  avec  $v_d$  et  $v_g$  les vitesses linéaires respectivement de la roue droite et de la roue gauche de la plate-forme.

Avant de présenter chaque cas séparément, il faut noter que, pour chacun d'eux, la tâche est réalisée correctement.

#### a. Optimisation de la mesure de manipulabilité du bras manipulateur $w_B$

La figure 3-9a donne l'évolution de la mesure de manipulabilité  $w_B$  en fonction du temps, lorsque celle-ci est le critère optimisé. On voit que la manipulabilité du bras s'améliore rapidement et atteint un seuil au voisinage duquel elle se stabilise jusqu'à la fin de la simulation. La figure 3-9b montre que l'OT a exécuté sa tâche correctement et que la plate-forme recule un peu au début pour contribuer à l'amélioration de la manipulabilité du bras. Les trajectoires de la plate-forme et de l'OT se coupent. En effet la plate-forme ne s'est pas assez orientée dans la direction de la tâche et c'est principalement le bras qui effectue la tâche. La dégradation locale de la mesure de manipulabilité au voisinage de 25 secondes (voir figure 3-9a) correspond à des configurations où l'intervention de la plate-forme est limitée par la contrainte de non holonomie (le déplacement latéral de la plate-forme n'est pas possible). Un

retournement de la plate-forme s'impose pour améliorer la mesure de manipulabilité du bras. La plate-forme se déplace ensuite en marche arrière jusqu'à la fin. Le bras se reconfigure au début pour atteindre sa configuration optimale qui maximise sa manipulabilité  $w_B$ . En même temps, la base compense le déplacement du bras afin d'exécuter convenablement la tâche opérationnelle imposée. Une fois que le bras a atteint sa meilleure posture, la majorité du déplacement est effectuée par la plate-forme. L'indicateur énergétique E pour cette trajectoire est  $E=7.15 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .



**Figure 3-9 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du bras  $w_B$  : a) évolution de la mesure de manipulabilité, b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.**

### b. Optimisation de la mesure de manipulabilité directionnelle du bras manipulateur

$$w_{Bdir}$$

La figure 3-10a donne l'évolution de la mesure de manipulabilité  $w_{Bdir}$  en fonction du temps, lorsque celle-ci est le critère optimisé et celle de la mesure de la manipulabilité  $w_B$  du bras pour comparaison. La manipulabilité directionnelle du bras est initialement bonne, elle diminue légèrement puis s'améliore progressivement. La mesure  $w_B$  correspondante n'est pas à sa valeur maximale, mais reste dans une plage de valeurs acceptables, loin des configurations singulières. Sur la figure 3-10b, on constate que les deux trajectoires ne se coupent pas contrairement au cas précédent : la plate-forme s'oriente par rapport à la direction de la tâche et le bras reste sur la partie avant du système. L'indicateur énergétique E pour cette trajectoire est  $E=3.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . La dépense énergétique est inférieure au cas précédent.

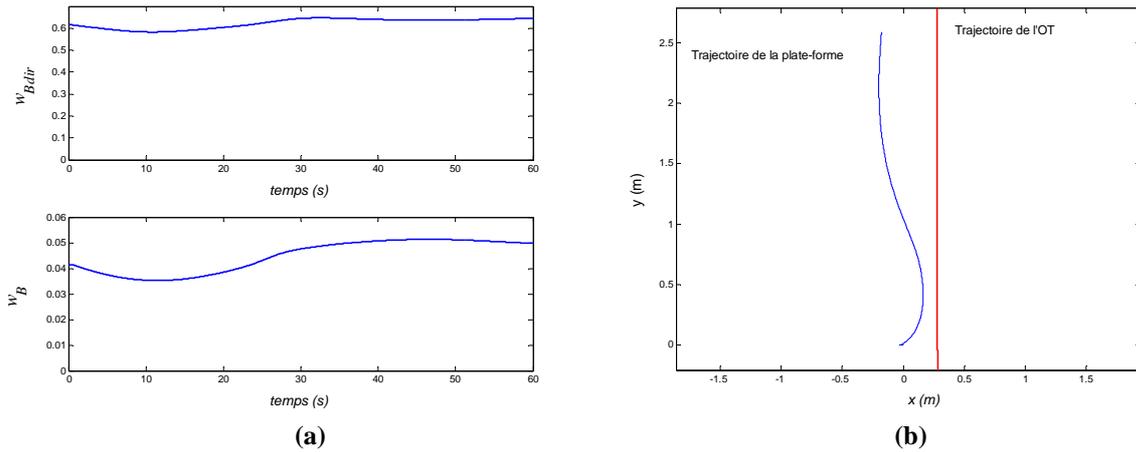


Figure 3-10 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du bras  $w_{Bdir}$  : a) évolutions des mesures de manipulabilité  $w_{Bdir}$  et  $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.

**c. Optimisation de la mesure de manipulabilité du manipulateur mobile  $w$**

La figure 3-11 donne les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité non normalisée du manipulateur mobile  $w$ . Les évolutions de la fonction optimisée  $w$  et de la mesure correspondante en manipulabilité du bras  $w_B$  sont représentées sur la figure 3-11a. La figure montre que la manipulabilité du manipulateur mobile s'améliore et garde de bonnes valeurs, alors que celle du bras se dégrade pour s'annuler à la fin. Dans la figure 3-11b on constate que la tâche imposée à l'OT est correctement exécutée. La plate-forme recule un peu plus que les deux cas précédents, puis elle avance pour contribuer à l'exécution de la tâche et l'amélioration de la fonction optimisée. Cependant sa réorientation en direction de la tâche est plus lente par rapport au cas de l'optimisation de  $w_{Bdir}$  (cas b). L'indicateur énergétique E pour cette trajectoire est  $E=3.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , la même que précédemment.

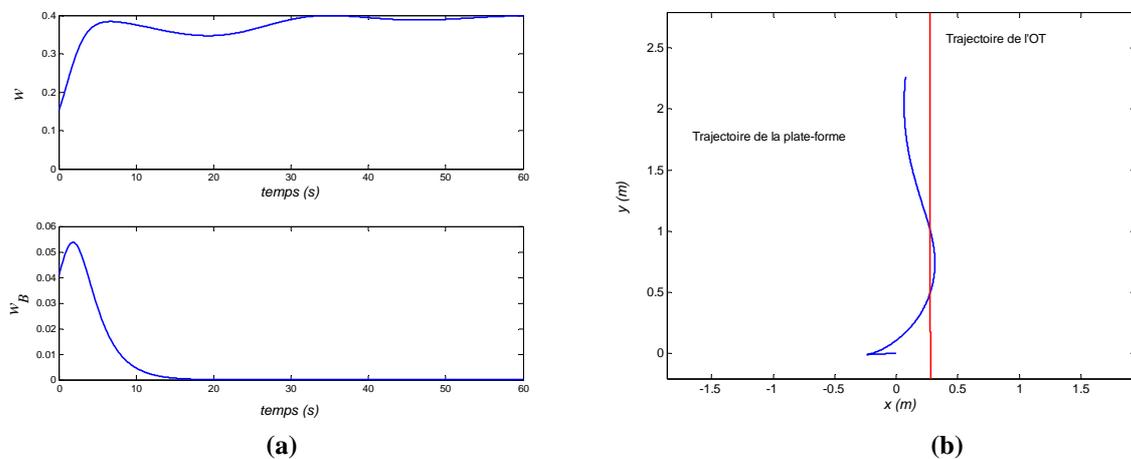


Figure 3-11 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité du manipulateur mobile  $w$  : a) évolutions des mesures de manipulabilité  $w$  et  $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.

#### d. Optimisation de la mesure de manipulabilité normalisée du manipulateur mobile

 $\tilde{w}$ 

La figure 3-12a donne les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité normalisée du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  et l'évolution de  $w_B$ . La manipulabilité du manipulateur mobile s'améliore pour atteindre un maximum, puis se dégrade légèrement. La manipulabilité correspondante du bras se dégrade un peu sans s'annuler puis s'améliore. Le cycle d'évolution des mesures de manipulabilité se reproduit jusqu'à la fin. On voit que les configurations qui maximisent la manipulabilité du manipulateur mobile ne correspondent pas forcément à de mauvaises configurations du bras. La trajectoire de l'OT de la figure 3-12b montre que la tâche est correctement achevée. La plate-forme recule un peu au début, ce qui correspond à l'amélioration de la manipulabilité du bras sur la figure 3-12a. Ensuite elle avance en s'orientant afin d'accomplir la tâche tout en optimisant la contrainte de manipulabilité. La plate-forme se réoriente sans changer de direction de mouvement à chaque fois que la valeur de la fonction optimisée se dégrade. L'indicateur énergétique E pour cette trajectoire est  $E=5.7 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ . Cette valeur est supérieure au cas précédent car ici le bras ne s'étend pas complètement.

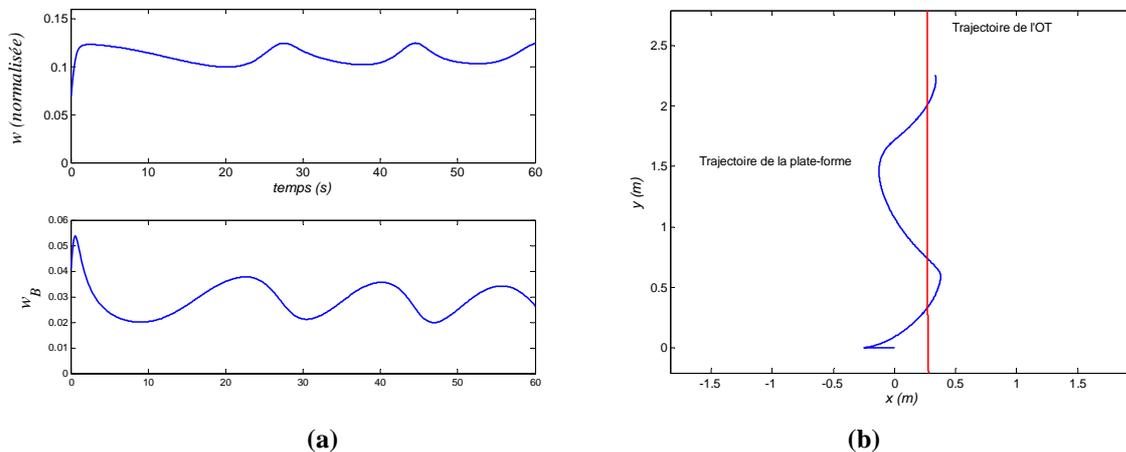


Figure 3-12: Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité normalisée du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  : a) évolution de la mesure de manipulabilité, b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.

### e. Optimisation de la mesure de manipulabilité directionnelle du manipulateur mobile

$$\tilde{w}_{dir}$$

La figure 3-13a donne les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle du manipulateur mobile  $\tilde{w}_{dir}$  et l'évolution de  $w_B$ . La mesure  $\tilde{w}_{dir}$  tient compte de la direction de la tâche et des capacités de manipulation du manipulateur mobile. Les courbes présentées montrent que la manipulabilité directionnelle globale s'améliore et que le bras évolue vers des configurations non singulières. Les valeurs affichées par  $w_B$  ne sont ni les meilleures ni les plus faibles du point de vue de cette mesure. La plate-forme (figure 3-13b) contribue à l'exécution de la tâche en reculant un peu au début puis en tournant en direction de la tâche pour avoir plus de capacité dans l'exécution de la tâche. L'indicateur énergétique  $E$  pour cette trajectoire est  $E=3.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

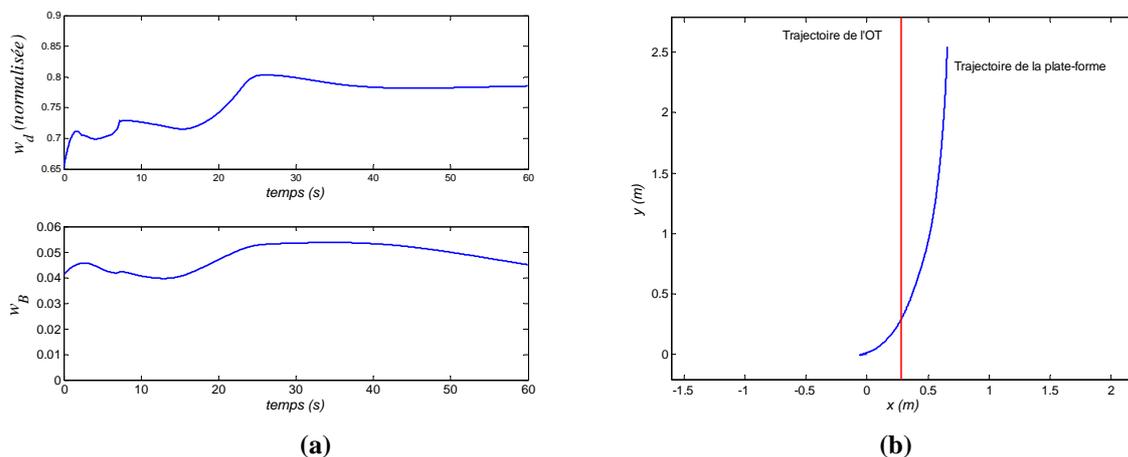


Figure 3-13 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile : a) évolutions des mesures de manipulabilité  $\tilde{w}_{dir}$  et  $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.

## 4.3 Discussion

D'après le tableau 3-1 on peut déduire que les comportements du système sont plus naturels dans le cas de l'utilisation des deux mesures de manipulabilité directionnelles du bras manipulateur ( $w_{Bdir}$ ) et du manipulateur mobile ( $\tilde{w}_{dir}$ ). On signifie par « comportements naturels » le fait d'avoir à la fois une bonne orientation du système par rapport à la tâche, un mouvement sans retournement de la plate-forme et de bonnes configurations de manipulation. Ces comportements naturels sont caractérisés par une plus faible dépense énergétique. La

suite de la discussion détaillée plus précisément les avantages et inconvénients de chaque mesure.

**Tableau 3-1 : Résumé les points de comparaison en fonction des mesures optimisées.**

Optimisation de :	$w_B$	$w_{Bdir}$	$w$	$\tilde{w}$	$\tilde{w}_{dir}$
Allure de la trajectoire	Avec retournement	Sans retournement	Sans retournement	Non stable mais sans retournement	Sans retournement
Indicateur de l'énergie E	7.15	3.1	3.0	5.7	3.0
Capacité de manipulation	Bonne	Bonne	Nulle	Moyenne	Bonne

L'utilisation d'une fonction d'optimisation basée sur la mesure de manipulabilité  $w_B$  permet de tenir compte des singularités du bras. La redondance générée par l'association de la plate-forme mobile et du manipulateur mobile est exploitée pour mettre le bras dans ses meilleures configurations pendant l'exécution de la tâche imposée. Autrement dit, la priorité est à l'exécution de la tâche imposée et la redondance est utilisée pour la reconfiguration du bras. Le bras se reconfigure dès le début de la tâche pour améliorer sa manipulabilité. En même temps, la plate-forme se déplace pour contribuer à l'amélioration de la manipulabilité et de telle sorte que le mouvement de l'OT corresponde au mouvement imposé. Une fois que le bras a atteint sa meilleure configuration, la plate-forme effectue le reste du mouvement. L'inconvénient de ce comportement est que le bras est amené à se reconfigurer dès le début pour maximiser sa manipulabilité sans tenir compte de la tâche imposée. Ceci provoque dans certains cas un déplacement inutile de la plate-forme et des points de rebroussements si la plate-forme est initialement mal orientée par rapport à la direction de la tâche. Les comparaisons des mesures que nous proposons ont été faites par rapport à  $w_B$ . D'autres mesures de la littérature ( $w_5, w_2, \dots$ ) peuvent être utilisées car basées sur le même principe. La différence de ces mesures par rapport à  $w_B$  est qu'elles donnent des informations plus qualitatives sur la forme de l'ellipsoïde de manipulabilité. Alors que  $w_B$  donne une information plus quantitative qui représente le volume de l'ellipsoïde.

L'utilisation d'une fonction d'optimisation basée sur la mesure de manipulabilité directionnelle du bras manipulateur seul  $w_{Bdir}$  permet de tenir compte de la tâche. Cela permet d'éviter des déplacements inutiles de la plate-forme dans certains cas, comme le montre les exemples. Cette mesure reflète la capacité réelle de déplacement suivant la direction de la

tâche. Par conséquent, elle ne s'annule par forcément aux configurations singulières, sauf si le(s) degré(s) de liberté perdu(s) correspond(ent) à la direction de la tâche imposée.

Les mesures présentées ci-dessus ne tiennent compte que de la capacité de manipulation du bras. Le mouvement de la plate-forme résulte de l'exécution de la tâche opérationnelle et de la satisfaction de la contrainte du bras manipulateur. Pour une coordination de mouvement, il est intéressant de prendre des contraintes qui tiennent compte à la fois des capacités de manipulation du bras et de locomotion de la plate-forme. L'utilisation d'une fonction d'optimisation basée sur la mesure de manipulabilité  $w$  permet de tenir compte de la présence de la plate-forme. Cependant, tous les actionneurs sont considérés avec la même importance et la différence des limites en vitesse n'est pas prise en compte. Les configurations du bras obtenus lors de la réalisation des tâches sont généralement tendues (singulières). La maximisation de  $w$  engendre généralement l'annulation de  $w_B$ .

Nous avons proposé la mesure  $\tilde{w}$  qui prend en compte les limites en vitesses des différents actionneurs, ce qui permet d'éviter la dominance d'un sous-système (plate-forme ou bras) sur l'autre. Les résultats ci-dessus montrent que la manipulabilité du bras est meilleure lorsqu'on optimise  $\tilde{w}$  que lorsqu'on optimise  $w$ . Ainsi, les configurations complètement étendues du bras ne sont plus privilégiées par rapport à  $w$ .

Enfin, nous avons étendu la définition de la manipulabilité directionnelle que nous avons proposée pour les bras manipulateurs au cas des manipulateurs mobiles. Cet indice permet de prendre en compte la contribution de la plate-forme et du bras pour la réalisation de tâche imposée. Les résultats obtenus avec cet indice affichent de bonnes mesures de manipulabilité du bras manipulateur.

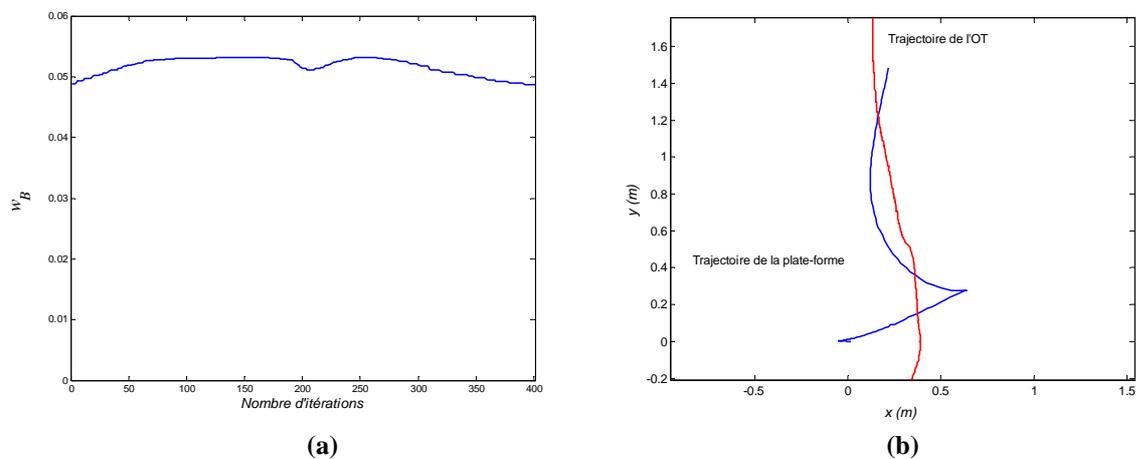
#### **4.4 Exemples sur le robot réel**

Nous avons implémenté sur le robot réel l'algorithme de commande qui gère la plate-forme mobile et les six articulations du bras manipulateur. Un problème se pose du à l'hétérogénéité des protocoles de communication entre le PC embarqué et le bras MANUS d'une part et la plate-forme d'autre part fait que les deux systèmes ne répondent pas en même temps à des commandes pourtant envoyées simultanément : ce qui nuit à la fluidité des mouvements. Il est nécessaire d'insérer des temporisations.

La commande de la plate-forme est réalisée ici en boucle ouverte. Pour la partie bras manipulateur, un terme d'erreur est pris en compte à chaque itération pour compenser l'erreur commise sur l'exécution de l'itération précédente.

Pour illustrer les résultats présentés en théorie, nous avons choisi deux exemples d'optimisation de la manipulabilité du bras manipulateur :  $w_B$  et  $w_{Bdir}$ . À partir d'une configuration  $q_i$  donnée, recueillie par les retours capteurs, nous imposons une tâche opérationnelle à l'organe terminal du bras manipulateur qui consiste à suivre une ligne droite suivant la direction perpendiculaire à l'axe longitudinale de la plate-forme (l'axe y du repère du monde). La vitesse imposée est 0.005 m par cycle de 60 ms.

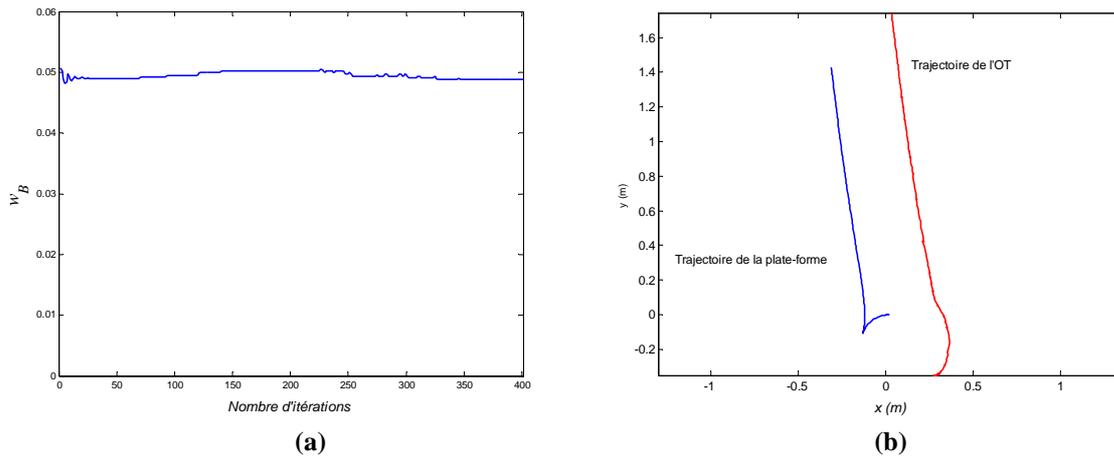
La figure 3-14 montre les résultats obtenus en optimisant la mesure de manipulabilité  $w_B$  du bras manipulateur.



**Figure 3-14 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité  $w_B$  du bras manipulateur : a) évolution de la mesure  $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.**

La figure 3-14a affiche une bonne manipulabilité du bras manipulateur durant l'exécution de la tâche imposée. Les trajectoires de la plate-forme et de l'OT présentées sur la figure 3-14b montrent que la plate-forme effectue la grande partie de son mouvement en marche arrière. L'organe terminal suit presque une ligne droite avec une erreur qui atteint 21 cm en fin de la tâche. Cette erreur inclue celle de l'odométrie (une erreur non bornée) et l'erreur de poursuite.

Sur la figure 3-15 sont présentés les résultats obtenus en optimisant la mesure de manipulabilité directionnelle  $w_{Bdir}$  du bras manipulateur.



**Figure 3-15 : Résultats obtenus en optimisant la manipulabilité  $w_{Bdir}$  du bras manipulateur : a) évolution de la mesure  $w_B$ , b) trajectoires de la plate-forme et de l'OT.**

La figure 3-15a montre que le système exécute la tâche imposée avec une bonne manipulabilité du bras manipulateur. La trajectoire de la plate-forme représentée sur la figure 3-15b indique que la plate-forme recule un peu au début et s'oriente suivant la direction de la tâche. La trajectoire de l'organe terminal suit une ligne droite avec une faible erreur au départ ( $< 3\text{cm}$ ) mieux que le cas de l'optimisation de  $w_B$ . L'erreur de la poursuite augmente vers la fin de l'exécution de la tâche. En effet, comme le calcul de la position de la pince se fait sur la base du retour odométrique, qui engendre des erreurs non bornées, l'erreur de poursuite augmente.

## 5 Conclusion

L'objectif du chapitre était de proposer de nouvelles mesures de manipulabilité et d'évaluer leur apport pour la commande d'un bras manipulateur. Pour ce faire, nous avons rappelé le concept de l'ellipsoïde de manipulabilité et les mesures basées sur son principe. Un inconvénient de ces mesures est qu'elles ne prennent en compte que les capacités de manipulation du bras manipulateur sans tenir compte de la tâche en cours. La mesure que nous proposons intègre la direction de la tâche. Alors que les mesures de la littérature s'annulent dès que le déplacement est impossible dans une direction donnée, la mesure que nous proposons ne s'annule que lorsque aucun déplacement n'est possible dans la direction de la tâche. Cette mesure a été étendue au cas des manipulateurs mobiles pour tenir compte de l'ensemble des degrés de liberté du système composé d'un bras manipulateur et d'une plate-forme mobile.

Un autre point abordé dans ce chapitre concerne l'hétérogénéité du système constitué de plusieurs composants : dans notre cas, le bras manipulateur et la plate-forme. Cette hétérogénéité porte sur les unités et les valeurs maximales des grandeurs physiques. Nous avons proposé une normalisation pour pallier ce problème. Elle consiste à multiplier la matrice jacobienne réduite par une matrice de pondération faisant intervenir les valeurs maximales des grandeurs physiques. Il en résulte que la nouvelle matrice jacobienne réduite est composée d'éléments sans dimension.

L'association des capacités de locomotion de la plate-forme et de manipulation du bras engendre une redondance que nous avons exploitée pour assurer en chaque configuration la meilleure manipulabilité du bras. Nous proposons un algorithme d'inversion basé sur un schéma classique qui optimise un critère de manipulabilité. Nous avons utilisé cet algorithme pour comparer plusieurs mesures de manipulabilité dont certaines sont tirées de la littérature et celles que nous avons proposées. Les résultats montrent d'une part que notre normalisation améliore les performances du système (comparaison de  $w$  avec  $\tilde{w}$ ) et d'autre part que le comportement du système est plus naturel dans le cas de l'utilisation des deux mesures de manipulabilité directionnelle du bras manipulateur et du manipulateur mobile que nous avons proposées.



# **Chapitre 4 : Stratégie d'approche pour la saisie**



## 1 Introduction

La stratégie de saisie s'insère dans le cadre plus général du contrôle du manipulateur mobile par la personne handicapée et principalement de la coopération humain-machine. Le principe que nous avons retenu est que la machine est semi-autonome. L'objectif de rendre service à la personne en suppléant la fonction manipulation est atteint par coopération humain-machine. Chaque entité, personne et machine, apporte sa contribution en cherchant toutefois à réduire la charge de travail de la personne et à préserver sa maîtrise du déroulement de la tâche. Ce dernier point s'est imposé au fur et à mesure de l'avancement du projet. Contraindre le moins possible la personne en mettant à sa disposition un système proposant une large gamme de modes de commande est une façon de satisfaire les contraintes précédentes. Une machine semi-autonome présente l'avantage de pallier les limites de l'assistant robotisé, c'est-à-dire le manipulateur mobile, en exploitant la présence humaine et ses capacités d'intervention notamment en termes perceptuel et décisionnel. Les « limites » proviennent du fait que le contexte d'utilisation ne permet pas d'envisager un robot agissant de manière complètement automatique. La semi-autonomie est un compromis qui permet de répondre à la contrainte forte d'aboutir à un système abordable financièrement tout en tenant compte du fait que l'environnement et les tâches ne sont que partiellement prévisibles.

L'un des principaux objectifs du chapitre est de calculer les coordonnées généralisées du manipulateur mobile à partir de la connaissance des coordonnées opérationnelles de l'organe terminal (position et orientation) fournies par l'entité maître : homme et/ou machine. Selon la phase de saisie en cours, la résolution du système redondant intégrera des contraintes en fonction de leur ordre d'importance. C'est l'élaboration d'une stratégie globale de préparation à la saisie qui nous intéresse ici.

Ce chapitre commence par décrire les différents types de modes de commande mis à la disposition de la personne pour interagir avec le manipulateur mobile. Des exemples appliqués à la fonction mobilité permettent de mieux comprendre les avantages et inconvénients des différents types de mode de commande. Puis seront dégagées, au travers d'un scénario, les principales étapes mises en jeu lors d'une tâche de saisie. Comme il a été vu au chapitre 3, la redondance du robot peut être exploitée pour répondre à des contraintes spécifiques ; aussi nous précisons pour chaque phase, les tâches et les contraintes permettant de calculer les commandes à envoyer au manipulateur mobile. En utilisant les méthodes classiques basées sur le modèle cinématique inverse, nous montrerons pour chaque phase des résultats de simulation qui permettront d'une part de comparer les indices de manipulabilité

présentés au chapitre 3, notamment l'indice de manipulabilité directionnelle et, d'autre part, de vérifier la validité et les limites de la stratégie de saisie proposée.

## **2 Stratégie de saisie**

### **2.1 Modes de commande**

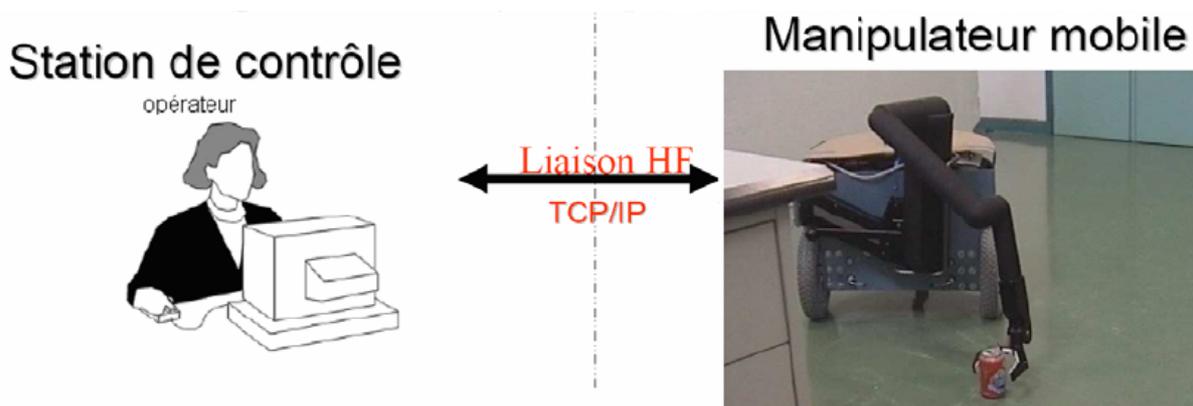
L'utilisateur dispose de trois types de modes de commande. Le premier est le mode manuel. Il donne à l'utilisateur le contrôle de tous les degrés de liberté du système. La totale liberté de commande donnée à l'utilisateur se traduit par une complexité et donc une charge de travail importante. Dans le second mode dit «automatique», le système exécute seul la mission voulue par l'opérateur. Le premier défaut de ce mode est d'interdire à l'opérateur d'agir par lui-même, alors que c'est souvent un souhait exprimé. Le second défaut provient de la difficulté de proposer un système totalement autonome, sans équiper l'environnement, tout en restant abordable financièrement. Ces modes ne permettent pas de répondre aux différentes situations qui peuvent être rencontrées, ne prennent pas en compte la variabilité des facteurs humains et environnementaux et ne mettent pas en jeu une réelle coopération homme-machine. Il a été développé en complément au laboratoire au cours de travaux antérieurs un troisième type de modes, dont l'origine provient du domaine de la téléopération, appelé « mode de commande partagée » qui pallie les défauts listés ci-dessus. Comme son nom l'indique, il consiste à partager le contrôle des coordonnées opérationnelles entre l'opérateur et le système. L'intérêt est que, dans le principe, le taux d'implication de la personne peut être variable. On peut envisager un certain nombre de variantes entre le mode manuel et le mode automatique et ainsi mieux prendre en compte les contextes humains et environnementaux. Nous illustrons cette notion de mode de commande partagée par des exemples portant sur la fonction mobilité de l'assistant robotisé. Un premier mode de commande partagée consiste à assister l'opérateur pour l'évitement des obstacles se trouvant sur le chemin emprunté par le robot. L'opérateur donne la direction à suivre, le robot se charge d'éviter les obstacles. Un second mode de commande partagée, appelé mode caméra, repose sur le mode de contrôle du déplacement de la plate-forme mobile. Une caméra, orientable en site et en azimut, est embarquée. Ici, l'opérateur pilote l'orientation de la caméra, le robot se déplace dans la direction voulue. Une déclinaison de ce mode est possible en utilisant la fonction de suivi incluse dans la caméra. Elle consiste à suivre, de façon automatique, le mouvement d'un objet en le gardant constamment au centre de l'image. Une fois l'objet choisi par l'opérateur, la

caméra le suit et la plate-forme mobile se déplace dans sa direction. Pour chacun de ses deux derniers modes, on peut ajouter la fonctionnalité d'évitement d'obstacle décrite ci-dessus.

Si on s'intéresse à une tâche plus globale de saisie, le principe qui a été adopté est que, quel que soit le type de mode utilisé, ce sont les coordonnées opérationnelles de l'organe terminal (position et orientation) qui sont contrôlées par l'entité maître : l'opérateur et/ou la machine. La difficulté réside dans les choix à effectuer pour calculer les coordonnées généralisées du manipulateur mobile et contraindre la solution de ce système redondant. Si on inclut la recherche de l'objet à saisir, une tâche de saisie peut se décomposer en phases dans lesquelles les contraintes sont différentes. L'objet du paragraphe suivant est de présenter un scénario faisant apparaître ces phases.

## 2.2 Scénario de saisie

L'objectif est la restauration partielle ou complète de la fonction manipulation de la personne handicapée à l'aide d'un manipulateur mobile semi-autonome. L'ensemble du système mis à la disposition de la personne est constitué comme l'illustre la figure 4-1 par une station de contrôle qui permet d'une part d'envoyer des ordres au robot selon le mode choisi et d'autre part de recevoir des informations qui le renseignent sur le déroulement de la tâche en cours.



**Figure 4-1 : Commande du robot par téléopération : un opérateur génère des commandes depuis une station de contrôle et reçoit des retours d'informations sur une interface graphique.**

La tâche est d'aller chercher un objet qui se trouve à une place pas forcément connue de la personne. On peut tout à fait adopter une stratégie inspirée du comportement humain. La première étape consiste à se déplacer à l'intérieur du domicile pour retrouver cet objet. Quand celui est retrouvé, la étape d'approche débute. Une anticipation est mise en jeu pour

commencer à positionner le corps et le bras en fonction de plusieurs facteurs liés à l'objet : sa forme, sa pose et, son environnement proche, notamment l'encombrement ou les entraves potentielles ([Jeannerod84], [Land94]; [Grasso98]). Dans ces deux premières étapes, c'est la mobilité qui est privilégiée, le bras restant dans une position de repos qui ne gêne pas le déplacement. L'avant dernière étape est une approche précise qui permet d'affiner la situation de la main par rapport aux points de saisie de l'objet quand celui-ci est proche. La saisie proprement dite et les étapes suivantes ne sont pas traitées dans ce chapitre.

Une stratégie similaire peut être envisagée si on considère que le bras robotisé mobile est une extension du bras humain. Par analogie la plate-forme mobile du robot correspond au corps de la personne, le bras Manus au bras humain et l'organe préhenseur à la main. Cette façon d'aborder ce problème de stratégie s'inscrit dans l'approche qui a été développée au laboratoire lors de travaux antérieurs portant sur l'appropriation ([Rybarczyck04a]). L'une des idées défendues dans cette approche est qu'il faut, autant que faire se peut, que la personne en situation de téléopération soit capable d'interpréter ce que fait le robot. L'un des moyens d'y parvenir est que le robot soit au niveau structurel, comportemental et fonctionnel « bioinspiré ». Ce n'est pas l'objet de ce document de défendre ce point. Nous retiendrons seulement que nous adoptons une stratégie bioinspirée qui peut être décomposée en trois étapes :

- une étape de recherche de l'objet, c'est essentiellement la fonction mobilité du robot qui est mise en jeu ;
- une étape d'approche avec anticipation dans laquelle l'ensemble des degrés de liberté du manipulateur mobile peuvent être sollicités mais plus particulièrement ceux intervenant dans la mobilité ;
- une étape d'approche fine dans laquelle l'environnement du robot peut être assez encombré, par exemple par la présence d'une table sur laquelle se trouve l'objet à saisir. Cette étape sollicite plus particulièrement les degrés de liberté du bras manipulateur.

Il faut noter que le type de mode de commande n'intervient que peu dans la réflexion qui suit. On suppose que pour réaliser la tâche, le mode qu'il soit manuel, automatique ou « partagé », génère les coordonnées opérationnelles de la tâche opérationnelle. L'objet du chapitre est de calculer les coordonnées généralisées correspondantes en adoptant une méthode de résolution en fonction de l'étape du scénario dans laquelle se trouve le robot. Pour un objet insaisissable car lointain, seule la mobilité de la plateforme est mise à contribution.

Dès que l'intervention du bras manipulateur se révèle nécessaire, il est possible d'exploiter la redondance de l'ensemble et de satisfaire à la fois la tâche opérationnelle et certaines contraintes. La terminologie adoptée dans la suite du chapitre est la suivante :

- Tâche opérationnelle : tâche destinée à amener le repère de l'organe terminal du manipulateur mobile pour le rapprocher de l'objet à saisir. La stratégie présentée ici ne permet que l'approche pour la saisie.
- Tâche principale : tâche à effectuer prioritairement
- Tâche secondaire : tâche à effectuer si possible
- Tâche additionnelle : tâche à effectuer avec la même importance que la tâche principale
- Contrainte « Évitement d'obstacles » : évitement réactif des obstacles.
- Contrainte « Manipulabilité » : optimisation d'une mesure de manipulabilité.

## 2.3 Phases

Une analyse du scénario décrit précédemment a amené à différencier dans les étapes deux notions : phase et zone. Le scénario est alors décomposé en deux phases selon que l'objectif, à savoir l'objet à saisir, est éloigné ou proche. Dans chaque phase, deux zones sont considérées, proche ou éloignée d'un obstacle, car la présence de l'obstacle modifie le comportement du système. Le changement de phase est précisé par l'opérateur tandis que le changement de zone est déterminé automatiquement grâce à un capteur de détection d'obstacles.

### 2.3.1 Objectif éloigné

Comme il a été précisé précédemment, lorsque l'objet à atteindre est loin, la tâche se résume à une tâche de navigation sous la contrainte d'éviter les obstacles éventuels. Le passage d'une navigation en zone libre à celle en zone contrainte est fixé par le seuil 1 (voir figure 4-2). Le choix de ce seuil est a priori déterminé une fois pour toute en fonction des capacités du système de perception, de la réponse du manipulateur mobile et du mode de commande sélectionné. Ce n'est pas un problème simple. Nous supposons la valeur de ce seuil connue, il est identifié sous le terme « seuil 1 ».

Dans cette phase la fonction mobilité est privilégiée, le bras manipulateur restant dans une position de repos qui ne gêne pas la maniabilité du robot lors des déplacements. Il est inutile d'actionner les articulations du bras manipulateur puisque aucune opération de saisie n'est en cours. Commander la pince revient simplement à déplacer la plate-forme mobile en

direction du but et en passant par les points intermédiaires en vue de se rapprocher de la zone de saisie. Les degrés de liberté de la plate-forme sont utilisés pour accomplir la tâche opérationnelle imposée à la pince c'est à dire « aller dans la direction du but ». Aucune redondance n'est cependant disponible pour répondre à des contraintes supplémentaires. Dès que le seuil 1 est franchi, il est nécessaire d'établir une zone de sécurité qui évite la collision avec l'environnement. Dans ce cas, la fonction « évitement des obstacles » devient la tâche principale.

Zone : obstacle éloigné	Seuil 1	Zone : obstacle proche
Tâche principale : Tâche Opérationnelle (TO)		Tâche Principale : combinaison entre évitement d'obstacles et convergence vers l'objectif

**Figure 4-2 : Objectif éloigné.**

### 2.3.2 Objectif proche

Dans ce cas, l'opérateur signale au système que l'objet à saisir est proche. Comme il a été vu au cours du scénario, l'ensemble des degrés de liberté du manipulateur mobile est mis à contribution. Dans cette phase, on distingue également deux zones selon la distance aux obstacles. Dans la zone dénommée « zone : obstacle éloigné », avant le seuil 2 (figure 4-3). Si l'environnement n'est pas trop encombré, le mécanisme d'anticipation signalé dans le scénario peut être utilisé pour orienter le mieux possible l'ensemble du manipulateur mobile afin de faciliter la saisie future. La tâche opérationnelle reste le déplacement de la pince selon les points intermédiaires imposés par le mode de commande actif. Cependant la redondance permet de satisfaire des contraintes supplémentaires, notamment un meilleur positionnement du manipulateur mobile pour la prochaine saisie. La redondance du système est exploitée pour optimiser la manipulabilité du bras manipulateur ou du manipulateur mobile (voir chapitre 3) et répondre à la contrainte d'évitement d'obstacle. Dès que le seuil 2 est franchi, par mesure de sécurité, les déplacements linéaires de la plate-forme sont interdits. La tâche opérationnelle consiste à amener la pince en situation de saisie de l'objet avec le meilleur indice de manipulabilité possible. Le franchissement du seuil 2 est détecté par les capteurs de proximité du système.

Zone : obstacle éloigné	Seuil 2	Zone : obstacle proche
Tâche principale: TO; Tâches secondaires: manipulabilité et évitement des obstacles		Tâche principale : TO Tâche secondaire: manipulabilité Tâche additionnelle : vitesse $v$ de la plate-forme nulle

Figure 4-3 : Objectif proche.

### 3 Méthodes de résolution selon les phases

L'objectif est de connaître à partir d'une configuration généralisée  $q$  donnée la différentielle articulaire  $dq$  qui correspond à une différentielle opérationnelle  $dX$  élaborée par le mode de commande. Parmi les méthodes d'inversion du modèle différentiel, celles numériques sont plus générales notamment celles basées sur la pseudo-inverse. L'intérêt de ce paragraphe réside dans l'adaptation de cette méthode au problème plus général de la stratégie de saisie que nous proposons. Comme nous l'avons vu précédemment, selon la phase en cours, il y a possibilité de profiter de la redondance du système pour satisfaire certaines contraintes qu'il est possible d'optimiser. Nous allons préciser pour chaque phase les coordonnées opérationnelles que l'on veut contrôler et la méthode de résolution retenue.

#### 3.1 Phase : objectif éloigné

##### 3.1.1 Zone : obstacle éloigné

*Tâche principale : tâche opérationnelle*

*Tâche(s) secondaire(s) : néant*

*Tâche additionnelle : néant*

On rappelle que dans cette phase aucune redondance n'est disponible. Le bras manipulateur reste dans une position de repos qui ne gêne pas le déplacement. Il suffit de piloter la plate-forme à partir d'un point dont les coordonnées sont celles de la pince exprimées dans le repère de la plate-forme. Les équations donnant la position de la pince en fonction de l'orientation de la plate-forme et de la situation initiale du bras manipulateur s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} x_1 = x_p + (x_{B2} + a) \cos(\theta_p) - (b - x_{B1}) \sin(\theta_p) \\ x_2 = y_p + (x_{B2} + a) \sin(\theta_p) + (b - x_{B1}) \cos(\theta_p) \\ x_3 = x_{B3} + c = \text{constante} \end{cases} \quad (1)$$

avec  $x_{Bi}$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ): coordonnées de l'organe terminal exprimées dans le repère du bras manipulateur et, a, b et c (constantes): coordonnées de la base du bras exprimées dans le repère de la plate-forme.  $x_p, y_p, \theta_p$ : coordonnées opérationnelles de la plate-forme exprimées dans le repère du monde.

Ces trois coordonnées sont suffisantes pour définir la tâche opérationnelle imposée à la pince puisque la plate-forme mobile ne peut se déplacer que dans le plan horizontal. L'inversion du système est simple dans ce cas là.

$$\dot{X}_d = \bar{J}(q)u \quad (2)$$

où :

$$\dot{X}_d = [\dot{x}_{1d}, \dot{x}_{2d}]^T \text{ et } u = [v, \omega]^T \text{ (vitesse linéaire et angulaire de la plate-forme)}$$

$$\bar{J}(q) = \begin{bmatrix} c_{\theta_p} & -(x_{B2} + a)s_{\theta_p} - (b - x_{B1})c_{\theta_p} \\ s_{\theta_p} & (x_{B2} + a)c_{\theta_p} - (b - x_{B1})s_{\theta_p} \end{bmatrix}$$

avec  $x_{Bi}$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ): coordonnées de l'organe terminal exprimées dans le repère du bras manipulateur et a, b et c : coordonnées de la base du bras exprimées dans le repère de la plate-forme.  $c_{\theta_p}, s_{\theta_p}$  sont respectivement le cosinus et le sinus de l'angle  $\theta_p$ .

Pour qu'une solution existe, il faut que le rang de  $\bar{J}(q)$  soit égal à 2. C'est-à-dire il faut que  $x_{B2}+a$  soit différent de zéro. La pince ne doit donc pas être alignée avec l'axe des roues. Il faut éviter que la pince soit mise dans cette configuration.

### 3.1.2 Zone : obstacle proche

*Tâche principale : combinaison de deux comportements réactifs (évitement d'obstacles et convergence de la plate-forme vers l'objectif)*

*Tâche(s) secondaire(s) : néant*

*Tâche additionnelle : néant*

### 3.1.2.1 Évitement d'obstacles

La plate-forme du projet ARPH est équipée d'une ceinture de capteurs ultrasons qui permet la détection des obstacles dans des environnements encombrés. La méthode consiste à évaluer l'espace encombré dans l'environnement proche du robot. On cherche alors à faire évoluer le robot dans la direction la moins encombrée. Ainsi, lorsque le robot détecte un rétrécissement de l'espace sur la gauche il dévie vers la droite et vice versa.

Le navigateur utilisé est basé sur un contrôleur flou (figure 4-4) dont les référentiels d'entrées sont  $d_n$ ,  $g_n$  et  $f_n$ , respectivement, les distances normalisées à droite, à gauche et frontale, entre le robot et l'environnement le plus proche ([Maaref 00], [Benreguieg97]) :

$$d_n = \frac{d}{d+g}, \quad g_n = \frac{g}{d+g} \quad \text{et} \quad f_n = \frac{f}{\sigma} \quad (3)$$

où  $d$  et  $g$  représentent les mesures des capteurs de droite et de gauche et  $\sigma$  la distance d'influence des capteurs.

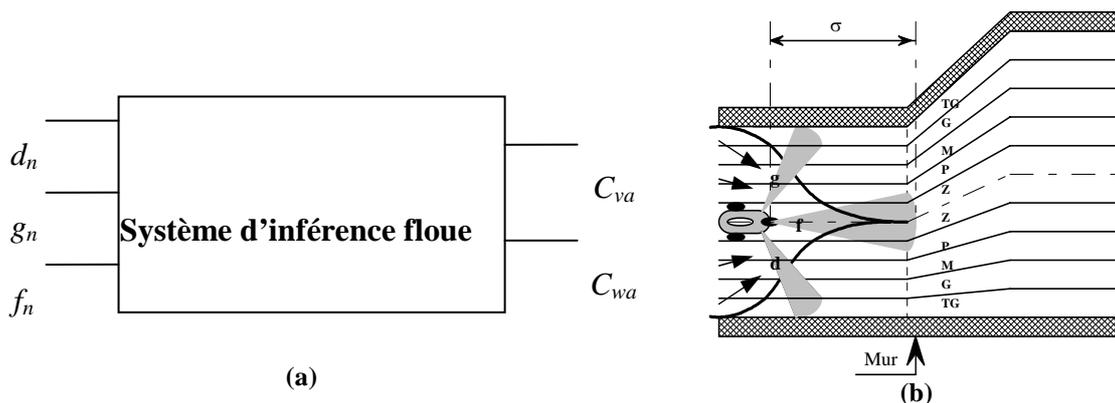


Figure 4-4 : Navigation à base d'un contrôleur flou : a) SIF, b) évolution de la partition de l'univers de discours

Les variables de sortie  $C_{va}$  et  $C_{\omega a}$  sont des coefficients multiplicateurs des vitesses linéaire et angulaire de la plate-forme.

Univers de discours :  $-1 \leq C_{\omega a} \leq 1$  et entre 0 et 1 pour les autres. Les fonctions d'appartenance choisies ont une forme triangulaire. Les répartitions linguistiques sont :

-  $C_{va} = \{Z : \text{zéro} ; P : \text{petit} ; M : \text{moyen} ; G : \text{Grand} ; TG : \text{très grand}\}$

-  $C_{\omega a} = \{NG : \text{négatif grand} ; NP : \text{négatif petit} ; Z : \text{zéro} ; PP : \text{positif petit} ; PG : \text{positif grand}\}$

L'ensemble des règles floues déduites de l'expérience intuitive d'un conducteur humain est représenté par les cinquante règles regroupées dans les deux tables de la figure 4-5 : 25 règles permettent de déterminer  $C_{\omega a}$  et 25 autres déterminent  $C_{va}$ .

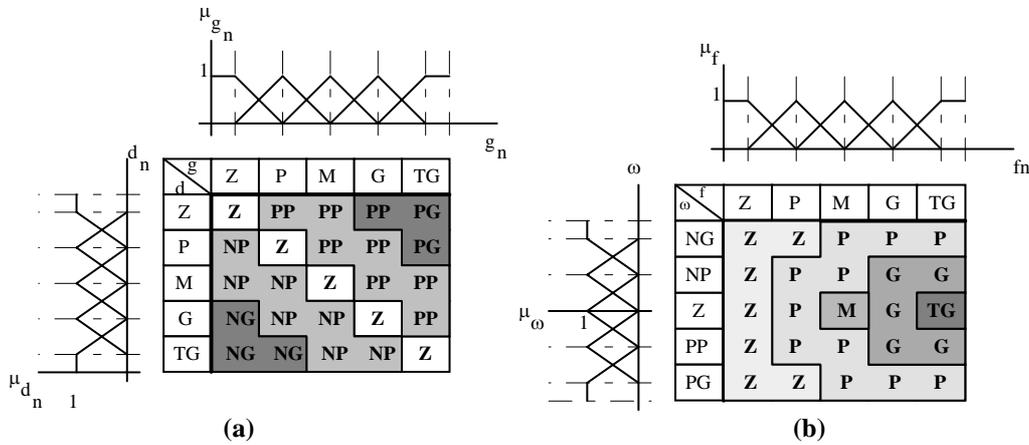


Figure 4-5 : Tables de règles pour la détermination des coefficients des vitesses :  
 a) angulaire  $C_{\omega a}$  , b) linéaire  $C_{va}$ .

### 3.1.2.2 Convergence vers le but et fusion de comportements

Nous appliquons le concept de force d'attraction vers le but utilisé dans la méthode du champ de potentiel ([Khatib86]). Pour atteindre son but, le robot est attiré par une force qui le guide jusqu'à sa destination. Les actions ( $C_{vg}$ ,  $C_{\omega g}$ ) générées par cette force sont modulées par la distance  $\|P, S_{but}^i\|$ , qui sépare le centre P du robot et le sous but  $S_{but}^i$  (figure 4-6) ([Benreguieg97]).

$\theta_g$  est la déviation angulaire nécessaire pour atteindre  $S^k$ .  $D$  est la distance d'influence de  $S_{but}^i$

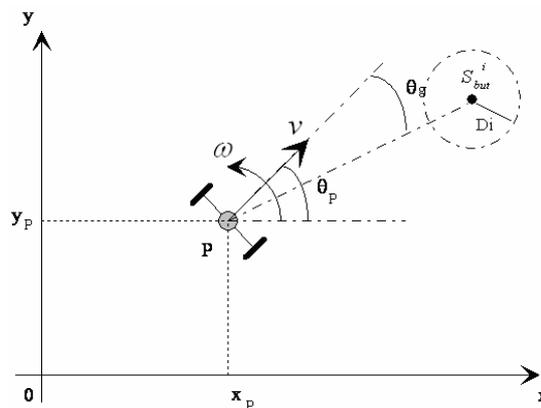


Figure 4-6 : Situation de convergence vers le but.

Quand le robot est assez loin du sous but le coefficient de la vitesse angulaire est tel que:

$$C_{\omega g} = \frac{c_g}{\|P, S_{but}^i\|} \times \frac{D}{\pi} \cdot \theta_g.$$

Le coefficient  $C_g$  (compris entre  $-1$  et  $1$ ) est choisi de manière à ce que le robot atteigne une vitesse angulaire maximale à  $\theta_g < \pi$  afin que son cap ne s'écarte pas trop de la direction de la droite  $PS_{but}^i$ .

Mais, si le robot se trouve dans la zone d'influence de diamètre  $D$ , le coefficient de la vitesse angulaire est tel que:  $C_{\omega g} = \frac{C_g}{\pi} \theta_g$ . Ce découpage évite des commandes trop importantes en vitesse angulaire induisant des mouvements brusques du robot.

Par ailleurs, on lie le coefficient de réglage de la vitesse linéaire de convergence vers le but au coefficient de vitesse angulaire par la relation suivante :  $C_{vg} = 1 - |C_{\omega g}|$ . Ceci traduit la règle suivante : plus le robot est orienté vers la direction du but, plus il peut aller vite (sachant que la vitesse est limitée par une vitesse maximale imposée, soit par l'utilisateur, soit par le matériel).

L'évitement d'obstacles et la convergence vers le but sont fusionnés pour assurer la sécurité du robot et la convergence vers le but.

- Si un obstacle très proche du robot est détecté sur les côtés ou en face, l'évitement d'obstacles est prioritaire et l'attraction vers le but est annulée ( $C_{\omega g} = 0$ ).

- Dans le cas contraire, la vitesse angulaire  $\omega_r$  appliquée au robot résulte d'une combinaison linéaire des coefficients fournis par les modules de recherche de l'espace libre et d'attraction par le but :

$$\omega_e = (\alpha \times C_{\omega a} + \beta \times C_{\omega g}) \times \omega_{\max}.$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des coefficients ajustables par expérimentation pour avoir la meilleure génération de trajectoire possible.

De même, la vitesse linéaire  $V_e$  est donnée par :

$$v_e = \min(C_{va}, C_{vg}) \times V_{\max} \text{ si } P, S_{but}^i > D \text{ ou } v_e = \min(C_{va}, C_{vg}) \times V_{\min} \text{ si } P, S_{but}^i < D,$$

où  $V_{\max}$  et  $V_{\min}$  sont respectivement le maximum et le minimum choisis pour la vitesse linéaire.

## 3.2 Phase : objectif proche

### 3.2.1 Zone : obstacle éloigné

*Tâche principale : tâche opérationnelle*

*Tâche(s) secondaire(s) : évitement d'obstacles et manipulabilité*

*Tâche additionnelle : néant*

Dans cette phase le bras manipulateur et la plate-forme mobile sont impliqués dans l'exécution de la tâche opérationnelle désirée. Le calcul des consignes articulaires s'appuiera sur l'extension du principe d'inversion cinématique des bras manipulateurs au cas des manipulateurs mobiles. La présence de la contrainte de non holonomie de la plate-forme, est prise en compte en introduisant la notion de modèle de transformation réduit ([Foulon98], [Foulon99], [Bayle01c]) présenté au chapitre 2. Ainsi, nous pouvons considérer de manière simplifiée, que le rang de la matrice jacobienne du système mécanique décrit par le modèle cinématique direct (MCD) est différent de celui de la matrice jacobienne du système mécanique décrit par le modèle cinématique réduit. Cette formulation permet d'inclure toutes les contraintes cinématiques dans un même modèle.

La solution générale qui permet de calculer les vitesses de commande est donnée par :

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{J}}^+ \dot{\mathbf{X}}_d + (\mathbf{I}_{n-1} - \bar{\mathbf{J}}^+ \bar{\mathbf{J}}) \mathbf{Z} \quad (4)$$

où  $\dot{\mathbf{X}}_d$  est la tâche opérationnelle désirée et  $\mathbf{Z}$  un vecteur arbitraire.

La première possibilité est d'utiliser le vecteur  $\mathbf{Z}$  pour optimiser une fonction dépendant de la configuration du système par la descente du gradient ([Bayle01b], [Bayle01c]).

$$\mathbf{Z} = -K \left( \frac{\partial P(q)}{\partial q} \mathbf{M} \right)^T \quad (5)$$

où  $P(q)$  est une fonction à minimiser et  $K$  est une constante positive et

$$\mathbf{M}(\theta_p) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & 0 & & \\ \sin(\theta_p) & 0 & \mathbf{0}_{3 \times n_B} & \\ 0 & 1 & & \\ \mathbf{0}_{n_B \times 2} & & \mathbf{I}_{n_B \times n_B} & \end{bmatrix}$$

La deuxième possibilité que nous proposons consiste en l'extension de la formulation proposée par Chiaverini ([Chiaverini97]) pour les bras manipulateurs redondants. Lorsque la deuxième tâche (secondaire)  $T_s$  est définie par  $T_s = (\bar{J}_s(q), \dot{X}_{s,d})$ , l'équation 4 s'écrit sous la forme suivante :

$$u = \bar{J}^+ \dot{X}_d + (I_{n-1} - \bar{J}^+ \bar{J}) \bar{J}_s^+ \dot{X}_{s,d} \quad (6)$$

On peut combiner la réalisation de plusieurs tâches secondaires en utilisant le même principe. Pour le système réel, il est plus intéressant d'inclure le retour d'informations capteurs dans l'algorithme. Une version en boucle fermée des équations précédentes peut être adoptée. L'équation 6 devient :

$$u = \bar{J}^+ (\dot{X}_d + k_p e_p) + (I_{n-1} - \bar{J}^+ \bar{J}) \bar{J}_s^+ (\dot{X}_{s,d} + k_s e_s) \quad (7)$$

On peut considérer deux tâches secondaires, l'évitement d'obstacles et la manipulabilité à optimiser. L'idée est d'effectuer une combinaison linéaire d'une fonction à optimiser liée à la manipulabilité avec la tâche d'évitement d'obstacle, comme le montre l'équation 8.

$$u = \bar{J}^+ \dot{X}_d + (I_{n-1} - \bar{J}^+ \bar{J}) (\alpha (K \frac{\partial P(q)}{\partial q} M)^T + (1 - \alpha) \bar{J}_s^+ \dot{X}_{s,d}) \quad (8)$$

avec  $\alpha \in [0,1]$  est un coefficient de pondération. Si  $\alpha$  égal 1, la tâche secondaire est uniquement l'optimisation de la manipulabilité. Si  $\alpha$  égal 0, la tâche secondaire est uniquement l'évitement des obstacles.

$P(q)$  est la fonction à maximiser.  $P(q)$  est l'un des indices de manipulabilité présentés au chapitre 3.

La tâche secondaire à réaliser quant à elle ne fait intervenir que les coordonnées de la plateforme mobile. Si on respecte la formulation de Chiaverini, la tâche secondaire d'évitement est décrite par le vecteur de la tâche (vitesses opérationnelles) et la jacobienne sous la forme suivante :

$$\dot{X}_{s,d} = [v_e, \omega_e, 0_{1 \times n_B}]^T, \bar{J}_s = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times n_B} \\ 0_{n_B \times 2} & 0_{n_B \times n_B} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Si on ne s'intéresse qu'à la position de l'OT, on n'utilise que les trois premières articulations du bras manipulateur ( $n_B=3$ ).

$v_e, \omega_e$  sont respectivement les vitesses linéaire et angulaire de la plateforme fournies par le module d'évitement des obstacles décrit précédemment.

Finalement on obtient :

$$u = \bar{J}^+ \dot{X}_d + (I_{n-1} - \bar{J}^+ \bar{J})(\alpha(K \frac{\partial P(q)}{\partial q} M)^T + (1-\alpha)[v_e, \omega_e, 0_{1 \times n_B}]^T) \quad (10)$$

avec  $\alpha \in [0,1]$  tel que défini en équation 8,  $P(q)$  fonction à maximiser,  $K$  est une constante positive de gain.

### 3.2.2 Zone : obstacle proche

*Tâche principale : tâche opérationnelle*

*Tâche(s) secondaire(s) : manipulabilité*

*Tâche additionnelle : vitesse de la plateforme nulle*

La différence par rapport au cas précédent est que l'évitement d'obstacle n'est plus une tâche secondaire. Pour éviter la collision avec les obstacles à une distance définie par le seuil 2 introduit précédemment, on interdit le déplacement linéaire de la plate-forme en lui imposant une vitesse nulle. Une façon de résoudre le problème consiste à ajouter à la tâche opérationnelle une tâche additionnelle de même priorité sous la forme :

$$\bar{J}_a = [1 \quad 0 \quad 0_{1 \times n_B}] \quad (11)$$

Ce qui permet de n'agir que sur la composante vitesse linéaire de la plate-forme.

Si on ne s'intéresse qu'à la position de l'OT, on n'utilise que les trois premières articulations du bras manipulateur ( $n_B=3$ ).

Ainsi, la solution générale se transforme comme suit :

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{J}}_t^+ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_d \\ 0 \end{bmatrix} + (\mathbf{I}_{n-1} - \bar{\mathbf{J}}_t^+ \bar{\mathbf{J}}_t) \mathbf{Z} \quad (12)$$

$$\text{avec } \bar{\mathbf{J}}_t = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{J}} \\ \bar{\mathbf{J}}_a \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \mathbf{Z} = \mathbf{K} \left( \frac{\partial P(q)}{\partial q} \mathbf{M} \right)^T$$

$P(q)$  est la fonction à maximiser.  $P(q)$  est l'un des indices de manipulabilité présentés au chapitre 3 et la matrice  $M(\theta_p)$  définie en équation (5) telle que  $\dot{q} = M(\theta_p)u$ .

## 4 Résultats de simulations.

L'objectif des simulations est double, illustrer à l'aide d'exemples représentatifs le bien fondé de la stratégie de saisie et montrer l'intérêt, pour résoudre le problème d'inversion, d'exploiter la redondance en introduisant des contraintes variables selon la phase en cours. La simulation est réalisée sous MATLAB®.

Le but de la mission simulée est le déplacement d'un point de la résidence vers l'objet sans toutefois réaliser la saisie de cet objet. La simulation ne porte que sur la position (hors orientation) de la pince. La tâche est décrite sous la forme de points de passage exprimés en coordonnées opérationnelles. Le mouvement entre deux points de passage est rectiligne. A chaque pas de temps, un générateur de mouvement évalue l'incrément opérationnel. L'incrément généralisé est calculé en appliquant la méthode de résolution vu en §3 de ce chapitre en fonction de la phase et de la zone concernées.

Dans un premier temps, nous allons illustrer le cas où l'objectif à atteindre est éloigné. Dans ce cas, le bras manipulateur est figé dans une configuration de repos qui ne gêne pas les capacités manœuvrières de la plate-forme. La pince atteint l'objectif en passant par les points intermédiaires uniquement par le déplacement de la plate-forme. Dans un deuxième temps nous illustrerons le cas d'un objectif proche. L'ensemble du manipulateur mobile est mis à contribution pour réaliser la tâche. Dans ce cas, la redondance générée par la plate-forme est exploitée différemment selon que le manipulateur mobile se trouve en zone éloigné ou proche de l'objet.

## 4.1 Phase objectif lointain

### 4.1.1 Protocole expérimental

Ce protocole reste valable pour toute la partie simulation. Considérons connues la configuration opérationnelle initiale du manipulateur mobile ARPH, les coordonnées opérationnelles intermédiaires et finale de la pince. Considérons, de plus, que la trajectoire opérationnelle de la pince s'effectue dans un plan c'est à dire à hauteur fixe. La trajectoire opérationnelle de la pince est générée comme suit. A chaque itération, la distance  $\Delta$  entre l'organe terminal et le sous-objectif le plus proche est calculée. La vitesse  $V_{op}$  de déplacement de la pince le long de la trajectoire est constante.

$$\begin{aligned}
 \Delta_x &= x_{SBi} - x_1(i); \\
 \Delta_y &= y_{SBi} - x_2(i); \\
 \Delta &= \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}; \\
 \dot{x}_1 &= V_{op} \frac{\Delta_x}{\Delta}; \dot{x}_2 = V_{op} \frac{\Delta_y}{\Delta} \\
 \text{où : } V_{op} &\text{ est la vitesse de déplacement le long de la trajectoire} \\
 \dot{X}_d &= [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ 0]^T
 \end{aligned} \tag{13}$$

avec :  $x_1(i)$  et  $x_2(i)$  sont les coordonnées opérationnelles de la pince dans le plan à la  $i^{\text{ème}}$  itération,  $x_{SBi}$  et  $y_{SBi}$  sont les coordonnées opérationnelles du sous-objectif et  $\dot{X}_d$  la vitesse opérationnelle imposée à la pince.

Le manipulateur mobile évolue dans une salle carrée de huit mètres de côté. Deux obstacles sont placés dans l'environnement afin d'évaluer la phase « objectif éloigné » pour les deux zones : obstacle proche ou obstacle éloigné. Le seuil 1 définissant le passage d'une zone à l'autre est fixé à 30 cm. Nous rappelons que le principe adopté, dans ce cas où l'objectif à atteindre est éloigné, est de figer le bras manipulateur dans une configuration de repos qui ne gêne pas les capacités manœuvrières de la plate-forme. La pince atteint l'objectif en passant par les points intermédiaires uniquement par le déplacement de la plate-forme. Pour chaque exemple, nous représentons les trajectoires suivies par l'organe terminal (OT, en rouge) et la plate-forme (en vert). La position initiale de la pince et la position des points intermédiaires sont représentées sur la trajectoire de l'OT par des étoiles. L'orientation de la plate-forme pendant son déplacement est représentée sur la trajectoire par des triangles. On rappelle que la valeur angulaire est donnée par rapport à l'axe x du repère du monde.

### 4.1.2 Simulation

#### Exemple1 :

La plate-forme mobile se trouve initialement par rapport au repère du monde à la position  $[x_p, y_p]^T = [0.5, 0.5]^T$  (m), orientée en direction du premier obstacle ( $\theta_p = 0^\circ$ ) (figure 4-7a). La position initiale de la pince par rapport à la base du bras manipulateur est donnée par le vecteur de coordonnées opérationnelles  $X_B = [0.09, 0.4, 0]^T$  (m). Cette position de la pince correspond à une extension moyenne du bras. La vitesse de déplacement de la pince est  $V_{op} = 5$  cm/s. Nous nous fixons un sous-but dont la position par rapport au repère du monde est  $X_{SBI} = [2.6, 2]^T$  (m). Le but est situé dans le même plan en  $X_{But} = [4.5, 2]^T$  (m). La figure 4-7b donne les trajectoires de l'OT et du centre de l'axe des roues de la plate-forme. L'OT atteint le but fixé en passant par le point intermédiaire imposé tout en évitant les obstacles. On constate que le manipulateur mobile a exécuté la tâche imposée avec succès alors qu'il était orienté initialement face à l'obstacle.

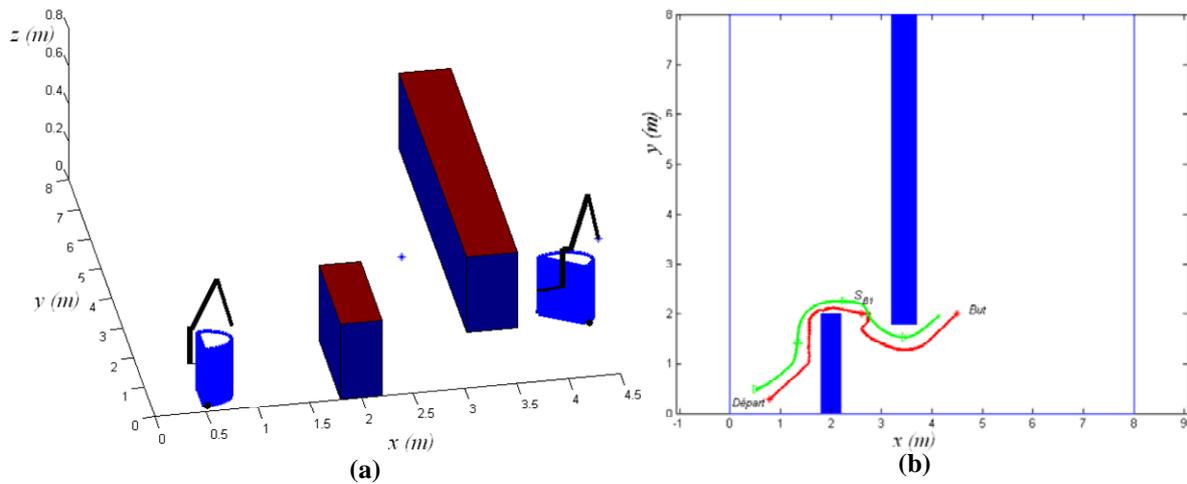
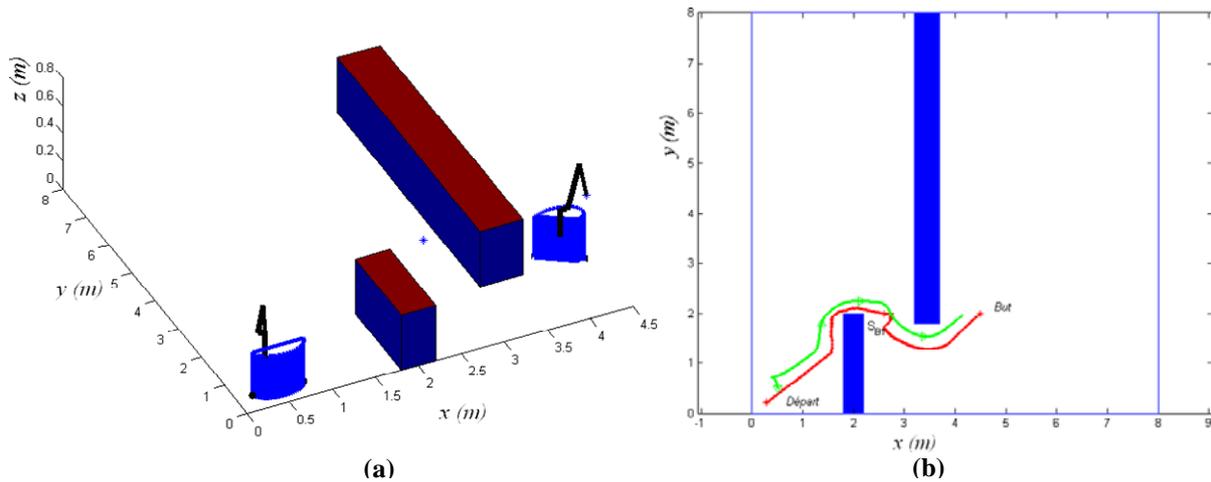


Figure 4-7 : Navigation lorsque l'objectif est loin : a) configurations initiale et finale du manipulateur mobile, b) trajectoires de l'OT et de la plate-forme.

#### Exemple2 :

En gardant les mêmes conditions et le même objectif que dans l'exemple 1 mais en modifiant l'orientation initiale à la plate-forme  $\theta_p = -90^\circ$  (figure 4-8a). Au début, la plate-forme se déplace en marche arrière pendant une courte durée, puis se réoriente et atteint son objectif final comme précédemment (figure 4-8b).



**Figure 4-8 : Navigation dans le cas où objectif final est loin : a) configurations initiale et finale du manipulateur mobile, b) trajectoires de l'OT et de la plate-forme.**

### 4.1.3 Discussion

Nous avons testé l'algorithme pour différentes conditions : position et orientation initiales de la plate-forme, position de l'objectif, position des obstacles. Des exemples dans lesquels la plate-forme occupe des situations initiales différentes sont donnés en annexe C.1. Les exemples qui ont été choisis pour illustrer le comportement du manipulateur mobile sont représentatifs. Dans la majorité des situations le système réussit sa mission tout en évitant les obstacles. On peut noter que le système passe de la zone « obstacle éloigné » à la zone « obstacle proche » et vice-versa plusieurs fois pendant l'exécution de la mission. Le comportement du système est différent dans les deux zones. Dans la première, il cherche à exécuter la tâche opérationnelle et dans la seconde l'évitement d'obstacle prend une part importante.

Dans l'exemple 2, le premier sous but est situé vers l'arrière du système. On remarque que le robot commence par reculer, puis se retourne pour rouler en marche avant. La tâche opérationnelle est réalisée par l'organe terminal du bras manipulateur qui est ici positionné vers l'avant du robot.

Il faut noter que cet algorithme présente des lacunes dues en partie au fait que l'évitement d'obstacle n'a qu'une vision locale de l'environnement. Il est perfectible en prenant en compte les nombreux travaux qui ont été menés pour résoudre ce problème. Son but essentiel est de permettre de mettre en place des simulations complètes illustrant l'ensemble de la stratégie proposée dans le paragraphe §2 de ce chapitre.

De plus nous avons privilégié tout au long du projet ARPH un pilotage de la machine en mode commande partagée avec l'homme qui a une vision globale de l'environnement et connaît les limites de la machine.

## 4.2 Phase objectif proche

### 4.2.1 Zone obstacle éloigné

#### 4.2.1.1 Protocole expérimental

Le protocole reprend les principes décrits à la phase précédente. Le manipulateur mobile est proche d'une zone de manipulation et de saisie mais à une distance supérieure au seuil 2 d'un obstacle. Dans cette zone les deux parties du système contribuent à l'exécution de la tâche imposée. La redondance est exploitée simultanément pour l'évitement des obstacles et la recherche d'une manipulabilité optimale du point de vue la mesure optimisée. Différentes mesures de manipulabilité du bras manipulateur ( $w_B, w_{Bdir}$ ) et du système entier ( $\tilde{w}, \tilde{w}_{dir}$ ) sont évaluées. Pour chaque exemple, nous donnons les trajectoires de la plateforme et de l'OT ainsi que l'évolution correspondante de la mesure de manipulabilité  $w_B$  du bras manipulateur. Cette mesure est choisie comme référence pour caractériser les capacités de manipulation intrinsèque du bras manipulateur en une configuration donnée et son éloignement par rapport aux configurations singulières. On prend  $\alpha=0.5$  dans l'équation 10.

#### 4.2.1.2 Simulation

##### *Exemple1 :*

Le manipulateur mobile se trouve initialement dans une configuration donnée par :  $q_i = [0.4, 1, 130, 270, 135.8, 240]^T$ . Le but est d'exécuter la tâche opérationnelle qui consiste à atteindre un objectif en ligne droite situé à 10 cm de la bordure d'une table. La position du but par rapport au repère du monde est donnée par  $X_{But} = [1.9; 1.5, 0.4]^T$ . La vitesse opérationnelle de déplacement le long de la trajectoire est fixée à  $V_{op}=0.05$  m/s. La figure 4-9 donne l'environnement de la simulation et la configuration initiale du bras.

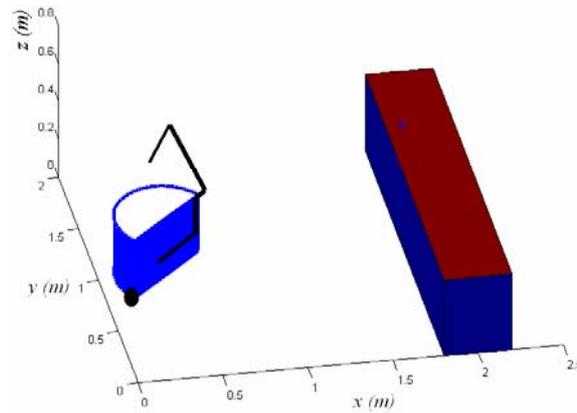


Figure 4-9 : État initial de la simulation.

### a. Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$

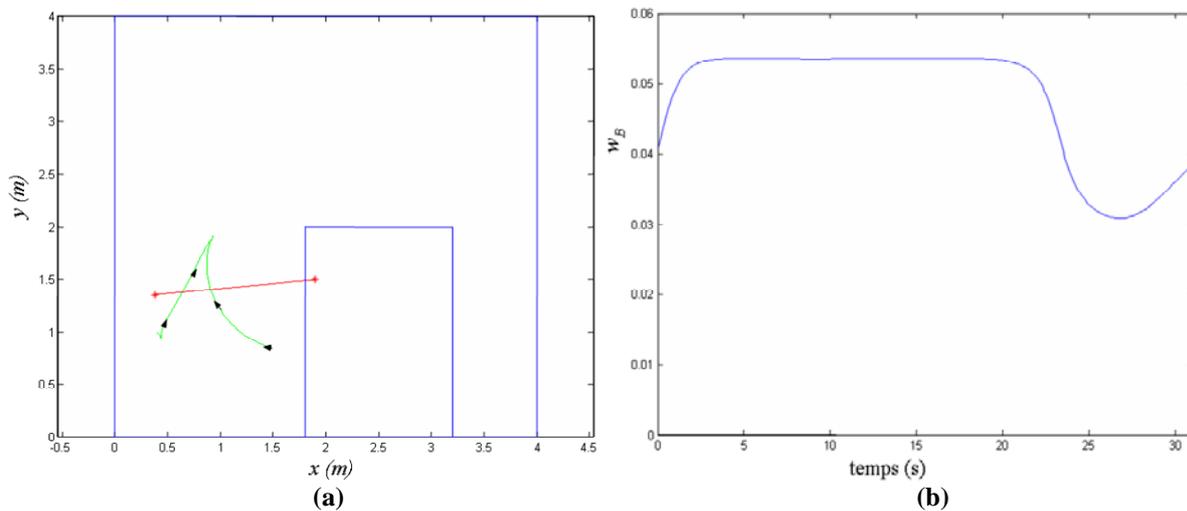


Figure 4-10 : Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$  et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .

D'après la figure 4-10a, montrant les trajectoires de la plate-forme et de l'OT, on constate que la plate-forme recule un peu au début pour contribuer à l'amélioration de la manipulabilité du bras. Une fois la manipulabilité du bras améliorée, la plate-forme avance tout en s'éloignant de l'obstacle. La manipulabilité du bras (figure 4-10b) se dégrade légèrement, ce qui exige un retournement de la plate-forme pour continuer l'exécution de la tâche opérationnelle avec une bonne manipulabilité. L'OT a réalisé la tâche imposée correctement, mais l'orientation finale de la plate-forme est opposée à l'obstacle ( $\theta_p=163^\circ$ ). Le déplacement de la plate-forme en marche arrière n'est pas souhaité, le robot dans ce cas exécute son mouvement en aveugle car il n'y a pas de capteurs ultrasonores à l'arrière de la plate-forme. Ce qui peut engendrer une collision avec l'obstacle si on éloigne l'objet à saisir un peu plus de la bordure de la table.

### b. Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$

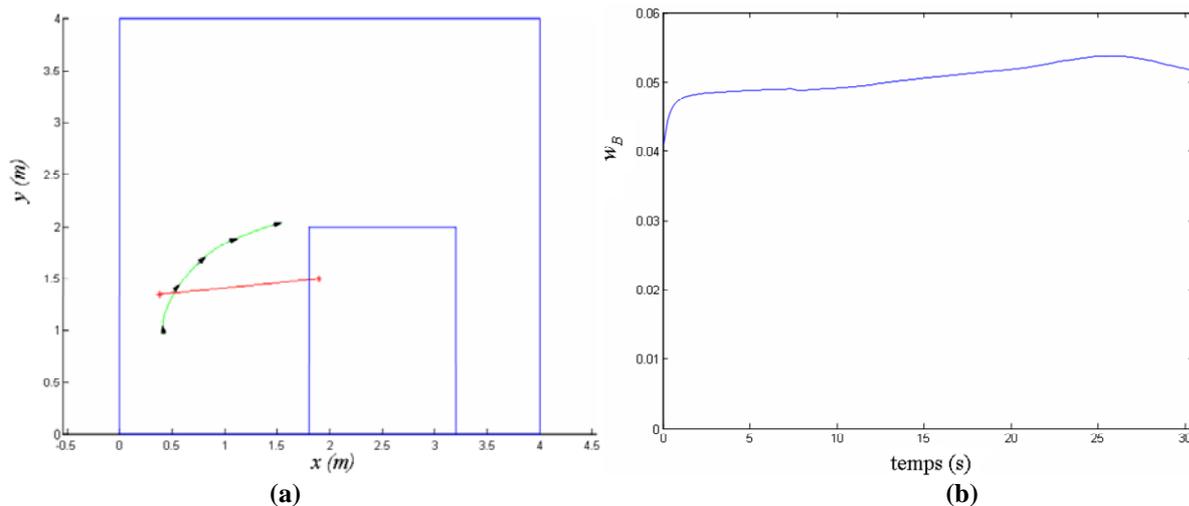
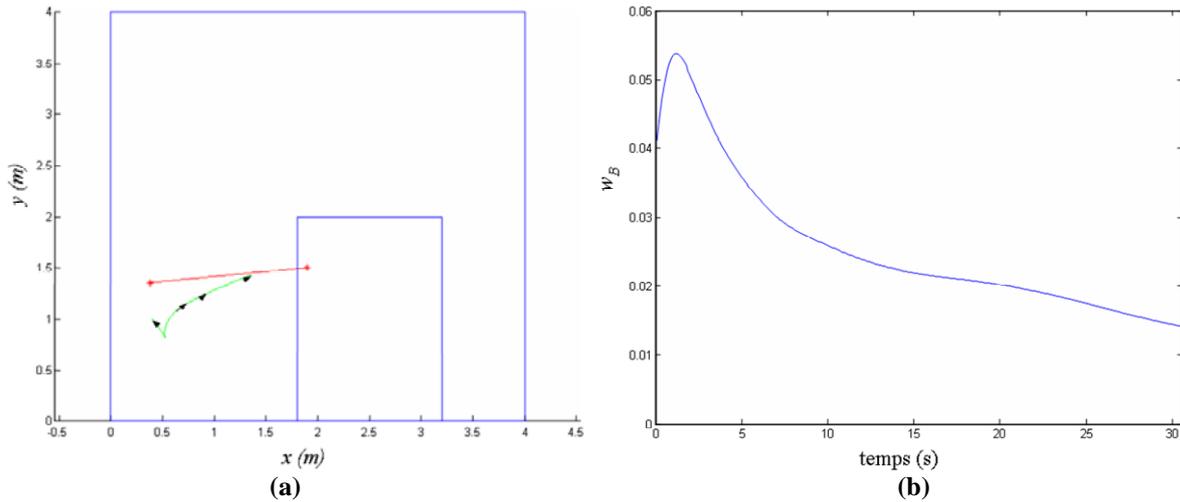


Figure 4-11 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .

La figure 4-11 illustre les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle du bras et l'évitement d'obstacles en tâches secondaires. D'après la figure 4-11a, on constate que la plate-forme recule au début pour contribuer à l'amélioration de la manipulabilité du bras et s'orienter suivant la direction de la tâche. La figure 4-11b montre que le système a exécuté la tâche avec des configurations correspondant à une bonne manipulabilité du bras. La plate-forme s'est orientée suivant la direction de la tâche ( $\theta_{pf}=12^\circ$ ). L'OT s'est rapproché du but en suivant la tâche imposée, mais nous avons arrêté l'exécution de la tâche à cause de la détection d'un obstacle dans la zone inférieure au seuil 2. Ce problème est traité dans le paragraphe suivant « objectif proche et obstacle proche ».

### c. Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile $\tilde{w}$ .

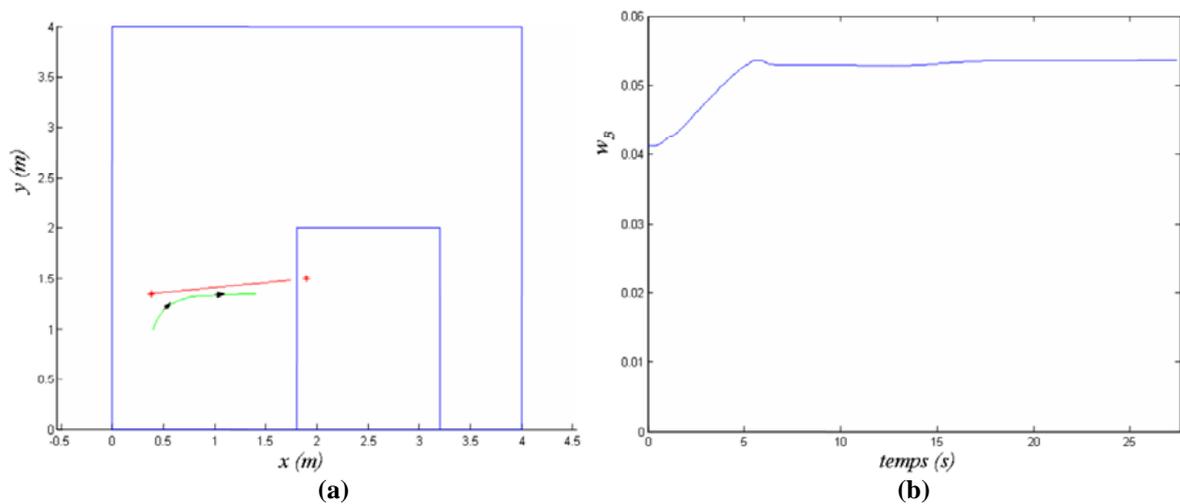
La figure 4-12a donne les trajectoires de la plate-forme et de l'OT. On remarque que la plate-forme recule au début ce qui correspond à l'amélioration des mesures de manipulabilité optimisée et du bras (figure 4-12b). Ensuite la plate-forme avance et s'oriente en direction de l'objectif. La manipulabilité du bras mesurée diminue,  $w_B$  se rapprochant de la valeur 0. Le bras tend vers une configuration complètement tendue vers l'avant de la plate-forme.



**Figure 4-12 : Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .**

**d. Optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile.**

La figure 4-13a montre que la tâche opérationnelle imposée ne s'est pas terminée parce que plate-forme a détecté l'obstacle. La manipulabilité du bras (figure 4-13b) s'améliore dès le début et atteint un plateau. La plate-forme recule un peu au début pour contribuer à l'amélioration de la fonction optimisée puis elle avance en s'orientant en direction de la tâche. De même que dans l'exemple b, nous avons arrêté la simulation à cause de la détection d'un obstacle trop proche.



**Figure 4-13 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile  $\tilde{w}_{dir}$  et évitement d'obstacle: a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .**

### 4.2.1.3 Discussion

Nous avons testé l'algorithme pour différentes conditions. L'exemple qui a été choisi pour illustrer le comportement du manipulateur mobile est représentatif. Un autre exemple dans lequel la plate-forme présente une orientation différente est disponible en annexe C.2.1.

On peut comparer les mesures selon trois critères :

- succès de la tâche
- capacité de manipulation du bras en fin tâche ; la question est de savoir dans quelles conditions le robot va aborder la tâche suivante
- le comportement de la plate-forme, plus précisément la trajectoire suivie

Les mesures de manipulabilité liées au bras seul apportent des réponses qui satisfont les deux premiers critères en notant toutefois une diminution temporaire de la manipulabilité en cours d'exécution dans le cas de  $w_B$ . Les mesures globales soit donnent une manipulabilité mauvaise en fin de tâche soit ne réussissent pas la mission.

En terme de comportement de la plate-forme la présence d'obstacle induit selon les mesures de manipulabilité un retournement de la plate-forme voire même un déplacement en marche arrière de celle-ci. Ce fait constitue un inconvénient vu que le système se déplace en aveugle (il n'y a pas de capteurs ultrasonores à l'arrière de la plate-forme). Parmi les mesures testées, on constate que la manipulabilité directionnelle du bras permet d'apporter une réponse satisfaisante (pas de rebroussement ni de marche arrière). Comme dans le cas de l'objectif éloigné, lorsque la pince est sur l'avant de la plate-forme, l'avant de celle-ci s'oriente selon le mouvement imposé à l'OT par la tâche opérationnelle. Ce comportement est plus naturel et ainsi plus compréhensible par la personne qui pilote le robot ce qui si on se place du point de vue de la coopération homme-machine est un des objectifs recherchés.

Il faut noter toutefois que ce bilan doit être considéré sous réserve d'une étude plus fine de l'influence du choix de la pondération des deux tâches additionnelles mises en concurrence dans l'algorithme.

## 4.2.2 Zone obstacle proche

### 4.2.2.1 Protocole expérimental.

Le manipulateur mobile est proche d'une zone de manipulation et de saisie mais à une distance inférieure au seuil 2 (dans notre exemple fixé à 5 cm) d'un obstacle qui peut être tout

simplement la table sur laquelle est posé l'objet comme le montre la figure 4-14. La situation initiale de la plate forme est donnée par sa position  $[x_p, y_p]^T = [1.35, 1]^T$  (m) et son orientation  $\theta_p = 0^\circ$  (figure 4-14). L'extension du bras est de 40 cm vers l'avant de la plate-forme ( $q_{Bi} = [130, 270, 135.8, 240]^T$  (en degré)). Ainsi, la pince est située initialement sur la face avant du système. La tâche opérationnelle imposée consiste à atteindre un objectif placé sur la table. Plusieurs positions de l'objectif ont été testées. La redondance est exploitée pour la recherche d'une manipulabilité optimale du point de vue de la mesure optimisée. Il n'y a plus d'évitement d'obstacle, la vitesse linéaire de la plate-forme est imposée nulle. Différentes mesures de manipulabilité du bras ( $w_B, w_{Bdir}$ ) et du système entier ( $\tilde{w}, \tilde{w}_{dir}$ ) sont évaluées. L'évolution de  $w_B$  est utilisée comme référence pour caractériser les capacités de manipulation du bras en une configuration donnée. Pour chaque cas, sont donnés la trajectoire de l'OT, l'évolution de la manipulabilité du bras et de l'orientation de la plate-forme. L'intérêt de donner l'orientation de la plate-forme est d'évaluer l'aptitude de la méthode à profiter des capacités d'extension maximale de l'ensemble bras manipulateur - plate-forme. En effet comme le bras manipulateur est fixé sur la partie arrière de la plate-forme, le retournement de celle-ci permet d'atteindre des objectifs plus éloignés du système.

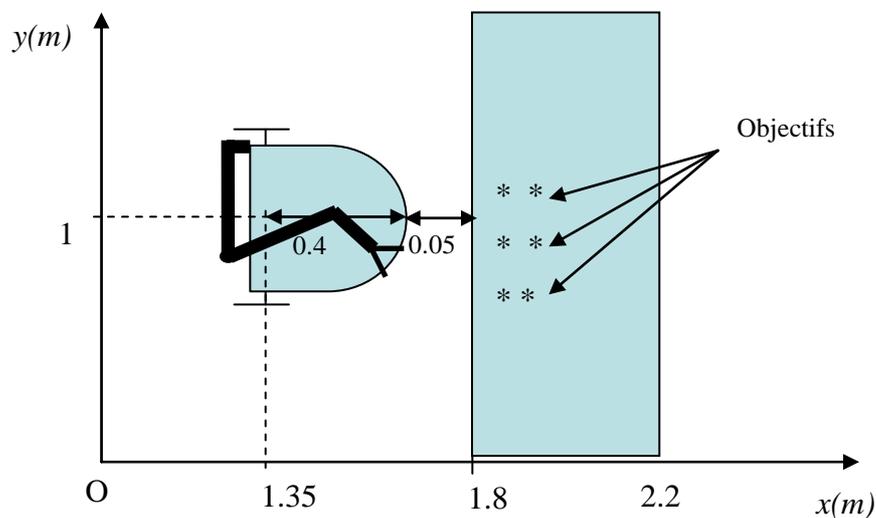


Figure 4-14 : Plate-forme mobile à 5 cm d'une table de saisie.

#### 4.2.2.2 Simulation

##### Exemple1 :

Le but est maintenant d'atteindre l'objectif situé à 20 cm de la bordure de la table. La situation de la pince dans l'espace est donnée par le vecteur  $X_{but} = [2, 1.2, 0.4]^T$ . L'objectif

n'est pas atteignable par le bras manipulateur seul, c'est à dire sans l'intervention de la plate-forme.

### a. Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$

Sur les figures 4-15a et 4-15b sont donnés les résultats obtenus en optimisant  $w_B$ . La trajectoire de l'OT donnée par la figure 4-15a montre que l'OT a atteint son but avec une bonne manipulabilité (figure 4-15b). L'extension finale du bras manipulateur est donnée par  $X_{Bf}=[0.52, 0.32, 0]^T$ . La plate-forme mobile est orientée à la fin à  $89.4^\circ$ .

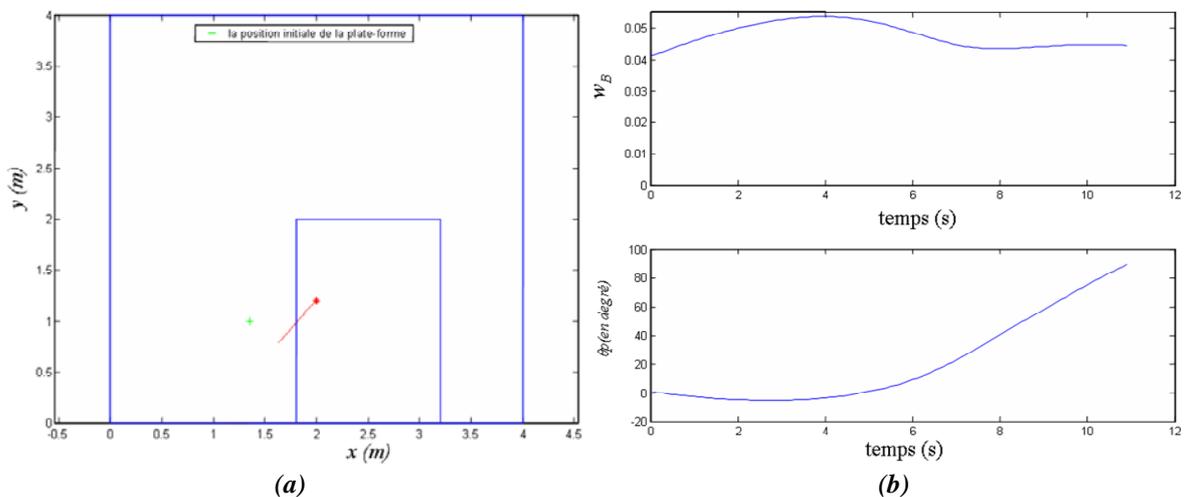


Figure 4-15 : Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

### b. Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$

Les figures 4-16a et 4-16b montrent les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$ . On remarque que la manipulabilité du bras se dégrade progressivement. Les coordonnées opérationnelles du bras à la fin sont  $X_{Bf}=[0.46, 0.46, 0]^T$  et l'orientation finale de la plate-forme est de  $76^\circ$ .

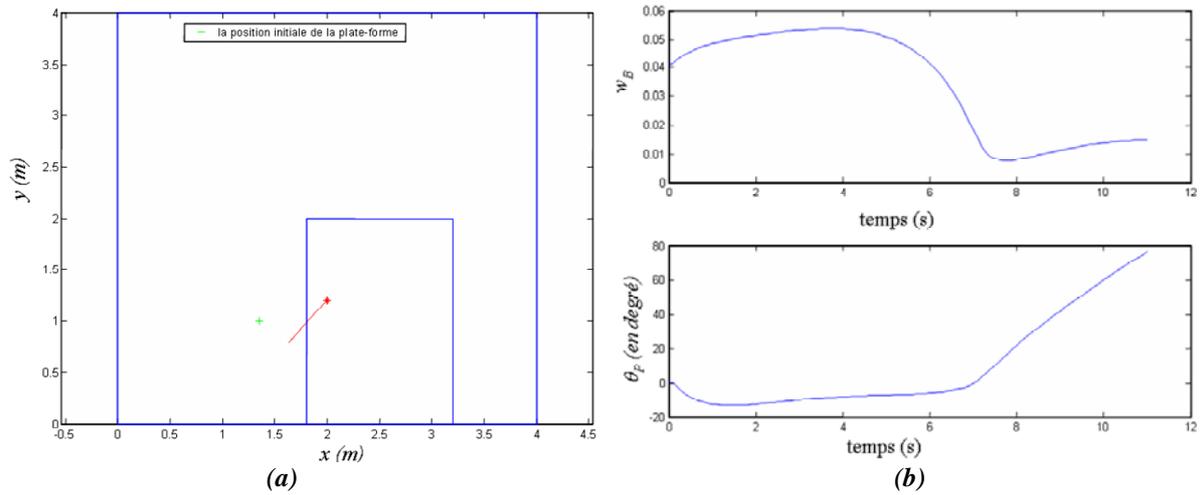


Figure 4-16 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

**c. Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}$**

Les résultats présentés sur la figure 4-17 montrent que l'OT a atteint l'objectif désiré. La manipulabilité du bras s'annule (figure 4-17b) car le bras atteint une configuration singulière. Le bras est étendu. L'orientation finale de la plate-forme est de  $75^\circ$ .

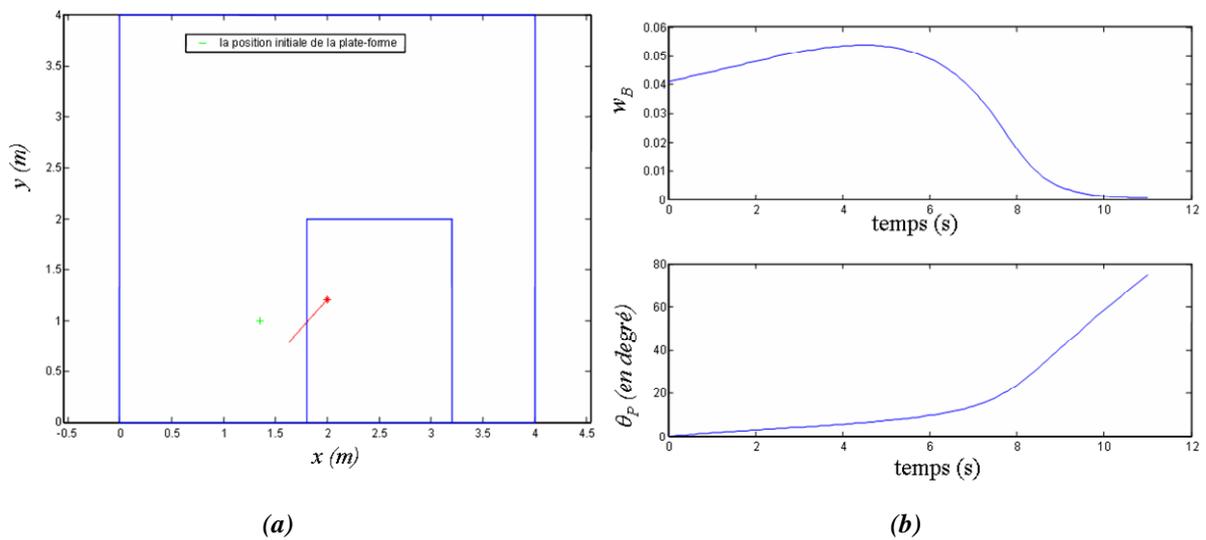


Figure 4-17 : optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

#### d. Optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile

$$\tilde{w}_{dir}$$

Sur la figure 4-18a, on remarque que l'OT atteint son objectif avec une manipulabilité très faible (figure 4-18b). Le bras est très proche d'une configuration complètement étendue  $X_{Bf}=[0.47, 0.46, 0]^T$ . L'orientation finale de la plate-forme est de  $77^\circ$ .

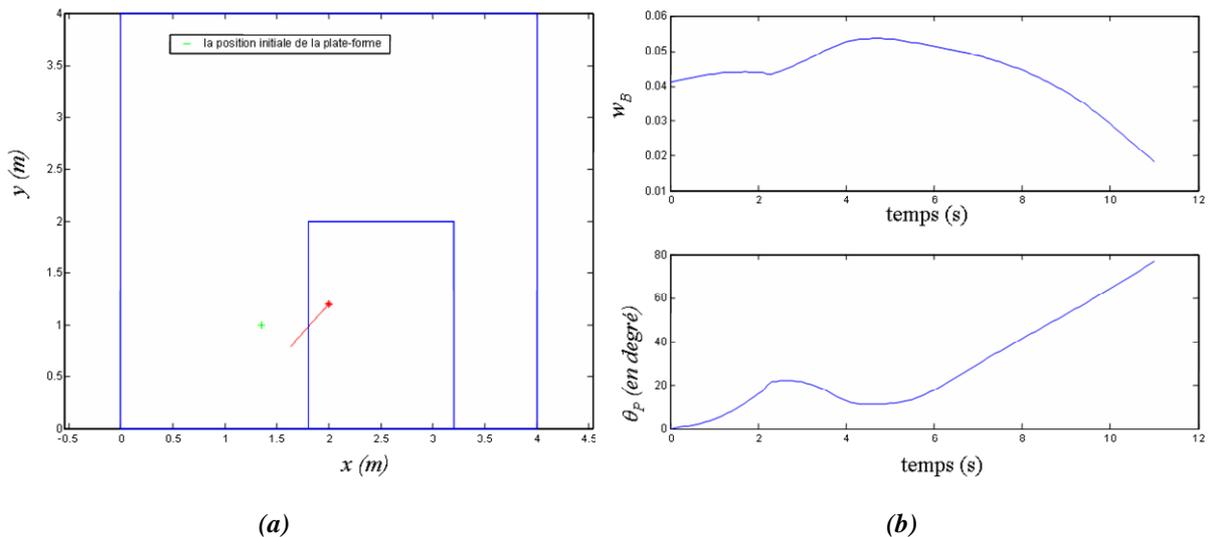


Figure 4-18 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile  $\tilde{w}_{dir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

#### Exemple 2 :

Le but est d'atteindre l'objectif situé dans l'espace à  $X_{but}=[1.88, 0.8, 0.4]^T$ . L'objectif se trouve à 8 cm de la bordure de la table. L'objectif est à la limite du domaine atteignable du bras manipulateur seul.

##### a. Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$

Les figures 4-19a et 4-19b montrent les résultats obtenus en optimisant  $w_B$ . La trajectoire de l'OT donnée par la figure 4-19a montre que l'OT a atteint son but avec une bonne manipulabilité (figure 4-19b). L'extension finale du bras manipulateur est donnée par  $X_{Bf}=[0.22, 0.56, 0]^T$ . La plate-forme mobile est orientée à la fin à  $17^\circ$ . La plate-forme s'oriente plus en fin de la tâche pour éviter que le bras atteigne son extension maximale qui annule sa manipulabilité.

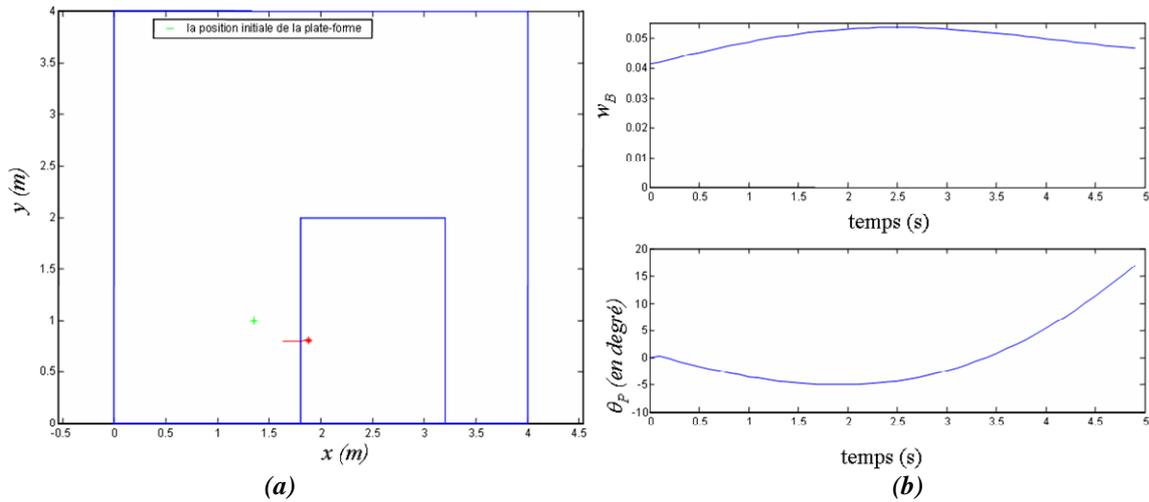


Figure 4-19 : Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

**b. Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$**

Les figures 4-20a et 4-20b montrent les résultats obtenus en optimisant la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$ . La figure 4-20a montre que l'objectif final est atteint. On remarque que la manipulabilité du bras est bonne, elle s'améliore légèrement au cours du temps et le bras manipulateur reste dans de bonnes configurations (figure 4-20b). La plate-forme s'oriente progressivement pour conserver la capacité de manipulation pour l'exécution de la tâche. L'orientation finale de la plate-forme mobile est de  $23^\circ$  et l'extension du bras est donnée par :  $X_{Bf} = [0.27, 0.52, 0]^T$ .

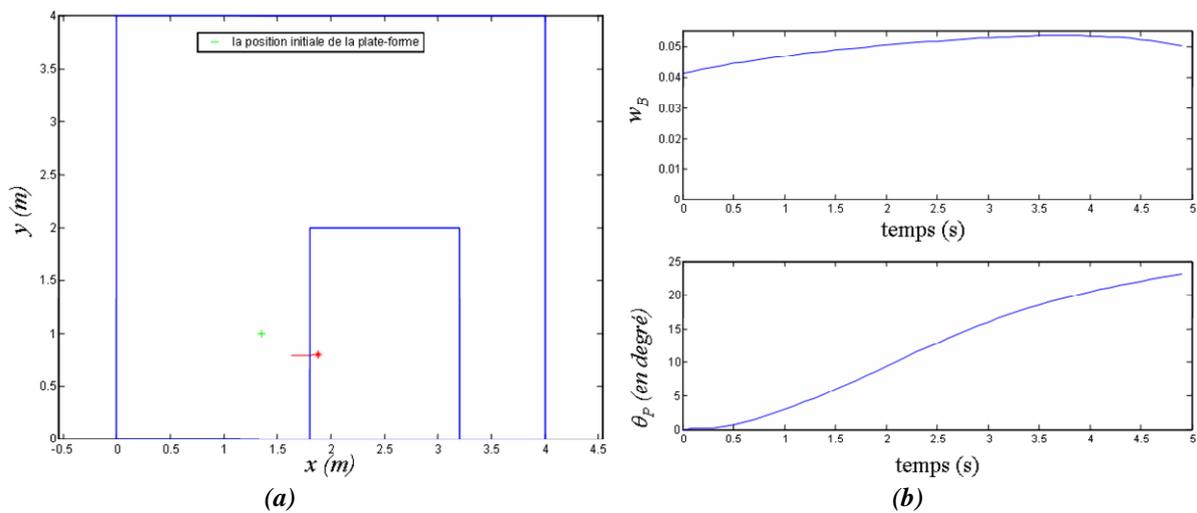


Figure 4-20 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

### c. Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile $\tilde{w}$

Sur la figure 4-21a, on remarque que l'OT atteint son objectif avec une manipulabilité bonne, mais inférieure à celle obtenue dans les deux exemples précédents (figure 21b). Le bras s'étend vers l'avant de la plate-forme ( $X_{Bf}=[0.16, 0.61, 0]^T$ ). L'orientation finale de la plate-forme est de  $9^\circ$ . L'extension du bras est plus importante par rapport au cas de l'optimisation des mesures liées au bras et la plate-forme s'oriente moins.

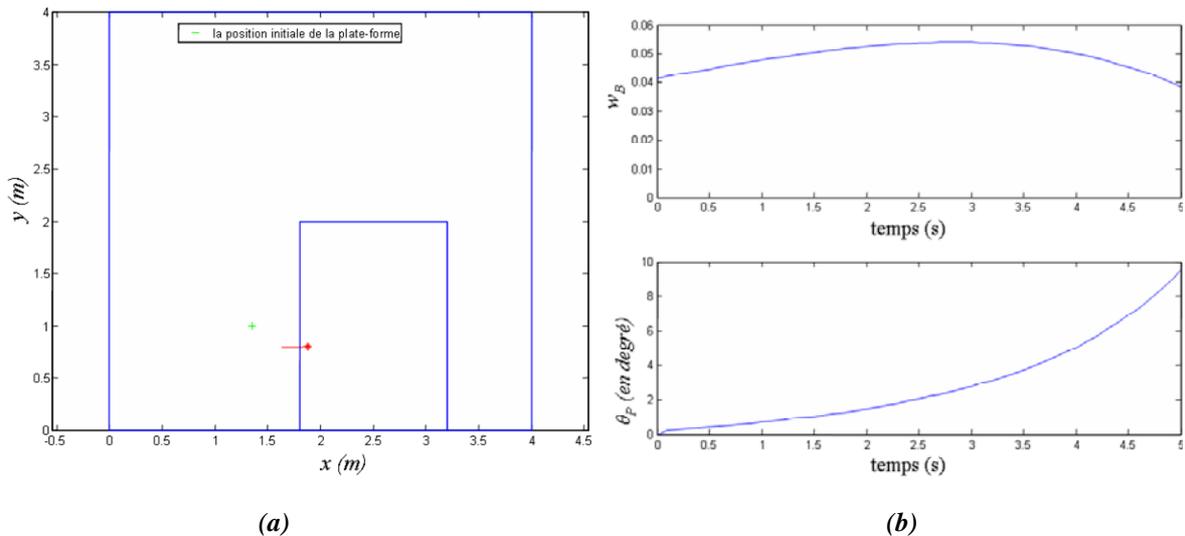
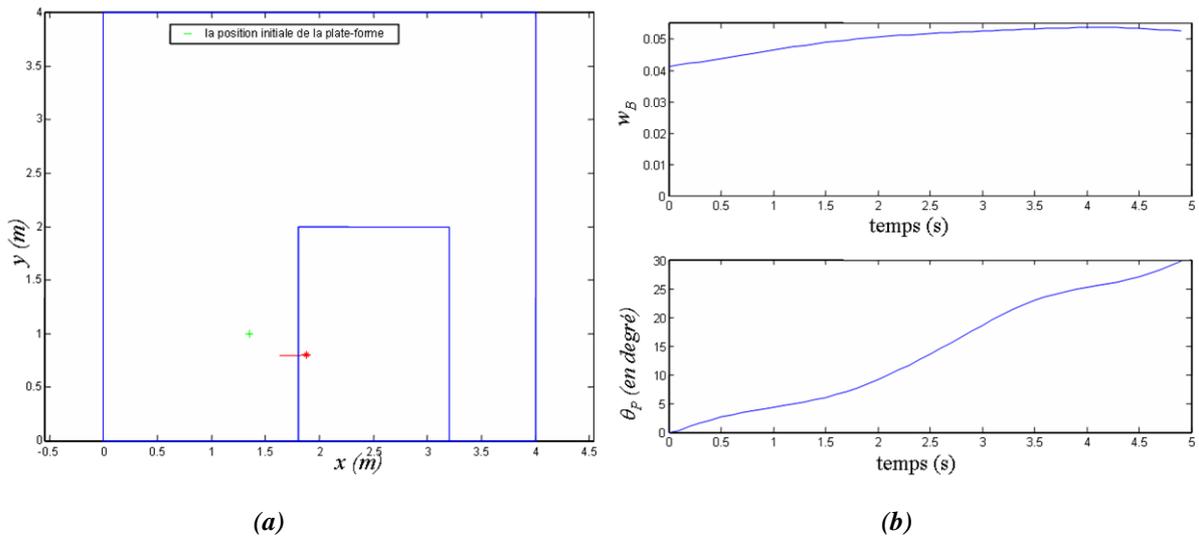


Figure 4-21 : Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

### d. Optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile

$$\tilde{w}_{dir}$$

Les résultats présentés sur la figure 4-22 montrent que l'OT a atteint l'objectif désiré. La manipulabilité du bras est bonne (figure 4-22b). Les coordonnées opérationnelles du bras à la fin de la tâche sont  $X_{Bf}=[0.31, 0.48, 0]^T$ . La plate-forme s'oriente progressivement et atteint une orientation finale de  $30^\circ$ .



**Figure 4-22 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du manipulateur mobile  $\tilde{w}_{dir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.**

#### 4.2.2.3 Discussion

Nous avons testé l'algorithme pour différentes conditions. Les exemples qui ont été choisis pour illustrer le comportement du manipulateur mobile sont représentatifs. Un autre exemple est disponible en annexe C.2.2.

On peut comparer les mesures selon trois critères :

- succès de la tâche
- capacité de manipulation du bras en fin tâche ; la question est de savoir dans quelles conditions le robot va aborder la tâche suivante
- comportement de la plate-forme. Seule l'évolution de l'orientation est concernée puisque la vitesse linéaire est imposée nulle. Ce critère permet d'évaluer si l'algorithme est capable d'exploiter l'extension maximale du bras manipulateur.

La tâche est réalisée avec succès dans tous les cas où l'objet est saisissable. Dans le cas où l'objet n'est pas saisissable même avec un mouvement approprié de la plate-forme mobile (exemple non présenté ici), à la fin du mouvement l'organe terminal se trouve aussi proche que possible de l'objectif.

En ce qui concerne la capacité de manipulation du bras manipulateur, il n'y a pas de différence notable entre les résultats obtenus pour un objectif situé dans l'espace atteignable du bras manipulateur seul (exemple2). Lorsque l'objectif n'est pas atteignable par le bras manipulateur seul (exemple1), seule l'optimisation de  $w_B$  conserve une bonne manipulabilité du bras manipulateur.

Le déplacement linéaire de la plate-forme étant interdit, c'est en jouant sur son orientation que la plate-forme peut augmenter le domaine atteignable du bras pour atteindre un objectif éloigné sur la table. Dans l'exemple 1 l'objet n'est pas atteignable par simple mouvement du bras manipulateur. L'orientation de la plate-forme permet alors de saisir l'objet. Dans l'exemple 2, l'objet est atteignable par simple mouvement du bras manipulateur. L'orientation de la plate-forme permet alors de conserver une manipulabilité élevée du bras manipulateur. La réorientation de la plate-forme mobile reste néanmoins inférieure à celle de l'exemple 1 dans lequel elle permet non seulement d'avoir une bonne manipulabilité mais aussi d'augmenter l'espace atteignable du bras manipulateur.

Les résultats de simulation font apparaître que dans la phase « objectif proche » et la zone « obstacle proche » la mesure  $w_B$  permet d'obtenir une réponse satisfaisante aux trois critères en étant supérieure aux autres mesures pour le deuxième critère (capacité de manipulation du bras manipulateur).

En résumé, pour la phase « objectif proche », la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  permet de répondre aux critères pour la zone « obstacle éloigné » alors que la manipulabilité du bras  $w_B$  permet de répondre aux critères pour la zone « obstacle proche ». Il faut envisager un changement de la mesure à optimiser lors du changement de zone avec les problèmes algorithmiques inhérents à la commutation.

### 4.2.3 Phase proche : changement de zone

#### 4.2.3.1 Protocole expérimental

L'objectif est d'illustrer par un exemple le changement de zone qui correspond au franchissement du seuil 2. Le protocole est identique à celui suivi précédemment. Pour tenir compte des résultats des paragraphes précédents, on optimise  $w_{Bdir}$  dans la zone éloignée de l'obstacle et  $w_B$  dans la zone proche de l'obstacle.

#### 4.2.3.2 Simulation

Soit le manipulateur mobile qui se trouve initialement dans la configuration suivante :  $q_i = [0.4, 1, 0, 270, 135.8, 240]^T$ . Le but est d'atteindre l'objectif situé dans l'espace à  $X_{but} = [2, 1.5, 0.4]^T$  (à 20 cm du bord de la table) en suivant une ligne droite à vitesse constante de 0.05m/s.

La figure 4-23a montre les trajectoires de la plate-forme et de l'organe terminal. La tâche opérationnelle imposée est réalisée correctement. L'objectif final est atteint. La

manipulabilité du bras affiche de bonnes valeurs (figure 4-23b) sur toute la phase de manipulation. Dans la zone éloignée, la plate-forme s'oriente progressivement pour éviter l'obstacle (figure 4-23b). Lorsqu'elle arrive dans la zone proche de l'obstacle ( $t=28s$ ), les déplacements linéaires de la plate-forme sont interdits. On remarque sur les courbes de la figure 4-23 un changement de l'évolution de  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme correspondant à un changement du comportement du système. La plate-forme contribue avec son orientation à atteindre l'objectif avec une configuration manipulable. L'orientation finale de la plate-forme est de  $\theta_{Pf}=41^\circ$ .

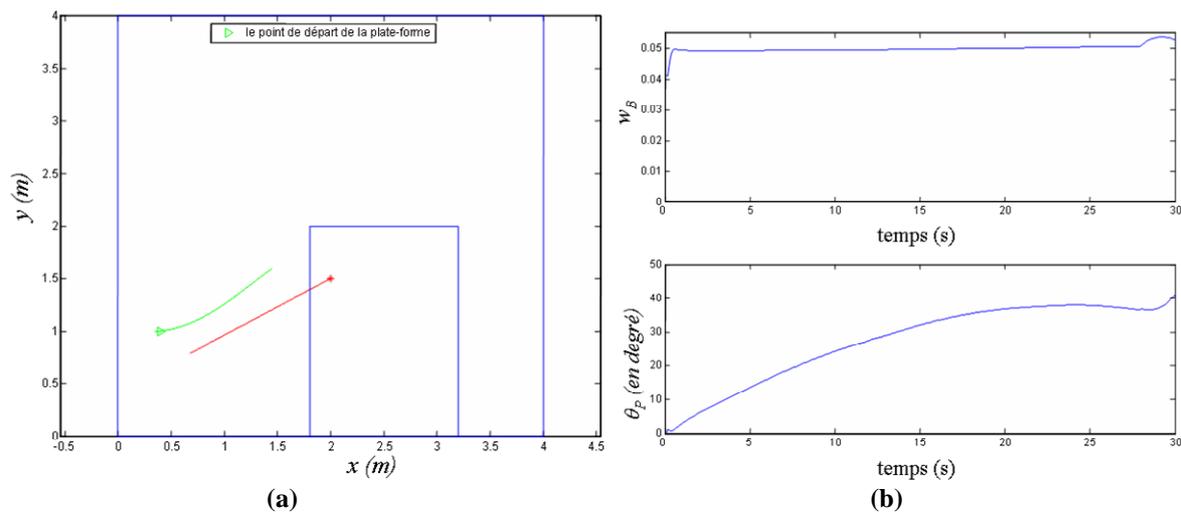


Figure 4-23 : Phase de manipulation et de saisie d'un objet : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .

### 4.2.3.3 Discussion

Nous avons montré ici un exemple de simulation représentant la phase proche de l'objectif. La tâche opérationnelle imposée permet la convergence de la pince vers l'objectif désiré. La phase étudiée est décomposée en deux zones de comportements différents. On remarque que les critères utilisés précédemment, à savoir la réalisation de la tâche, la conservation des capacités de manipulation du bras manipulateur et l'orientation de la plate-forme mobile, sont satisfaits.

Les deux zones constituant la phase « objectif proche » sont complémentaires. En zone « obstacle éloigné » l'optimisation de  $w_{Bdir}$  donne de meilleurs résultats. Même si l'optimisation de cet indice n'interdit pas les configurations singulières du bras, la mobilité de la plate-forme permet de pallier cet inconvénient. On rappelle que dans ce cas l'optimisation de  $w_B$  engendre un retournement de la plate-forme mobile. Dès qu'un obstacle est proche (zone « proche de l'obstacle »), la mobilité de la plate-forme est réduite à une simple rotation.

Cette mobilité réduite de la plate-forme ne permet plus de pallier une éventuelle configuration singulière du bras manipulateur et le retournement de la plate-forme n'engendre aucune difficulté d'évitement d'obstacle. Ces deux arguments militent pour l'optimisation de la mesure de manipulabilité  $w_B$  ce qui correspond au résultat du paragraphe 4.2.2. Ce passage permet de garder les configurations du bras manipulateur loin des singularités lorsque la réalisation de la tâche le permet. La préservation des configurations manipulables loin des singularités facilite d'éventuels ajustements de la position et de l'orientation de l'organe terminal pour l'opération de saisie proprement dite.

### 4.3 Exemple complet

#### 4.3.1 Protocole expérimental

Pour tester l'ensemble des phases, nous avons considéré que le manipulateur mobile évolue dans une salle de  $8\text{m}^2$ . L'environnement comporte trois obstacles et une table sur laquelle est déposé l'objet à atteindre. La tâche opérationnelle imposée à la pince du manipulateur mobile consiste à atteindre l'objectif final en passant au voisinage des trois sous-objectifs dont les positions sont connues. Les sous-objectifs sont respectivement situés à  $X_{SB1}=[2; 2.4]^T$ ,  $X_{SB2}=[4.5; 2.3]^T$  et  $X_{SB3}=[7; 6; 0.4]^T$ . L'objectif final est situé à  $X_{but}=[7.1; 7.2; 0.4]^T$ . Le passage de la phase objectif lointain à la phase objectif proche est activé dès que la distance entre la pince et l'objectif final devient inférieure à 50cm.

#### 4.3.2 Simulation

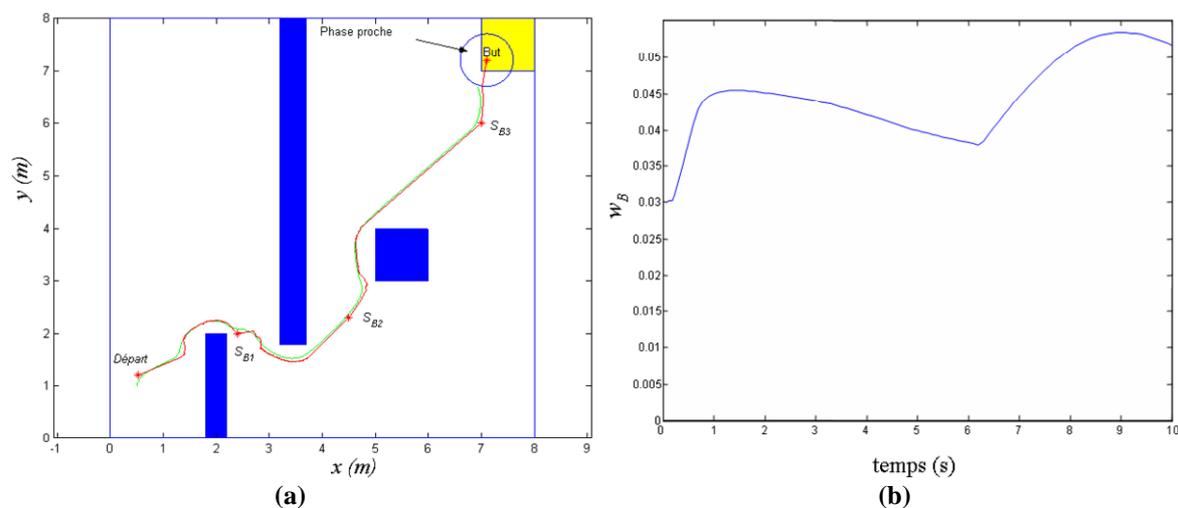


Figure 4-24 : Exemple complet : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité

Sur la Figure 4-24a sont représentées les trajectoires de la plate-forme et de l'OT pour une mission complète dans un environnement complexe. Au départ, le système se trouve dans la phase « objectif éloigné » et dans la zone « obstacle éloigné ». Pour accomplir sa tâche, il commence par se diriger vers  $S_{BI}$  en suivant une droite. Lorsque sa distance au premier obstacle franchit le seuil  $S_I$ , le comportement réactif est activé. Ces deux comportements du système se succèdent jusqu'à atteindre la phase « objectif proche ». Dans cette dernière, les capacités de manipulation du bras manipulateur sont mises en jeu pour accomplir la mission avec succès.

Sur la Figure 4-24b est donnée la manipulabilité du bras manipulateur à partir du moment où le système rentre dans la phase « objectif proche ». On retrouve une forme de courbe identique à celle de la Figure 4-23b. La manipulabilité du bras manipulateur est globalement bonne durant cette phase. Elle s'améliore d'avantage dans la dernière zone d'approche.

### 4.3.3 Discussion

Nous avons testé l'ensemble de la stratégie pour différentes positions de l'objectif final, différentes valeurs du seuil de passage de la phase « objectif lointain » à la phase « objectif proche » (seuil  $l$  variant entre 50 cm et 1 mètre).

L'exemple qui a été choisi pour illustrer le comportement du manipulateur mobile est représentatif. Le système évolue de son point de départ à son point d'arrivée en passant par les différentes zones décrites dans ce chapitre.

Nous avons utilisé les différentes mesures de manipulabilité. Dans certaines situations, la tâche imposée et l'optimisation des contraintes induisent le retournement de la plate-forme. Ces situations sont évitées en optimisant la manipulabilité directionnelle du bras et lorsque la réalisation de la tâche le permet. Il est impératif d'avoir la pince positionnée initialement en face avant de la plate-forme pour pouvoir éviter les obstacles avec succès. Nous avons prévu dans l'algorithme la possibilité de découpler les mouvements de la plate-forme et du bras. Si la pince se trouve positionnée initialement à l'arrière du système, il suffit d'exécuter une tâche par le bras pour la ramener à l'avant du système. Si l'objectif est proche, les mouvements de l'ensemble bras-base sont coordonnés pour avoir un comportement naturel qui ressemble à celui de l'être humain. Cependant si l'objectif visé est loin, il est plus intéressant de n'utiliser

que les capacités de locomotion du système. Donc, il n'est pas important d'actionner les deux sous systèmes.

## 5 Conclusion

Ce chapitre a proposé une stratégie de déplacement d'un manipulateur mobile dont l'objectif principal est de placer le système dans la meilleure configuration possible en terme de manipulabilité pour effectuer la tâche finale de saisie. Cette stratégie distingue les situations dans lesquelles la tâche n'est exécutée que par la plate-forme, des situations qui nécessitent la coordination entre la plate-forme et le bras manipulateur. L'idée est que la personne ne se soucie que du pilotage de l'organe terminal du bras manipulateur et que le reste du système articulé suive en prenant en compte si nécessaire la présence d'obstacle.

Pour respecter les principes qui permettent de faciliter la coopération homme-machine, comme nous l'avons brièvement présenté en début de chapitre, nous nous sommes inspirés du comportement humain pour établir une stratégie décomposée en deux phases selon que l'objectif, à savoir l'objet à saisir, est éloigné ou proche. Dans chaque phase, deux zones sont considérées, proche ou éloignée d'un obstacle. En effet la présence de l'obstacle doit modifier le comportement du système. Le changement de phase est précisé par l'opérateur tandis que le changement de zone est déterminé automatiquement grâce aux capteurs de détection d'obstacles.

Pour chaque phase a été définie la méthode de résolution permettant de calculer les commandes du manipulateur mobile à partir des ordres fournis par le mode de commande actif. Dans la première phase « objectif éloigné », le système n'est pas redondant, le bras manipulateur étant fixe. Deux comportements sont pris en compte : la convergence vers l'objectif (tâche opérationnelle) et l'évitement des obstacles. Ce dernier n'est activé qu'à proximité des obstacles (zone « obstacle proche ») et devient de plus en plus prépondérant au fur et à mesure que le système se rapproche de l'obstacle.

Dans la seconde phase (« objectif proche »), le système devient redondant avec la prise en compte du bras manipulateur. Il est alors intéressant d'exploiter cette redondance. La méthode proposée est basée sur l'utilisation classique de la pseudo-inverse avec un terme d'optimisation. Pour chaque cas, nous avons défini la tâche principale qui est dans la plupart des cas la tâche opérationnelle et lorsqu'il y avait redondance, le critère à optimiser et/ou la tâche secondaire et si nécessaire la tâche additionnelle. Les simulations ont permis de vérifier globalement le bon fonctionnement de la stratégie et aussi de comparer plusieurs mesures de manipulabilité qui entrent dans le critère à optimiser quand il y a la possibilité d'exploiter la

redondance. La comparaison s'est faite sur les points suivants : succès de la tâche, capacité de manipulation du bras en fin tâche, comportement de la plate-forme. Les mesures portant sur le bras versus celles portant sur le manipulateur mobile apportent une meilleure réponse :  $w_B$  pour la phase « objectif proche » et la zone « obstacle proche » et  $w_{Bdir}$  la nouvelle mesure que nous avons proposée au chapitre 3, pour la phase « objectif proche » et la zone « obstacle lointain ».

Plusieurs contraintes sont possibles pour exploiter la redondance. Nous avons choisi d'optimiser la mesure de manipulabilité et l'évitement des obstacles. Nous avons utilisé des coefficients de pondérations statiques pour les contraintes. Nous pensons qu'il est possible d'améliorer cette gestion de redondance en utilisant des coefficients dynamiques et variables en fonction de l'état de l'environnement (libre ou encombré).

Pour des raisons de lisibilité nous n'avons présenté que les résultats portant sur le positionnement de l'OT. Les modèles développés tiennent aussi compte de l'orientation.

## **Conclusion générale**



Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire, qui s'inscrivent dans le cadre du projet ARPH, ont pour but la suppléance fonctionnelle de la manipulation et la saisie d'objets par une personne handicapée moteur. L'usage d'un manipulateur mobile représente une certaine source d'autonomie pour les personnes handicapées, leur permettant d'interagir avec leur environnement et d'alléger leur dépendance vis-à-vis de leur entourage. Un assistant robotisé à base d'un bras manipulateur embarqué sur une plate-forme mobile offre des possibilités accrues pour la locomotion et la manipulation. Malgré son grand intérêt, il présente néanmoins un certain nombre d'inconvénients dus à la complexité de sa commande et à la variabilité de l'environnement dans lequel il évolue. L'objectif de ce mémoire était d'apporter une contribution dans le développement d'une stratégie d'exécution des tâches par la coordination de la plate-forme et du bras manipulateur, et cela tout en tenant compte de l'aspect coopération homme-machine. Pour ce faire, nous avons élaboré une stratégie capable d'amener le système dans les meilleures conditions pour une saisie de l'objet. L'idée que nous avons adoptée est que la personne ne se soucie que du pilotage de l'organe terminal du bras manipulateur et que le reste du système articulé suive en prenant en compte si nécessaire la présence d'obstacle. L'association des capacités de manipulation du bras manipulateur et de la locomotion de la plate-forme offre la possibilité d'effectuer une tâche opérationnelle tout en exécutant une ou plusieurs tâches additionnelles et/ou en respectant une ou plusieurs contraintes comme éviter des obstacles, s'éloigner des singularités et des butées articulaires. Pour placer le système dans de meilleures configurations possibles en terme de capacité de manipulation pour effectuer la tâche finale, nous avons utilisé le concept d'ellipsoïde de manipulabilité et les mesures basées sur son principe.

Le choix des éléments composant le manipulateur mobile correspond à un compromis entre plusieurs critères notamment le coût, la fiabilité, la maintenabilité. La plate-forme mobile a été conçue au laboratoire et le bras manipulateur a été acheté chez une société Hollandaise (Exact Dynamics) qui le fabrique et le commercialise. Le développement de la stratégie de commande nécessitait les modèles géométriques et cinématiques qui n'étaient pas connus à l'achat du matériel. Il a fallu établir les modèles et les valider expérimentalement. Dans un premier temps, nous avons défini et testé les modèles géométriques et cinématiques du bras Manus. Ensuite, nous avons élaboré les modèles globaux de l'ensemble du manipulateur mobile en tenant compte d'un nouveau type de contrainte au niveau des vitesses. Cette contrainte est due à l'utilisation d'une plate-forme mobile non holonome pour

laquelle les trajectoires ne sont pas toutes admissibles. L'utilisation des modèles cinématiques réduits permet d'inclure cette contrainte.

L'association des degrés de liberté du bras manipulateur et de la plate-forme mobile offre une flexibilité et plusieurs solutions pour exécuter une tâche opérationnelle. Pour exploiter la redondance disponible afin d'assurer de meilleures conditions pour la manipulation dans un environnement libre, nous avons choisi d'utiliser le concept de manipulabilité. Nous avons proposé de nouvelles mesures et évalué leurs apports dans la commande du manipulateur mobile. Les mesures de manipulabilité de la littérature présentent un inconvénient : elles n'évaluent pas la capacité réelle de déplacement suivant la direction de la tâche en cours. Elles s'annulent dès que le déplacement est impossible dans une direction donnée. Pour pallier ce problème, nous avons proposé une nouvelle mesure pour les bras manipulateurs qui permet de prendre en compte non seulement la configuration du bras manipulateur, mais aussi la tâche que l'on souhaite exécuter. La mesure que nous avons proposée ne s'annule que lorsqu'aucun déplacement n'est possible dans la direction de la tâche désirée. Nous avons ensuite étudié l'extension du concept de manipulabilité des bras manipulateurs aux manipulateurs mobiles pour tenir compte de l'apport de la mobilité de la plate-forme. Nous avons d'une part, contribué à l'amélioration des mesures existantes en homogénéisant les dimensions du système, ce qui permet de prendre en compte des limites en vitesses du système et, d'autre part, en nous inspirant de notre première amélioration, nous avons défini une nouvelle mesure de manipulabilité directionnelle pour l'ensemble du système.

Pour l'application de manipulabilité à la commande du manipulateur mobile, nous avons proposé un algorithme d'inversion basé sur un schéma classique qui optimise un critère de manipulabilité. Nous avons utilisé cet algorithme pour comparer plusieurs mesures de manipulabilité dont certaines tirées de la littérature et celles que nous avons proposées. Les résultats ont montré d'une part que notre normalisation améliore les performances du système et, d'autre part, que le comportement du système est plus naturel dans le cas de l'utilisation des deux mesures de manipulabilité que nous avons proposées : manipulabilité directionnelle du bras manipulateur et du manipulateur mobile.

Une fois que l'exploitation de la redondance a été étudiée dans un environnement libre, nous avons proposé une stratégie permettant de répondre à un scénario usuel de saisie d'un objet par une personne distante. L'objectif principal est de placer le système dans les

meilleures configurations possibles en terme de manipulabilité pour effectuer la tâche finale de saisie. Pour respecter les principes qui permettent de faciliter la coopération homme-machine, nous nous sommes inspirés du comportement humain. Cette stratégie distingue les situations, dans lesquelles la tâche n'est exécutée que par la plate-forme, des situations qui nécessitent la coordination de mouvements entre la plate-forme et le bras manipulateur. Elle prend en compte à la fois l'aspect coopération homme-machine et l'environnement dans lequel le manipulateur mobile évolue. L'étape d'approche pour la saisie est décomposée en deux phases : « phase objectif éloigné » et phase « objectif proche ». Dans chaque phase deux zones sont considérées, proche ou éloigné d'un obstacle, car la présence de l'obstacle doit modifier le comportement du système. Le changement de phase est précisé par l'opérateur tandis que le changement de zone est déterminé automatiquement grâce aux capteurs de détection d'obstacles. La stratégie a été validée en simulation par des tests unitaires dans chaque zone et phase puis par des tests sur l'ensemble de la stratégie.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont abouti à la publication dans une revue internationale et à deux papiers dans des conférences : l'une internationale récompensée par un « Best Paper Award » et l'autre nationale qui va donner lieu à une publication en revue.

Nous avons implémenté sur le robot réel l'algorithme de commande qui gère la plate-forme mobile et les six articulations du bras manipulateur. Nous nous sommes confrontés à de nombreux problèmes :

- L'hétérogénéité des deux sous systèmes composant le manipulateur mobile notamment en termes de protocole de communication et de synchronisation temporelle.
- Le manque d'information sur le matériel du commerce.
- L'acquisition des données du terrain : imprécision et incomplétude des données fournies par les capteurs.

A court terme, certaines évolutions sont envisagées. Nous travaillons sur la mise en place d'une commande en boucle fermée et la validation de l'ensemble de la stratégie sur le système réel. Comme il a été dit précédemment, nous avons choisi d'optimiser la mesure de manipulabilité et l'évitement des obstacles pour exploiter la redondance. Nous avons utilisé des coefficients de pondérations statiques pour les contraintes. Nous pensons qu'il est possible

d'améliorer cette gestion de redondance en utilisant des coefficients dynamiques et variables en fonction de l'état de l'environnement (libre ou encombré).

A plus long terme, notre objectif est d'apporter une contribution dans l'évolution des fonctionnalités existantes du manipulateur mobile du point de vue de la commande et de la conception.

Pour la partie commande, nous envisageons de compléter le travail de recherche présenté dans ce mémoire par une fonction de préhension automatique. Nous pensons qu'il faudrait développer dans un premier temps une méthode pour générer une pose appropriée de pince du bras manipulateur pour saisir un objet de type connu à partir de la connaissance d'un ensemble de points de contact. Ensuite il faudrait adapter la méthode pour de nouveaux types d'objets. Pour choisir la meilleure posture pour une prise, il est nécessaire d'avoir des informations sur la forme de l'objet à saisir. Pour ce faire, nous allons équiper le manipulateur mobile avec de nouveaux capteurs afin d'améliorer sa perception de l'environnement et ainsi pouvoir assurer une préhension automatique. Les travaux de Naima Ait-Oufroukh ([Ait-Oufroukh02]) de l'équipe Hands du laboratoire IBISC portent sur un dispositif de perception embarqué sur la pince constitué d'une caméra vidéo et des capteurs ultrasons.

Un deuxième point que nous voudrions bien traiter est l'évitement des collisions pour la partie bras manipulateur, car le Manus dans sa version actuelle ne possède aucun capteur pour la détection des obstacles de l'environnement.

Pour la partie conception, nous envisageons d'utiliser la manipulabilité pour étudier les positions de fixation du bras sur la plate-forme les mieux appropriées afin optimiser les capacités de manipulation du manipulateur mobile.

# **Annexes**



## A.1 Inversion matricielle

Nous rappellerons ici les éléments mathématiques fondamentaux pour l'inversion cinématique.

### A.1.1 Inverse généralisée et pseudo-inverse

Soit  $A$  une matrice de dimensions  $(m \times n)$ . Une inverse généralisée de la matrice  $A$  est une matrice de dimensions  $(n \times m)$  notée  $A^\#$  telle que :

$$AA^\#A = A \quad (\text{A-1})$$

La pseudo inverse (ou inverse de Moore Penrose) d'une matrice  $A$  est une matrice unique de dimension  $(n \times m)$  notée  $A^+$  telles que :

$$AA^+A = A \quad (\text{A-2})$$

$$A^+AA^+ = A^+ \quad (\text{A-3})$$

$$(AA^+)^T = AA^+ \quad (\text{A-4})$$

$$(A^+A)^T = A^+A \quad (\text{A-5})$$

$$A^{++} = A \quad (\text{A-6})$$

$$A^{+T} = A^{T+} \quad (\text{A-7})$$

Lorsque  $A$  est de rang maximal  $AA^+$  est défini positive.

**Remarque 1 :** d'après l'équation (A-2) on remarque que la pseudo-inverse est une inverse généralisée particulière.

**Remarque 2 :** une inverse généralisée de la matrice  $A$  est utilisée quand l'inverse  $A^{-1}$  n'existe pas. Autrement dit, lorsque  $A$  est singulière ou rectangulaire.

## A.2 Résolution d'un système linéaire

Soit le système linéaire à résoudre :

$$Ax = y \quad (\text{A-8})$$

avec  $A$  une matrice de dimension  $(m \times n)$ ,  $y$  un vecteur connu de dimension  $(m \times 1)$ .

Le problème est de trouver le vecteur  $x$  de dimension  $(n \times 1)$ .

- Si la matrice  $A$  est carrée ( $m = n$ ) et non singulière, alors la solution du système est unique.

Elle est donnée par :

$$x = A^{-1}y \quad (\text{A-9})$$

- Si la matrice  $A$  est rectangulaire ( $m \neq n$ ), on peut résoudre le problème par minimisation de critère suivant :

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} \|y - Ax\|^2 \quad (\text{A-10})$$

Si ce minimum est nul, alors  $x$  vérifie  $Ax = y$  et constitue une solution exacte de cette équation.

Si le minimum n'est pas nul, alors  $Ax \neq y$  et nous dirons que  $y$  est une solution approchée de l'équation  $Ax = y$ .

Soit  $r$  le rang de la matrice  $A$  ( $r = \text{rang}(A)$ )

Si  $m \geq n$  et  $r = n$ , alors la solution de l'équation (A-8) est :

$$x = A^T (AA^T)^{-1} = A^+ y \quad (\text{A-11})$$

Si  $m \leq n$  et  $r = m$ , alors l'équation (A-8) admet une infinité de solutions exactes qui peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} x &= A^+ y + (I_n - A^T (AA^T)^{-1} A)z \\ &A^+ y + (I_n - A^+ A)z \end{aligned} \quad (\text{A-12})$$

où  $z$  est un vecteur quelconque de dimension  $(n \times 1)$ .

Si  $r < \min(m, n)$ , alors par des permutations préalables de lignes et de colonnes,  $A$  peut s'écrire :

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \text{ où } A_{11} \text{ est une matrice de l'ordre } r \text{ et de rang. On pose } A_1 = [A_{11}^T \ A_{21}^T]^T \text{ de}$$

dimension  $(m \times r)$  et  $A_2 = [A_{12} \ A_{22}]$  de dimension  $(r \times n)$

Le problème de trouver une solution à l'équation (A-10) peut se ramener à la résolution de :

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} \|y_1 - A_2 x\|^2 \quad (\text{A-13})$$

où le vecteur  $y_1$  est de dimension  $r$ .

### A.3 Décomposition en valeurs singulières

Soit  $A$  une matrice de dimension  $(m \times n)$  et de rang  $r$  ( $r \leq \min(m, n)$ ).

Les valeurs singulières d'une matrice  $A$  sont les racines carrées des valeurs propres de  $A^T A$ .  
on les note  $\sigma_i$  :

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i(A^T A)}$$

Alors que les valeurs propres sont liées aux directions invariantes par la transformation  $A$ , les valeurs singulières contiennent l'information "métrique" sur cette transformation. L'image du cercle unité par  $A$  est un ellipsoïde dont la longueur des demi axes principaux correspondent aux valeurs singulières maximale et minimale :

$$\sigma_{\max} = \max_{u \neq 0} \frac{\|Au\|}{\|u\|} \quad \text{et} \quad \sigma_{\min} = \min_{u \neq 0} \frac{\|Au\|}{\|u\|}$$

où  $\|x\|$  désigne la norme euclidienne de  $x$ :  $\|x\| = \sqrt{x^T x}$ .

La décomposition en valeurs singulières (SVD, *Singular Value Decomposition*) exprime la

$$A = U_{m \times m} \Sigma_{m \times n} V_{n \times n}^T$$

matrice  $A$  sous la forme :

$$= [U_1, U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_{1r \times r} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} |r \times n \\ |r \times (n - r)| \end{array}$$

avec :

- $U \in R^{m \times m}$  matrice unitaire ( $UU^T = I_{m \times m}$ ),
- $V \in R^{n \times n}$  matrice unitaire ( $VV^T = I_{n \times n}$ ),
- $\Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$  avec  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_r > 0$
- $U_1$  et  $U_2$  de dimension  $m \times r$  et  $m \times (m - r)$  respectivement,
- $V_1$  et  $V_2$  de dimension  $n \times r$  et  $n \times (n - r)$  respectivement,

$U$  est la matrice des vecteurs singuliers  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$  (voir figure ci-dessous).  $V$  est la matrice des vecteurs dont les images par  $A$  sont les vecteurs singuliers  $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ . En

$$\text{effet : } Av_i = U\Sigma V^T v_i \text{ or } : V^T v_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ n \end{matrix} \quad \text{car } V \text{ est unitaire}$$

$$Av_i = \sigma_i u_i$$

Les dernières colonnes de  $V$  correspondant aux valeurs singulières nulles engendrent le *noyau* de la matrice  $A$ , les autres colonnes correspondant aux valeurs singulières non nulles engendrent l'espace image de  $A$ .

## B.1 Calcul des modèles géométrique du bras manipulateur

### B.1.1 Calcul du modèle géométrique direct du bras manipulateur

Tableau B-1 : Les paramètres de Denavit Hatenberg du bras manipulateur.

N° de l'articulation	$\alpha_i$	$d_i$	$q_{Bi}$	$r_i$
1	0	0	$q_{B1}$	0
2	-90	0	$q_{B2}$	$-L_2$
3	0	$L_3$	$q_{B3}$	0
4	90	0	$q_{B4}$	$L_4$
5	-90	0	$q_{B5}$	0
6	90	0	$q_{B6}$	0

Le passage du repère  $R_{Bi-1}$  au repère  $R_{Bi}$  (Figure 2-2) est exprimé par la matrice homogène donnée par l'équation :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(q_{Bi}) & -\sin(q_{Bi}) & 0 & d_i \\ \cos(\alpha_i)\sin(q_{Bi}) & \cos(\alpha_i)\cos(q_{Bi}) & -\sin(\alpha_i) & -r_i \sin(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i)\sin(q_{Bi}) & \sin(\alpha_i)\cos(q_{Bi}) & \cos(\alpha_i) & r_i \cos(\alpha_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B-1})$$

La position et l'orientation du repère  $R_T$  (lié à la pince du bras) par rapport au repère  $R_B$  (lié à la base du bras manipulateur) sont données par le produit de 6 matrices homogènes ci-dessous.

$${}^0T_T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (\text{B-2})$$

Où :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B1}) & -\sin(q_{B1}) & 0 & 0 \\ \sin(q_{B1}) & \cos(q_{B1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B2}) & -\sin(q_{B2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_2 \\ -\sin(q_{B2}) & -\cos(q_{B2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B3} - q_{B2}) & -\sin(q_{B3} - q_{B2}) & 0 & L3 \\ \sin(q_{B3} - q_{B2}) & \cos(q_{B3} - q_{B2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B4}) & -\sin(q_{B4}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L4 \\ \sin(q_{B4}) & \cos(q_{B4}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B5}) & -\sin(q_{B5}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q_{B5}) & -\cos(q_{B5}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_{B6}) & -\sin(q_{B6}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(q_{B6}) & \cos(q_{B6}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette méthode fixe la configuration zéro "géométrique" du robot telle que  $q_B = 0$ . Cette configuration ne correspond pas forcément à la configuration zéro "codeur". On peut passer de l'une à l'autre en procédant au changement de variable suivant:

$$q_B = q_{Bc} + q_{B0}.$$

$q_{B0}$  : représente le décalage ("offset") introduit par les variables codeurs  $q_{Bc}$  pour obtenir le vecteur des variables articulaires

La position de l'OT peut être obtenue simplement par la multiplication des quatre premières matrices homogènes i.e.  ${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$ .

**Remarque 2 :** Pour retrouver les résultats du modèle implémenté par le constructeur, on doit toujours ajouter  $+\frac{\pi}{2}$  à l'angle  $\theta_B$  (donné par l'équation ci-dessus) :  $\theta_{B_{Mamus}} = \theta_B + \frac{\pi}{2}$ .

### B.1.2 Calcul du modèle géométrique inverse du bras manipulateur

Pour trouver la solution du problème d'inversion du modèle géométrique, nous avons utilisé une méthode qui consiste à prémultiplier successivement les deux membres de

l'équation par les matrices  ${}^i T_{i-1}$  pour  $i$  (ajouter la formule) Cette opération permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre, les variables articulaires.

### La position de l'OT :

1<sup>ère</sup> Étape :

$${}^1 T_0 {}^0 T_4 = {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4$$

$$x_{B2} \sin(q_{B1}) + x_{B1} \cos(q_{B1}) = L_4 \sin(q_{B3}) + L_3 \cos(q_{B2}) \quad (1)$$

$$-x_{B1} \sin(q_{B1}) + x_{B2} \cos(q_{B1}) = -L_2 \quad (2)$$

$$x_{B3} = -L_3 \sin(q_{B2}) + L_4 \cos(q_{B3}) \quad (3)$$

2<sup>ème</sup> Étape :

$${}^2 T_1 {}^1 T_0 {}^0 T_4 = {}^2 T_3 {}^3 T_4$$

$$\cos(q_{B2})(x_{B1} \cos(q_{B1}) + x_{B2} \sin(q_{B1})) - x_{B3} \sin(q_{B2}) = -L_4 \sin(q_{B2} - q_{B3}) + L_3 \quad (4)$$

$$-\sin(q_{B2})(x_{B1} \cos(q_{B1}) + x_{B2} \sin(q_{B1})) - x_{B3} \cos(q_{B2}) = -L_4 \cos(q_{B2} - q_{B3}) \quad (5)$$

$$-x_{B1} \sin(q_{B1}) + x_{B2} \cos(q_{B1}) + L_2 = 0 \quad (6)$$

3<sup>ème</sup> Étape :

$${}^3 T_2 {}^2 T_1 {}^1 T_0 {}^0 T_4 = {}^3 T_4$$

$$x_{B1} \cos(q_{B3}) \cos(q_{B1}) + x_{B2} \cos(q_{B3}) \sin(q_{B1}) - x_{B3} \sin(q_{B3}) - L_3 \cos(q_{B3}) \cos(q_{B2}) - L_3 \sin(q_{B3}) \sin(q_{B2}) = 0 \quad (7)$$

$$-x_{B1} \sin(q_{B3}) \cos(q_{B1}) - x_{B2} \sin(q_{B3}) \sin(q_{B1}) - x_{B3} \cos(q_{B3}) + L_3 \sin(q_{B3}) \cos(q_{B2}) - L_3 \cos(q_{B3}) \sin(q_{B2}) = -L_4 \quad (8)$$

$$-x_{B1} \sin(q_{B1}) + x_{B2} \cos(q_{B1}) + L_2 = 0 \quad (9)$$

La résolution de ces équations nous donne :

$$\sin(q_{B1}) = \frac{L_2 x_{B1} + x_{B2} \sqrt{(x_{B1}^2 + x_{B2}^2 - L_2^2)}}{x_{B1}^2 + x_{B2}^2},$$

$$\cos(q_{B1}) = \frac{-L_2 x_{B2} + x_{B1} \sqrt{(x_{B1}^2 + x_{B2}^2 - L_2^2)}}{x_{B1}^2 + x_{B2}^2},$$

$$q_{B1} = \text{atan2}(\sin(q_{B1}), \cos(q_{B1})) + \pi \quad (\text{le } \pi \text{ est l'offset})$$

on pose:

$$C = x_{B1} \cos(q_{B1}) + x_{B2} \sin(q_{B1}),$$

$$X = 2L_3 x_{B3},$$

$$Y = -2L_3 C,$$

$$Z = L_4^2 - C^2 - L_3^2 - x_{B3}^2,$$

$$\sin(q_{B2}) = \frac{XZ + Y\sqrt{(X^2 + Y^2 - Z^2)}}{(X^2 + Y^2)},$$

$$\cos(q_{B2}) = \frac{YZ - X\sqrt{(X^2 + Y^2 - Z^2)}}{(X^2 + Y^2)},$$

$$q_{B2} = \text{atan2}(\sin(q_{B2}), \cos(q_{B2})) + \pi \quad (\pi \text{ est l'offset})$$

$$\sin(q_{B3}) = \frac{C - L_3 \cos(q_{B2})}{L_4}$$

$$\cos(q_{B3}) = \frac{x_{B3} + L_3 \sin(q_{B2})}{L_4}$$

$$q_{B3} = \text{atan2}(\sin(q_{B3}), \cos(q_{B3})) + \frac{\pi}{2}, \quad (\text{le } \frac{\pi}{2} \text{ est l'offset})$$

### L'orientation de l'OT

On calcule le terme de gauche :

$$\text{Terme\_gauche} = {}^3T_2 \cdot {}^2T_1 \cdot {}^1T_0 \cdot {}^0T_6,$$

À partir des angles d'Euler, on forme une matrice 4×4 :

$$\text{Euler} = \begin{bmatrix} R & 0_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{où } R \text{ est la matrice de passage entre les angles d'Euler et les cosinus}$$

directeur, donnée par :

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) - \sin(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) - \sin(\phi_B) \cos(\psi_B) & \cos(\phi_B) \sin(\theta_B) \\ \sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) + \cos(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) + \cos(\phi_B) \cos(\psi_B) & \sin(\phi) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta_B) \cos(\psi_B) & \sin(\theta_B) \sin(\psi_B) & \cos(\theta_B) \end{bmatrix}$$

$$\text{Terme\_droite} = {}^3T_2 \cdot {}^2T_1 \cdot {}^1T_0 \cdot \text{Euler};$$

$$q_{B4} = \text{atan2}(-\text{Terme\_droite}(1,3), \text{Terme\_droite}(3,3));$$

$$q_{B5} = -\text{acos}(\text{Terme\_droite}(2,3)) + \pi;$$

$$q_{B6} = \text{atan2}(\text{Terme\_droite}(2,1), \text{Terme\_droite}(2,2));$$

La comparaison des éléments des Terme\_gauche et Terme\_droite permet de vérifier que les angles sont dans les bons quadrants.

## **B.2 La contrainte de non holonomie de la plate-forme**

La condition de roulement sans glissement de la roue droite est décrite par deux équations qui correspondent à une projection dans le plan de la roue et dans un plan perpendiculaire à la roue :

$$\dot{x}_p \cos(\theta_p) + \dot{y}_p \sin(\theta_p) + \frac{d}{2} \dot{\theta}_p - r \dot{\phi}_r = 0$$

$$-\dot{x}_p \sin(\theta_p) + \dot{y}_p \cos(\theta_p) = 0$$

De même, la condition de roulement sans glissement de la roue gauche est décrite par les deux équations :

$$\dot{x}_p \cos(\theta_p) + \dot{y}_p \sin(\theta_p) - \frac{d}{2} \dot{\theta}_p - r \dot{\phi}_l = 0$$

$$-\dot{x}_p \sin(\theta_p) + \dot{y}_p \cos(\theta_p) = 0$$

On en déduit que la condition de r. s. g. de la plate-forme est décrite par l'équation :

$$-\dot{x}_p \sin(\theta_p) + \dot{y}_p \cos(\theta_p) = 0$$

Nous pouvons déduire cette contrainte sur les vitesses autrement. La supposition du roulement sans glissement des roues sur le sol conduit à une vitesse  $v$  du point  $O_p$  portée par l'axe  $x_p$ .

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} \dot{x}_p = v \cos(\theta_p) & (I) \\ \dot{y}_p = v \sin(\theta_p) & (II) \end{cases}$$

En multipliant (I) par  $\sin(\theta_p)$  et (II) par  $\cos(\theta_p)$ , on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}_p \sin(\theta_p) = v \cos(\theta_p) \sin(\theta_p) & (III) \\ \dot{y}_p \cos(\theta_p) = v \sin(\theta_p) \cos(\theta_p) & (IV) \end{cases}$$

La soustraction entre l'équation (III) et (IV), nous permet d'écrire l'équation de la non holonomie de la plate forme sous la forme :

$$\sin(\theta_p)\dot{x}_p - \cos(\theta_p)\dot{y}_p = 0 \quad (\text{B-3})$$

Elle peut être exprimée en fonction des vitesses généralisées sous la forme :

$$G_p(\theta_p)\dot{q}_p \quad (\text{B-4})$$

où  $G_p(\theta_p) = [-\sin(\theta_p) \ -\cos(\theta_p) \ 0]$  et  $\dot{q}_p = [\dot{x}_p \ \dot{y}_p \ \dot{\theta}_p]^T$

### **B.3 Les matrices de passages entre les principaux repères liés au manipulateur mobile.**

Le repère  $R_T$  de l'OT est lié au repère  $R_B$  de la base du bras manipulateur par la matrice de transformation homogène  ${}^B T_T(q_B)$  (exprime les coordonnées dans le repère  $R_B$  en fonction des coordonnées dans le repère  $R_T$ ). Cette matrice correspond à celle donnée par l'équation **B-2**.

Le repère  $R_B$  de la base du bras manipulateur est lié au repère  $R_P$  de la plate-forme mobile par la matrice de transformation homogène  ${}^P T_B(q_B)$

$${}^P T_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & a \\ -1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B-5})$$

Le repère  $R_P$  de la plate-forme mobile est lié au repère du monde  $R$  par la matrice de transformation homogène  ${}^O T_P(q_B)$

$${}^O T_P = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & -\sin(\theta_p) & 0 & x_p \\ \sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B-6})$$

## C.1 Phase objectif loïn

En gardant les mêmes conditions et le même objectif que dans l'exemple 1 § 4.1.2 du chapitre 4 mais en rapprochant le manipulateur mobile du premier obstacle (à moins d'un mètre) afin de faire jouer de façon plus évidente l'évitement d'obstacle. La plate-forme mobile, orientée en direction de l'obstacle, se trouve initialement à la position  $[x_p, y_p]^T = [1, 0.5]^T$  (m). D'après l'allure des trajectoires de l'OT et de la plate-forme, qui sont représentées sur la figure C-1, on constate que la plate-forme avance et s'oriente pour se rapprocher du sous but. Dès que la plate-forme franchit le seuil de sécurité (seuil 1), l'algorithme d'évitement d'obstacle prend le relais et permet ainsi contourner l'obstacle. La pince atteint l'objectif final imposé avec succès.

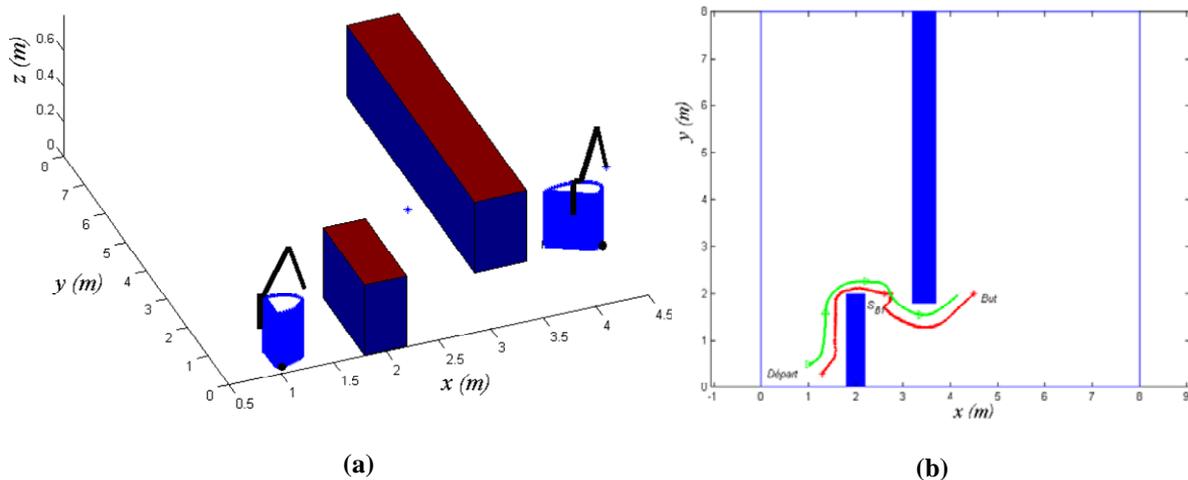


Figure C-1 : Navigation dans le cas où objectif final est loïn : a) configurations initiale et finale du manipulateur mobile, b) trajectoires de l'OT et de la plate-forme.

## C.2 Phase objectif proche

### C.1.1 Zone obstacle éloignée

Nous reprenons les mêmes conditions initiales que l'exemple 1 (objectif situé à 10 cm de la bordure de la table) avec juste un changement d'orientation initiale de la plate-forme qui passe à la direction verticale à l'axe  $x$  ( $\theta_p=90^\circ$ ). La configuration initiale du système est :  $q_i = [0.4, 1, 90, 270, 135.8, 240]^T$ . La figure C-2 montre les conditions de simulation.

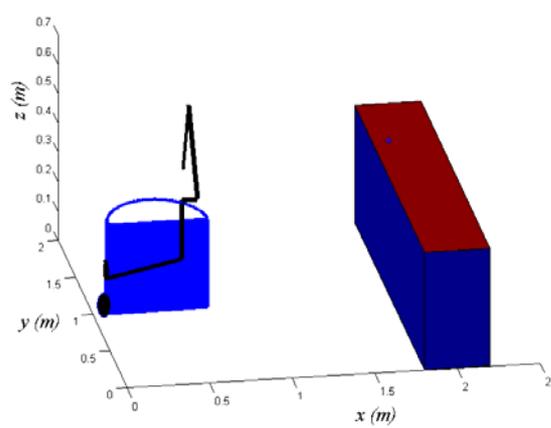


Figure C-2 : Condition initial de la simulation.

### a. Optimisation de la manipulabilité du bras $w_B$

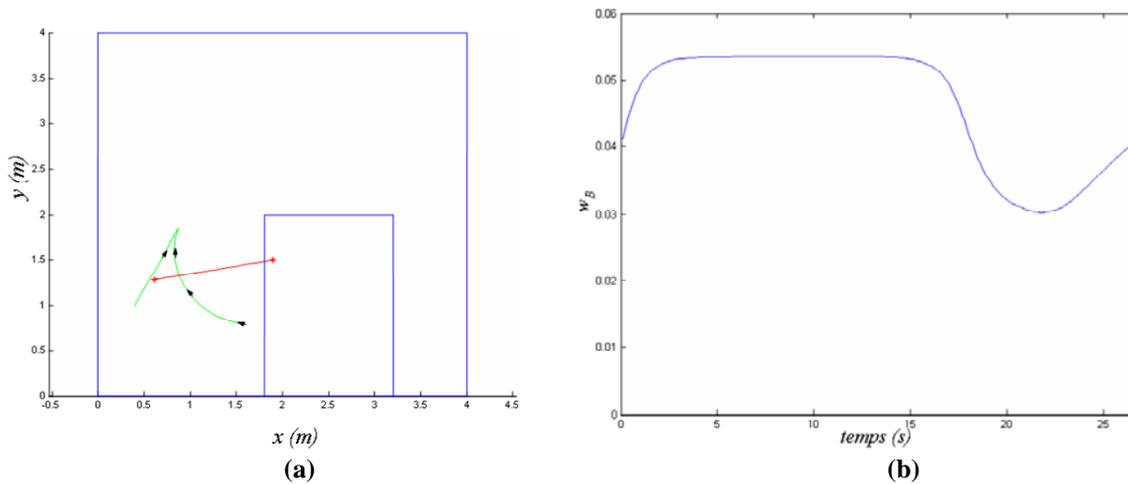
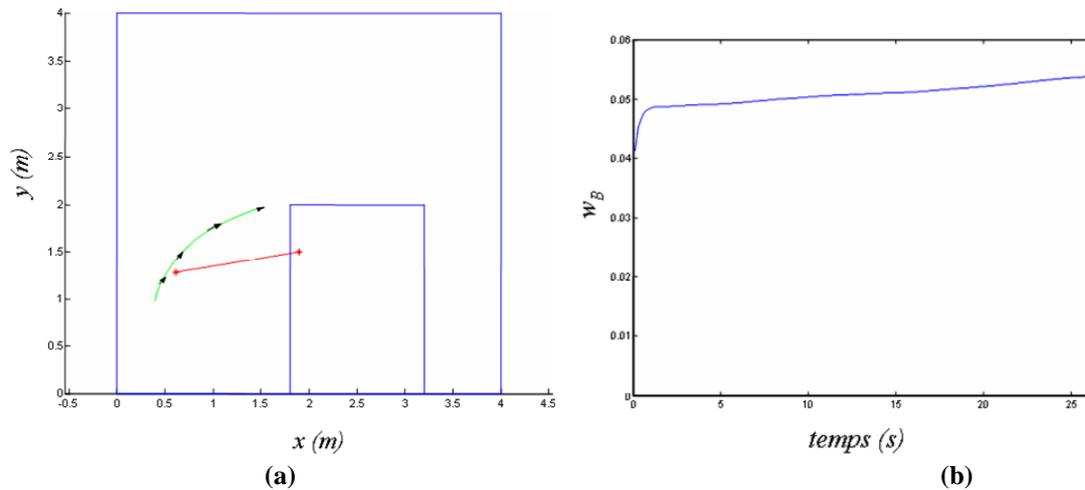


Figure C-3 : Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$  et évitement d'obstacle: a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .

La figure C-3a montre que la tâche est exécutée correctement avec de bonnes valeurs de manipulabilité du (figure C-3b). La plate-forme recule un peu au début pour contribuer à l'amélioration de la fonction optimisée puis elle avance dès que  $w_B$  est améliorée. L'évitement de l'obstacle provoque une grande déviation de la plate-forme qui a nécessité un retournement de la plate-forme pour continuer à exécuter la tâche désirée. Ce qui a provoqué un déplacement en aveugle du robot vers la fin de la simulation.

### b. Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$

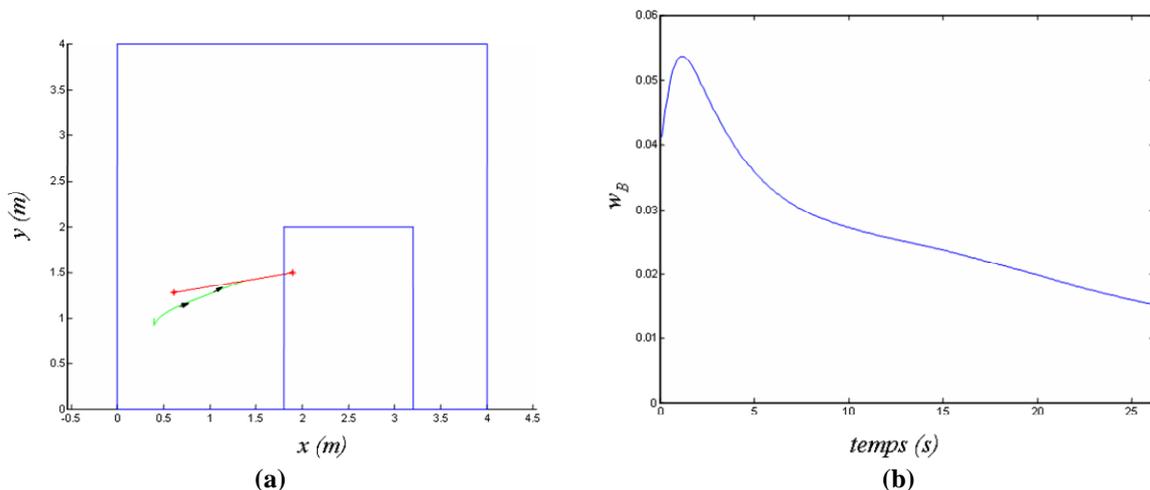


**Figure C-4: Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  et évitement d'obstacle: a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .**

La figure C-4 montre les résultats obtenus avec l'optimisation la manipulabilité directionnelle du bras et l'évitement des obstacles en tâches secondaires.

La plate-forme recule légèrement au début pour aider à l'accomplissement de la tâche avec une bonne manipulabilité directionnelle. Elle avance ensuite en direction de l'objectif. Ce qui permet de bénéficier du retour d'informations des capteurs ultrasons. L'objectif est approché à moins de 1.5cm, mais il n'est pas atteint à cause de la détection de collision avec la table.

### c. Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile $\tilde{w}$ .

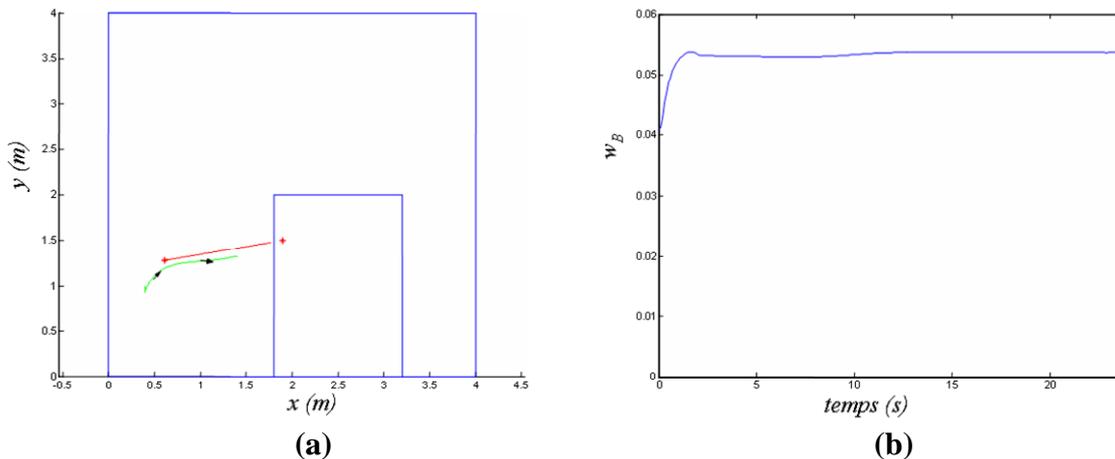


**Figure C-5 : Optimisation de la manipulabilité globale du bras mobile  $\tilde{w}$  et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .**

La figure C-5a montre que l'OT a réalisé la tâche imposée. La plate-forme recule légèrement au début pour contribuer à l'amélioration de la fonction optimisée durant l'exécution de la

tâche. L'évolution correspondante en capacité de manipulation du bras, exprimée par  $w_B$  (figure C-5b) montre une amélioration au début qui correspond au recul de la plate-forme, puis une dégradation progressive qui signifie que le bras s'est rapproché de ses configurations singulières.

**d. Optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile.**



**Figure C-6 : Optimisation de la manipulabilité globale directionnelle du bras mobile  $\tilde{w}_{dir}$  et évitement d'obstacle : a) trajectoires de la plate-forme et de l'OT, b) mesure de manipulabilité  $w_B$ .**

La figure C-6a montre que la tâche opérationnelle imposée est suivie, mais l'objectif n'est pas atteint à cause de la détection de l'obstacle par la face avant de la plate-forme. La figure C-6b montre que la manipulabilité du bras est bonne durant l'exécution de la tâche.

**C.1.1 Zone obstacle proche**

Le but est d'atteindre l'objectif situé à 30 cm de la bordure de la table. La situation dans l'espace de l'OT est donnée par  $X_{But}=[2.1, 1.1, 0.4]^T$ .

**a. Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$**

Les figures C-7a et C-7b montrent les résultats obtenus en optimisant  $w_B$ . La trajectoire de l'OT donnée par la figure C-7a montre que l'OT a atteint son but avec une bonne manipulabilité (figure C-7b).

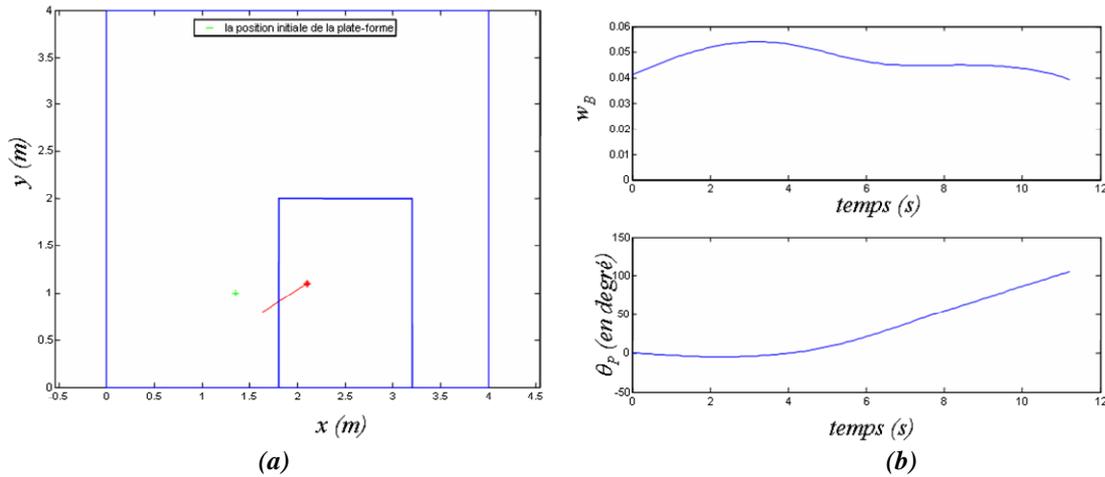


Figure C-7 : Optimisation de la manipulabilité du bras  $w_B$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

### b. Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras $w_{Bdir}$

La figure C-8a montre que l'objectif final est atteint. On remarque que la manipulabilité du bras se dégrade qui correspond aussi à la dégradation locale de la fonction optimisée, puis elle s'améliore avec la réorientation de la plate-forme. (Figure C-8b). L'extension finale du bras manipulateur est donnée par  $X_{Bf}=[0.63, 0.02, 0]^T$ . La plate-forme mobile est orientée à la fin à  $105^\circ$ .

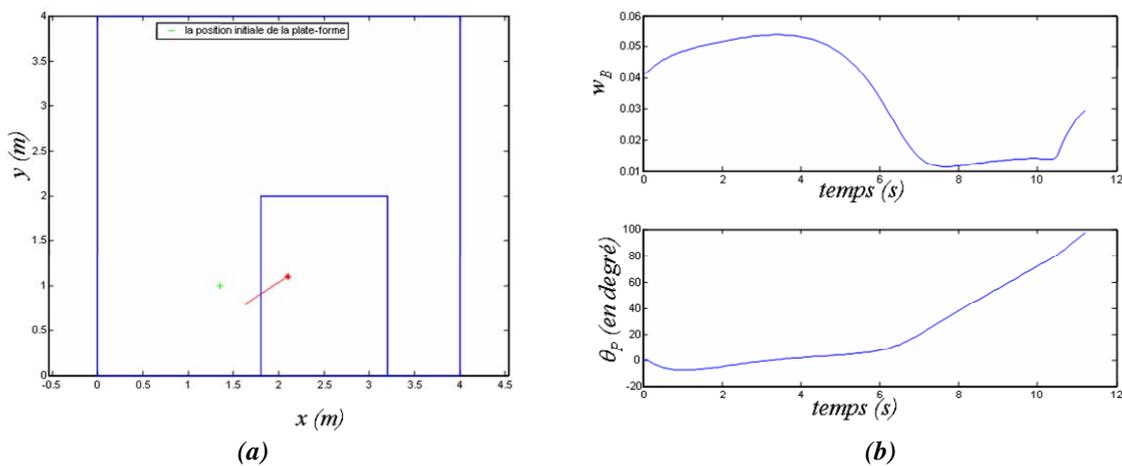


Figure C-8 : Optimisation de la manipulabilité directionnelle du bras  $w_{Bdir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_{Bdir}$  et de l'orientation de la plate-forme.

L'orientation finale de la plate-forme mobile est suivant la direction perpendiculaire à l'axe  $x$  ( $\theta_f= 97.3^\circ$ ) et l'extension du bras est donnée par :  $X_{Bf}=[0.63, 0.12, 0]^T$  (parallèlement à l'axe des roues de la plate-forme).

### c. Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile $\tilde{w}$

Les résultats présentés sur la figure C-9 montrent que l'OT a atteint l'objectif désiré. La manipulabilité du bras s'annule (figure C-9b) car le bras atteint une configuration singulière. Le bras est complètement tendu sur le coté droite de la plate-forme. L'orientation finale de la plate-forme par rapport à l'axe  $x$  est de  $91^\circ$ .

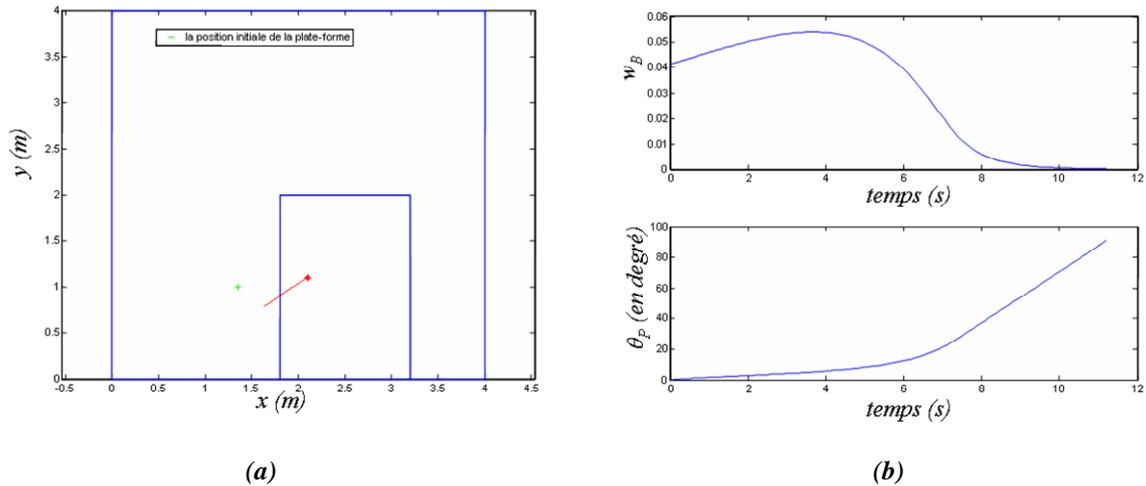


Figure C-9 : Optimisation de la manipulabilité globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

### d. Optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile $\tilde{w}_{dir}$

Les résultats présentés sur la figure C-10, montrent que l'OT a atteint l'objectif désiré. Le bras est proche d'une configuration singulière (figure C-10b). L'orientation finale de la plate-forme est de  $91.7$ . Le bras est étendu sur le coté droite de la plate-forme. La fonction optimisée se dégrade localement.

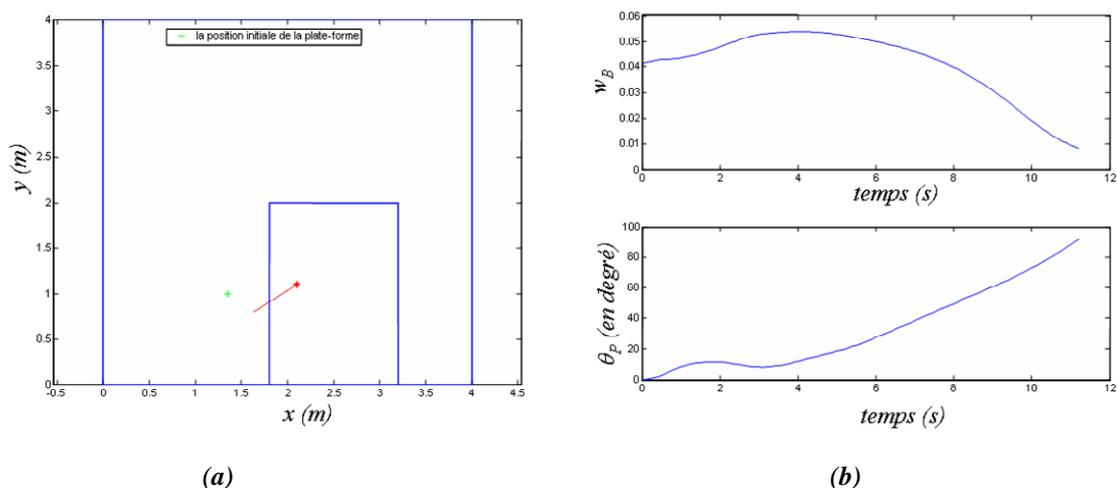


Figure C-10: optimisation de la manipulabilité directionnelle globale du manipulateur mobile  $\tilde{w}_{dir}$  : a) trajectoire de l'OT, b) évolutions de la mesure de manipulabilité  $w_B$  et de l'orientation de la plate-forme.

## Références

### Références personnelles

- [Nait-Chabane06] K. Nait-Chabane, P. Hoppenot, E. Colle. Mobile arm for disabled people assistance Manipulability measure for redundancy solve. - Journal of Intelligent & Robotics Systems, received 28 July2005, accepted 3may2006.
- [Nait-Chabane05] K. Nait-Chabane, P. Hoppenot, E. Colle. Mobile Arm for Disabled People Assistance – Manipulability Analysis. - ICSIT'05, International Conference on Computer Systems and Information Technology, p. 624-630, 19-21 July 2005.
- [Delarue06] S.Delarue, K. Nait-Chabane, P. Hoppenot, E. Colle. ARPH: Comparison of a classical method and a method using man - machine collaboration to exploit the redundancy of the robotized assistant.- AMSE, 2006, to appear
- [Colle06] E. Colle, K. Nait-Chabane, S. Delarue et P. Hoppenot. Comparaison d'une méthode classique et d'une méthode utilisant la coopération homme-machine pour exploiter la redondance de l'assistant robotisé. - HANDICAP 2006, Paris, France, 7-9 Juin 2006.

### Autres références

- [Abdul-Razak03] B. Abdul-Razak, M. Mokhtari, B. Grandjean. Assistive robotics for severely disabled people: The Commanus project, AMSE, Journal of the association for Advancement of Modelling and Simulation Techniques in Entreprises, Vol 63, N° 4, Special edition Handicap, pp 1-14, Barcelona, Spain 2003.
- [Abdul-Razak04]. B. Abdul Razak. Interaction Homme-Machine dans le cas d'un handicap moteur. Thèse de doctortat de l'Institut National de Télécommunication, Université d'Evry Val d'Essonne, 18 mai 2004.
- [Abou-Samah01] M. Abou-Samah. A Kinematically Compatible Framework for Collaboration of Multiple Nonholonomic Wheeled Mobile Robots. Masters of Engineering thesis, Department of Mechanical Engineering Center of Intelligent Machines McGill University, Montreal, Canada, nov2001.
- [Ait-Oufroukh02] N. Ait-Oufroukh. Recalage automatique d'objets 3D de forme libre en utilisant la clinométrie. Thèse de Doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, 18 Décembre 2002.
- [Antonelli03] G. Antonelli, S. Chiaverini. Fuzzy Redundancy Resolution and Motion Coordination for Underwater Vehicle-Manipulator Systems. IEEE Transactions On Fuzzy Systems, Vol. 11, No. 1, February 2003.
- [Antonelli05] G. Antonelli, S. Chiaverini. The Null-Space-Based Behavioral Control for Mobile Robots, 6th CIRA Symposium, Espoo, Finland, June 27-30, 2005, Volume, Issue, 27-30, pages 15 – 20.
- [Baerlocher00] P. Baerlocher, R. Boulic. Kinematic Control of the Mass Properties of Redundant Articulated Bodies, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation San Francisco, CA April 2000.

- [Baerlocher01] P. Baerlocher. Inverse Kinematics Techniques for the Interactive Posture Control of Articulated Figures. Thèse de Doctorat présentée au département d'informatique, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2001.
- [Baerlocher98] P. Baerlocher, R. Boulic. Task Priority Formulations for the Kinematic Control of Highly Redundant Articulated Structures, proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria, B.C., Canada October 1998.
- [Baillieul86] J. Baillieul. Avoiding Obstacles and Resolving Kinematic Redundancy, Proceedings, 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1698-1704.
- [Bayle00a] B. Bayle, J. Y. Fourquet, M. Renaud. A Coordinated Strategy for Mobile Manipulator. 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6), Venise (Italie), 25-27 Juillet 2000.
- [Bayle00b] B. Bayle, J. Y. Fourquet, M. RENAUD. Generalized path generation for a mobile manipulator. 7th International Conference on Mechanical Design and Production (MDP-7), Le Caire (Egypte), 15 Février 2000 Current Advances in Mechanical Design and Production VII, Eds. MF.Hassan, SM.Megahed, 2000, Pergamon, ISBN 0-08-043711-7, pp.57-66
- [Bayle01a] B. Bayle, J. Y. Fourquet, M. RENAUD. Manipulability analysis for mobile manipulators. International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2001), Seoul (Korée), 21-26 Mai 2001, pp.1251-1256.
- [Bayle01b] B. Bayle, J. Y. Fourquet, M. Renaud. Using Manipulability with Nonholonomic Mobile Manipulators, 3rd International Conference on Field and Service Robotics (FSR'2001), Helsinki (Finlande), 11-13 Juin 2001, pp.343-348.
- [Bayle01c] B. Bayle. Modélisation et commande cinématiques des manipulateurs mobiles à roues. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 13 Décembre 2001.
- [Benreguieg97] M. Benreguieg. Aides à la navigation d'un robot mobile dans un environnement partiellement connu. Thèse de Doctorat de l'Université d'Evry Val d'Essonne, 16 janvier 97.
- [Boulic03] R. Boulic. Cinématique inverse pour l'optimisation de postures humaines soumises à des contraintes multiples, Societe Francaise de Biomecanique, 15 mai 2003, Valenciennes.
- [BROUAR04] C. BROUAR Le handicap en chiffres Synthèse réalisée par (CTNERHI), en coordination avec les membres du comité de pilotage :Nathalie DUTHEIL, Pascale GILBERT, Hélène MICHAUDON, Solveig VANOVERMEIR (DREES), Pierrette TISSERAND et Catherine VASLIN (DGAS), Marc MAUDINET, Annick PIQUET et Jésus SANCHEZ (CTNERHI), février 2004.
- [Casals00] A. Casals, X. Cufi, J. Freixenet, J. Marti, X. Munos. Friendly Interface for Objects Selection in a Robotized Kitchen”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA April 2000.
- [Chiaverini97] S. Chiaverini. Singularity-Robust Task-Priority Redundancy Resolution for Real-Time Kinematic Control of Robot Manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 3, June 1997, pp. 398-410.
- [Chutinan94] A. Chutinan. 18-331 Junior Project: Coordination Control of The Lunar

- Mobile Manipulator, Spring 1994 Final Project Report.
- [Cleary90] K. Cleary. Incorporating Multiple Criteria in the Operation of Redundant Manipulators. Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 618 - 624, 1990.
- [Colle00] E. Colle, P. Hoppenot, J.P. Gaillard, L. Claquin. Assistance robotisée basée sur une coopération entre la personne handicapée et la machine. JESA, vol. 34, n°6-7, pp. 743-764, septembre 2000.
- [Colle02] E. Colle, Y. Rybarczyk, P. Hoppenot. ARPH: An assistant robot for disabled people" - SMC'2002, Hammanet, Tunisia, abstract p.5, 6-9 October 2002.
- [Foulon97] G. Foulon, J. Y. Fourquet, M. RENAUD. On Coordinated Tasks For Nonholonomic Mobile Manipulators. In Proc, fifth IFAC Symposium on Robot Control, Nantes (France), Septembre 1997.
- [Foulon98] G. Foulon. Génération de mouvements coordonnés pour un ensemble d'une plate-forme mobile à roues et d'un bras manipulateur. Thèse de Doctorat Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, soutenu le 05/10/1998.
- [Foulon99] G. Foulon, J. Y. Fourquet, M. RENAUD. Coordinating mobility and manipulation using nonholonomic mobile manipulators, Control Engineering Practice 7 (1999) 391-399.
- [Gardner00] J.F. Gardner, S. Velinsky. A Kinematics of Mobile Manipulators and Implications for Design. Journal of Robotic Systems Vol.17, No6, pp. 309-320, 2000.
- [Goillot01] C.Goillot, P. Mormiche. Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» en institution en 1998, INSEE Résultats, collection Démographie-Société, n°83-84, 2001.
- [Goillot02] C.Goillot, P. Mormiche. Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» auprès des personnes vivant à domicile en 1999, INSEE Résultats, collection Société, n°6, 2002.
- [Grasso98] R. Grasso, P. Prévost, Y.P Ivanenko & A. Berthoz. Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans: An anticipatory synergy. Neuroscience Letters, 253,115-118.
- [Guglielmelli94] E.Guglielmelli, M. Goodwin, C. Mulè, P. Dario. A Supervisory System for the URMAD Robotic Unit. Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '94), Munich, Germany, September 12-16, 1994, pp.1687-1694.
- [Hagan97] K. Hagan, M. Hillman, S. Hagan, and J. Jepson The Design of a Wheelchair Mounted Robot. The Institution of Electrical Engineers. Printed and published by the IEE, Savoy Place, London WCPR OBL, UK, 1997.
- [Hanafusa81] H. Hanafusa, T. Yoshikawa, Y. Nakamura. Analysis and Control of Articulated Robot with Redundancy. IFAC, 8th Triennial World Congress, Vol. 4, pp. 1927 - 1932, 1981.
- [Hillman03] M. Hillman. Rehabilitation robotics from past to present - a historical perspective, Proceedings of the ICORR 2003(The Eighth International Conference on Rehabilitation Robotics), 23-25 April 2003.
- [Hillman99] M. Hillman, K. Hagan, J. R. Jepson, A wheelchair Mounted Assistive Robot. Proc. ICORR'99 6th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 86-91, Stanford California, USA, July 1999.
- [Hillman02] M. Hillman Karen Hagan, Sean Hagan, Jill Jepson, Roger Orpwood The

- Weston Wheelchair Mounted Assistive Robot - The Design Story  
 Robotica (2002) volume 20, pp. 125-132. © Cambridge University Press
- [Hoppenot02] P. Hoppenot, E. Colle. Mobile robot command by man-machine co-operation - Application to disabled and elderly people assistance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 34, n°3, pp. 235-252, July 2002.
- [Ishii95] S. Ishii, S. Tanaka, F. Hiramatsu. Meal Assistance Robot for severely Handicapped People. *Proc. IEEE Robotics and Automation International Conference*, Vol. 2, pp 1308-1313, May 1995.
- [Jeannerod84] M. Jeannerod. The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16, 235-254.
- [Jung99] J.W. Jung, W.K. Song, H. Lee, J.-S. Kim, Z. Bien A Study On the Enhancement of Manipulation Performance of Wheelchair-Mounted Rehabilitation Service Robot. A study.on the ICORR '99: International Conference on Rehabilitation Robotics, Stanford, CA.
- [Kalil99] W. Khalil et E. Dombre. Modélisation identification et commande des robots. Les édition HERMES, 2ème édition Janvier 1999.
- [Kang01a] S. Kang, K. Komoriya, K. Yokoi, T. Koutoku, K. Tanie Utilization of Inertial Effect in Damping-based Posture Control of Mobile Manipulator. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
- [Kang01b] S. Kang, K. Komoriya, K. Yokoi, T. Koutoku & K. Tanie. Reduced Inertial Effect in Damping-based Posture Control of Mobile Manipulator, *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Maui, Hawaii, USA, Oct. 29 - Nov. 03, 2001.*
- [Khatib86] O. Khatib. Real-Time Obstacle Avoidance For Manipulators and Mobile robots. *International Journal of Robotic Research*. Vol.5, no 1, pages 90-98 ; 1986.
- [Kwee85] H. Kwe, S. Petrequin, F. Galmiche, S. Pannier. Manipulation assistée par téléthèse: l'expérimentation clinique de la téléthèse Mat-1. *Photothèque de l'assistance publique*, 1995.
- [Kwee95] H.H. Kwee. Rehabilitation Robotics-Softening the Hardware. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol. 14, N° 3 30-335, june 1995.
- [Land99] M.F Land, N. Mennie & J. Rusted. The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living. *Perception*, 28, 1311-1328.
- [Lashi01] C. Laschi, G. Teti, G. Tamburrini, E. Datteri, P. Dario. Adaptable Semi-Autonomy in Personal Robots. *Proc. 10th international workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2001, Bordeaux, Paris, France pp. 152-157, 2001.
- [Laumond01] J.P. Laumond. La robotique mobile. HERMES science publication 2001
- [Lee97] J. Lee. A study on the manipulability measures for robot manipulators, *IROS1997*, France, Grenoble.
- [Maaref00] H. Maaref. Traitement de données imparfaites dans le cadre de la theorie du flou : Contribution à la navigation et à la localisation d'un robot mobile. *Mémoire H. D.R., Université d'Evry Val d'Essonne, Soutenu le 24 Janvier 2000.*
- [Maciejewski90] A. A. Maciejewski. Dealing with the Ill-Conditioned Equations of Motion for Articulated Figures. *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 63-71, May 1990.
- [Mahoney01] R.M. Mahoney. The Raptor Wheelchair Robot System. In *Integration of*

- Assistive Technology in the Information, Age, pages 135-141, Netherlands, 2001, Ed. M. Mokhtari.
- [Mahoney97] R. Mahoney. Robotic products for rehabilitation: Status and strategy. In Proceedings of ICORR '97. International Conference on Rehabilitation Robotics, 1997.
- [Marani02] G.Marani, J. Kim, J.Yuh, and W.K. Chung. A real-time approach for singularity avoidance in Resolved Motion Rate Control of Robotic Manipulators, Volume: 2, on page(s): 1973- 1978 vol.2, ICRA 2002.
- [Martens01] C. Martens, N. Ruchel, O. Lang, O. Ivlev, A. Graser. A FRIEND for assisting handicapped people. Robotics & Automation Magazine, IEEE , Vol. 8, Issue 1, pp. 57-65, Mars 2001.
- [Matsikis02] A. Matsikis, T. Zoumpoulidis, F. Broicher, K.-F. Kraiss. Learning Object-specific Vision-based Manipulation in Virtual Environments, Proceedings of the 11th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication ROMAN 2002, pp. 204-210, September 25-27, Berlin.
- [Matsikis03] A. Matsikis, F. Schulte, F. Broicher, K.-F. Kraiss. A behaviour coordination manager for a mobile manipulator. Intelligent Robots and Systems (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ, International Conference, 27-31 Oct. 2003, Bally's Las Vegas, Las Vegas, Nevada, U.S.A.PP. 174- 181 vol.1.
- [Mokhtari03] M. Mokhtari, B. Abdul-Razak, M. Feki R. Rodriguez, B. Grandjean. "Integration of Rehabilitation Robotics in the Context of Smart Homes: Application to Assistive Robotics", Proc ICORR 2003, 8th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp 5-8, Daejeon, Korea, April 2003.
- [Nagatani02]. K. Nagatani, T. Hirayama, A. Gofuku, Y. Tanaka. Motion planning for mobile Manipulator with keeping Manipulability, IROS 2002, Lausanne, Switzerland, October 2002, pp 1663-1668.
- [Nagatani96] K. Nagatani and S.Yuta. Designing strategy and implementation of mobile manipulator control system for opening door. Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 2828-2834, 1996.
- [Nakamura91] Y. Nakamura. Advanced robotics, redundancy and optimization, Addison Wesley Publishing, 1991.
- [Neveryd98] H. Neveryd Sensor -Based navigating mobile robots for people with disabilities. Center for Rehabilitation Research Lund university, LICENTIATTHESIS CERTEC, LTH NUMMER 1: 1998.
- [Paul81] R. C. P. Paul. Robot Manipulators: Mathematics, programming, and Control, MIT press, 1981.
- [Quinlan93] S.Quinlan and O. Khatib. Elastics Bands: Connecting path Planning and Control. In Transactions on Robotics and Automation. IEEE, 1993.
- [Rybarczyk02a] Y. Rybarczyk, E. Colle, P. Hoppenot. Contribution of neuroscience to the teleoperation of rehabilitation robot, - SMC'2002, Hammamet, Tunisia, abstract p.75, 6-9 October 2002.
- [Rybarczyk02b] Y. Rybarczyk, O. Ait Aider, P. Hoppenot, E. Colle. Remote control of a biomimetics robot assistance system for disabled persons. AMSE, special issue bioengineering applied to handicap rehabilitation, pp.47-56, 2002.
- [Rybarczyk04a] Y. Rybarczyk. Etude de l'appropriation d'un système de téléopération dans l'optique d'une Coopération Homme-Machine. Thèse de doctorat, université d'Evry Val d'Essonne, 15 mars 2004.
- [Rybarczyk04b] Y. Rybarczyk, D. Mestre, P. Hoppenot, E. Colle. Evaluation de

- l'adaptation homme-machine basée sur un modèle biologique. Handicap 2004, Paris, 17-18 juin 2004, p. 71-76, 2004.
- [Salisbury82] J. K. Salisbury and J.J. Craig. Articulated hands force Control and Kinematic issues. Intl J. Robotics Research, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [Schaeffer99] C. Shaeffer and T.May. Care-O-bot: A System for Assisting Elderly for Disabled Persons in Home Environment. In Association for Advancement of Assistive Technology in Europe Conference, pages 340-345, Düsseldorf, Germany, 1999.
- [Sciavicco88] L. Sciavicco and B.Siciliano. A Solution Algorithm to the Inverse Kinematic problem for Redundant Manipulators. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 4, August 1988.
- [Sciavicco96] L. Sciavicco and B. Siciliano. Modeling and control of robot manipulators, The McGraw-Hill companies, inc., 1996.
- [Seraji93] H. Seraji. An on-line approach to coordinated mobility and manipulation. In ICRA'1993, Atlanta, USA, may 1993, pp. 28-35
- [Seraji95] H. Seraji. Configuration Control of Rover-Mounted Manipulators. In Proc. IEEE International Conference on robotics and Automation, Nogoya (Japan), pages 2261-2266, april 1995.
- [Siciliano91] B. Siciliano and J.-J. Slotine. A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotic Systems, IEEE 1991.
- [Tchon02] K. Tchon and J. Jakubiak. Extended Jacobian Inverse Kinematics Algorithms for Mobile Manipulators. Journal of Robotic Systems 19(9), 443-454 (2002) © 2002 Wiley Periodicals, Inc.
- [Topping01] M. Topping. Handy 1, A robotic aid to independence of severely disabled people. Proc ICORR 2001, 7th International Conference on Rehabilitation Robotics, "Integration of assistive technology in the information age", Ed. IOS Press, PP 142-147, INT EVRY, April 2001.
- [Topping99] M. Topping. The development of Handy 1, a robotic system to assist the severely disabled. In Proceedings of ICORR '99: International Conference on Rehabilitation Robotics, pages 244-249, 1999.
- [Van der Loos95] H.F. M. Vander Loos. Va / Stanford rehabilitation robotics research and development program: Lessons learned in the application of robotics technology to the field of rehabilitation. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 3(1):46-55, March 1995.
- [Volpe90] R. Volpe and P. Khosla. Manipulator Control with Superquadric Artificial Potential Functions: Theory and Experiments, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 20, no. 6, November/December 1990.
- [Wandosell02] H. Wandosell, J. Manuel and B. Graf. Non-holonomic Navigation System of a Walking Aid Robot. In International Workshop on Robot and Human Interactive Communication Roman, Berlan, Germany, September 2002, IEEE.
- [WOOD88] P. WOOD, Classification internationale des Handicaps: déficience, incapacité et désavantage. Rapport INSERM, CTNERHI, OMS 1988.
- [Yamamoto87] Y.Yamamoto and X. Yun. Coordinating locomotion and manipulation of mobile manipulator. In: 539 Zheng, Y. (ed.) Recent Trends in Mobile Robots (1987).
- [Yamamoto94] Y. Yamamoto. Control and Coordination of Locomotion and Manipulation of Wheeled Mobile Manipulators. Doctorate thesis, GRASP, university of Pennsylvania. Août 1994.

- [Yamamoto95] Y. Yamamoto and X. Yun. Coordinated Obstacle Avoidance of A Mobile Manipulator, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 0-71303 1965 6/95 1995
- [Yamamoto99] Y. Yamamoto and X. Yun. Unified analysis an mobility and manipulability of mobile manipulators. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Detroit, pp. 1200-1206, USA, 1999.
- [Yoshikawa84] T. Yoshikawa. Analysis and control of Robot manipulators with redundancy, In M. Brady & R. Paul, editors, Robotics Research: The First International Symposium, pages 735-747, MIT Press, 1984.
- [Yoshikawa85] T. Yoshikawa. Manipulability of Robotic Mechanisms. International Journal of Robotics: Research, vol.4, no 2, page 3- 9, 1985.
- [Yoshikawa90] T. Yoshikawa. Foundation of robotics: Analysis and control. The MIT Press, 1990.

## Références Internet

- [W-Afma] : <http://www.afma-robots.com/pages/afmaster.htm>
- [W-Exact] : <http://www.exactdynamics.nl/>
- [W-RIMLAB] [http://rimlab.ce.unipr.it/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://rimlab.ce.unipr.it/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)
- [W-Secom] : <http://www.secom.co.jp/english/myspoon/index.html>
- [W-Tauro] : <http://www.techinfo.rwth-aachen.de/Forschung/MSR/Manus/index.html>
- [W-Who] : [www.who.int](http://www.who.int)

**Titre :** « Exploitation de la redondance pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile d'assistance aux personnes handicapées.»

**Résumé :** Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de la robotique d'assistance aux personnes handicapées. L'objectif est l'exploitation de la redondance générée par l'association d'un bras manipulateur et d'une plate-forme mobile non holonome. Nous avons modélisé le système et choisi d'utiliser le concept de manipulabilité pour placer le système dans la meilleure configuration en termes de capacité de manipulation pour effectuer la tâche opérationnelle désirée. Nous avons proposé une nouvelle mesure de manipulabilité directionnelle qui inclut des informations sur la direction de la tâche. Pour prendre en compte la mobilité de la plate-forme dans la mesure de la capacité de manipulation, nous avons introduit une normalisation pour résoudre le problème lié aux unités de mesures et pour inclure les contraintes sur les limites en vitesse des différents actionneurs.

Afin de respecter les principes qui permettent de faciliter la coopération homme-machine, nous nous sommes inspirés du comportement humain pour établir une stratégie décomposée en phases et zones. L'ensemble de ces apports a été implanté sur un manipulateur mobile réel.

**Mots clés:** manipulateur mobile, assistance robotique, manipulabilité, systèmes redondants, systèmes non holonomes, commande coordonnée, inversion cinématique, modélisation.

**Title:** « Exploitation of redundancy for the coordinated control of an assistive mobile manipulator. »

**Abstract:** The work presented in this thesis document appears in the field of handicapped people's robotic assistance. The goal is to exploit the redundancy generated by the association of a manipulator arm and a non holonomic mobile platform. We have modeled the system and chosen to use manipulability concept to place the system in the best configuration in terms of manipulation capacity to achieve the desired operational task. We have proposed a new directional manipulability measure that includes information on the task direction. To take into account the platform mobility in the measure of the capacity of manipulation, we have introduced a normalization to solve the problem inherent to physical units and to include constraints on velocities limits of the different actuators.

In order to respect the principles that permit to facilitate the human-machine cooperation, we were inspired from human behaviour to establish a strategy decomposed in phases and zones. All contributions have been implemented on a real mobile manipulator.

**Key-words:** Mobile manipulator, robotic assistance, manipulability, redundant systems, non holonomic systems, coordinated control, kinematic inversion, modelling.