



HAL
open science

Contribution à la commande stochastique d'un robot redondant sous contraintes d'environnement : application à l'assistance aux handicapés physiques

Alain Le Drezen

► **To cite this version:**

Alain Le Drezen. Contribution à la commande stochastique d'un robot redondant sous contraintes d'environnement : application à l'assistance aux handicapés physiques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1995. Français. NNT : 1995METZ038S . tel-01775910

HAL Id: tel-01775910

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01775910>

Submitted on 24 Apr 2018

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

ds 127 198

UNIVERSITE DE METZ

U.F.R. MIM

THESE



présentée pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE METZ

Spécialité Automatique

par

Alain LE DREZEN

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ	
N° inv	19950735
Cote	S/M3 95/38
Loc	Magasin

CONTRIBUTION A LA COMMANDE STOCHASTIQUE D'UN ROBOT REDONDANT SOUS CONTRAINTES D'ENVIRONNEMENT APPLICATION A L'ASSISTANCE AUX HANDICAPES PHYSIQUES

Soutenu publiquement le 9 juin 1995
devant la commission d'examen :

Rapporteurs : **C. COUET**
J.P. LALLEMAND

Examineurs : **R. HUSSON**
M. POTIER FERRY
C. LAURENT
A. PRUSKI
C. BOP

"Confondu avec la nature, l'animal ne peut l'interroger. Voilà, il me semble, le point que nous cherchons. L'animal fait *un* avec la nature. L'homme fait *deux*. Pour passer de l'inconscience passive à la conscience interrogative, il a fallu ce schisme, ce divorce, il a fallu cet arrachement. N'est-ce point la frontière justement? Animal avant l'arrachement, homme après lui? Des animaux dénaturés, voilà ce que nous sommes."

VERCORS Les animaux dénaturés

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles (L.A.E.I.) de l'Université de Metz au sein de l'équipe robotique dirigée par Mr le Professeur C. LAURENT.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr le Professeur C. LAURENT, Directeur de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a témoigné en m'acceptant au L.A.E.I. et pour le soutien qu'il m'a apporté durant ces années passées dans son laboratoire.

Je suis particulièrement reconnaissant envers mon directeur scientifique de thèse, Mr C. BOP Maître de Conférences, qui m'a soutenu et m'a apporté son expérience et sa rigueur scientifiques durant ces années.

J'exprime ma gratitude à Mr le Professeur C. COUET de l'Université de Reims et à Mr le Professeur J.P. LALLEMAND de l'Université de Poitiers qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail en qualité de rapporteur.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr le Professeur A. PRUSKI du L.A.E.I. pour son soutien et ses compétences scientifiques qu'il a bien voulu me faire partager.

Mes remerciements à Mr le Professeur M. POTIER FERRY de l'Université de Metz et à Mr le Professeur R.HUSSON de l'Institut National Polytechnique de Lorraine pour avoir accepté de siéger à ce jury de thèse.

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

SOMMAIRE

SOMMAIRE

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	8
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I : ROBOTIQUE ET HANDICAP	14
I INTRODUCTION.....	15
II ROBOTIQUE ET HANDICAP : LES BESOINS.....	15
II.1 POINT DE VUE DES HANDICAPES	15
II.2 L' A.F.M.	16
III LES AIDES ROBOTIQUES POUR HANDICAPES.....	17
III.1 LES ORTHESES	17
III.2 LES PROTHESES	18
III.3 LES TELETHESES	19
IV ADEQUATION BESOINS/EXISTANT. L'EVALUATION CLINIQUE.....	27
V CRITERES ET CONTRAINTES DE CONCEPTION.....	28
V.1 VITESSE / PUISSANCE	28
V.2 CAPACITES DE SAISIE	28
V.3 CONSOMMATION D'ENERGIE.....	29
V.4 VOLUME ACCESSIBLE.....	32
V.5 MASSE GLOBALE	32
V.6 ENCOMBREMENT	32
V.7 PRECISION / REPETABILITE	33
V.8 COUT	33
V.9 INSTRUMENTATION, AIDE A LA SAISIE ET A LA MANIPULATION	33
VI CONCLUSION	34
CHAPITRE II : LE PROJET BRAS MANIPULATEUR	35
I INTRODUCTION.....	36
II MOBILITE	36
III MORPHOLOGIE	36
III.1 STRUCTURE ANTHROPOMORPHE COMPLETE	37
III.2 CONCEPTION MECANIQUE.....	39
IV COMMANDE	40
IV.1 NIVEAU OBJECTIF /COOPERATION	42
IV.2 NIVEAU COORDINATION / SYNCHRONISATION.....	42
IV.3 NIVEAU REFLEXE	43
IV.4 SYSTEME D'EXPLOITATION	44
IV.5 ARCHITECTURE INFORMATIQUE	45
V INTERFACE HOMME/MACHINE, ACCES AUX DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT	46

V.1 TELEROBOTIQUE	46
V.2 INTERACTIONS HOMME/MACHINE	47
V.2.1 Manipulation	47
V.2.2 Télémanipulation	48
V.3 INTERFACE HOMME/MACHINE	50
V.3.1 Aspect informationnel de l'homme vers la machine	50
V.3.2 Aspect matériel	52
VI SECURITE	54
VII CONCLUSION	55

CHAPITRE III : SECURITE DES ROBOTS DE COOPERATION	56
I CONCEPTION SECURITAIRE	57
I.1 ANALYSE SADT	57
I.2 LEGISLATION ET SECURITE	61
I.2.1 Code du travail	61
I.2.2 Normes françaises	62
II ANALYSE DES RISQUES D'ACCIDENTS	63
II.1 CLASSIFICATION GENERALE DES DEFAILLANCES	63
II.2 LES PRINCIPAUX ACCIDENTS	63
III CONCEVOIR UN DISPOSITIF A SECURITE INTRINSEQUE	64
III.1 FIABILISATION DE LA COMMANDE	64
III.1.1 Contrôle de l'exécutif	65
III.1.2 Contrôle des données en mémoire morte	65
III.1.3 Contrôle des données en mémoire vive	66
III.1.4 Généralités et validité des dispositifs	66
III.2 CAPTEURS ET PROCEDES D'EVITEMENT DE COLLISION	67
III.2.1 Capteurs	67
III.2.2 Procédé d'évitement de collision	69
III.3 MAINTENANCE - AUTODIAGNOSTIC	70
III.3.1 Objectifs	70
III.3.2 Principes de mise en oeuvre	71
IV. CONCLUSION	72

CHAPITRE IV : GENERATION STOCHASTIQUE DE TRAJECTOIRES EN TEMPS REEL AVEC CONTRAINTES D'ENVIRONNEMENT	74
I INTRODUCTION	75
II ETAT DE L'ART	76
III HYPOTHESES DE TRAVAIL	79
III.1 MODELE ROBOT	79
III.2 MODELE CAPTEUR	80
IV GENERATION STOCHASTIQUE EN TEMPS REEL DE TRAJECTOIRE SANS CONTRAINTE D'ENVIRONNEMENT	81
IV.1 METHODE GENERALE	81

IV.2 OBTENTION DES $\Delta\theta_i$ ET ΔT_i	84
IV.3. RESULTATS / EXEMPLES	85
IV.4 MODIFICATION DE L'ALGORITHME	87
V OPTIMISATION DE LA METHODE DE GENERATION DE TRAJECTOI- RES	90
V.1 INTRODUCTION	90
V.2 FORCAGE DES SIGNES DE $\Delta\theta_i$ ET ΔT_i	90
V.3 CALCUL PONDERE DES $\Delta\theta_{imax}$ ET ΔT_{imax}	92
V.4 INFLUENCE CUMULEE DES DEUX OPTIMISATIONS	93
V.5 EXEMPLES DE DEPLACEMENTS	94
V.I INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES	94
VI.1 INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES SUR LE NOMBRE D'ESSAIS	94
VI.2 INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES SUR LE TEMPS DE CALCUL	95
V.II EVITEMENT D'OBSTACLES	96
VII.1 INTRODUCTION	96
VII.2 METHODOLOGIE	96
VII.2.1 Utilisation de capteurs enveloppants	96
VII.2.2 Utilisation de capteurs discrets	99
VII.3 CAPTEUR UTILISE	100
VII.4 SIMULATION	101
VII.5 LIMITES DE LA METHODE ET APPLICATIONS	102
VII.5.1 Limites de la méthode	102
VII.5.2 Applications	104
VIII GESTION CINEMATIQUE DE LA TRAJECTOIRE	105
VIII.1 INTRODUCTION	105
VIII.2 METHODOLOGIE	106
VIII.3 INFLUENCE DU RAYON DE LA SPHERE DE RACCORDEMENT SUR LA TRAJECTOIRE	109
IX CONCLUSION	111
 CONCLUSION	112
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	115

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : activités désirées	16
Figure I.2 : Rancho Golden Arm	18
Figure I.3 : orthèse de l'hôpital Henri Mondor.....	18
Figure I.4 : prothèse du docteur Funakubo	18
Figure I.5 : Bath Institute of Mechanical Engineering	21
Figure I.6 : John's Hopkins University	21
Figure I.7 : John's Hopkins University	21
Figure I.8 : University of Heidelberg	21
Figure I.9 : University of Heidelberg	21
Figure I.10 : Spartacus	21
Figure I.11 : Bras du Professeur Funakubo	22
Figure I.12 : Bras du Professeur	22
Figure I.13 : MASTER (CEA).....	22
Figure I.14 : MASTER (CEA).....	22
Figure I.15 : Spar Aerospace	24
Figure I.16 : Spar Aerospace	24
Figure I.17 : Veteran Administration	24
Figure I.18 : Veteran Administration	24
Figure I.19 : MANUS	25
Figure I.20 : MANUS	25
Figure I.21 : Tokyo Denki University	25
Figure I.22 : Tokyo Denki University	25
Figure I.23 : Université de Besançon	26
Figure I.24 : United States Dep. of Grant	26
Figure I.25 : United States Dep. of Grant	26
Figure I.26 : différentes possibilités de motorisation	30
Figure I.27 : redondance apportée par l'axe 0	31
Figure II.1 : structure antropomorphe	37
Figure II.2 : structure antropomorphe complète	37
Figure II.2bis : vue générale du manipulateur	38
Figure II.3 : volume accessible	39
Figure II.4 : différentes postures de saisie	40
Figure II.5 : structure générale de la commande	41
Figure II.6 : graphe de transformation	43
Figure II.7 : asservissement de vitesse	44
Figure II.8 : architecture initiale	45
Figure II.9 : architecture finale.....	46
Figure II.10 : repères de référence	51
Figure II.11 : modification de posture	51
Figure II.12 : évitement d'obstacle	52
Figure II.13 : enchaînement des différents modes	54
Figure III.1 : "créer une téléthèse" A-0	57
Figure III.2 : " créer une téléthèse" noeud A0	58
Figure III.3 : " déterminer un ensemble de solutions" noeud A3	59
Figure III.4 : " réaliser la mise en sécurité des ensembles" noeud A3-5	60
Figure III.5 : matrice de criticité	64
Figure III.6 : checksum	65
Figure III.7 : C.R.C.	65
Figure III.8 : redondance hétérogène d'ordre 2 utilisant des technologies différentes	68
Figure III.9 : zones de sécurité	69
Figure III.10 : différentes maintenances	70
Figure III.11 : modèles d'apparition des défaillances	71

Figure III.12 : analyse du mouvement	71
Figure IV.1 : configuration du robot en présence de deux obstacles [COLB 89]	77
Figure IV.2 : chemin généré pour un manipulateur à 8 degrés de liberté [BARR 90]	78
Figure IV.3 : contournement d'obstacle	78
Figure IV.4 : paramétrage d'un manipulateur	80
Figure IV.5 : distance "capteur/obstacle"	81
Figure IV.6 : volume des tirages valides	82
Figure IV.7 : algorithme de la méthode modifiée	84
Figure IV.8 : $\Delta\theta_{imax}$ et ΔT_{imax}	85
Figure IV.9 : influence de $\Delta\theta_{imax}$ et ΔT_{imax} sur $V_{ti.va}$	85
Figure IV.10 : influence de $\Delta\theta_{imax}$ et ΔT_{imax} sur la trajectoire	85
Figure IV.11 : exemples de déplacements (robot 7 axes)	86
Figure IV.12 : décomposition : orientation/position	87
Figure IV.13 : algorithme modifié	88
Figure IV.14 : algorithme avec forçage des signes	91
Figure IV.15 : exemples de déplacements	94
Figure IV.16 : influence du nombre d'axes sur le nombre d'essais	95
Figure IV.17 : influence du nombre d'axes sur le temps de calcul	96
Figure IV.18 : zone de détection par le capteur enveloppant	97
Figure IV.19 : algorithme pour utilisation de capteur enveloppant	98
Figure IV.20 : zone de détection capteurs fins	99
Figure IV.21 : détermination du plan P0	100
Figure IV.22 : calcul de DCi	101
Figure IV.23 a) b) c) : exemples de déplacements avec obstacles	101
Figure IV.24 : blocage suite à une mauvaise posture	103
Figure IV.25 : blocage suite à engagement dans un mauvais chemin	104
Figure IV.26 : blocage dans un minimum local	104
Figure IV.27 : déplacement en environnement connu	105
Figure IV.28 : postures intermédiaires	106
Figure IV.29 : sphères de raccordement	107
Figure IV.30 : profil de vitesse	107
Figure IV.31 : trajectoire de l'organe terminal	109
Figure IV.32 : profils des vitesses lissées	109
Figure IV.33 : influence du volume de la sphère de raccordement sur la trajectoire	110

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : téléthèses à poste fixe	20
Tableau I.2 : téléthèses embarquées sur fauteuil roulant	23
Tableau I.3 : téléthèses embarquées sur base mobile autonome	23
Tableau II.1 : échange informationnel homme/membre	48
Tableau II.2 : échanges informationnels homme/machine	49
Tableau II.3 : différentes interfaces	53
Tableau IV.1 : nombre d'essais	86
Tableau IV.2 : comparaison entre la méthode initiale et la méthode modifiée	89
Tableau IV.3 : influence du forçage des signes des $\Delta\theta_i$ et ΔT_i	91
Tableau IV.4 : influence des coefficients correcteurs	93
Tableau IV.5 : influence cumulée des deux optimisations	93
Tableau IV.6 : nombre d'essai en déplacement avec obstacles	102
Tableau IV.7 : influence de Racc sur le temps de parcours	110

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Si l'ensemble des domaines couverts par la robotique ont principalement des vocations industrielles, une des applications particulières, la robotique dédiée aux handicapés, a tendance à ramener cette science vers son origine. En effet, cette application veut faire tendre la robotique vers ses motivations originales : copier les capacités de mobilités et d'actions sur l'environnement de l'homme. Si actuellement le terme copier est synonyme de singer, il est nécessaire de faire converger nos efforts de recherche vers la réalisation de copies aussi proches que possible des modèles originaux.

Au niveau des applications dédiées au domaine du handicap moteur, l'action de copier se scinde en deux sous-ensembles qui sont :

- imiter les capacités fonctionnelles,
- concevoir un système de morphologie similaire.

Le premier point est certainement le plus difficile à appréhender. Toutes les techniques de la robotique (vision, modélisation d'environnement, mécanique générale, ...) y sont mises en oeuvre. Le second problème, à notre avis essentiel, fait plus particulièrement intervenir des concepts de "design" au sens commun du terme, et son traitement influe fortement sur l'acceptabilité d'un point de vue psychologique de l'aide robotique développée.

Le travail de recherche développé au cours de ce mémoire portera plus particulièrement sur l'étude des capacités fonctionnelles adjoignables à une aide de type bras manipulateur et approfondira certaines fonctionnalités.

Le premier chapitre présente l'état de l'art de la robotique des bras manipulateurs adapté au domaine du handicap. A partir de cette présentation et de l'évaluation clinique de différents projets nous proposons un certain nombre d'idées directrices relatives à la conception de tels projets.

La seconde partie présente le projet développé au L.A.E.I. (Laboratoire d'Automatique et d'Electronique Industrielles) de Metz. Nous y abordons différentes caractéristiques, notamment en ce qui concerne la morphologie, la commande et l'interface homme/machine. Nous y posons aussi la nécessité d'aborder la conception en terme de sécurité.

Au cours du troisième chapitre, nous développons les notions relatives à la sécurité de l'opérateur : la notion d'intégration de la sécurité à la phase de conception, l'aspect légal et normatif du problème et enfin les méthodes et moyens à mettre en oeuvre pour :

- fiabiliser la commande,
- éviter les collisions,
- permettre une maintenance adaptée.

Le quatrième chapitre présente une méthode originale de génération stochastique de trajectoire en temps réel sous contraintes d'environnement. Cette méthode, outre son intérêt évident d'évitement de collisions, permet à l'opérateur de commander le manipulateur de manière automatique dans un environnement non structuré. Après avoir établi un état de l'art concernant les méthodes d'évitement d'obstacles et de génération de trajectoires, nous proposons notre méthode et mettons en évidence ses performances et ses limites. La dernière partie de ce chapitre propose l'intégration de notion de cinématique à la trajectoire générée.

CHAPITRE I

ROBOTIQUE ET HANDICAP

I INTRODUCTION

Ce premier chapitre présente l'état de l'art des aides robotiques de type bras manipulateur dédiées aux handicapés et, à partir de cette présentation, met en évidence les caractéristiques idéales de tels projets.

La première partie présente les besoins énoncés par les utilisateurs et les prescripteurs.

La seconde partie décrit aussi exhaustivement que possible l'ensemble des aides robotiques en fonction de leur classe d'appartenance (orthèses, prothèses et téléthèses).

Dans la troisième partie nous présentons les conclusions des évaluations cliniques menées sur divers projets. Cette partie met en évidence un certain manque d'adéquation entre l'existant et les besoins des handicapés.

Au cours de la quatrième partie nous présentons des critères et des contraintes qui devraient être intégrés lors de la conception des manipulateurs devant pallier à des handicaps moteurs des membres supérieurs.

II ROBOTIQUE ET HANDICAP : LES BESOINS

II.1 POINT DE VUE DES HANDICAPES

Si le roboticien raisonne en terme de spécifications techniques, il n'en est pas de même au niveau des handicapés . En effet ceux-ci raisonnent en terme d'actions utiles qui relèvent bien plus souvent d'effets spéciaux télévisuels que de technologies actuellement disponibles.

Il est toutefois possible de discerner les principales activités réalisables souhaitées par les handicapés suite aux enquêtes réalisées par [BREL 93] [HILL 92] [PRI 90] [figure I.1]

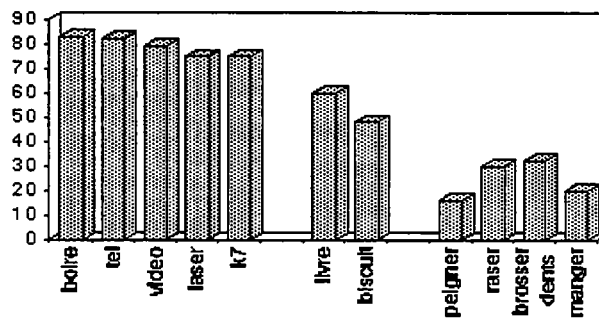


Figure I.1 : activités désirées

II.2 L' A.F.M.

L'A.F.M. (Association Française contre les Myopathies) [CUNI 92] propose diverses spécifications qui devraient prévaloir lors de l'élaboration d'un manipulateur pour handicapé. A la vue des principes généraux énoncés, nous avons retenu les différents critères suivant qui s'appliquent plus spécifiquement au robot embarqué sur fauteuil roulant.

Conception mécanique :

- structure anthropomorphe,
- position de rangement non encombrante,
- dispositif d'anti-blocage (remise en position manuelle par une tierce personne),
- poids global faible,
- possibilité de manipuler des masses de 1 Kg,
- désolidarisation aisée du fauteuil,
- alimentation en énergie par le fauteuil roulant ou par une source extérieure notamment lors de l'utilisation à poste fixe.

Capacités générales :

- le manipulateur doit permettre une gamme d'activités aussi étendue que possible,

- il doit disposer de modes d'apprentissage et de modes automatiques accessibles à un utilisateur non roboticien.

Notions de sécurité :

- les mécanismes de transmission d'énergie (engrenages, câbles , courroies ...) doivent être protégés,
- l'opérateur doit pouvoir interrompre tout mouvement en cours par l'intermédiaire d'un dispositif adapté,
- le manipulateur devra disposer de capteurs de détection ou d'évitement de chocs.

L'ensemble des critères proposés constituent la majeure partie d'un cahier des charges relatif à la conception d'un bras manipulateur embarqué. Toutefois, si ils sont certainement nécessaires, ils ne sont pas suffisants, notamment en ce qui concerne la sécurité de l'opérateur.

III LES AIDES ROBOTIQUES POUR HANDICAPES

Les appareillages de type robotique sont divisés en trois catégories. Ces trois classes sont les orthèses, les prothèses et les téléthèses, aides dont nous allons décrire ci-après les principaux objectifs.

III.1 LES ORTHESES

Elles visent à redonner un mouvement à une articulation ou à un membre existant mais invalide.

Nous pouvons citer dans cette catégorie [GUIT 88]

- le Rancho Golden Arm (figure I.2) à motorisation électrique et possédant une commande coordonnée des articulations par ordinateur,
- l'orthèse de l'hôpital Henri Mondor (figure I.3) à motorisation électrique où la définition du plan horizontal de travail s'effectue à l'aide de capteur vocal ou myoélectrique, l'orientation et la vitesse étant ensuite définies par l'intermédiaire d'un capteur céphalique.

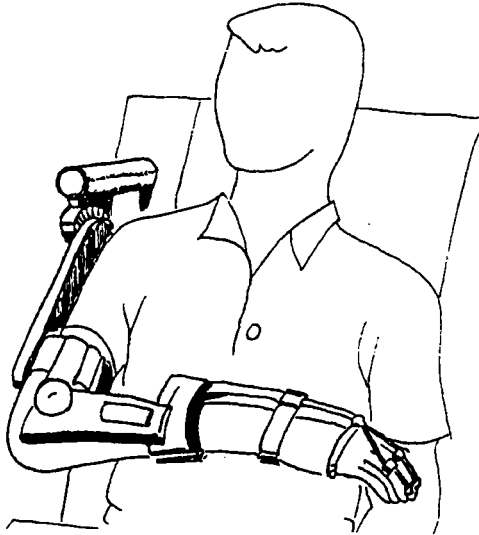


Figure I.2 : Rancho Golden Arm

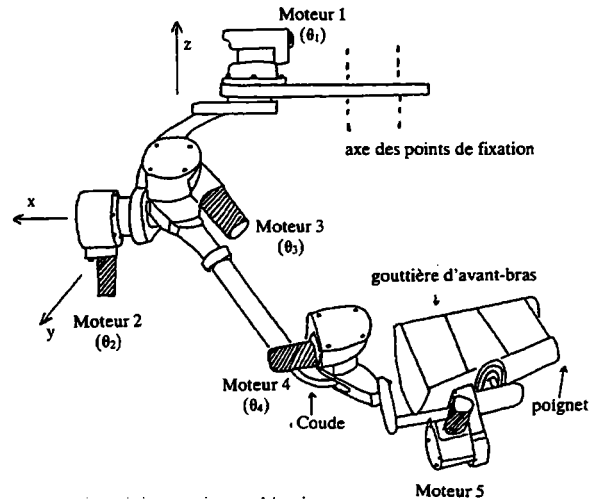


Figure I.3 : orthèse de l'hôpital Henri Mondor

III.2 LES PROTHESES

Leur objectif est de remplacer une partie ou la totalité d'un membre en essayant de lui rendre ses mobilités naturelles. La plus célèbre de ces aides est le bras du professeur Funakubo (figure I.4) possédant 7 axes pour le bras, plus 5 axes pour la main. La commande du bras est obtenue par l'intermédiaire d'un code mélodique déclenchant des actions préprogrammées ou par un capteur céphalique permettant de diriger le poignet en une position donnée. Les commandes sont réalisées à partir d'un calculateur spécifique à base de Z80.



Figure I.4 : prothèse du docteur Funakubo

III.3 LES TELETHESES

Elles n'ont pas pour objectif de redonner à l'handicapé ses mobilités naturelles mais de pallier à ses déficits moteurs par un robot ou un bras manipulateur. On peut envisager trois principaux cas d'utilisation de ces substituts [CEA 92] :

- téléthèse à poste fixe : il est positionné sur un plan de travail spécialement agencé pour des applications données (tableau I.1) (figures 5 à 14). Une majorité des actions sont réalisées en mode automatique.
- téléthèse embarqué sur un fauteuil roulant : ceci implique des contraintes énergétiques, mécaniques et de poids supplémentaires (tableau I.2) (figures 15 à 25). Les opérations sont alors effectuées principalement en mode manuel.
- téléthèse embarqué sur une base mobile "autonome" : il est alors nécessaire de pouvoir piloter la base mais aussi de pouvoir localiser les objets à déplacer (tableau I.3) .

Légende des tableaux récapitulatifs :

- état actuel :
- E : évaluation
 - L : laboratoire
 - ET : évaluation terminée
 - S : projet stoppé
 - SE : projet stoppé après évaluation
 - C : commercialisation

- interface homme/machine :
- S : switches
 - J : joystick ou similaire
 - V : contrôle à la voix
 - C : clavier

- énergie :
- E : électrique
 - H : hydraulique
 - P : pneumatique

	Pays	Nombres axes	RTX UMI	Conception particulière	Année début du projet	Etat actuel	Mode automatique	Mode manuel	Contrôle cartésien	Contrôle articulaire	Interface h/m	Masses manipulables kg	Energie	Divers
Georgia Inst of technology	USA	6		*		L	*	*	*	*	J	2.5		
Neil Squire Foundation "MOM"	USA	6		*		E	*	*	*	*	S C V	1.5		
Bath Institute of Medical Engineering	GB	5				E	*	*	*		C	1		voir fig 1.4
King's College of London	GB		*			L	*		*	*	C		E	programmation niveau objectif
AI du Pont Institute	USA		*				*	*	*	*	C		E	
John's Hopkins University	USA	5			74	SE	*	*		*	S	2	E	voir fig 1.5 et 1.6
Uni. of Heidelberg Roesler & Paeslack	ALLEMA	5			72	S		*	*	*	SJ	5	E	voir fig 1.7 et 1.8
INRIA "SPARTACUS"	FRANCE	6		*	74	S	*	*	*	*	TÊTE	1.5	E	Poursuivi par MASTER voir fig 1.9
Prof. Funakubo	JAPON	6-7		*	78		*		*	*	V	0.35	E	coopération de 2 bras voir fig 1.10 et 1.11
University of Keele "HANDY 1"	GB	5				E	*			*	S			
Cerebral Palsy Foundation of Kansas	USA	5				ET	*		*	*			E	
University of Saskatchewan	CANADA	5				L		*	*	*	V		E	
Prab Command "HAND OFF"	USA		*			E	*		*		V		E	
Handikapp Institutet			*				*		*	*	C		E	
Hadar	SUEDE		*			E	*		*	*	C		E	programmation niveau objectif
University of Toronto	CANADA		*			L	*	*	*	*	V		E	
Stanford Rehabilitation center "DEVAR"	USA	PUMA				E	*	*	*	*	V			[HAMM 92]
Cambridge University	GB		*			E	*		*	*	VISION C V		E	programmation niveau objectif
CEA "MASTER"	FRANCE		* modif		85	ET	*	*	*	*	S J V			[LESI 92] voir fig 1.12 et 1.13
Tokyo Metropolitan Proth. & Orth. Resarch Institut	JAPON	6		*		L					S		P	
Adelaide University	AUSTRAL	3		*		E	*	*		*	C	0.25		

Tableau I.1 : téléthèses à poste fixe

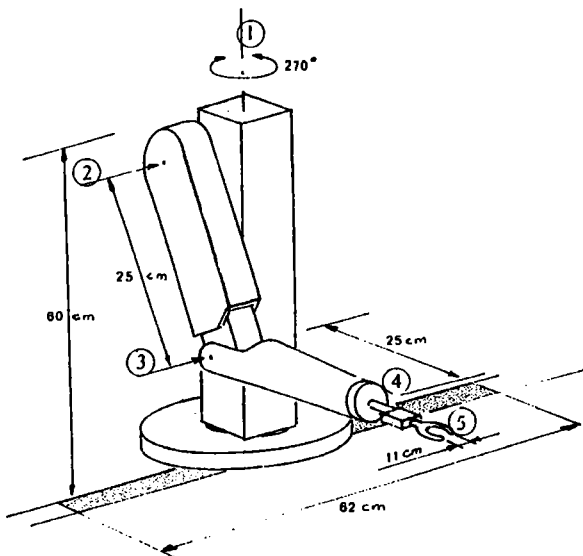


Figure I.7 : John's Hopkins University

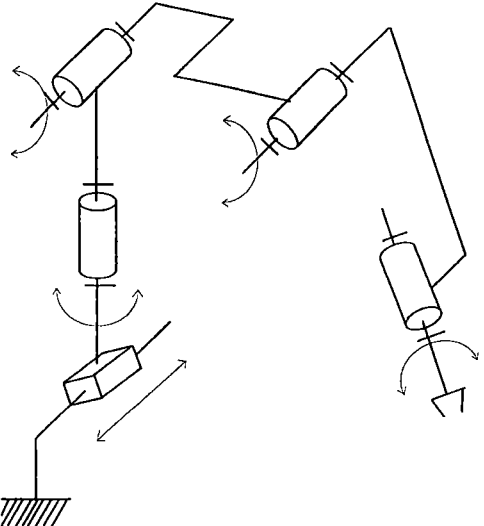


Figure I.6 : John's Hopkins University

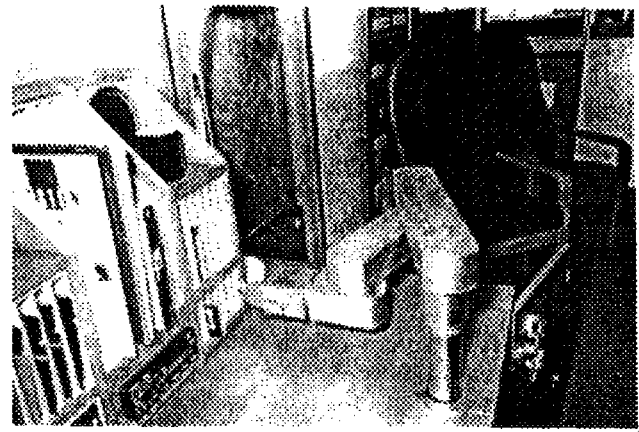


Figure I.5 : Bath Institute of Mechanical Engineering

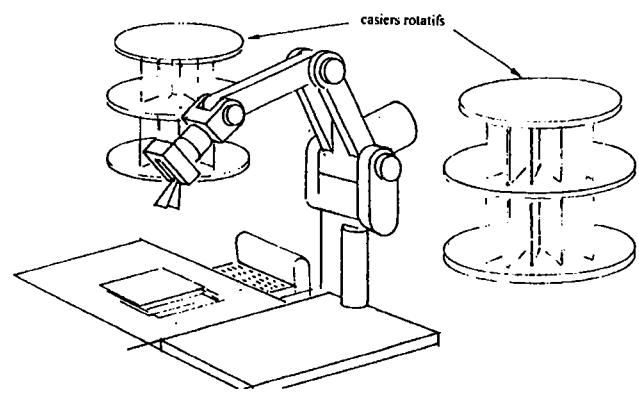


Figure I.8 : University of Heidelberg

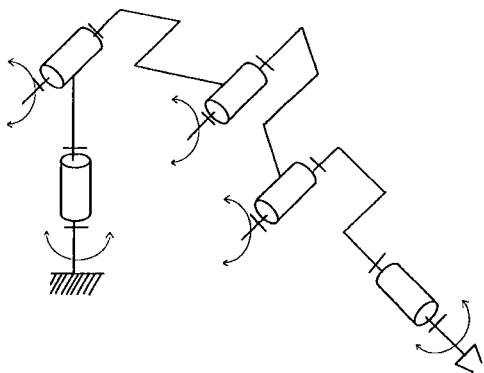


Figure I.9 : University of Heidelberg

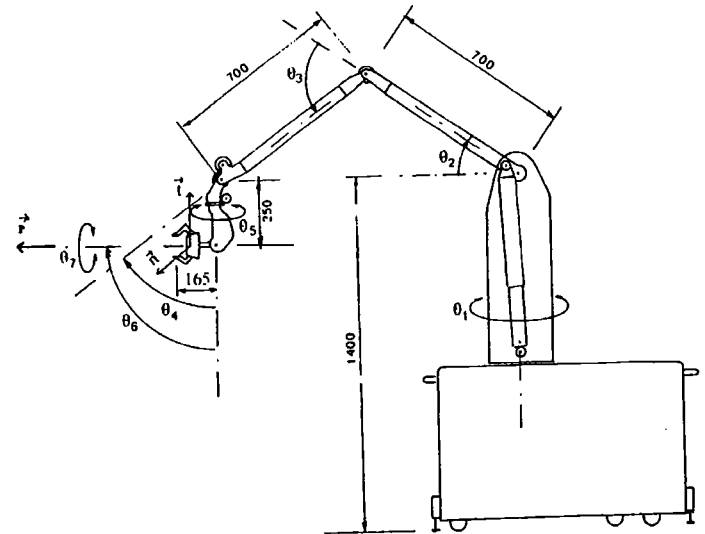


Figure I.10 : Spartacus

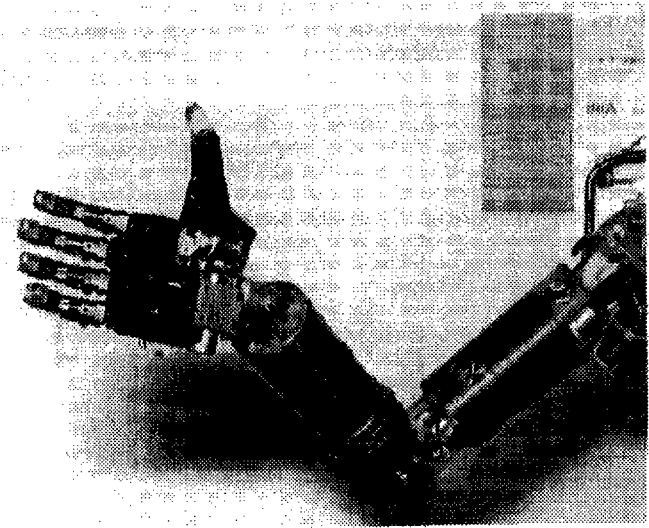


Figure I.11 : Bras du Professeur Funakubo

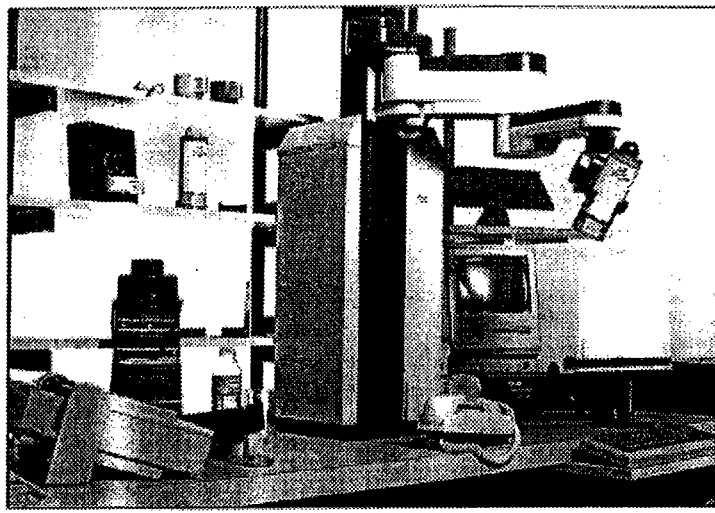


Figure I.13 : MASTER (CEA)

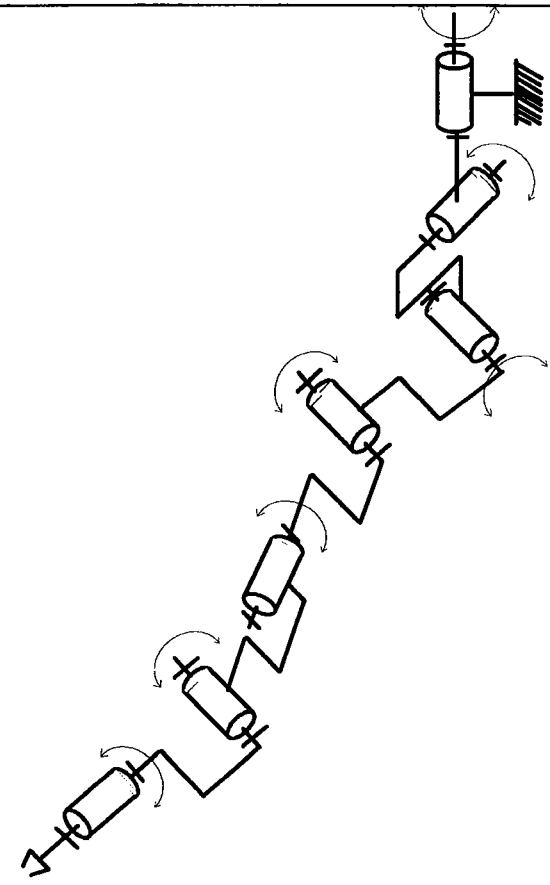


Figure I.12 : Bras du Professeur Funakubo

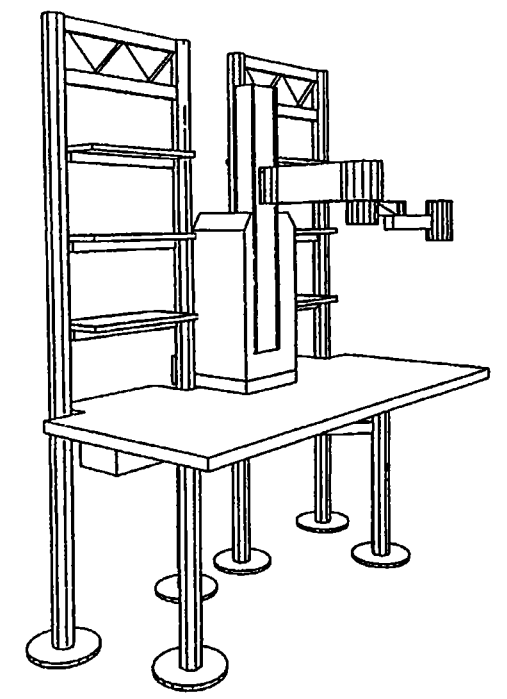


Figure I.14 : MASTER (CEA)

	Pays	Nombre axes	Robot indus	Conception particulière	Année début du projet	Etat actuel	Mode automatique	Mode manuel	Contrôle cartésien	Contrôle articulaire	Interface h/m	Masse manipulable kg	Energie	Divers
Spar Aerospace	CANADA	4		*	76	S		*		*	S J	5		voir fig 1.15 et 1.16
Jet Propulsion Laboratory	USA	6		*	74	S		*	*	*	V		E	
Veterans Administration	USA	5		*		S		*	*	*	S J			voir fig 1.17 et 1.18
"MANUS"	HOLLAN	6		*	86	ET C	*	*	*	*	S J C	1.5	E	[CUNI 92] [KWEE 89] voir fig 1.19 et 1.20
University of Pennsylvania	GB	6		*		L		*		*	S	3	P	[HAMM 92]
Middlesex Polytechnic	GB	6		*		L	*	*	*					
Bath Institute of Medical Engineering	GB	6		*		L							E	même manipulateur qu'en poste fixe
Tokyo Denki University	JAPON	6		*		L		*	*		V S	3.5	E	[SAIT 92] voir fig 1.21 et 1.22
Université de Besançon	FRANCE	6		*		E	*	*	*	*			H	voir fig 1.23
Department of physical Medicine & Rehabil. New Jersey	USA HOLLAN	5	micro-robot cobra					*		*	S		E	[BACH 90] voir fig 1.24 et 1.25

Tableau I.2 : téléthèses embarquées sur fauteuil roulant

	Pays	Nombre axes	Robot indus	Conception particulière	Année début du projet	Etat actuel	Mode automatique	Mode manuel	Contrôle cartésien	Contrôle articulaire	Interface h/m	Masse manipulable kg	Energie	Divers
Stanford Rehabilitation "MOVAR"	USA		puma			L	*	*	*	*	S		E	caméra pour téléopération recherche de chemins évitement d'obstacles
méra pour téléopération Shibaura Institute of Technology	JAPON	6		*		L	*		*	*	S J			camera / localisation 3D saisie automatique base mobile autonome
Ecole Polytechnique de Montreal	CANADA	6		*										opérations définies en univers statique
University of dundee	GB	<6		*		L		*		*	S J			robot radio contrôlé
Tokyo Development Center	JAPON	6		*		PROJET								
Fulmer systems	GB	6		*										robot mobil autonome
UMI	GB		rx			L								base mobile équipée de 2 bras
CEA "MASTER 3"	FRANCE		rx			L						2	E	

Tableau I.3 : téléthèses embarquées sur base mobile autonome

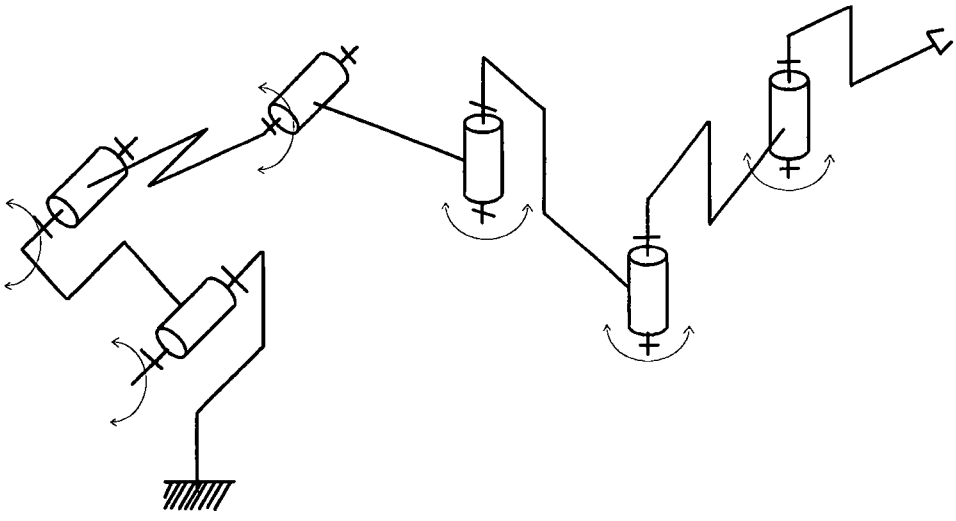


Figure I.15 : Spar Aerospace

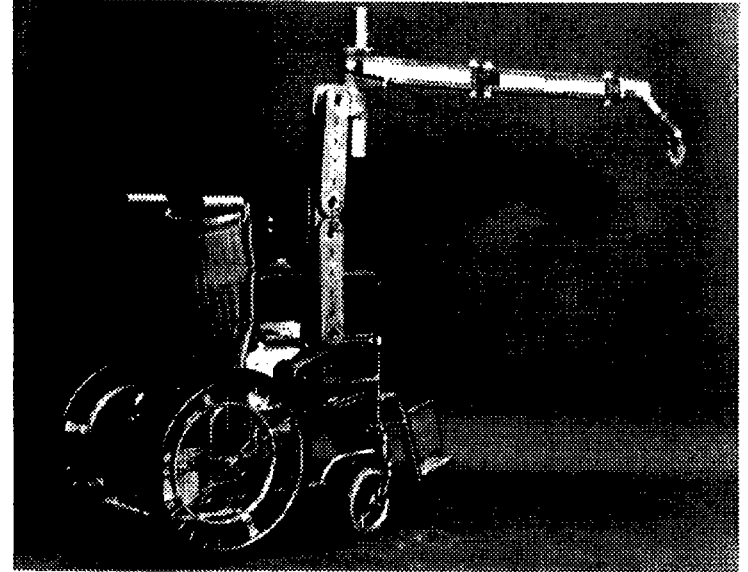


Figure I.16 : Spar Aerospace

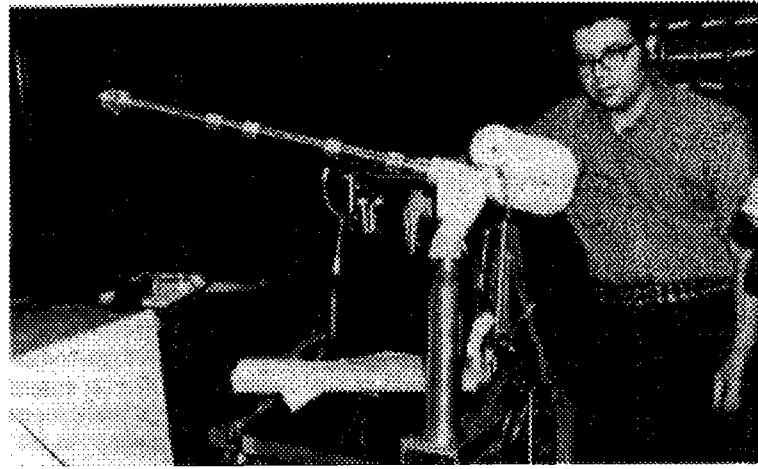


Figure I.17 : Veteran Administration

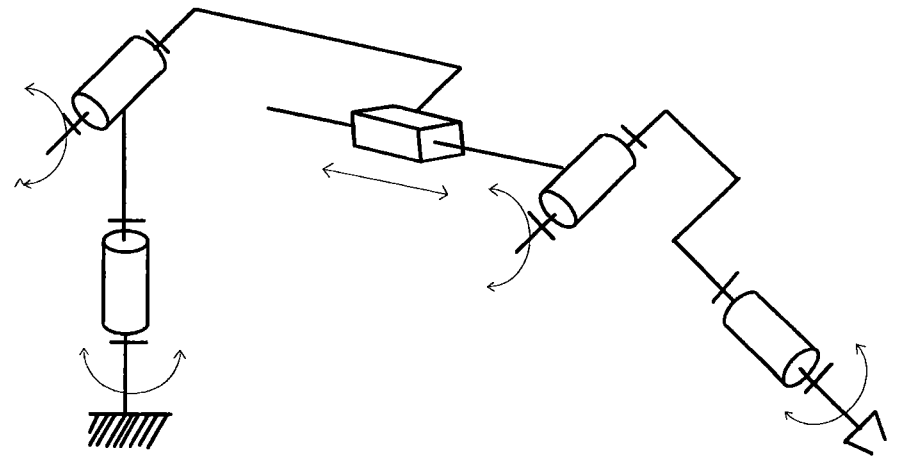


Figure I.18 : Veteran Administration

R	800 mm
H	450 mm
ΔH	250 mm
D	135 mm
α	400°
β	$n^\circ 360^\circ$
γ_1	400 mm
γ_2	320 mm
γ_3	100 mm
δ	$n^\circ 360^\circ$
φ_1	$n^\circ 360^\circ$
φ_2	$n^\circ 360^\circ$
φ_3	$120^\circ (140^\circ)$
P	90 mm

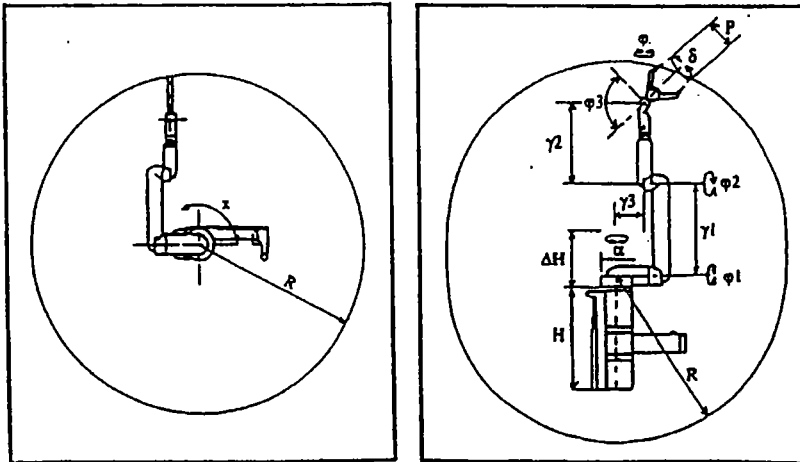


Figure I.20 : MANUS

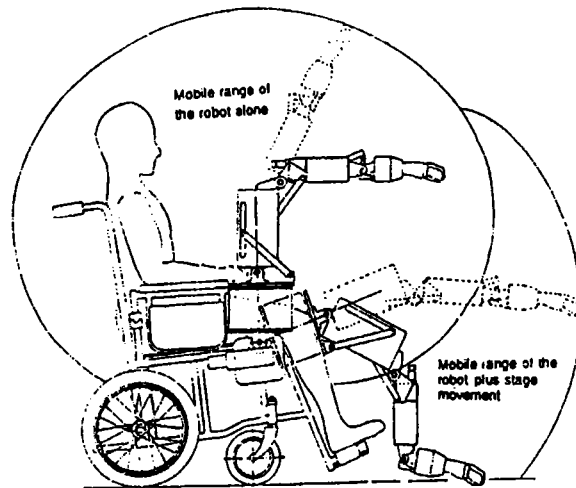


Figure I.21 : Tokyo Denki University

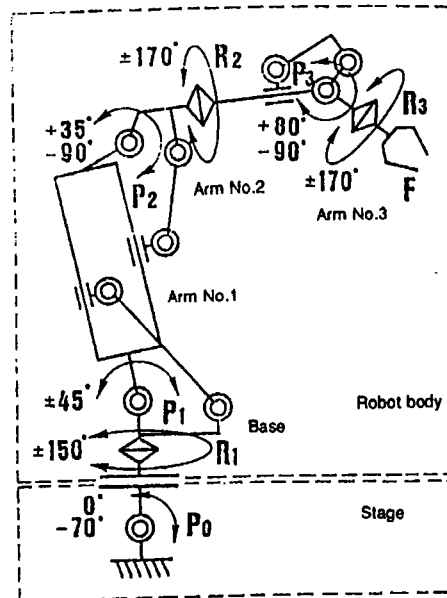


Figure I.22 : Tokyo Denki University

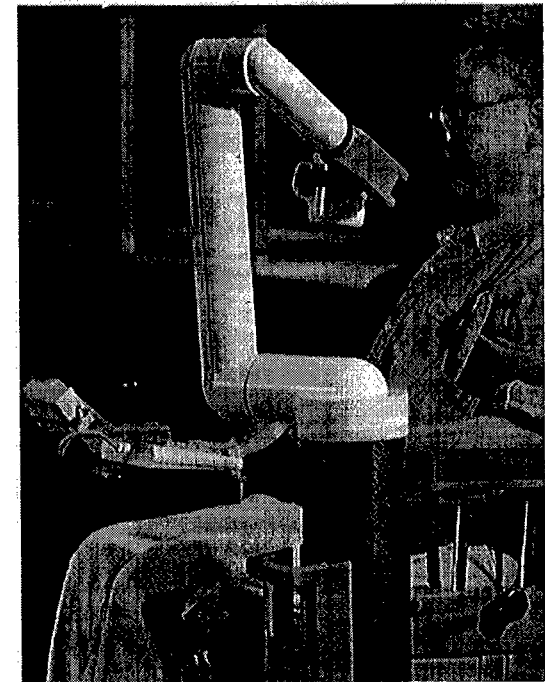


Figure I.19 : MANUS

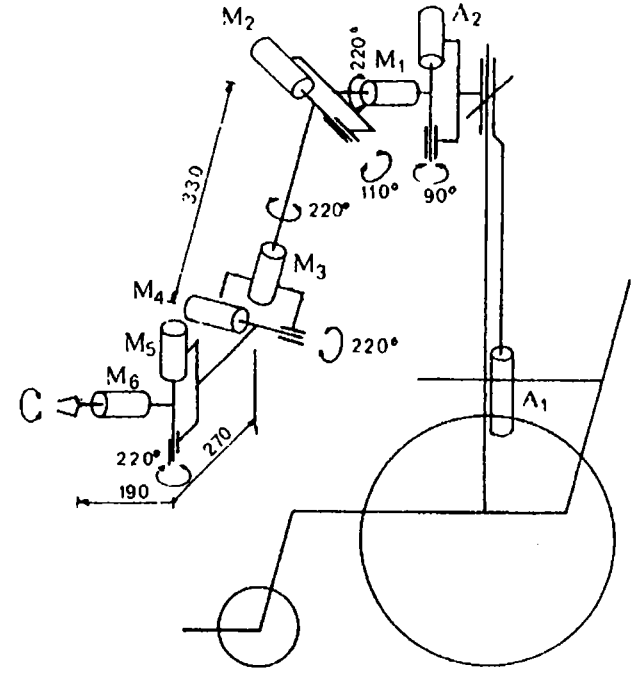


Figure I.23 : Université de Besançon



Figure I.24 : United States Dep. of Grant

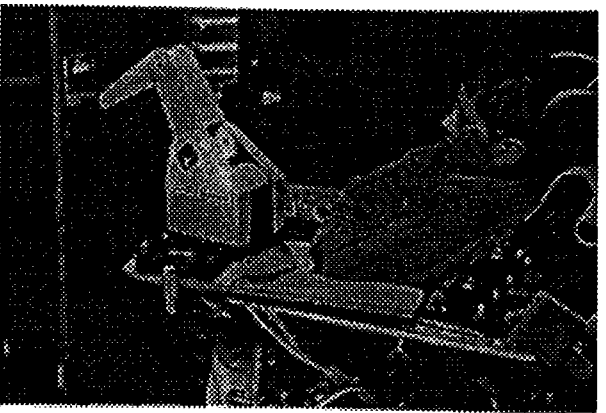


Figure I.25 : United States Dep. of Grant

IV ADEQUATION BESOINS/EXISTANT. L'EVALUATION CLINIQUE

Compte tenu des résultats actuellement disponibles des évaluations du projet MASTER et de la téléthèse du Bath Institute, nous pouvons noter les points à approfondir en vue de l'amélioration de tels projets (classement par priorité suite à l'évaluation du projet MASTER) :

- le développement de postes de commande plus adaptés (interface homme machine),
- le développement de programmes supplémentaires et d'applications spécifiques pour la vie quotidienne de l'utilisateur,
- l'amélioration de l'environnement du robot : poste de travail mieux adapté,
- la prise en compte des problèmes de coût,
- la possibilité d'avoir un système embarqué sur une base mobile,
- le développement de programmes supplémentaires et d'applications dans un domaine professionnel,
- la possibilité d'avoir un système embarqué sur un fauteuil roulant,
- l'esthétique générale du système.

D'autre part, l'évaluation clinique du projet MANUS [BREL 92] [BOUR 92], téléthèse sur Fauteuil Roulant Electrique (FRE) révèle:

- que les handicapés préfèrent les commandes automatiques pré-enregistrées aux commandes manuelles, celles-ci se révélant longues et fastidieuses. Cette tendance pourra être amoindrie par l'utilisation d'interfaces de commande permettant un flux d'informations plus important et par "l'arrimage" ou la localisation du fauteuil par rapport à un poste de travail configuré, ceci permettant le lancement de séquences automatiques (il sera alors possible de connecter le fauteuil à une source de courant),
- que l'accroissement de la largeur du fauteuil (15 cm) gêne considérablement lors des déplacements du FRE (même en centre de réadaptation particulièrement bien aménagé),
- que la surcharge engendrée par le bras crée un déséquilibre du FRE, ce qui peut entraîner un patinage des roues, ce phénomène pourra être évité en intégrant le bras à la conception du FRE en vue d'une meilleure répartition des masses,

- qu'il existe des risques d'accidents, notamment lorsque le robot évolue près de l'handicapé, ce qui implique la création de zones de sécurité.

V CRITERES ET CONTRAINTES DE CONCEPTION

Nous proposons un certain nombre de caractéristique que devrait intégrer la conception d'une téléthèse "idéale". Les caractéristiques définies sont issues des diverses constatations énoncées dans les parties précédentes.

V.1 VITESSE / PUISSANCE

Dans le cadre des robots de coopération, contrairement au domaine industriel, il est nécessaire de borner les puissances et les vitesses des manipulateurs. Ces limitations interviennent notamment pour des raisons de sécurité.

Au niveau des vitesses, un minima sera exigé pour le confort de l'opérateur lors de manipulations pour favoriser la rapidité de l'exécution du déplacement tandis que le maxima sera fonction des capacités d'arrêt du manipulateur et des temps de réaction minimaux de l'opérateur.

En ce qui concerne la puissance globale du robot, un minima sera exigé de manière à pouvoir manipuler des objets usuels de quelques kilogrammes, tandis que le maxima sera imposé pour éviter tout risque de lésion sévère de l'opérateur.

V.2 CAPACITES DE SAISIE

Etant donné la non existence d'un préhenseur «universel», c'est-à-dire apte à réaliser l'ensemble des actions manuelles, il est intéressant de prévoir un changement rapide, voire automatique, du préhenseur, principe connu pour les magasins d'outils des machines à commande numérique. Cette constatation provient de la diversité des manipulations réalisables et désirées par les handicapés :

- tourner une page
- boire
- insérer une cassette vidéo dans un magnétoscope

- se nourrir
- dévisser / visser un bouchon
- ...

V.3 CONSOMMATION D'ENERGIE

L'ajout d'un manipulateur ne devant pas diminuer sensiblement l'autonomie énergétique du fauteuil sur lequel il est embarqué, il est nécessaire d'intégrer certains critères lors de sa conception et de son utilisation. Il faudra éviter autant que possible l'ajout d'un nombre élevé de réserves d'énergie.

D'un point de vue mécanique, il est souhaitable d'opérer une minimisation globale des masses des différents segments dans le but de diminuer les couples articulaires et l'énergie dépensée. Une étude des matériaux utilisables, tels que les alliages légers, les matériaux composites et plastiques, doit être menée en tenant compte des sollicitations mécaniques, des conditions d'utilisation et de l'agressivité du milieu extérieur. D'autre part, le choix des actionneurs et de leur source d'énergie sera optimisé en fonction de leur rendement, de leur puissance massique et de divers critères. La figure I.26 présente les différentes possibilités de motorisation. Les actionneurs seront, autant que possible, déportés vers la base du manipulateur pour minimiser les couples articulaires et donc l'inertie globale du bras. Cette solution présente l'inconvénient de générer des couplages mécaniques articulaires suite à l'emploi de transmissions par câbles, par courroies et par engrenages et de ce fait d'augmenter le coût global du manipulateur.

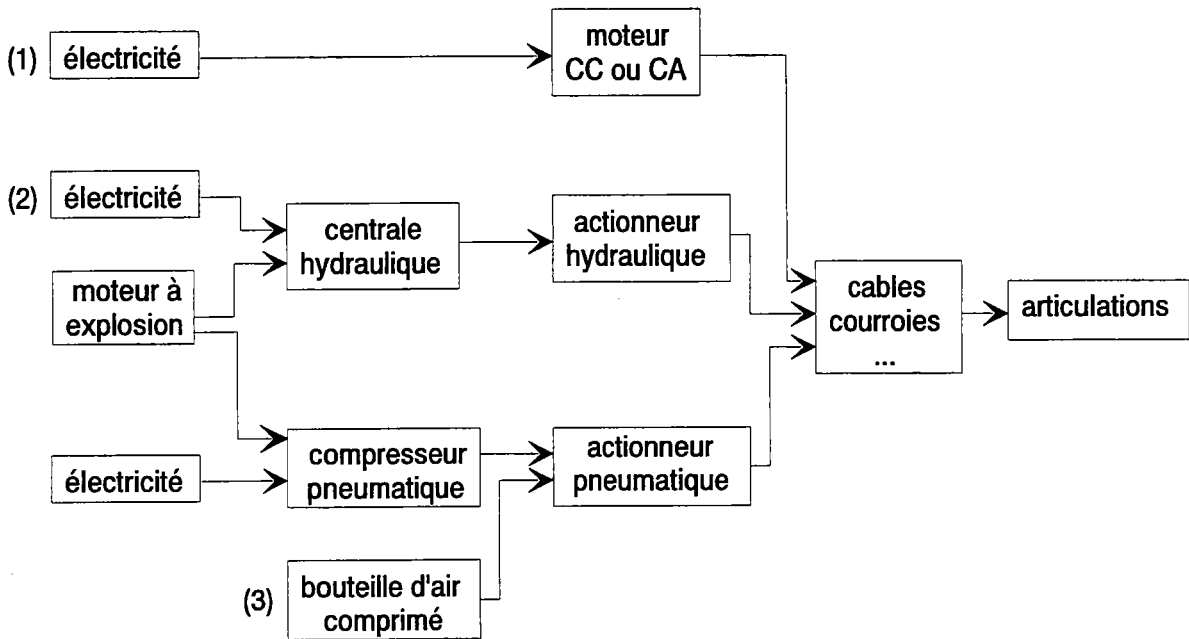


Figure I.26 : différentes possibilités de motorisation

L'utilisation de moteur à explosion est proscrite pour des raisons évidentes de nuisances acoustiques et de pollution atmosphérique. La solution qui utilise un compresseur pneumatique n'est pas envisageable à cause du bruit généré. Ces constatations nous amènent donc à étudier plus particulièrement les solutions 1, 2 et 3 de la figure I.26. La solution 3, pneumatique, présente des inconvénients majeurs d'un point de vue acoustique au niveau des échappements et d'un point de vue asservissement compte tenu de la compressibilité de l'air. Elle présente néanmoins l'avantage d'offrir une irréversibilité des articulations (cette constatation est valable pour la solution 2) par simple fermeture des échappements. La solution 2 présente un avantage indéniable du point de vue de la puissance massique et du point de vue de l'encombrement mais induit des pertes énergétiques suite à la transformation de la puissance électrique en puissance hydraulique et suite aux pertes de charge. L'utilisation de moteurs électriques (solution 1) garantit un rendement énergétique optimal mais leur puissance massique est faible. Quelle que soit la solution adoptée, la chaîne cinématique de transmission de la puissance devra être irréversible ou, si cela n'est pas possible, disposer d'un système de verrouillage à l'arrêt de type frein à manque de courant afin de permettre la mise en sommeil de l'alimentation énergétique tout en garantissant le maintien du bras en position. Il sera alors judicieux d'intégrer un système de débrayage aux différentes articulations pour permettre à une tierce personne de mouvoir

manuellement le robot en cas de dysfonctionnement.

Au niveau commande, lors de l'utilisation de manipulateur à structure mécanique redondante, il est possible d'insérer dans les modèles des critères de minimisation d'énergie. Néanmoins, certaines restrictions doivent être envisagées. Pour notre architecture redondante (présentée au chapitre suivant), l'axe 0 (hanche), désigné comme axe de mise en position, est avant tout générateur de redondance. Il permet à l'opérateur d'adopter une infinité de postures du bras pour une même position et orientation de l'organe terminal (figure I.27). Du fait que l'opérateur est le seul à avoir connaissance de la posture préférentielle pour une action donnée, il est aussi le seul à pouvoir modifier l'orientation de cet axe, ce qui exclut l'utilisation de critères énergétiques pour lever la redondance. Ainsi les modèles géométriques et cinématiques du manipulateur seront ceux du système non redondant constitué des axes 1 à 6. L'opérateur pourra manoeuvrer l'axe 0 individuellement sans modifier l'orientation et la position de la pince. Pour minimiser la consommation énergétique du manipulateur il sera aussi possible de prévoir une mise en sommeil du bras dans sa position lors de la non utilisation prolongée. Dans la mesure où les articulations sont irréversibles il suffit alors de couper l'alimentation énergétique des actionneurs.

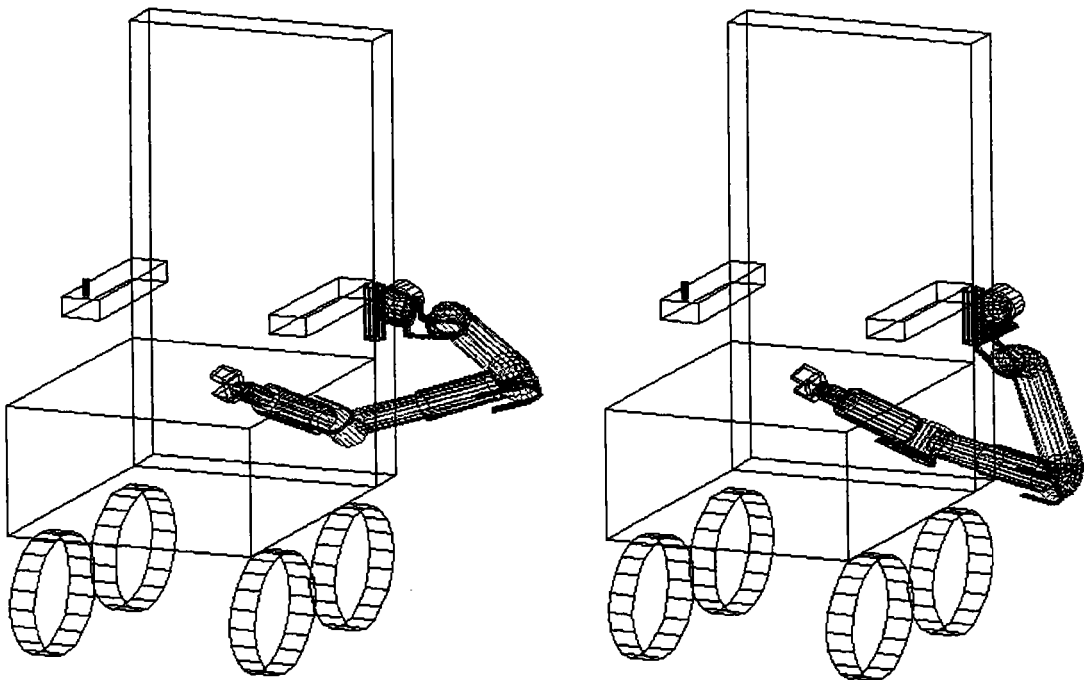


Figure I.27 : redondance apportée par l'axe 0

Lors de l'utilisation du manipulateur l'opérateur devra, dans la mesure du possible, utiliser le manipulateur en configuration de type SCARA. Cette position permet de limiter les couples articulaires liés aux masses des segments et des objets manipulés. Lors de l'utilisation du manipulateur sur des postes de travail aménagés, le fauteuil est alors dans une position pré-déterminée, il sera possible de se connecter à une source d'énergie extérieure.

V.4 VOLUME ACCESSIBLE

Dans la mesure où le manipulateur est amené à opérer sur un environnement non spécifiquement aménagé, il est nécessaire qu'il couvre un volume accessible permettant la saisie d'objets au sol (sac ou tout objet tombé au sol), en hauteur (livre sur étagère) et sur une table (verre d'eau, bouteille). Pour satisfaire ces objectifs, un dimensionnement proche de celui d'un bras humain serait souhaitable.

V.5 MASSE GLOBALE

En dehors des contraintes énergétiques, il s'avère nécessaire de minimiser le poids global du manipulateur pour deux principales raisons qui sont :

- la stabilité générale du manipulateur, une structure trop lourde entraîne des oscillations et un basculement du fauteuil lors de manipulation d'objets éloignés de la base du robot.
- le risque de patinage des roues motrices suite à un porte-à-faux trop important et ceci quelle que soit la posture du bras. Pour limiter ce phénomène il faudra étudier la répartition des masses lors de l'intégration du manipulateur au fauteuil. Dans la majeure partie des cas, une simple réorganisation spatiale des batteries électriques pourrait éliminer ce problème.

V.6 ENCOMBREMENT

Il est important que l'adjonction d'un manipulateur à un fauteuil n'entraîne pas un accroissement sensible de ses dimensions. En effet, ceci entraînerait une gêne de la navigation considérable lors de

déplacements dans des passages étroits ou encombrés. Ce phénomène a été mis en évidence lors de l'utilisation du systèmes MANUS.

V.7 PRECISION / REPETABILITE

Le type d'application étudié ne nécessite pas une précision et une répétabilité importante. Ceci est d'autant plus vrai lors de l'utilisation du manipulateur en mode manuel. Si la précision reste peu importante, une répétabilité de quelques millimètres est nécessaire pour permettre la saisie automatique d'objets usuels sur poste aménagé. Pour améliorer les caractéristiques du bras, une attention particulière devra être accordée aux jeux mécaniques dans les axes et les transmissions. Pour pallier à ce problème il suffit d'installer des systèmes de rattrapage de jeux et d'apporter un soin particulier à l'usinage des éléments fonctionnels.

V.8 COUT

Pour atteindre le marché spécifique des aides techniques aux handicapés, il faut actuellement proposer une solution de coût inférieur à 50000F [MD 94]. La partie commande (PC +cartes) étant de coût déterminé, matériel du commerce, la minimisation globale du coût de l'ensemble portera essentiellement sur la partie mécanique. Cette restriction influe donc sur les choix de la conception, ce qui impose une analyse de la valeur stricte du bras manipulateur tout en sachant que le coût final du produit conditionnera fortement les capacités et les fonctionnalités proposées.

V.9 INSTRUMENTATION, AIDE A LA SAISIE ET A LA MANIPULATION

Ici l'objectif est d'apporter à l'utilisateur un supplément de confort et de capacités par l'adjonction de fonctionnalités "intelligentes" à travers une instrumentation adaptée. Une des principales solutions réside actuellement en l'implantation d'un système de vision . Grâce à cette technique, il est possible à l'opérateur de désigner un objet à saisir, voire d'accéder à des primitives de niveau objectif comme : assembler, déposer sur, Une fois l'objet et son environnement déterminés, le calculateur définit une position et une posture de saisie en fonction de l'utilisation de

l'objet et supervise l'opération spécifiée. L'opérateur peut alors être inclus dans le système en tant que capteur extéroceptif, de manière à faciliter les prises de décision du système de commande. Pour permettre une saisie correcte il faut aussi instrumenter le préhenseur par des capteurs de pression, de glissement, de température,

Ces fonctionnalités font appel à des techniques coûteuses en temps de calcul et en instrumentation comme par exemple la reconnaissance de forme, les système expert,

VI CONCLUSION

Malgré le nombre considérable de projets dédiés à la robotique pour handicapés, il est à noter que, outre les auxiliaires de vie, l'aide actuellement la plus efficace est obtenue par l'utilisation de singes capucins [CHAR 93] (20 singes utilisés aux USA et démarrage du projet en France).

Ce chapitre nous a permis, à partir de l'étude des réalisations existantes, de poser les critères et les contraintes de conception à mettre en oeuvre lors de la réalisation d'une aide de type bras manipulateur. A partir de cette étude nous présentons au chapitre suivant le projet bras manipulateur développé au sein de notre laboratoire.

CHAPITRE II

LE PROJET BRAS MANIPULATEUR

I INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les différentes caractéristiques du bras manipulateur développé au le L.A.E.I. par C. Bop [BOP 92] [BOP 93]. Les principales caractéristiques présentées sont :

- la morphologie du manipulateur,
- l'architecture de commande,
- l'interface homme/machine.

La dernière partie abordée pose les problèmes relatifs aux notions de sécurité suite à l'utilisation de ce type de téléthèses.

II MOBILITE

Aux vues des évaluations cliniques, il nous semble qu'à ce jour les téléthèses les plus aptes à pallier aux déficits des handicapés soient celles à poste fixe du fait de leur fonctionnement automatique.

Mais malgré cela, les atouts des téléthèses embarquées sur FRE sont indéniables :

- volume de travail non limité,
- possibilité d'utiliser le robot en mode automatique à poste fixe,
- robot utilisable pour toute application non programmée de la vie courante.

Ces avantages nous ont conduits à adopter ce type de téléthèse.

D'autre part, il nous semble que l'utilisation des manipulateurs embarqués sur base mobile soit réservée aux personnes dans l'incapacité de se mouvoir ou alitées sauf si la base mobile supplée elle même au déficit de mobilité du handicapé. Dans ce but le projet Véhicule Autonome pour Handicapés Moteurs [BOUR 95] est développé au L.A.E.I..

III MORPHOLOGIE

Si l'AFM préconise une structure anthropomorphe au sens classique de la robotique (figure II.1), structure adoptée par le projet MANUS et par le projet de l'Université de Tokyo Denky, il semble plus à propos d'adopter ce terme en son sens étymologique, ce qui revient à penser en terme

de capacité du point de vue de la gestuelle. Contrairement aux projets précités, qui favorisent une gestuelle de type pendulaire, le manipulateur développé au LAEI permet toutes les postures de travail propres aux membres supérieurs humains.

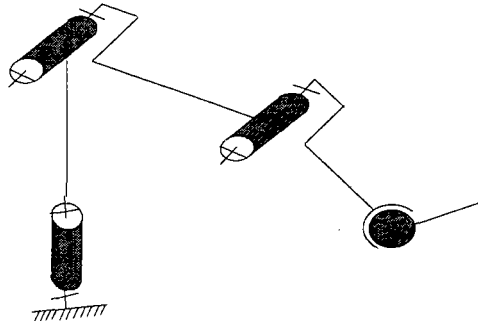


Figure II.1 : structure anthropomorphe

III.1 STRUCTURE ANTHROPOMORPHE COMPLETE

Le bras manipulateur du LAEI est, d'un point de vue cinématique, développé selon une démarche anthropomorphique. Il est constitué de 7 liaisons disposées de manière proche de celles d'un bras humain (figure II.2 et figure II.2bis).

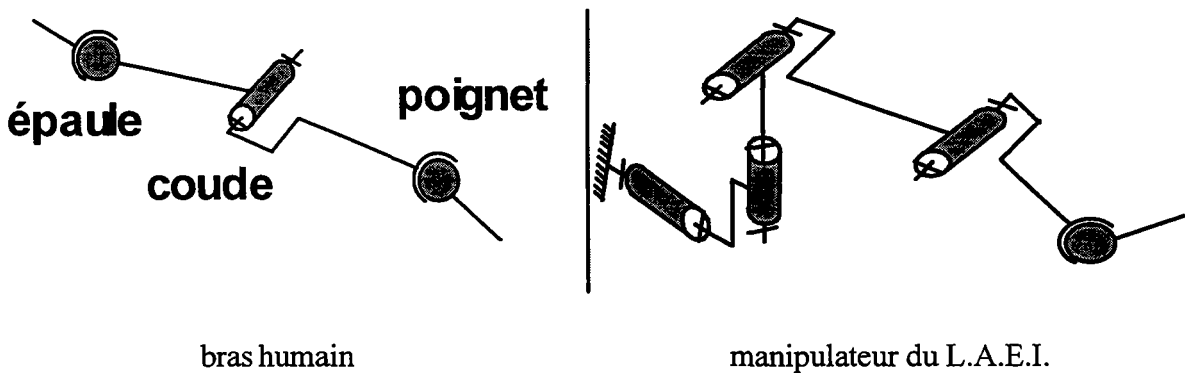


Figure II.2 : structure anthropomorphe complète

Le poignet de notre manipulateur est constitué de 3 liaisons pivot concourantes formant une rotule. Les dimensions entre les articulations sont respectées sous certaines contraintes technologiques mais les débattements (amplitudes) articulaires sont supérieurs à ceux d'un bras humain, ceci offre un volume accessible plus important.

La base du bras implantée sur le fauteuil roulant est positionnée dans un plan "épaule-tronc" de l'opérateur mais se situe au niveau de sa hanche de manière à permettre la saisie d'objets au sol.

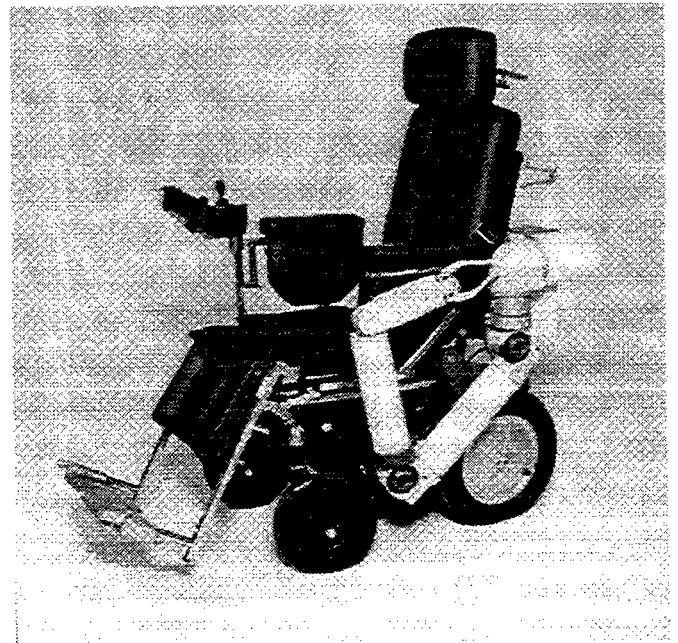
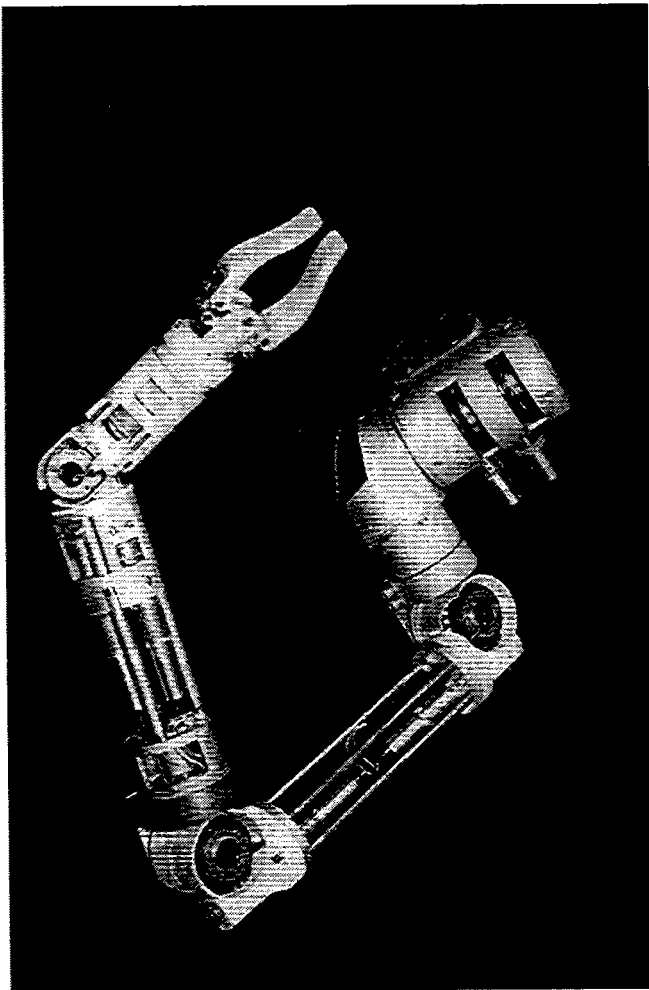
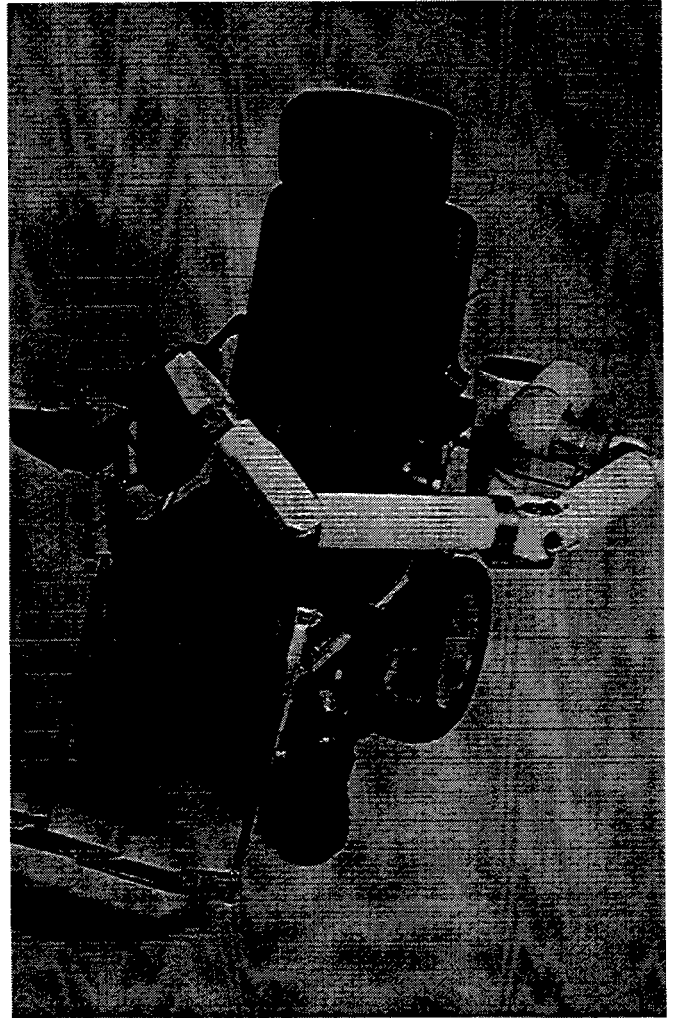
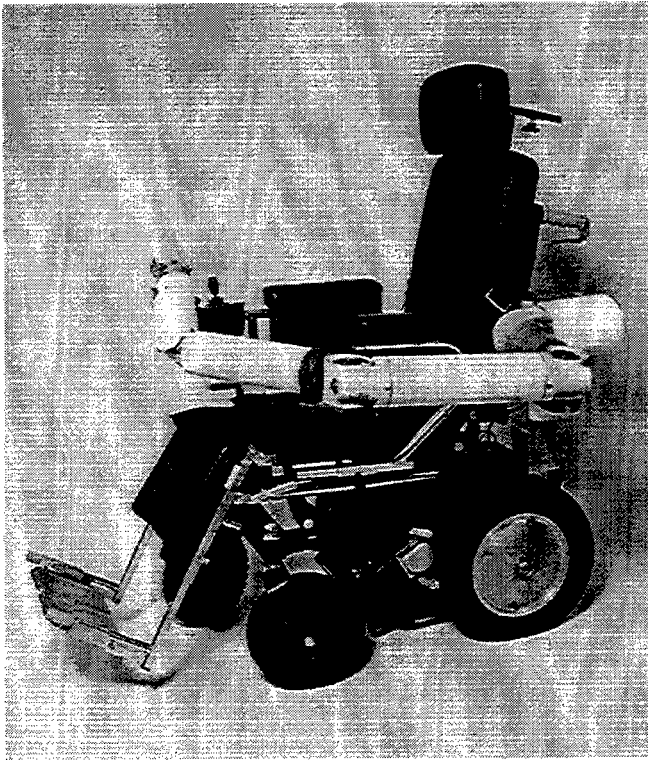


Figure II.2bis : vue générale du manipulateur

La démarche anthropomorphique adoptée n'est pas auto-suffisante, elle répond en effet à certaines nécessités énoncées lors d'évaluations cliniques. Outre le critère esthétique, la configuration mécanique proche de celle du bras d'un homme valide vise à favoriser le contact psychologique et le caractère "affectif" que le handicapé pourra développer vis à vis de son manipulateur. Cet aspect non abordé par les projet actuels de téléthèses embarquées devrait donc favoriser les relations homme/manipulateur.

III.2 CONCEPTION MECANIQUE

Les principaux critères ayant présidé à la conception mécanique du manipulateur ont été :

- la suffisance du volume accessible,
- la maintenabilité,
- la légèreté,
- l'autonomie énergétique,
- la modularité.

Le volume accessible obtenu de forme de demi tore [figure II.3 (dessin 3D du tore complet)] permet la saisie d'objets en hauteur, sur une table ou au sol ce qui permet une grande diversité d'activités comme le montre la figure II.4.

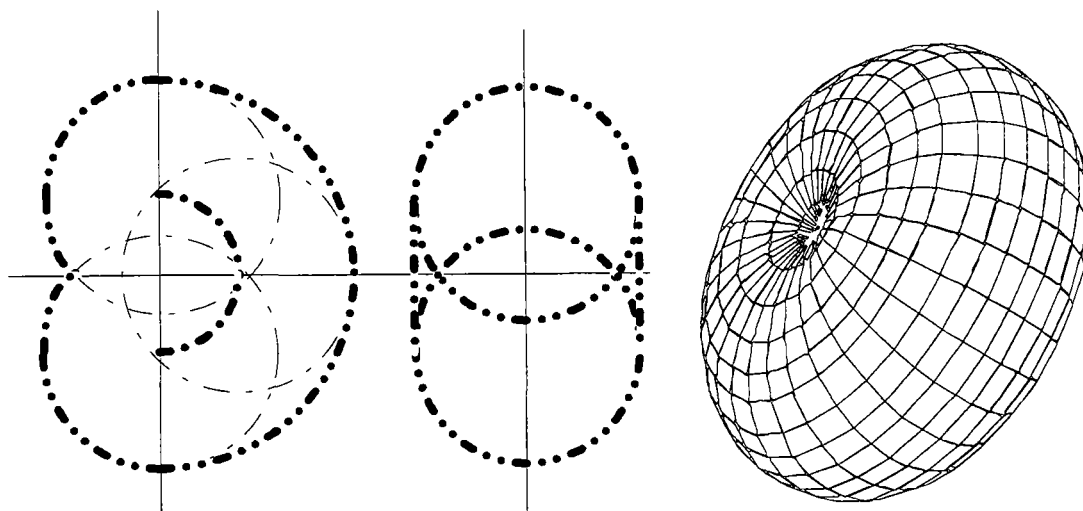


Figure II.3 : volume accessible

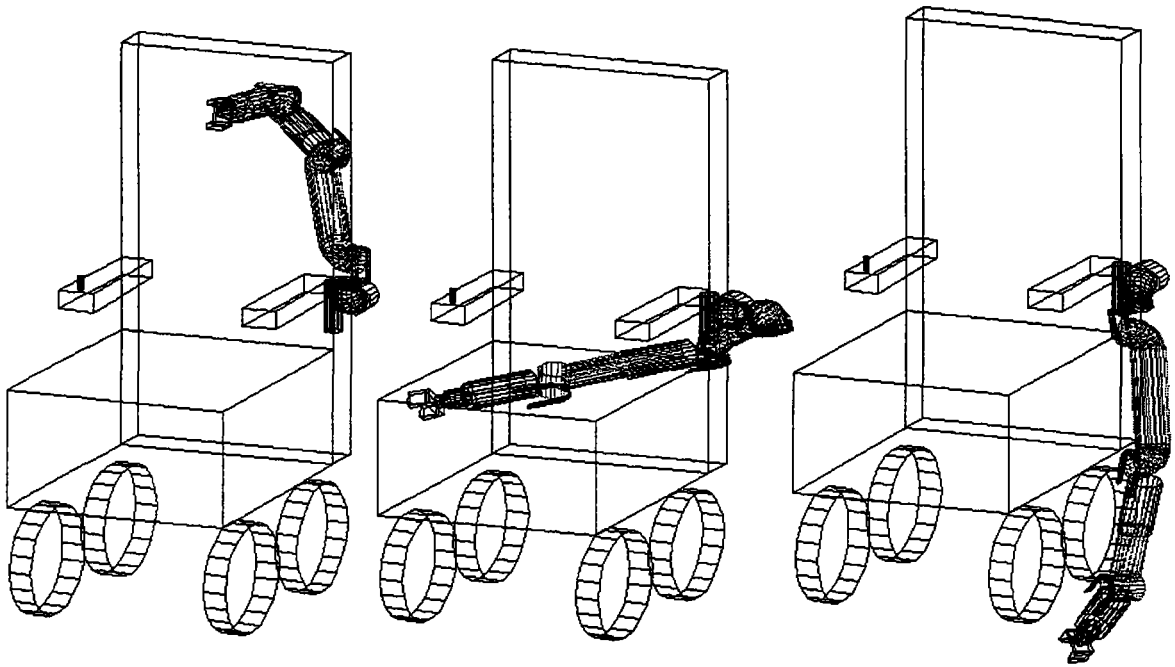


Figure II.4 : différentes postures de saisie

Le bras est constitué de 4 segments principaux qui sont tous aisément démontables, ce qui permet le changement d'éléments moteurs ou de transmissions en quelques minutes. Les trois derniers segments ont une structure tubulaire (coque en matériaux composites) semblable à ceux du projet de MANUS, ce qui renforce l'aspect anthropomorphique.

IV COMMANDE

Cet aspect du manipulateur est abordé par les projets actuels en terme de mode de fonctionnement (manuel, automatique ...) et d'interfaces (clavier, joystick ...) spécifiques à une application donnée, ceci restreignant fortement la capacité d'ouverture des systèmes conçus. Persuadé de l'intérêt d'une conception ouverte et structurée et vu le peu d'informations apportées par l'état de l'art de la robotique dédiée aux handicapés d'un point de vue structuration de la commande, nos recherches se sont inspirées de la robotique générale et des systèmes et principes de commande de procédés industriels.

Les principaux points abordés par cette étude correspondent aux niveaux classiques de la

structuration des systèmes de commande qui sont :

- le niveau objectif coopération : il est constitué de la partie "intelligence" de la machine qui est spécifique à une application donnée .
- le niveau coordination et synchronisation des actionneurs : cette couche repose principalement sur la modélisation mathématique du robot, que ce soit d'un point de vue géométrique ou cinématique. D'autres modules tels que l'auto-diagnostic ou la gestion de capteurs extéroceptifs y seront ajoutés.
- le niveau réflexe : il fait intervenir les lois des asservissement analogiques et numériques.

La structuration générale [LEDR 94] adoptée repose donc principalement sur les trois couches distinctes précitées à l'intérieur desquelles différentes sous-couches agissent en interactions , pouvant s'inhiber mutuellement et opérant sur des données communes. La structure générale sera donc de type conventionnelle (couches principales) tandis que la structure associée aux sous-couches sera de type réactive [figureII.5] [BROO 93] .

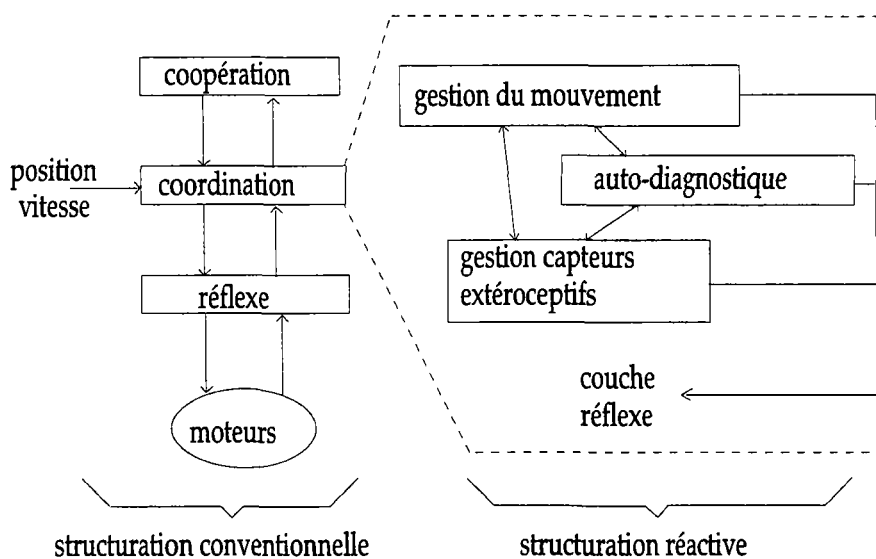


Figure II.5 : structure générale de la commande

La structuration des couches principales nous permet d'envisager l'utilisation du bras tel un périphérique classique de micro-ordinateur : clavier, lecteur de disque, ... où le niveau objectif communique avec les couches inférieures par l'intermédiaire d'un driver. Cette configuration permet une grande souplesse d'installation et d'utilisation.

IV.1 NIVEAU OBJECTIF / COOPERATION

Ce niveau supporte spécifiquement l'application dédiée. Il communique donc avec la couche inférieure par l'intermédiaire de commandes simples de type " aller à ... en mode ... avec une vitesse de ...", qui lui retourne des informations sur l'état du robot (position, vitesse, défauts ...).

Dans le cadre de l'application dédiée aux handicapés cette couche supporte :

- la communication avec la couche coordination,
- l'interfaçage homme / machine,
- la gestion des modes de fonctionnement (manuel, automatique ...),
- la gestion des modes de marche (niveau maintenance/fiabilité),
- la gestion de la sécurité de l'opérateur.

IV.2 NIVEAU COORDINATION / SYNCHRONISATION

Principalement orientée vers la gestion des déplacements, cette couche s'articule autour des modèles géométriques et cinématiques du manipulateur qui sont utilisés par des graphes de transformation [KOSS 86]. La méthode des graphes de transformation repose sur le fait qu'il existe une infinité de combinaisons de transformations menant d'un repère en un autre. Au regard de l'application décrite à la figure II.6 on peut écrire:

$$[TV_1] [TC_2] [TR] [TV_3] [TD] = [TC_4] [TV_5]$$

avec :

- [TR] transformation homogène robot
- [TV₁] [TV₃] [TV₅] transformations homogènes variables
- [TC₂] [TC₄] transformations homogènes constantes

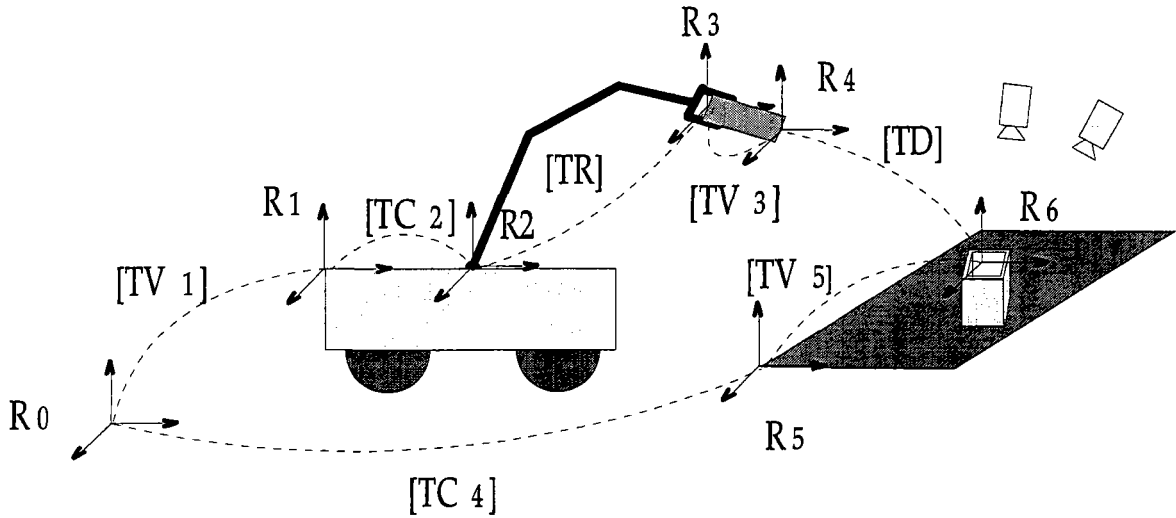


Figure II.6 : graphe de transformation

L'objectif étant d'insérer l'objet dans son support, ce déplacement s'effectuera en minimisant [TD] (Drive) de telle manière que en fin de mouvement [TD] = identité. On obtiendra alors l'équation :

$$[TV_1] [TC_2] [TR] [TV_3] = [TC_4] [TV_5]$$

soit $[TR] = [TC_2]^{-1} [TV_1]^{-1} [TC_4] [TV_5] [TV_3]^{-1}$.

Cette couche émet vers la couche réflexe des consignes de vitesse, qui lui retourne des informations de vitesse et de position.

Au travers des informations émanant du robot et par connaissance des courbes de réponses normales du manipulateur, ce niveau génère une surveillance de l'état de fonctionnement comme l'usure, les blocages, les points durs qu'il transmet à la couche supérieure qui en use à sa convenance.

IV.3 NIVEAU REFLEXE

Actuellement l'asservissement de vitesse est réalisé par une carte analogique (figure II.7).

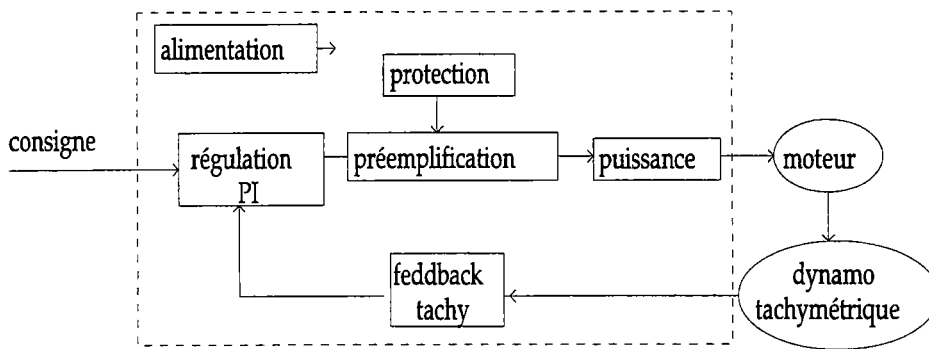


Figure II.7 : asservissement de vitesse

A court terme, ces cartes devraient être utilisées comme simples cartes de puissance de manière à porter la partie asservissement pure sur un microcontrôleur sur lequel sera programmé un régulateur de type PID.

IV.4 SYSTEME D'EXPLOITATION

Notre choix s'est porté sur le système d'exploitation temps réel IRMX version PC (80x86). Ce système développé par la société INTEL présente des avantages évidents liés au coût des plateformes cibles et permet l'utilisation des systèmes d'exploitation DOS et WINDOWS et la programmation simultanée en C, PLM (INTEL) et assembleur. Ces langages permettent l'écriture de code 32 bits de manière à utiliser totalement les capacités des processeurs 80386 et 80486.

Outre l'intérêt relatif à sa spécificité de système temps réel, IRMX permet une gestion aisée des différents processus concurrents, ce qui favorise la gestion de structures réactives. Parmi les tâches que peut gérer un tel système, dans le cadre de notre application, nous pouvons citer :

- le contrôle des mouvements (couche coordination)
- l'application spécifique (couche coopération)
- la gestion de la sécurité intrinsèque du système
- l'autosurveillance niveau software (error-handler)
- la gestion des capteurs extéroceptifs (vision, peau sensible, ...)

Nous noterons aussi l'existence de procédés normalisés de communication entre tâches tels que les sémaphores, les boîtes aux lettres et les segments.

IV.5 ARCHITECTURE INFORMATIQUE

L'architecture physique (hardware) du système (figure II.8) est actuellement constitué d'un PC (386 ou 486) et d'un bus externe (STE standard IEEE, 8 bit, transfert 5 Mbytes/s) sur lequel est connecté un ensemble de cartes d'entrées/sorties. Vis à vis du PC , l'accès aux différentes cartes s'effectue par des instructions d'écriture / lecture sur des ports d'entrées/sorties. Ces instructions sont alors redirigées vers les cartes E/S correspondantes par l'intermédiaire des deux cartes "pmlink".

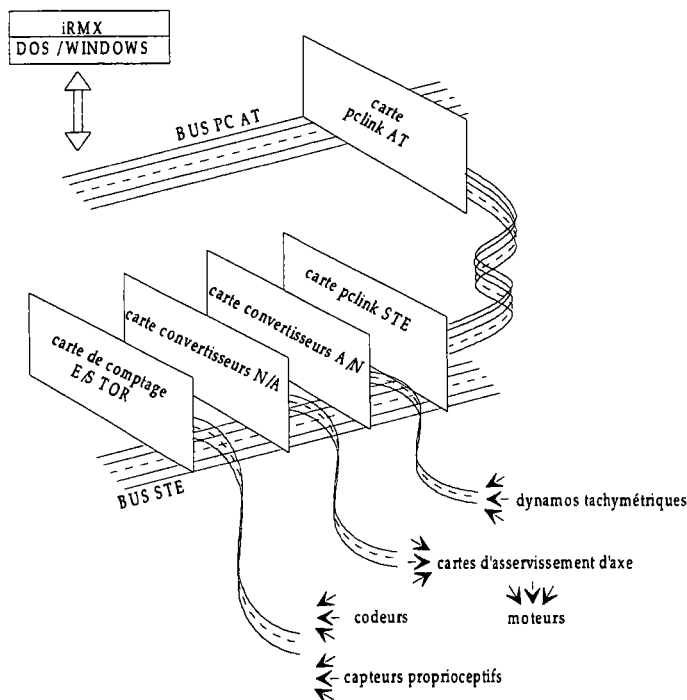


Figure II.8 : architecture initiale

L'architecture initiale évoluera vers celle décrite à la figure II.9 . Celle-ci offre l'avantage de présenter le robot tel un périphérique classique. L'application (couche coopération) sera alors dédiée au PC hôte tandis que la couche coordination sera installée sur la carte processeur du bus STE. La communication entre les deux processeurs s'effectuera par l'intermédiaire de fenêtres de RAM double accès.

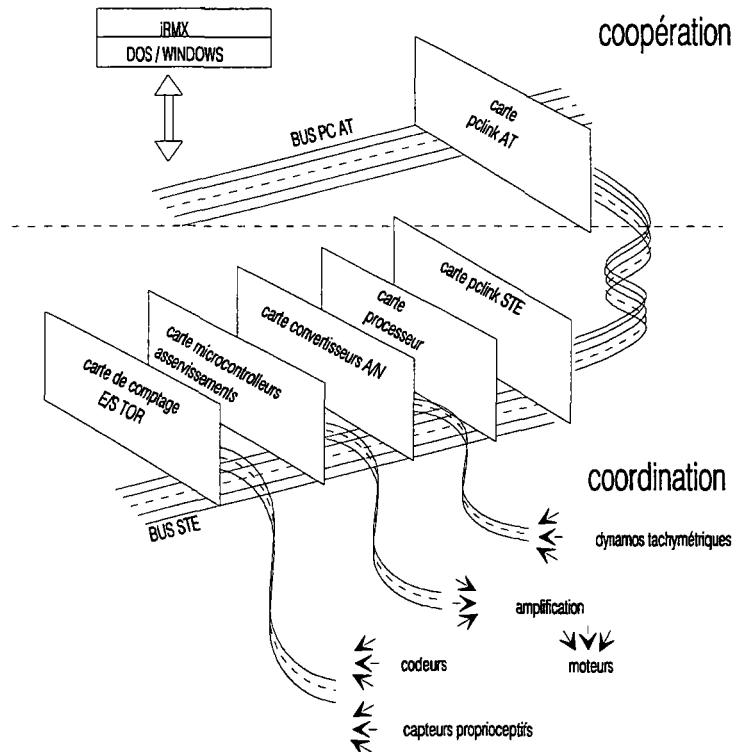


Figure II.9 : architecture finale

V INTERFACE HOMME/MACHINE, ACCES AUX DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT

V.1 TELEROBOTIQUE

Dans ce paragraphe nous nous intéresserons aux différentes interactions homme/machine dans le cadre de l'application dédiée aux handicapés.

Il est nécessaire de définir les différents niveaux ou classes de la télérobotique en remarquant les similitudes avec les langages de la robotique (effecteur, objet, objectif). On distingue trois modes génériques :

- la télémanipulation : l'opérateur exécute la tâche,
- la téléassistance: l'opérateur transmet au robot les informations et méthodes nécessaires à la réalisation de la tâche,

- la télésurveillance : l'opérateur décrit la tâche à exécuter et en surveille le bon fonctionnement.

Il apparaît clairement que notre étude porte principalement sur un système de type télémanipulation, même si la définition de tâches automatiques surveillées relève de la téléassistance.

Nous définirons par la suite les interactions entre l'homme et la machine permettant à l'opérateur d'effectuer une tâche définie.

V.2 INTERACTIONS HOMME/MACHINE

V.2.1 Manipulation

Notre objectif étant de suppléer à un déficit moteur des membres supérieurs, il est intéressant d'étudier les relations entre l'homme et son bras lors d'une manipulation type, par exemple, l'utilisation d'un outil (clef, ciseaux ...).

La tâche se décompose en sept étapes distinctes :

- (1) - définition de l'action globale suite à un besoin,
- (2) - localisation de l'outil,
- (3) - évaluation de l'outil,
- (4) - déplacement du membre,
- (5) - saisie de l'outil,
- (6) - déplacement du membre et de l'outil,
- (7) - utilisation de l'outil.

La seconde phase s'effectue principalement au moyen de la vue et peut faire intervenir un souvenir de la dernière localisation de l'outil (mémoire de l'opérateur). L'étape suivante consiste à extraire les principales caractéristiques de l'outil des divers renseignements visuels. On déterminera a priori le poids, la matière, le volume ce qui permettra la définition d'une position et d'une posture de saisie. Le déplacement du membre s'effectuera de manière à amener la main en position de saisie tout en évitant tout choc entre le membre et son environnement. La phase de saisie met en oeuvre un

mécanisme complexe qui fait intervenir de nombreux degrés de liberté, environ 20, et de multiples informations de pression. Cette action peut entraîner une modification du modèle perceptif de l'outil et peut induire une nouvelle configuration de saisie et/ou de posture. L'action suivante consiste donc à mener l'outil vers sa position d'utilisation en évitant de nouveau tout choc entre l'environnement et l'entité constituée du membre et de l'outil. La dernière étape a pour but d'appliquer à l'outil un torseur cinématique et un torseur transmissible (effort, couple) dans le but de réaliser le travail défini.

Ce descriptif permet ainsi de dégager les informations transitant entre l'homme et son membre résumées au tableau II.1.

de vers	homme	membre
homme	<ul style="list-style-type: none"> - localisation (vue) - expérience - mémoire 	<ul style="list-style-type: none"> - effort - inertie - pression - limites articulaires - contact - douleur - fatigue
membre	<ul style="list-style-type: none"> - positionnement - cinématique - torseur - posture 	<ul style="list-style-type: none"> - informations proprioceptives

Tableau II.1 : échange informationnel homme/membre

V.2.2 Télémanipulation

De même que dans le cadre de la manipulation, il est possible, lors d'une télémanipulation, de définir un enchaînement d'actions élémentaires visant à l'accomplissement de la tâche. Le descriptif proposé se placera dans le cadre d'un système possédant un préhenseur de type tout ou rien et non équipé de capteurs extéroceptifs tel qu'un système de vision par caméra . Si les séquences d'actions

restent identiques dans leur principe, il n'en est pas de même au niveau pratique, ceci étant lié à la diminution des informations homme-robot.

La séquence d'actions est alors :

- (1) - définition de l'action suite à un besoin,
- (2) - localisation de l'outil,
- (3) - évaluation de l'outil,
- (4) - l'homme ne gère que le déplacement du préhenseur et il lui est difficile de manoeuvrer dans un milieu encombré car il ne peut que difficilement influencer sur la posture du bras. Cette phase nécessite une étroite collaboration entre l'homme et la machine.
- (5) - contrairement au cas de la manipulation, cette phase se réduit pour l'opérateur à un ordre de type ouverture/fermeture et il ne reçoit plus les informations liées à la saisie manuelle.
- (6) - idem (4)
- (7) - cette phase souffre particulièrement du déficit d'informations. En effet si l'opérateur peut "aisément" contrôler la cinématique de l'outil manipulé, dans les limites imposées par la puissance disponible, il lui est impossible de lui définir un torseur car les informations effort/couple sont purement qualitatives. Il est à noter que dans le cadre d'application où l'opérateur est valide, il lui est alors possible de manipuler un "pantin à retour d'effort" ce qui lui permet de gérer le torseur qu'il transmet à l'outil.

Le tableau II.2 des interactions homme/machine se réduit à :

de vers	homme	robot
homme	- localisation (vue) - expérience - mémoire	- limites articulaires - contact - capacités
robot	- positionnement - cinématique - posture	- informations proprioceptives

Tableau II.2 : échanges informationnels homme/machine

En comparant la manipulation et la télémanipulation on s'aperçoit que toutes les informations liées au concept de force ont totalement disparu. Les notions de douleur et de fatigue sont remplacées par les informations "capacités" produites en temps réel par le module d'autodiagnostic qui informera l'opérateur sur l'état général du bras (usure, grippage, échauffement ...).

V.3 INTERFACE HOMME/MACHINE

V.3.1 Aspect informationnel de l'homme vers la machine

Les principales informations présentées précédemment transitant de l'homme vers le manipulateur sont liées au positionnement, à la cinématique et à la posture du bras. Ces informations sont transmises entre les deux parties sous différentes formes selon les trois modes de fonctionnement qui sont :

- le mode manuel
- le mode automatique
- le mode apprentissage

V.3.1.1 Mode manuel

L'objectif consiste ici à gérer le déplacement du préhenseur dans l'espace accessible. L'opérateur peut mouvoir et orienter l'organe terminal et doit donc accéder aux 6 degrés de liberté de l'organe terminal (3 translations et 3 rotations). Chaque degré comporte deux sens, soit au total 12 informations binaires. Pour que les déplacements soient complètement définis il faut leur associer un repère de référence qui est lié soit au fauteuil roulant soit à l'organe de préhension (figure II.10).

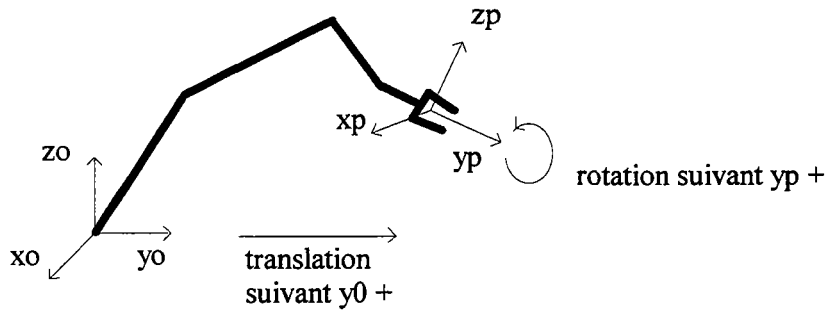


Figure II.10 : repères de référence

L'opérateur pourra modifier la posture de bras soit en actionnant l'axe 0 (hanche) du manipulateur ce qui ne changera pas la position et l'orientation de la pince par rapport au fauteuil, soit inverser l'épaule ou le coude (figure II.11).

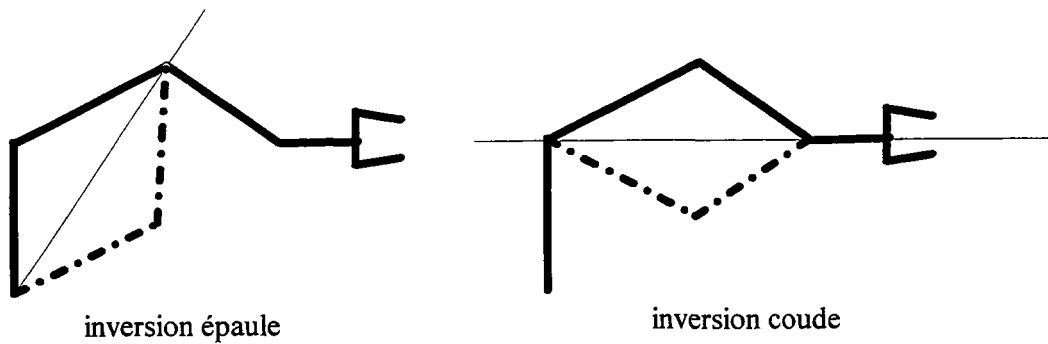


Figure II.11 : modification de posture

V.3.1.2 Mode apprentissage

-Mémorisation de position

L'opérateur amène le préhenseur en une position et une orientation désirées et enregistre la matrice homogène associée. Il pourra demander à rejoindre cette position lorsqu'il se trouvera en mode automatique.

-Mémorisation d'une trajectoire par l'opérateur

Le principe est de permettre à l'utilisateur de mémoriser une séquence de points pendant qu'il effectue un mouvement spécifique. Le rappel en mode automatique de cette trajectoire obligera le manipulateur à rejoindre le point le plus proche par une interpolation linéaire puis le préhenseur

suivra la trajectoire spécifiée par les différents points de passage.

- Mémorisation d'une trajectoire par une tierce personne

Une personne extérieure pourra utiliser le manipulateur tel un pantin et lui faire décrire une trajectoire. L'application se chargera de mémoriser les points de passage à chaque intervalle de temps (à définir selon l'exactitude de la restitution désirée).

V.3.1.3 Mode automatique

Ce mode permet le lancement de la séquence mémorisée par l'opérateur ou par logiciel (déploiement, rangement ...). L'opérateur peut à tout moment interrompre le mouvement et éventuellement le relancer après avoir effectué un contournement d'obstacle (figure II.12).

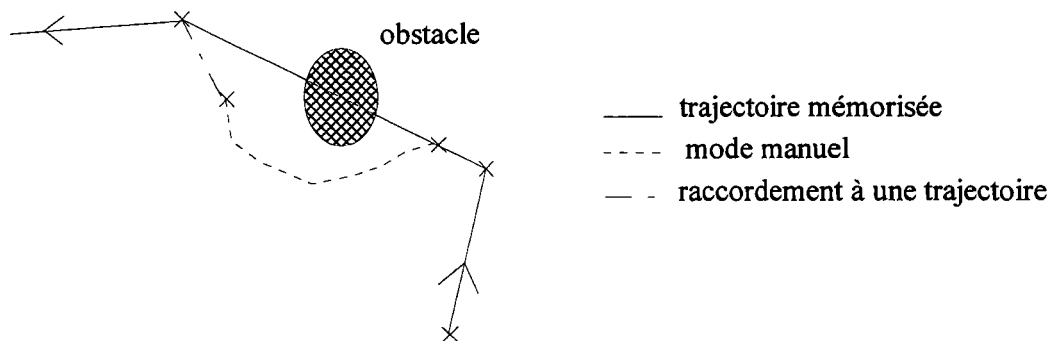


Figure II.12 : évitement d'obstacle

Une méthode qui permet l'évitement automatique d'obstacle sera présentée au chapitre IV.

V.3.2 Aspect matériel

Il existe de très nombreuses interfaces étudiées pour des handicaps spécifiques mais toutes ne conviennent pas à une application de télémanipulation qui nécessite un haut débit d'informations de l'handicapé vers le robot. Le mode de fonctionnement le plus restrictif est le mode manuel qui nécessite l'accès à 12 variables binaires plus la posture et l'ouverture/fermeture de la pince. Etant donné la multitude d'informations, il est nécessaire de pouvoir activer les variables dans un laps de

temps très court, ce qui semble prohiber l'utilisation de menus déroulants ou autres interfaces similaires.

Nous résumons les différentes interfaces existantes au tableau II.3.

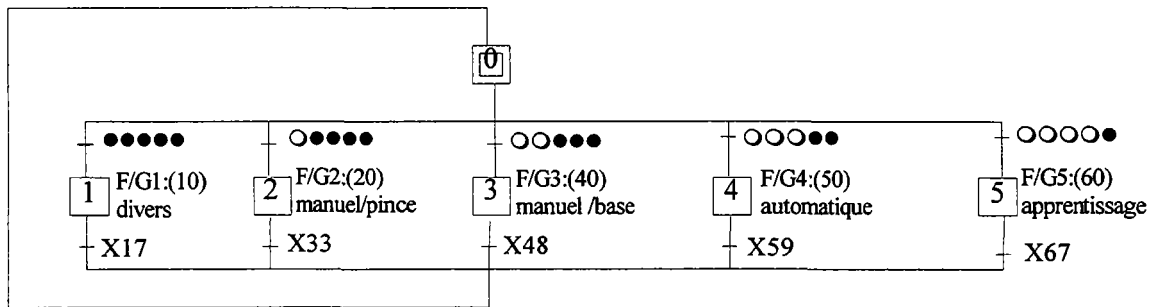
	apprentissage	débit d'informations	écran de visualisation	informations délivrées	coût
tout ou rien	rapide	très faible	nécessaire	1 bit	faible
1 joystick	rapide	faible	nécessaire	8 informations analogiques	faible
2 joystick	moyen	moyen	nécessaire	16 informations analogiques combinables 2 à 2	faible
commande vocale	rapide	élevé	inutile	n informations binaires	élevé
cts	lent	très élevé	non nécessaire	32 bit	faible

Tableau II.3 : différentes interfaces

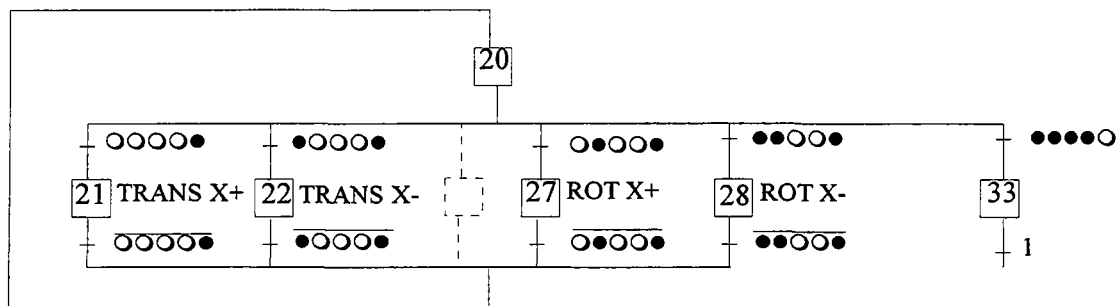
Une interface CTS (Clavier Type Sténographie) est composée de n capteurs tout ou rien combinables, ce qui permet de délivrer 2^n informations binaires. Une configuration classique consiste à utiliser un capteur par doigt ce qui offre 32 combinaisons rapidement accessibles après apprentissage. On pourra envisager selon les capacités de l'opérateur de placer les capteurs sur tout autre partie mobile du corps sachant qu'un minimum de 4 switches est nécessaire.

Une représentation simplifiée d'une combinaison se présente sous la forme [●○○●●] ou les caractères signifient : ○ capteur non activé / ● capteur activé.

Nous présentons par la suite, à la figure II.13, l'enchaînement des différents modes et le mode manuel sous forme de Grafset. Les combinaisons de touches affectées aux transitions sont configurables par logiciel.



graphe 0 : sélection de mode



graphe 2 : mode manuel/pince

Figure II.13 : enchaînement des différents modes

Le principal intérêt de cette interface réside principalement dans la rapidité d'atteinte des différentes combinaisons, qui devrait permettre une plus grande souplesse et précision de la gestuelle en mode manuel. Le clavier ainsi constitué pourra être inclus dans une télécommande infrarouge de type universel de manière à l'intégrer à une solution domotique et favoriser l'utilisation de l'interface par une tierce personne.

VI SECURITE

L'absence de critère de sécurité dans les projets actuels est relative aux faibles performances cinématiques et dynamiques des robots utilisés, ceci pouvant faire croire que tout contact, notamment avec l'utilisateur, ne peut entraîner de graves conséquences. Cette croyance fortement influencée par les démarches de protection des ouvriers en milieu industriel [VAUT 89] ne peut cependant pas justifier le manque d'attention accordé à ce problème. Outre le problème relatif à l'évitement de choc qui peut s'avérer crucial lors de l'utilisation d'un robot plus puissant en présence de personnes ne

possédant que de faibles capacités motrices, il est nécessaire d'accorder une attention toute particulière aux problèmes de dysfonctionnements et de défaillances des matériel ou des logiciel.

Contrairement au cadre industriel où une perte de fonctionnement "n'entraîne qu'une perte de production ou des bris de matériel ", la perte du contrôle de son manipulateur peut faire courir des risques importants à l'handicapé. Pour illustrer ces risques nous pouvons imaginer aisément les conséquences qu'entraînerait un non-contrôle de nos membres supérieurs lors de la conduite d'un véhicule.

Ainsi l'étude présentée sur la sécurité de l'opérateur portera principalement sur :

- la détection de collisions ou de risques collisions et le traitement de l'information,
- la fiabilisation du manipulateur au niveau de la partie commande logicielle.

VII CONCLUSION

Nous venons de présenter dans ce chapitre les différentes caractéristiques de notre manipulateur implanté sur fauteuil. Cette étude a mis en évidence le manque d'attention généralement accordé à l'intégration du facteur sécurité dans de tels dispositifs. Ceci nous a conduit à proposer au chapitre suivant une étude relative à l'intégration de ce paramètre lors de la phase de conception.

CHAPITRE III

SECURITE DES ROBOTS DE COOPERATION

I CONCEPTION SECURITAIRE

S'il nous paraît a priori possible dans un cadre industriel de dissocier sécurité de la personne et la fiabilité de la machine, cette idée n'est plus valide lors de l'utilisation d'un robot de coopération. En effet pour un handicapé, de même que pour une personne utilisant ses membres supérieurs, ayant engagé une action comme l'ouverture de robinet ou la prise d'un objet fragile ou dangereux, il serait dommageable de ne pouvoir la conclure où de la voir se poursuivre en dehors de son contrôle.

Ainsi, lors de la conception d'un manipulateur destiné à travailler dans un volume englobant l'utilisateur il est nécessaire d'intégrer initialement des notions de sécurité et de fiabilité. A cet effet l'intégration du concept sécurité est mis en évidence lors de l'étude SADT ayant pour activité principale la création d'un bras manipulateur embarqué sur un FRE.

I.1 ANALYSE SADT

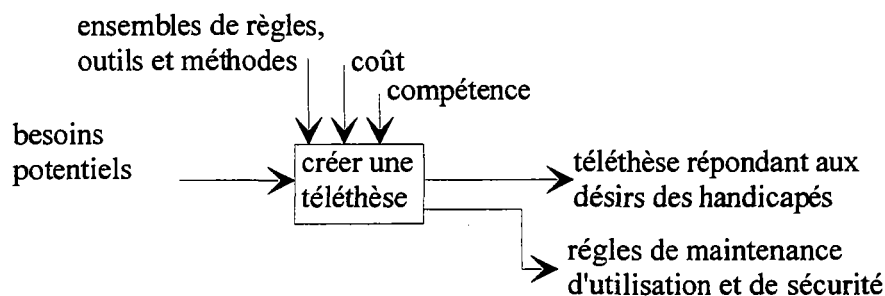


Figure III.1 : "créer une téléthèse" A-0

Les diagrammes des figures III.1 à III.4 mettent en évidence la démarche visant à la mise en sécurité d'une architecture potentielle. Deux objectifs principaux apparaissent :

- éviter l'apparition de l'accident,
- inhiber les conséquences de l'accident.

Cette distinction est liée à la constatation qu'il nous est impossible de prévenir toutes les défaillances et de ce fait qu'il est nécessaire de minimiser les risques d'accidents inhérents à leur apparition. Pour déterminer un niveau minimal de sécurité lors de la réalisation de l'activité A3-5 (figure III.4), nous nous sommes aidés du code du travail et des normes françaises (NF).

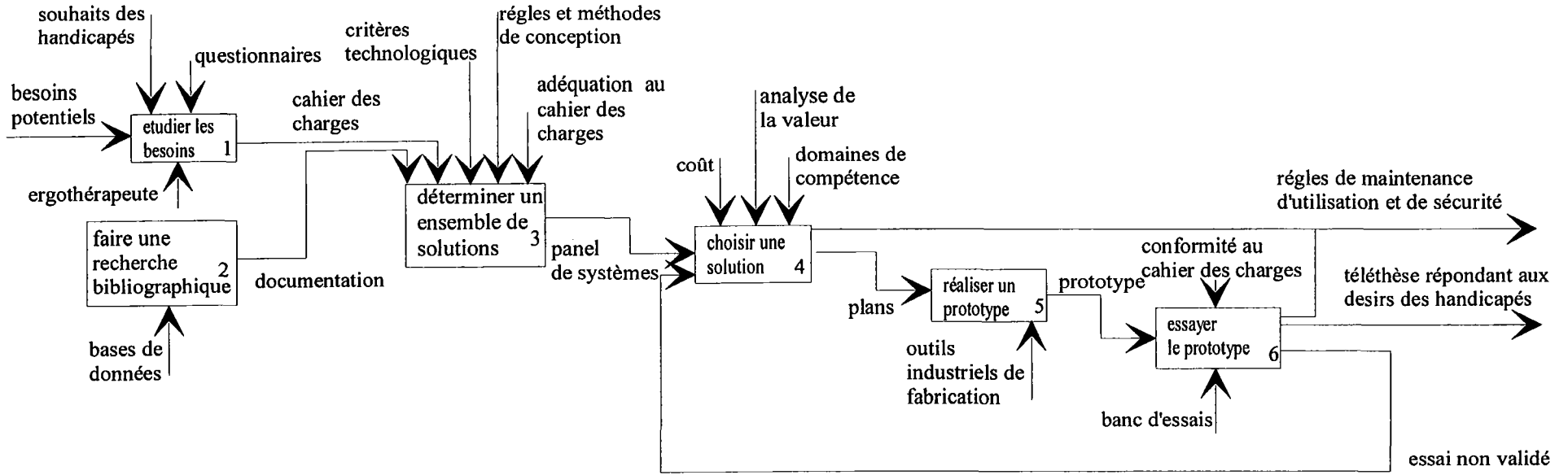


Figure III.2 : " créer une téléthèse" noeud A0

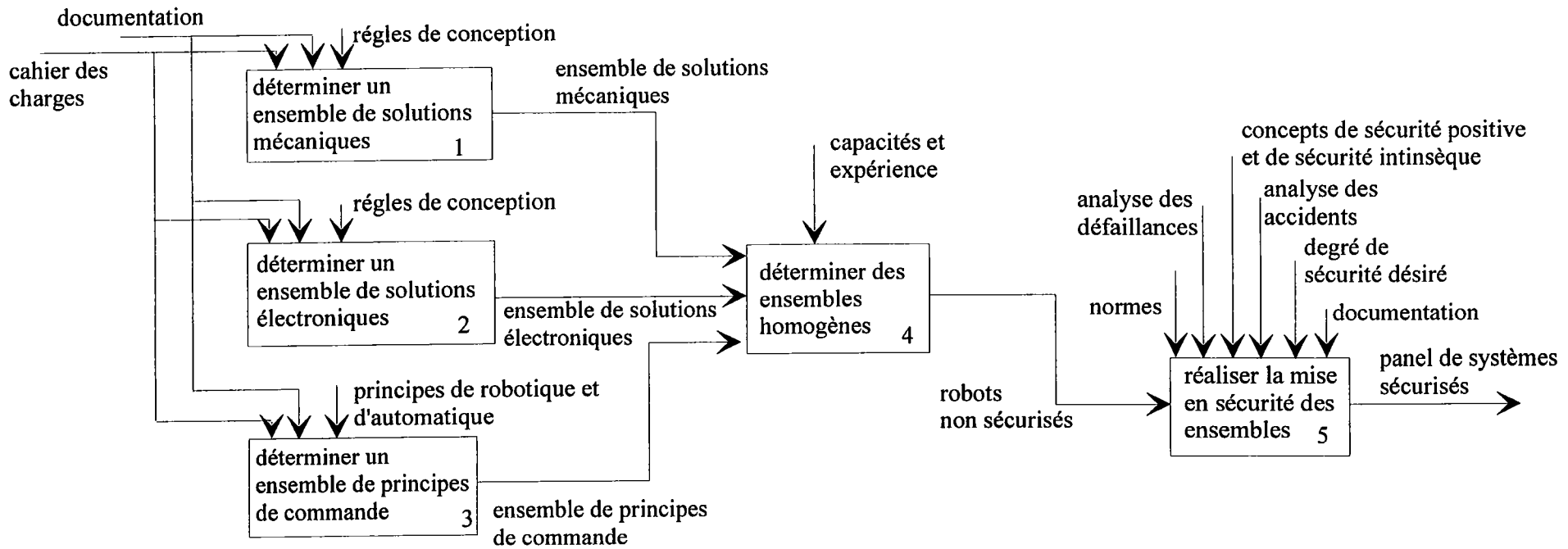
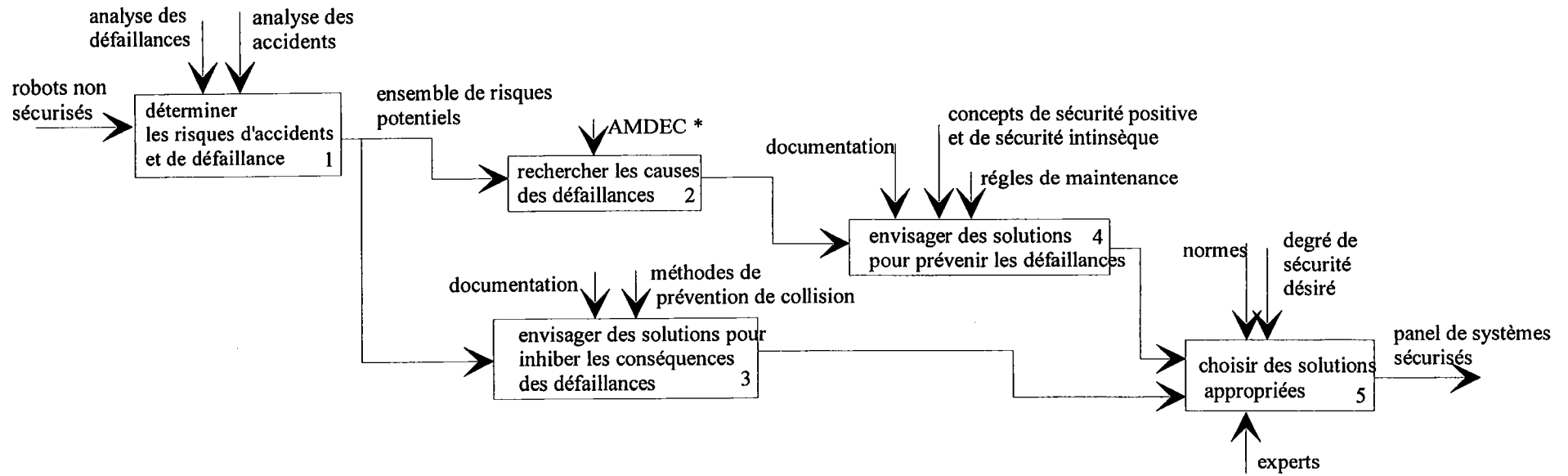


Figure III.3 : " déterminer un ensemble de solutions" noeud A3



* AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité

Figure III.4 : " réaliser la mise en sécurité des ensembles" noeud A3-5

I.2 LEGISLATION ET SECURITE

I.2.1 Code du travail

Elaborée pour des applications non spécifiquement robotiques la section VIII du code du travail (décret n°80-543 du 5 juillet 1980) article 233-94 à 233-107 nous impose certaines restrictions qu'il serait, autant que possible, judicieux voir obligatoire de prendre en compte lors de notre conception :

- Art. R. 233-96. Les dispositifs, équipements et composants de commande des machines et appareils doivent être conçus, construits et disposés de manière à interdire :
 - toute mise en marche intempestive des matériels notamment lors du rétablissement de l'énergie motrice après une coupure accidentelle de celle-ci;
 - toute possibilité de mise en marche des machines autrement que par une action volontaire sur les organes de service prévus à cet effet.
- Art. R. 233-97. Une défaillance, une panne ou une détérioration du système d'alimentation en énergie ou du circuit de commande des machines et appareils ne doivent :
 - ni provoquer la mise en marche intempestive d'un élément mobile de la machine;
 - ni empêcher l'arrêt automatique ou manuel des éléments mobiles quels qu'ils soient;
 - ni rendre inefficaces les dispositifs de protection des éléments mobiles.
- Art. R. 233-98. Un dispositif de séparation doit permettre après arrêt d'isoler les machines et appareils de toutes leurs sources d'alimentation en énergie.
- Art. r. 233-99. L'action maintenue sur les organes de service ayant une fonction de mise en marche ne doit, en aucun cas, s'opposer aux ordres d'arrêt.

Il apparaît clairement que pour notre application où les dispositifs de sécurité et de commande sont gérés par un même calculateur les contraintes émises aux articles R. 233-97 et R 233-96 ne peuvent être totalement respectées. Nous pouvons toutefois envisager un découplage physique des systèmes de sécurité et de commande du robot (alimentations en énergie et systèmes de contrôle/commande séparées) ainsi que l'ajout de dispositifs de freinage tels que les freins à manque de courant.

I.2.2 Normes françaises

L'AFNOR, au travers de la norme NF EN 775 [AFNO 93], énonce les principes généraux de sécurité relatifs à la conception et à l'utilisation de robots manipulateurs industriels. Si le principe des robots de coopération n'y est pas abordé, ce qui vise à rendre le volume d'atteinte du robot inaccessible à l'opérateur en mode de fonctionnement automatique, nous pouvons quand même citer certains principes :

- § 6.4.5 Pendant

- c) Le pendant doit comporter un dispositif d'arrêt d'urgence.
- d) Tout pendant, destiné à la commande des mouvements du robot par le personnel se trouvant à l'intérieur de l'espace contrôlé, doit comporter des organes de service à action maintenue.

- § 6.6 Mouvements d'urgences

Il doit être prévu des moyens pour mouvoir les axes du robot en cas d'urgence. Ces moyens peuvent être par exemple:

- a) hors puissance:
 - valves de dépressurisation des systèmes sous pression;
 - relâchement manuel des freins motorisés, sous réserve qu'il y ait équilibrage.
- b) sous puissance
 - possibilité de commande manuelle des soupapes/entraîneurs motorisés;
 - possibilité de commander des contre-mouvements.

- § 6.9 Perturbations

La conception et la construction des robots doivent incorporer de bonnes pratiques industrielles pour réduire les effets des perturbations qui peuvent affecter la sécurité. Ces perturbations peuvent inclure les perturbation électromagnétiques, les décharges électrostatiques, les perturbations radioélectriques, la chaleur, la lumière, les vibrations, etc.

II ANALYSE DES RISQUES D'ACCIDENTS

II.1 CLASSIFICATION GENERALE DES DEFAILLANCES

Non dangereuse : elle n'influe pas sur la sécurité, mais peut néanmoins avoir une incidence sur le comportement global.

Non directement dangereuse : prise isolément, elle n'a pas d'incidence mais avec d'autres la défaillance peut entraîner un risque.

Dangereuse : elle entraîne un risque immédiat à son apparition.

Les distinctions entre les trois classes ne sont pas franches.

II.2 LES PRINCIPAUX ACCIDENTS

Accidents de type non fonctionnement ou dysfonctionnement :

- mouvement inadéquat
- pas de mouvement
- mouvement "aléatoire"

Accident de type choc corporel ou matériel :

- choc d'un segment ou de l'organe terminal avec l'opérateur
- choc et/ou bris d'objet

Une distinction, bien qu'a priori non évidente, est faite entre ces deux classes d'accident du fait des moyens à mettre en oeuvre pour les détecter ou les inhiber.

Une analyse exhaustive des chemins conduisant à l'accident [VOGR 86] [BOP 92] ayant déjà été menée, qui sera complétée par une analyse de la matrice de criticité résultant (figure III.5) [MONC 87], nous nous limiterons au cours de cette étude aux moyens et aux concepts à mettre en oeuvre en vue d'améliorer :

- la sécurité positive : conception de dispositif telle qu'une défaillance n'altère pas la sécurité:
- une simple défaillance ne doit pas être la cause de dégradation du niveau de sécurité du système,

- une défaillance non détectée ne doit pas, en conjonction avec l'arrivée d'une deuxième défaillance, être la cause de risque supplémentaire.
- la sécurité intrinsèque : un composant est dit à sécurité intrinsèque lorsqu'il est capable de détecter ses propres défaillances ou lorsque ces dernières sont telles qu'elles provoquent toujours le même comportement du composant.

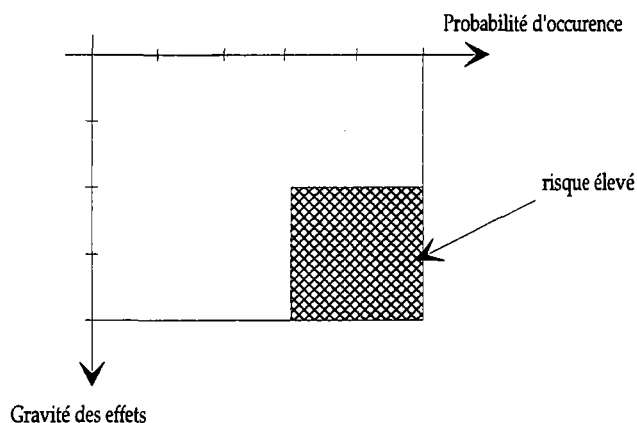


Figure III.5 : matrice de criticité

III CONCEVOIR UN DISPOSITIF A SECURITE INTRINSEQUE

III.1 FIABILISATION DE LA COMMANDE

Notre architecture matérielle étant figée (carte processeur) dans le but de minimiser les coûts, nous ne nous intéresserons donc pas aux techniques d'évitement et de contrôle des défauts faisant intervenir une conception électronique particulière telle que le dynamisme, le contrôle d'accès aux périphériques, l'analyse de signature [SCHW 86] ou la redondance, sujet néanmoins abordé dans le cadre de l'étude d'évitement de collision. Nous utiliserons donc :

- des auto-tests : procédures logicielles testant à un instant donné le bon fonctionnement d'une ressource du dispositif,
- des auto-surveillances : mécanismes logiciels surveillant en permanence ou de manière échantillonnée le bon fonctionnement d'un dispositif.

III.1.1 Contrôle de l'exécutif

Il est nécessaire de réaliser lors du démarrage du système un auto-test s'assurant de la validité du programme qui sera logé en mémoire morte de type EPROM, PROM ou ROM pour des raisons de fiabilité. Ce contrôle pourra être de type:

- checksum : l'ensemble des octets mémoires est additionné en tenant compte de la retenue et le résultat obtenu est comparé à la valeur de référence (figure III.6),

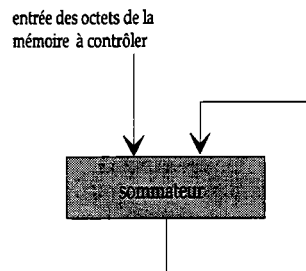


Figure III.6 : checksum

- C.R.C. (Cyclic Redondancy Check) : l'ensemble des données à valider est compacté par l'intermédiaire d'un registre à décalage de 16 bits bouclé et le résultat est comparé de même que pour le checksum à la valeur de référence (figure III.7).

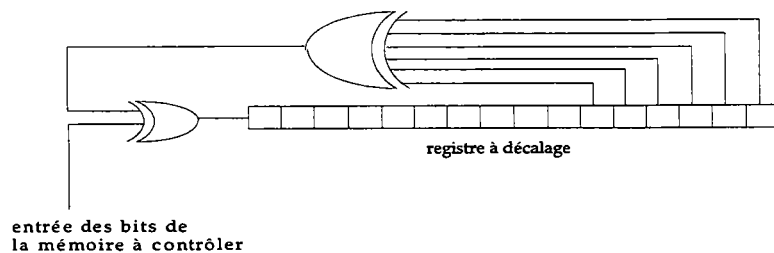


Figure III.7 : C.R.C.

P. Charpentier [CHAR 91] a mis en évidence l'intérêt prédominant du checksum par son pouvoir de détection identique à celui du CRC avec un temps d'exécution quatre fois inférieur.

III.1.2 Contrôle des données en mémoire morte

Un contrôle de ces données peut être effectué en dupliquant les données en mémoire et en effectuant

une comparaison de ces valeurs avant utilisation. Pour la vérification de blocs de données on pourra appliquer les méthodes énoncées en III.1.1.

Tous les emplacements mémoires non utilisés seront affectés d'un branchement vers un sous-programme de mise en sécurité du dispositif pour palier à un déroutement intempestif du programme exécuté par le microprocesseur.

III.1.3 Contrôle des données en mémoire vive

S'il est aisé de vérifier par un auto-test de type écriture/lecture le bon fonctionnement de la mémoire vive, il n'en reste pas moins nécessaire de vérifier la validité des données en cours de fonctionnement. Une telle auto-surveillance est réalisable :

- en adjoignant à la donnée une information complémentaire de type bit de parité ou valeur codée,
- en dupliquant la donnée et en comparant les deux valeurs lors de la lecture.

III.1.4 Généralités et validité des dispositifs

Comme une part non négligeable des défauts logiciels provient d'erreurs de programmation, il sera intégré, pour la phase de déverminage, une procédure de type error-handler assurant la localisation de l'instruction qui a provoqué l'erreur.

Pour mesurer l'influence des contrôles envisagés et le niveau de sécurité obtenu il sera nécessaire de mesurer:

- le taux de couverture : rapport exprimé en pourcentage entre le nombre de défauts détectés **N_{dd}** par le système analysé et le nombre total de défauts pouvant survenir **N_{dt}**,
- le taux d'insécurité : rapport exprimé en pourcentage entre le nombre de défauts graves ou dangereux **N_{dg}** pour le système analysé et le nombre total de défauts **N_{dt}** pouvant survenir.

A cet effet, l' INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) [GERA 89] a développé un dispositif le "DEF-injector" capable de générer un défaut que ce soit en mémoire, sur le bus ou sur le processeur et d'analyser la réaction de la cible. Une norme relative à la sécurité des robots de coopération

devrait exiger des taux de couverture et d'insécurité extrêmes ainsi qu'une résistance minimale aux rayonnements magnétiques ou hertziens.

III.2 CAPTEURS ET PROCÉDES D'ÉVITEMENT DE COLLISION

III.2.1 Capteurs

III.2.1.1. Ultra-sons

Basé sur la mesure du temps entre l'émission et la réception (temps de vol) ce qui permet de définir la distance à l'obstacle, ce type de capteur est perturbable (échos, température, absorption..) et ne permet pas une détection tridimensionnelle.

III.2.1.2 Infra-rouge

Ces capteurs peuvent être utilisés selon un principe d'émission/réception ou reposer sur la détection des radiations émises par les corps chauds. Des études visant à la détection d'objets dans une surface plane triangulaire [PINO 95] ou plus généralement au voisinage d'un manipulateur [CHEU 92] ont été menées mais se révèlent d'une mise en œuvre fastidieuse.

III.2.1.3 Micro-ondes

Ces capteurs utilisent la mesure de déphasage entre le signal émis et le signal reçu, ces capteurs sont peu perturbables [GHOS 90] mais ne peuvent donner d'informations tridimensionnelles sûres.

III.2.1.4 Capteurs capacitifs

Le principe est de mesurer la variation de capacité d'un condensateur formé par la terre, la masse, et par des éléments métalliques implantés sur le robot lors de la présence d'une personne ou d'un objet dans le champ électrique [POTT 92]. Ces capteurs présentent un pouvoir de détection maximal variant de

40 à 60 cm. L'emploi de tels capteurs semble adéquat pour notre application étant donné leur facilité de mise en oeuvre et leur aptitude à détecter tout type de matériaux dans un volume défini.

III.2.1.5 Peaux sensibles

Constitué généralement d'un film magnétorésistif de caoutchouc et de mylar dans lequel on mesure la variation magnétique lors d'un contact, ou d'un feutre de fibres conductrices dont on mesure la variation de résistance [PRUS 90], cette classe de capteurs permet seulement de déterminer s'il y a choc mais en aucun cas de prévenir un contact. Ces procédés ne peuvent être envisagés que dans la mesure où il est possible d'arrêter le robot sur une courte distance (quelques mm) ou de dévier sa trajectoire rapidement.

III.2.1.6 Vision et reconnaissance de forme

Cette technique vise généralement à extraire une représentation tridimensionnelle de l'environnement à partir d'images en deux dimensions. Il est alors possible, après traitement, de localiser le bras manipulateur et ainsi de définir la distance entre l'homme ou l'objet et le robot [MOTA 90].

Outre ses capacités à prévenir un choc, cette méthode nous apporte une redondance matérielle [SCWE 84] quant à la localisation du bras, pour améliorer la sécurité intrinsèque du manipulateur (figure III.8).

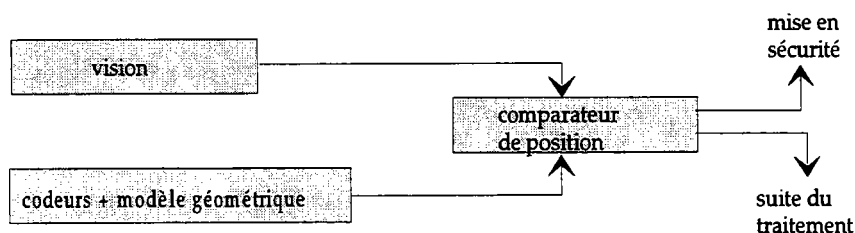


Figure III.8 : redondance hétérogène d'ordre 2 utilisant des technologies différentes

Il faut noter que ce type de matériel nous permettrait aussi de localiser des objets en vue de saisies automatiques.

III.2.2 Procédé d'évitement de collision

Outre les capteurs précités, il est possible de minimiser les risques d'accidents en créant des zones de sécurité autour de l'utilisateur. Lors de la pénétration d'une de ces zones par l'organe terminal, le calculateur doit diminuer automatiquement les vitesses maximales en translation et en rotation du bras manipulateur et, si le robot est en commande manuelle, il devra demander à l'utilisateur de revalider ses commandes. La taille des zones présentées à la figure III.9 sera fonction :

- des vitesses maximales du robot (**V_{max}**),
- des capacités d'arrêt du manipulateur (**D_{arr}**) [SAIN 91],
- du temps de réaction nécessaire à l'handicapé pour enclencher un arrêt d'urgence (**T_{reac}**).

La distance minimale **D_{mini}** entre l'opérateur et l'enveloppe de sécurité s'exprime par l'équation suivante :

$$D_{\text{mini}} = V_{\text{max}} * T_{\text{reac}} + D_{\text{arr}}$$

Pour notre application il est possible de ne définir que la zone englobant la tête de l'handicapé car un choc dans une autre zone ne saurait être dangereux. En effet, du fait de la faible puissance de la motorisation des articulations et des déformations élastiques (compliance passive) des différents segments en cas de choc, il est possible de détecter rapidement la rupture du mouvement commandé et de l'interrompre, ceci entraînant un choc mou donc peu dommageable.

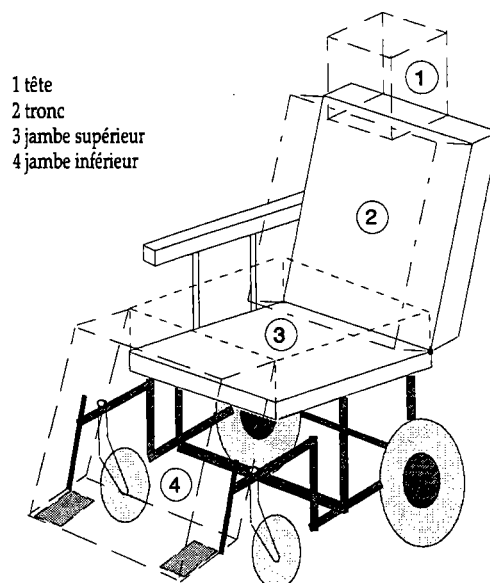


Figure III.9 : zones de sécurité

Ces zones de sécurité seront configurables par l'ergothérapeute responsable du système étant donné les différences notoires des morphologies et des postures des handicapés.

III.3 MAINTENANCE - AUTODIAGNOSTIC

III.3.1 Objectifs

Dans le but d'augmenter la disponibilité du robot il nous paraît nécessaire d'appliquer certaines règles de maintenance. Notre objectif est de concevoir un procédé permettant d'établir une maintenance conditionnelle (figure III.10) et d'homogénéiser les différents temps de bon fonctionnement (TBF) des articulations.

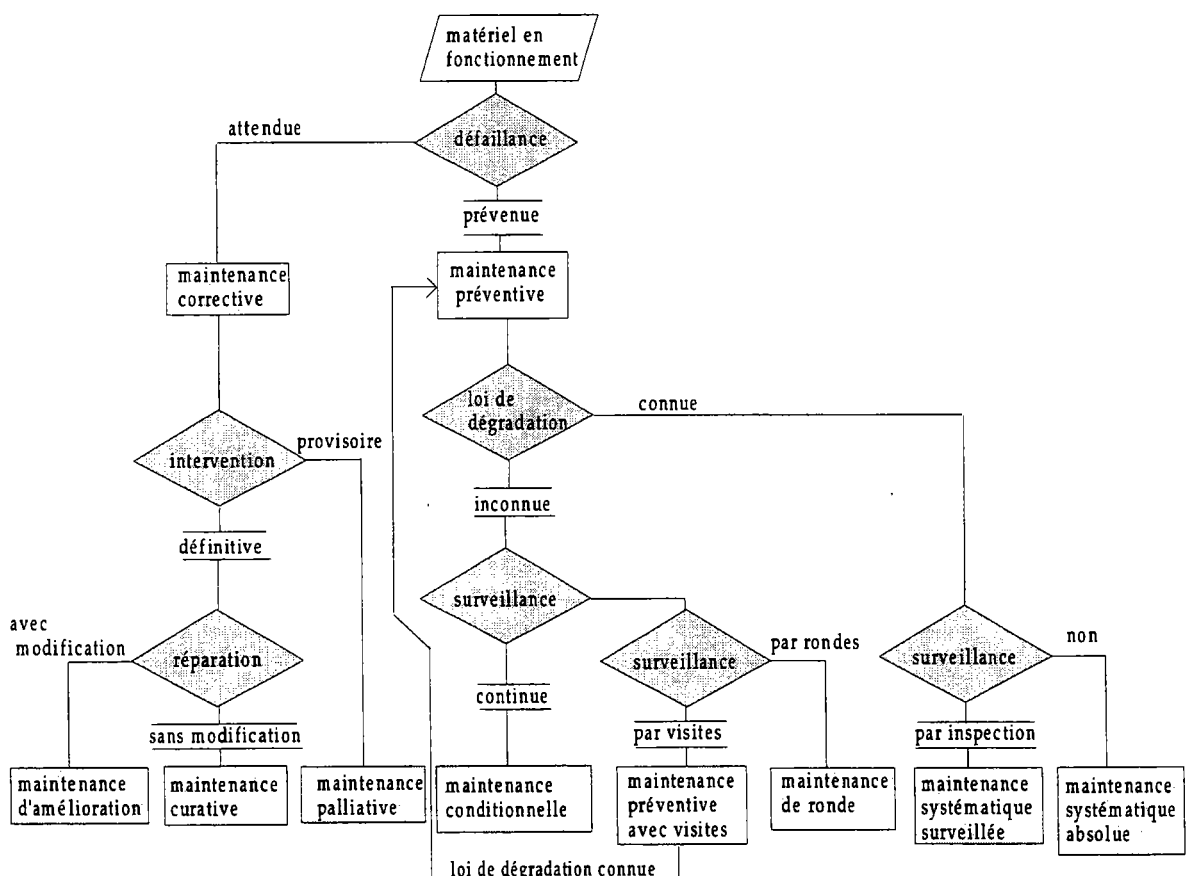


Figure III.10 : différentes maintenances

III.3.2 Principes de mise en oeuvre

Connaissant les modèles généraux d'apparition des défaillances (figure III.11), nous voulons obtenir les modèles spécifiques à chaque axe.

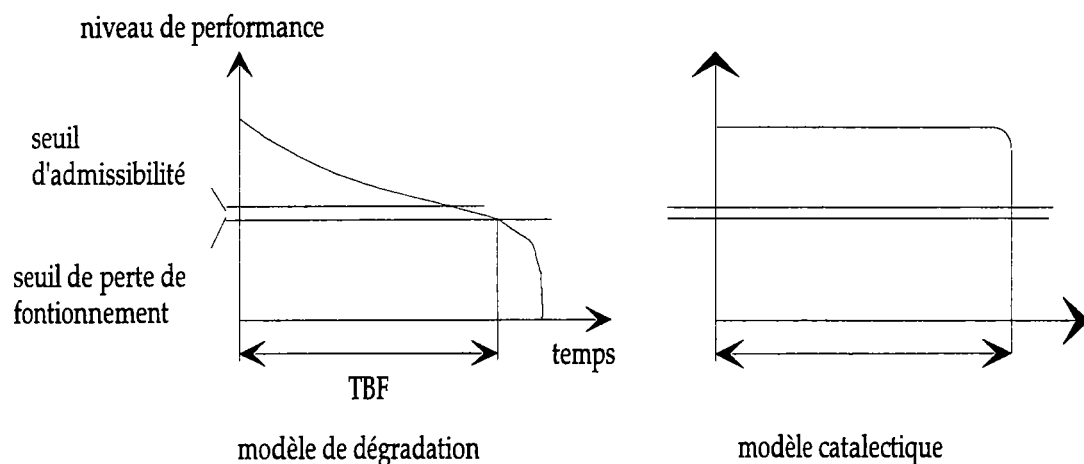


Figure III.11 : modèles d'apparition des défaillances

Pour ce faire, au cours du cycle de vie, nous analyserons des mouvements automatiques tels que le rangement en position sous l'accoudoir ou le déploiement en position pseudo-scara, en les comparant à ceux obtenus lors de la mise en service (figure III.12).

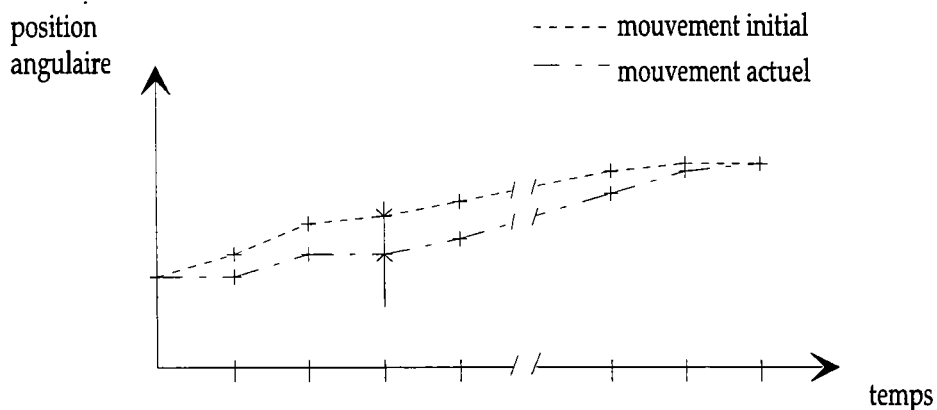


Figure III.12 : analyse du mouvement

Pendant le mouvement, on peut déterminer sur chaque articulation et à tout instant d'échantillonnage T_i une variation de position angulaire puis calculer une erreur angulaire moyenne pour la trajectoire complète. L'étude de cette erreur moyenne au cours du cycle de vie du manipulateur nous permettra de définir pour chaque axe, avec son ensemble motorisation réduction, l'évolution spécifique des défaillances et donc les différents TBF et seuils de perte de fonctionnement.

Ayant obtenu ces résultats, il sera possible de comparer les TBF et, s'il existe une différence conséquente entre ces temps, de revoir la conception de certains axes en vue d'égaliser les durées de vie.

La connaissance des seuils de perte de fonctionnement nous permettra de définir des seuils d'admissibilité qui, une fois atteints, enclencheront une procédure signalant à l'utilisateur la nécessité d'entreprendre une réparation de son manipulateur (maintenance conditionnelle).

Il est à noter que cette méthode permet aussi une détection des points durs par l'apparition d'écart de position anormalement élevés par rapport à la courbe de référence.

IV. CONCLUSION

Toutes les méthodes présentées permettent d'améliorer sensiblement la sécurité intrinsèque des bras manipulateurs embarqués ou non sur fauteuil roulant électrique sans introduire pour autant des coûts supplémentaires car, à l'exception des capteurs d'évitement de collision, tous ces principes reposent sur des applications logicielles.

Une norme relative aux principes de sécurité lors de la conception de téléthèses ou plus généralement de robot de coopération doit préconiser l'emploi des principes de sécurité précédemment énoncés et doit s'inspirer des réglementations en usage relatives à la conception de FRE :

- vitesses maximales réglables,
- dispositif d'arrêt d'urgence,
- système de freinage,
- ...

Il devra rester à l'esprit, lors de la mise en sécurité de tels systèmes, que toutes ces méthodes ne doivent pas limiter la personne dans ses utilisations potentielles du manipulateur mais simplement la prévenir et l'avertir des risques encourus. Ainsi, l'utilisateur pourra se gratter la figure s'il le désire au risque, en cas

de fausse manipulation , de se blesser .

A partir de cette étude, nous nous proposons, de développer au chapitre suivant une méthode originale de génération automatique de trajectoire avec contraintes d'environnement qui satisfasse aux notions d'évitement de collisions énoncées.

CHAPITRE IV

GENERATION STOCHASTIQUE DE TRAJECTOIRES EN TEMPS REEL AVEC CONTRAINTES D'ENVIRONNEMENT

I INTRODUCTION

Comme nous l'avons montré au chapitre relatif à la sécurité, il existe un réel besoin au niveau de la détection de collision et de l'évitement de contacts entre le manipulateur et son environnement, l'opérateur y étant inclus. Partant de cette constatation, nous proposons une méthode originale permettant la génération en temps réel de trajectoires sous contraintes d'environnement pour des robots redondants.

Les caractéristiques de cette méthode permettent à l'opérateur de manoeuvrer dans un repère cartésien à travers un environnement encombré ou d'utiliser des modes de fonctionnement automatiques hors des postes de travail aménagés où l'environnement est prédéfini et statique.

La première partie de ce chapitre présente les différentes méthodes permettant de gérer les déplacements de robots en présence d'obstacles. Ces méthodes sont différenciées selon qu'elles traitent des problèmes de type "évitement de collisions" ou de type "génération de trajectoires" et selon la connaissance ou la non connaissance de l'environnement.

La seconde partie décrit les modèles et les hypothèses de travail relatifs à notre méthode .

Dans la troisième partie nous présentons la méthode générale de génération stochastique de trajectoires en temps réel sans contraintes d'environnement pour des robots redondants ou non. Cette méthode présente des avantages évidents pour la gestion de robots présentant de grandes redondances.

La quatrième partie propose deux méthodes qui permettent de diminuer sensiblement les temps de calculs nécessaires à la génération de trajectoires en temps réel.

Au cours de la cinquième partie nous présentons l'influence du degré de redondance sur la méthode précédemment énoncée. Cette partie permet de poser les limites de la méthode en ce qui concerne la génération de trajectoires en temps réel pour les robots de grandes redondances.

La sixième partie propose d'appliquer la méthode de génération en temps réel de trajectoires à une stratégie globale d'évitement d'obstacles. Différentes stratégies sont envisagées selon le type du capteur employé.

Enfin, nous concluons en présentant les avantages et les inconvénients de la méthode proposée et en indiquant certaines idées qu'il serait souhaitable d'approfondir.

II ETAT DE L'ART

Dans un premier temps il est nécessaire de différencier les notions d'évitement de collisions des notions de génération de trajectoire avec contraintes d'environnement.

La première méthode consiste à éviter tout contact entre le robot et son environnement en suivant une trajectoire définie. Différentes méthodes sont utilisées selon que l'environnement est connu ou non. J.P. Novak [NOVA 93] propose une application constituée d'un robot PUMA dont les différents segments sont couverts par un ensemble de capteurs capacitifs. Le principe général de cette méthode consiste à diminuer les vitesses articulaires du manipulateur en fonction de la proximité des obstacles. En considérant un robot doté de n segments avec sur chaque segment m capteurs, il est possible de calculer pour chaque segment :

$$\Delta z = J_s J_q \Delta q = J \Delta q \text{ avec } J = J_s J_q$$

avec

Δz = vecteur de dimension m représentant la proximité de l'obstacle

J_s = matrice $m \times 6$ représentant la transformation différentielle capteurs/repère de base

J_q = matrice $6 \times n$ représentant la transformation différentielle repère de base/articulations

Δq = vecteur de dimension n représentant la perturbation associée aux vitesses articulaires

En réalisant ce calcul sur les n segments on obtient :

$$\Delta q_j = \max_{i=1, \dots, m} \left[\frac{\Delta z_i}{J_{ij}} \right]$$

Le vecteur Δq ainsi calculé permet de corriger les vitesses articulaires des différentes articulations de manière à limiter les vitesses de déplacement vers les obstacles en fonction de leur proximité. R. Colbaugh [COLB 89] propose, pour réaliser un évitement de collision à l'aide de capteurs, d'établir un ensemble de contraintes sous formes d'inéquations cinématiques et de vérifier la validité de ces inéquations pendant que l'organe terminal poursuit une trajectoire prédéterminée (figure IV.1). Les inéquations sont posées de manière à inhiber les déplacements des différents segments vers les obstacles, ce qui est rendu possible par la gestion des redondances du manipulateur.

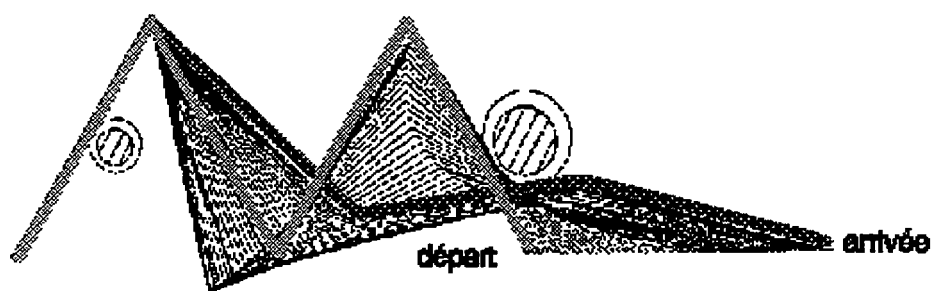


Figure IV.1 : configuration du robot en présence de deux obstacles [COLB 89]

Dans le cadre d'applications où l'environnement est prédéterminé C. Shaffer [SHAF 91] [SHAF 92] établit une méthode basée sur la modélisation du manipulateur et de son environnement par octree qui consiste en une décomposition de l'espace libre et non libre en cellules cubiques. Pour permettre de détecter un risque de collision, le volume des segments du manipulateur est virtuellement augmenté en fonction de leur vitesse de déplacement. La détection d'un risque de collision est déterminée lorsque une ou plusieurs cellules sont communes aux manipulateurs virtuels et à un obstacle. Cette méthode a été utilisée pour éviter les collisions entre deux manipulateurs coopérant et leur environnement.

En ce qui concerne les méthodes de génération de trajectoires avec contraintes d'environnement, il est tout d'abord nécessaire de définir le cadre de l'application. En effet, les déplacements peuvent s'effectuer dans un environnement complètement déterminé ou non. Si l'environnement est spécifié, il est possible de déterminer, en temps réel ou non, une trajectoire sans collision après modélisation de l'espace accessible du manipulateur (méthodes globales). La méthode de modélisation de l'environnement adoptée par J. Barraquand [BARR 90] [BARR 91] est de type champ de potentiel. Un potentiel attractif est associé à la cible à atteindre tandis qu'un potentiel répulsif est associé aux différents obstacles. L'auteur propose de construire et d'explorer un graphe connectant les minima locaux de la fonction de potentiel. Le graphe est exploré par une méthode aléatoire qui échappe aux minima locaux (figure IV.2). Cette méthode permet de gérer de grandes redondances.

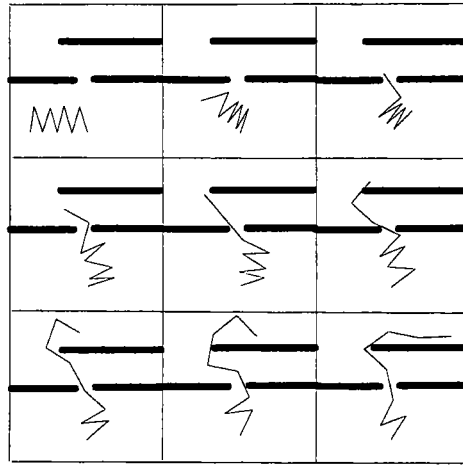


Figure IV.2 : chemin généré pour un manipulateur à 8 degrés de liberté [BARR 90]

L. Kavraki [KAVR 94] propose une stratégie scindée en deux phases qui sont chronologiquement :

- la création d'un réseau constitué aléatoirement de configurations accessibles vérifiant les conditions de non collision,
- la recherche d'un chemin dans le réseau ainsi constitué entre le noeud initial (configuration initiale) et le noeud final (configuration finale).

La première phase est réalisée une seule fois en fonction de l'environnement tandis que la phase de planification est réitérée pour chaque déplacement. Cette méthode permet de gérer de grandes redondances car dans la seconde phase elle n'utilise aucun modèle du manipulateur.

Si l'environnement n'est pas déterminé une des stratégies utilisées (méthodes locales) est celle dite du contournement d'obstacles [SUN 87] [LUME 87] qui consiste à suivre l'enveloppe de l'obstacle tant que le chemin vers la cible n'est pas directement accessible (figure IV.3). Cette méthode a été développée pour un robot non redondant dont les segments sont couverts d'un ensemble d'émetteurs/récepteurs infrarouge.

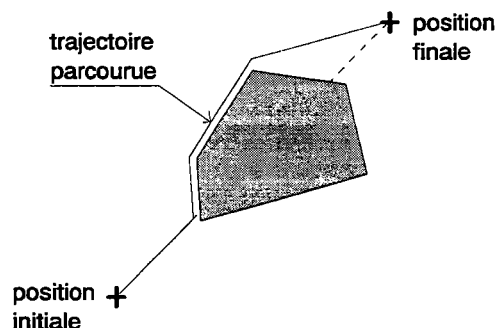


Figure IV.3 : contournement d'obstacle

Dans le même cadre d'application, P. Tournassoud [TOUR 92] propose la méthode dite des contraintes.

Cette méthode consiste à effectuer à chaque pas de discrétisation les étapes suivantes :

- calculer les distances critiques à partir d'une carte capteur ou d'un modèle CAO de l'environnement,
- construire un modèle conservatif de l'espace libre dans l'espace des configurations,
- se rapprocher de la consigne en restant dans l'espace libre en respectant des contraintes qui imposent :
 - la minimisation des vitesses normales aux obstacles,
 - la limitations des vitesses de déplacement,
 - la prise en compte des butées mécaniques.

Une autre technique parmi les méthodes locales est la méthode des potentiels [KHAT 86]. Un potentiel répulsif, d'influence limité, est associé à chaque obstacle détecté. Ce potentiel crée une force fictive de répulsion sur le robot, ce qui a pour effet de dévier sa trajectoire et d'engendrer un effet de rebond.

Comme il est possible de le constater, les dernières méthodes énoncées peuvent être utilisées pour notre application où l'environnement n'est généralement pas déterminé et où l'utilisation d'un robot redondant est préconisée [BOP 92]. Cependant nous proposons une méthode novatrice dont les avantages seront énoncés en conclusion de ce chapitre.

III HYPOTHESES DE TRAVAIL

III.1 MODELE ROBOT

Pour notre étude nous considérons d'une manière générale tout robot constitué de n liaisons (pivots ou glissières) redondant ou non, et doté de $n-1$ segments reliant deux liaisons consécutives et d'un segment reliant la dernière liaison à l'organe terminal. Une représentation générale du paramétrage d'un manipulateur n axes est donnée à la figure IV.4 ($n=5$).

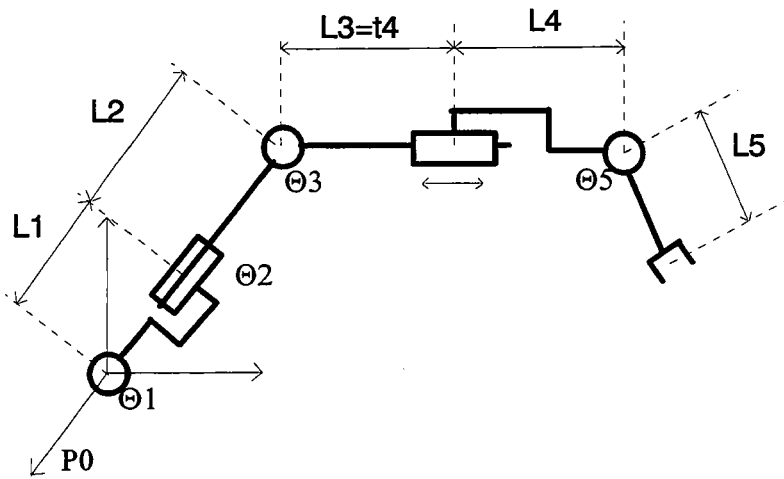


Figure IV.4 : paramétrage d'un manipulateur

Notre objectif est de mener le robot d'une posture initiale I , définie dans \mathbb{R}^6 , vers une posture finale ou cible C définie elle aussi dans \mathbb{R}^6 . Nous avons donc comme données initiales:

$$I = \begin{Bmatrix} \psi_I \\ \theta_I \\ \rho_I \\ PX_I \\ PY_I \\ PZ_I \end{Bmatrix} \quad C = \begin{Bmatrix} \psi_C \\ \theta_C \\ \rho_C \\ PX_C \\ PY_C \\ PZ_C \end{Bmatrix}$$

ou ψ, θ et ρ sont les angles d'Euler associés à l'organe terminal définis selon les conditions usuelles et, PX, PY et PZ représentent la position cartésienne du centre de l'organe terminal par rapport au repère de base.

Nous noterons :

$\Delta\theta_i$: variation angulaire associée à la liaison pivot d'indice i

ΔT_i : variation de la translation associée à la glissière d'indice i

III.2 MODELE CAPTEUR

Le déplacement entre les postures I et C s'effectue dans un environnement non déterminé qui peut donc contenir un nombre indéfini d'obstacles influant sur les déplacements du manipulateur. Ces obstacles sont de formes et de matières quelconques.

Par la suite, nous supposerons l'utilisation de capteurs qui délivrent une information de distance

DC normale aux segments auxquels ils sont associés (figure IV.5).

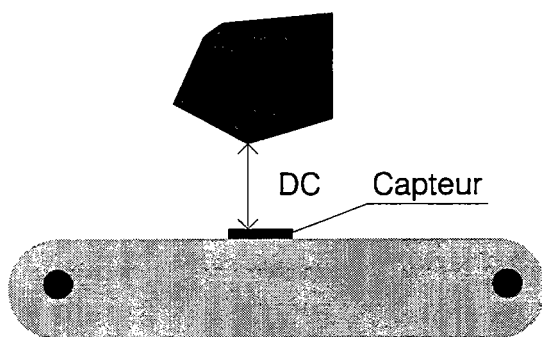


Figure IV.5 : distance "capteur/obstacle"

Nous supposons que le temps minimal d'établissement de l'information capteur est compatible avec les vitesses et les temps d'arrêt du manipulateur. Cette condition est nécessaire pour éviter tout contact entre le manipulateur et son environnement.

IV GENERATION STOCHASTIQUE EN TEMPS REEL DE TRAJECTOIRE SANS CONTRAINTE D'ENVIRONNEMENT

IV.1 METHODE GENERALE

Nous proposons ici, une méthode stochastique permettant de mener un robot d'architecture quelconque d'une posture I en une posture C . Cette méthode, de mise en oeuvre aisée, n'utilise que le modèle géométrique direct du manipulateur.

Le manipulateur étant dans une posture P , le principe consiste à associer à chaque articulation une variation aléatoire ($\Delta\Theta_i$ ou ΔT_i) et à vérifier, à l'aide du modèle géométrique direct, si la nouvelle posture obtenue P' se rapproche de la posture cible C . Pour que le déplacement de P vers P' soit effectué, il faut alors que le système d'inéquations suivant soit vérifié:

$$\begin{cases} D_{\text{trans}} \mathbf{P} > D_{\text{trans}} \mathbf{P}' & (1) \\ D_{\text{rot}} \mathbf{P} > D_{\text{rot}} \mathbf{P}' & (2) \end{cases}$$

avec:

$$D_{\text{trans}} \mathbf{P} = \sqrt{(PX_C - PX_P)^2 + (PY_C - PY_P)^2 + (PZ_C - PZ_P)^2}$$

$$D_{\text{trans}} \mathbf{P}' = \sqrt{(PX_C - PX_{P'})^2 + (PY_C - PY_{P'})^2 + (PZ_C - PZ_{P'})^2}$$

$$D_{\text{rot}} \mathbf{P} = \sqrt{(\rho_C - \rho_P)^2 + (\theta_C - \theta_P)^2 + (\psi_C - \psi_P)^2}$$

$$D_{\text{rot}} \mathbf{P}' = \sqrt{(\rho_C - \rho_{P'})^2 + (\theta_C - \theta_{P'})^2 + (\psi_C - \psi_{P'})^2}$$

L'inéquation (1) représente la condition d'évolution en position vers la posture \mathbf{C} tandis que l'inéquation (2) représente celle d'évolution vers l'orientation définie par la posture \mathbf{C} .

L'inéquation (1) est vérifiée si l'organe terminal se déplace dans le volume des tirages valides ($V_{\text{ti.va.}}$). Ce volume étant défini comme l'intersection de (figure IV.6):

- V_{ac} volume accessible par l'organe terminal au cours du déplacement aléatoire
- et de S_{ad} sphère d'admissibilité centrée en $\mathbf{O}(PX_C, PY_C, PZ_C)$ de rayon $D_{\text{trans}} \mathbf{P}$ vers laquelle le robot doit se déplacer pour vérifier l'inéquation (1)

nous avons donc : $V_{\text{ti.va.}} = V_{\text{ac}} \cap S_{\text{ad}}$.

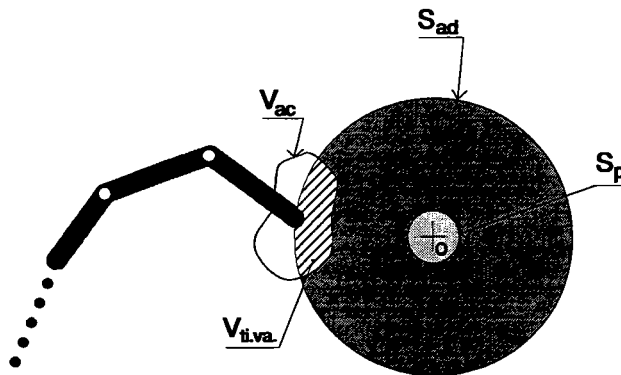


Figure IV.6 : volume des tirages valides

La sphère de proximité S_p représente le volume final dans lequel l'organe terminal doit se situer. Cette sphère est centrée en \mathbf{O} et a pour rayon Prec_{pos} (précision en position) initialement déterminée selon les besoins de l'application considérée.

D'une façon générale le déplacement sera arrêté si :

$$\begin{cases} D_{\text{trans}} P < \text{Pr ec}_{\text{pos}} & (3) \\ D_{\text{rot}} P < \text{Pr ec}_{\text{or}} & (4) \end{cases}$$

où Pr ec_{or} représente la précision en orientation désirée.

Le système formé des inéquations (1) et (2) oblige à une minimisation simultanée des distances en translation et en rotation. Ceci mène à des cas de blocage notamment si une des inéquations (3) ou (4) est vérifiée. Pour remédier à ce problème, nous proposons, pour valider un déplacement de P vers P' , de vérifier la minimisation d'une somme pondérée des distances de translation et de rotation telle que :

$$D_{\text{trans}} P + \frac{D_{\text{transtot}}}{D_{\text{rottet}}} \cdot D_{\text{rot}} P > D_{\text{trans}} P' + \frac{D_{\text{transtot}}}{D_{\text{rottet}}} \cdot D_{\text{rot}} P' \quad (5)$$

avec

$$D_{\text{transtot}} = \sqrt{(PX_C - PX_I)^2 + (PY_C - PY_I)^2 + (PZ_C - PZ_I)^2}$$

$$D_{\text{rottet}} = \sqrt{(\rho_C - \rho_I)^2 + (\theta_C - \theta_I)^2 + (\psi_C - \psi_I)^2}$$

La pondération utilisée vise à une homogénéisation des distances en translation et en rotation car ces distances ne se situent pas dans de mêmes ordres de grandeur.

La figure IV.7 présente l'algorithme de la méthode ainsi modifiée :

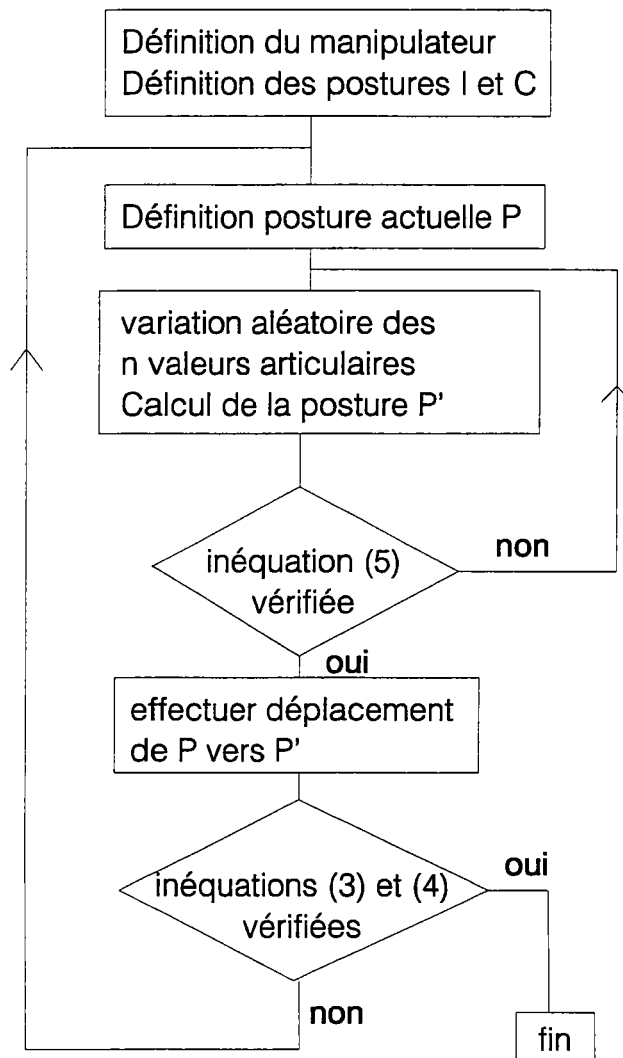


Figure IV.7 : algorithme de la méthode modifiée

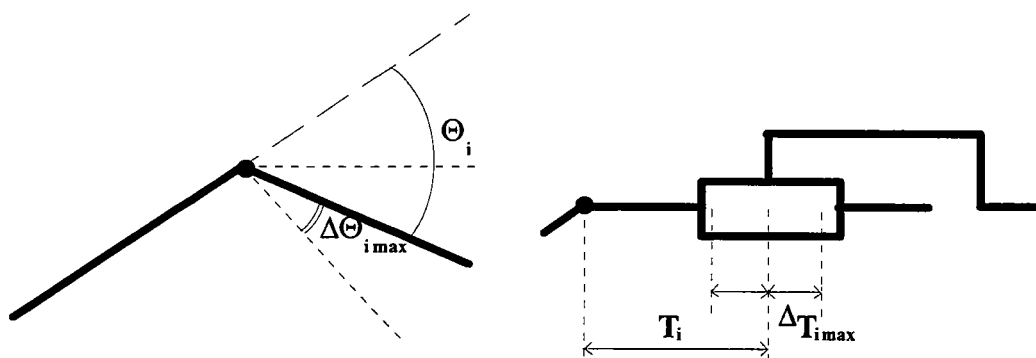
IV.2 OBTENTION DES $\Delta\theta_i$ ET ΔT_i

Les variations aléatoires $\Delta\Theta_i$ et ΔT_i sont obtenues aléatoirement en respectant les deux inéquations :

$$\|\Delta T_i\| < \Delta T_{i\max}$$

$$\|\Delta\Theta_i\| < \Delta\Theta_{i\max}$$

Les variations articulaires maximales $\Delta\Theta_{i\max}$ et $\Delta T_{i\max}$ (figure IV.8) sont initialement déterminées afin de progresser finement à travers l'ensemble des obstacles, de telle façon qu'elles soient compatibles avec la précision désirée au point d'arrivée.

Figure IV.8 : $\Delta\Theta_{i_{max}}$ et $\Delta T_{i_{max}}$

Le choix des amplitudes influe sensiblement sur le volume accessible par l'organe terminal au cours du tirage aléatoire. En augmentant les variations articulaires maximales le volume $V1_{ti.va.}$ devient $V2_{ti.va.}$ avec $V1_{ti.va.} \subset V2_{ti.va.}$ (figure IV.9). Le fait d'augmenter ce volume permet de progresser plus rapidement vers O mais ceci a pour effet de générer une trajectoire moins lissée (figure IV.10).

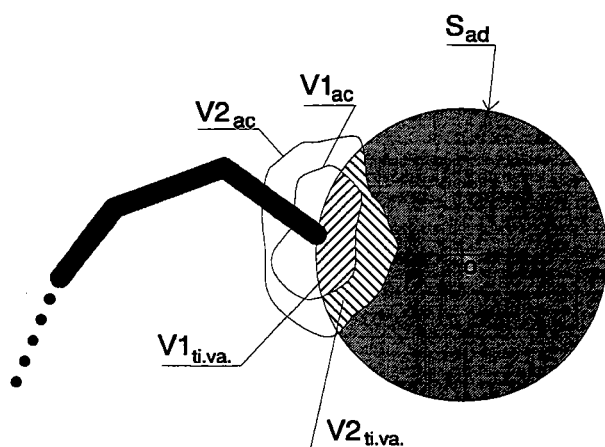


Figure IV.9 :

influence de $\Delta\Theta_{i_{max}}$ et $\Delta T_{i_{max}}$ sur $V_{ti.va.}$

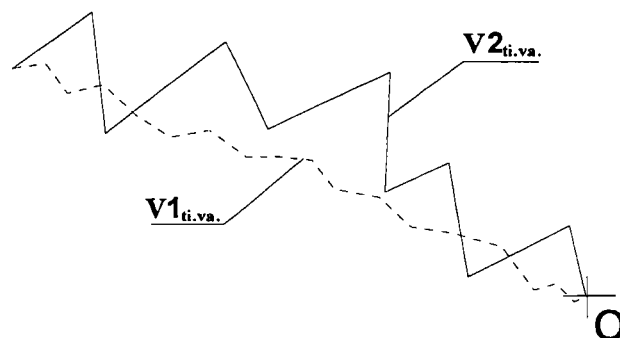


Figure IV.10 :

influence de $\Delta\Theta_{i_{max}}$ et $\Delta T_{i_{max}}$ sur la trajectoire

IV.3. RESULTATS / EXEMPLES

Nous présentons les résultats obtenus pour le robot de notre application (7 axes) avec des déplacements présentés à la figure IV.11. Par la suite, nous entendons par "essai de déplacement" le calcul de P' et la vérification de l'inéquation (5).

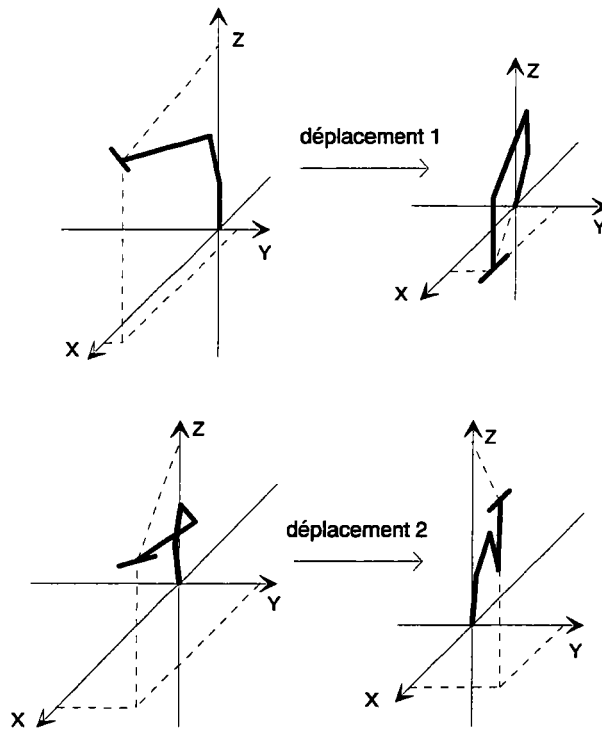


Figure IV.11 : exemples de déplacements (robot 7 axes)

Les résultats présentés au tableau IV.1 ont été obtenus pour 100 déplacements complets de type 1 et 2. Les résultats numériques de ce chapitre ont été obtenus sur un PC 486 33 MHz. Le langage de programmation utilisé est une version du langage C (16 bits) utilisable sous DOS. Les modèles géométriques directs des manipulateurs ont été calculés à partir de la méthode des matrices homogènes, mais toute autre méthode est envisageable et n'influencera pas les résultats finaux.

	déplacement 1	déplacement 2
nb essais moyen	6264	4683
nb essais mini	2015	2204
nb essais max	14110	8205
temps moyen	102 s	76.3 s

Tableau IV.1: nombre d'essais

Ces résultats mettent en évidence le nombre important d'essais et les temps moyens de calcul qui font que cette méthode ne peut être directement utilisée pour la génération en ligne de trajectoires. Nous présenterons donc par la suite une méthode permettant de diminuer considérablement le nombre d'essais et donc le temps de calcul qui s'y associe.

IV.4 MODIFICATION DE L'ALGORITHME

Considérons un robot n axes dont les trois dernières articulations sont constituées de liaisons pivots dont les axes sont concourants et forment une rotule (figure IV.12). En se fixant l'objectif à atteindre, une posture associée au repère \mathbf{Robj} , nous pouvons à partir des angles d'Euler déterminer la position finale de l'axe $n-1$, le centre de la rotule. La résolution de notre problème se réduit à la minimisation d'un seul critère qui est l'écart en position \mathbf{Dist} de l'avant dernier axe par rapport à sa position finale calculée. La distance \mathbf{Dist} est rapidement calculée grâce au modèle géométrique direct du robot constitué du robot initial moins le dernier segment. Le critère d'évolution de \mathbf{P} vers \mathbf{P}' sera alors:

$$\mathbf{DistP} > \mathbf{DistP}' \quad (6)$$

Lorsque l'inéquation (3) est vérifiée, il est alors possible d'orienter correctement l'organe terminal en calculant les valeurs articulaires des trois derniers axes.

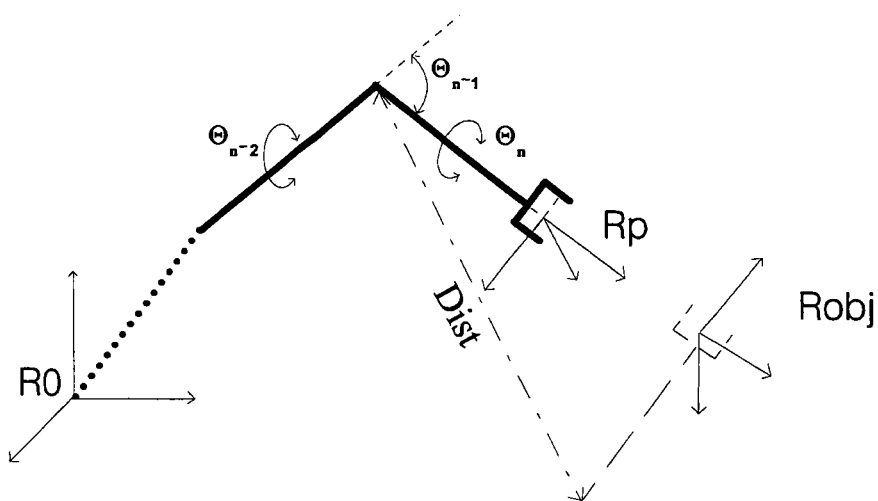


Figure IV.12 : décomposition : orientation/position

Le nouvel algorithme de calcul de la méthode est présenté à la figure IV.13 :

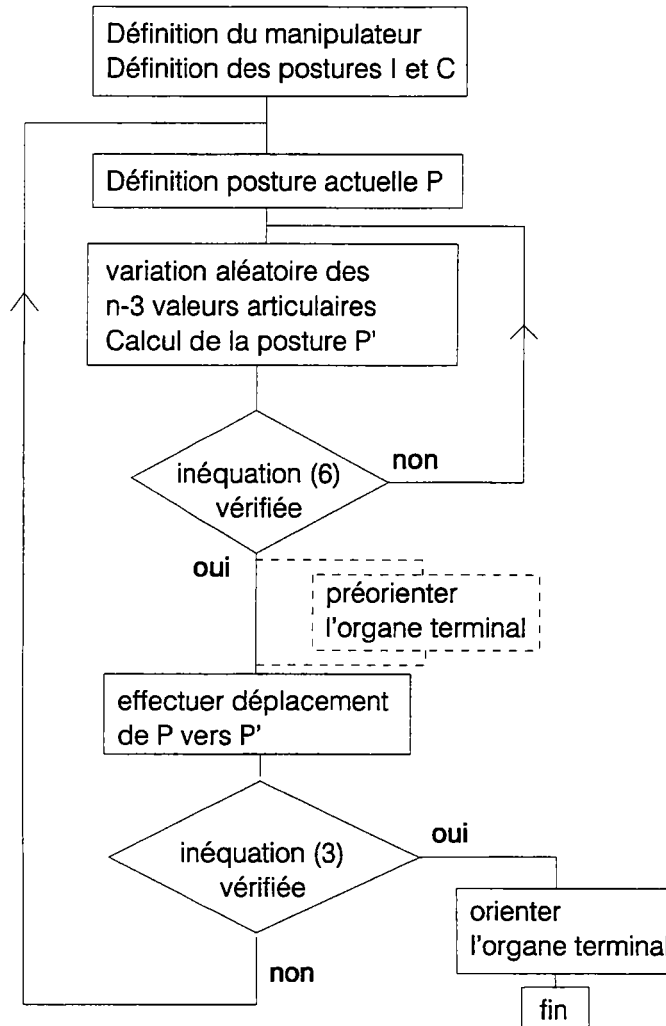


Figure IV.13 : algorithme modifié

Remarque : nous ne calculons plus que les variations aléatoires articulaires des $n-3$ premières articulations car les trois dernières valeurs qui définissent l'orientation de l'organe terminal sont calculées directement.

La solution générale consiste à simplement orienter l'organe terminal lorsque l'équation (3) est vérifiée. Une deuxième solution consiste à orienter progressivement l'organe terminal en fonction de l'écart en position. Le modèle géométrique modifié ne sert plus que à calculer la position du poignet (PX_p, PY_p, PZ_p) . L'orientation intermédiaire du préhenseur à la posture P' est alors donnée par les expressions :

$$\rho_{P'} = \rho_I + (\rho_C - \rho_I) \left(1 - \frac{D_{\text{trans } P}}{D_{\text{transtot}}} \right)$$

$$\theta_{P'} = \theta_I + (\theta_C - \theta_I) \left(1 - \frac{D_{\text{trans } P}}{D_{\text{transtot}}} \right)$$

$$\psi_{P'} = \psi_I + (\psi_C - \psi_I) \left(1 - \frac{D_{\text{trans } P}}{D_{\text{transtot}}} \right)$$

Le tableau IV.2 présente une comparaison des résultats obtenus entre la méthode (1) visant à la minimisation de la somme pondérée des distances de position et d'orientation et la méthode (2) minimisant simplement le critère de distance.

	déplacement 1		déplacement 2	
	méthode (1)	méthode (2)	méthode (1)	méthode (2)
nb essais moyen	6264	206	4683	327
nb essais mini	2015	141	2204	286
nb essais max	14110	297	8205	384
temps moyen	102 s	0.77 s	76.3 s	1.16 s

Tableau IV.2 : comparaison entre la méthode initiale et la méthode modifiée

Comme nous le constatons la méthode modifiée permet une très forte diminution du nombre d'essais nécessaires pour effectuer un déplacement. Cette diminution du nombre d'essais s'accompagne d'un gain de temps de calcul considérable, gain d'autant plus important que la méthode modifiée ne nécessite pas le calcul de l'orientation de l'organe terminal dans la posture P' . Les temps de calcul ainsi obtenus permettent la génération en ligne des déplacements du manipulateur.

V OPTIMISATION DE LA METHODE DE GENERATION DE TRAJECTOIRES

V.1 INTRODUCTION

Le temps de calcul nécessaire pour un essai de déplacement est constitué d'un temps de calcul invariable lié à la méthode de calcul et d'un temps linéairement proportionnel au nombre d'articulations lié au calcul du modèle géométrique direct. Ces temps étant incompressibles, nous essayerons donc de minimiser le nombre d'essais nécessaires pour effectuer un déplacement.

Une première constatation menant à l'optimisation du processus est que lorsque le robot se déplace vers sa position finale, le signe des variations articulaires change peu fréquemment. Cette constatation a pour effet de proposer une modification de la méthode qui consiste à forcer les signes des $\Delta\theta_i$ et ΔT_i en fonction de l'essai précédent.

La deuxième constatation repose, quant à elle, sur l'influence prépondérante des premières articulations sur le déplacement résultant de l'organe terminal. Notre objectif sera de minimiser cette influence et nous montrerons l'intérêt primordial de cette modification.

V.2 FORCAGE DES SIGNES DE $\Delta\theta_i$ ET ΔT_i

La méthode permettant de diminuer sensiblement le nombre d'essais pour effectuer un mouvement consiste à stocker les signes des $\Delta\theta_i$ et ΔT_i lorsque l'essai est accepté et de forcer les signes de l'essai suivant avec ceux stockés précédemment. Le tableau IV.3 met en évidence l'intérêt de cette méthode. Le nombre d'essais moyens a été calculé pour 100 déplacements complets identiques. Ces déplacements ont été effectués à partir d'un robot plan constitué de n liaisons pivots parallèles.

	8 axes		12 axes		16 axes	
	sans forçage	avec forçage	sans forçage	avec forçage	sans forçage	avec forçage
nb essais moyen	492	221	606	266	693	309
nb essais mini	417	98	516	148	602	111
nb essais max	632	376	698	380	738	558

Tableau IV.3 : influence du forçage des signes des $\Delta\Theta_i$ et ΔT_i

Nous présentons à la figure IV.14 l'algorithme modifié :

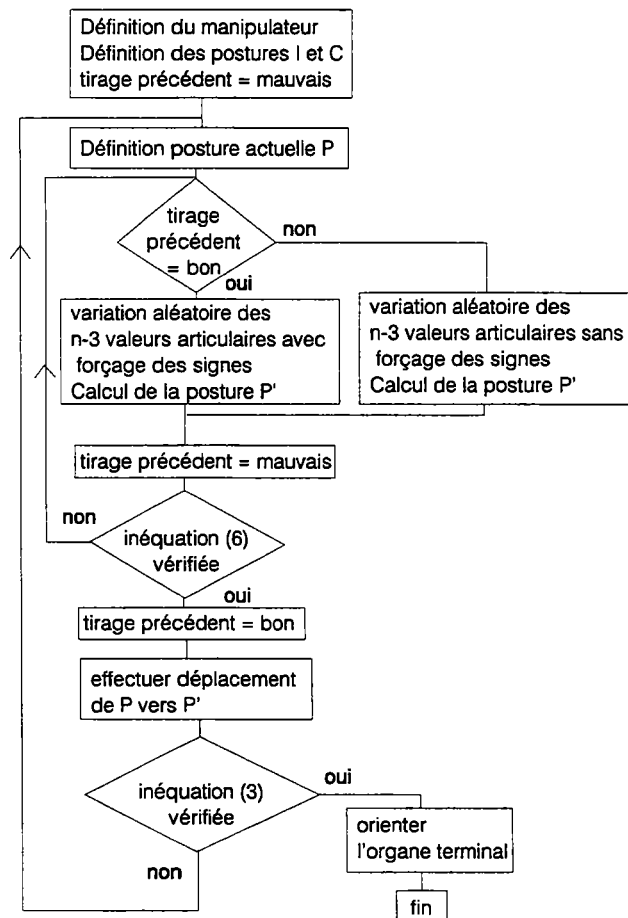


Figure IV.14 : algorithme avec forçage des signes

V.3 CALCUL PONDERE DES $\Delta\Theta_{imax}$ ET ΔT_{imax}

Pour les exemples suivants et pour un robot constitué de n axes et de n segments de longueur L_i , le calcul de $\Delta\Theta_{imax}$ et ΔT_{imax} est:

$$\Delta\Theta_{imax} = (\beta / n) \cdot \text{Corr_p} \cdot \text{Corr_ls}$$

$$\Delta T_{imax} = (\gamma / n)$$

avec :

$$\text{Corr_p} = i \quad \text{avec } i \in [1, n]$$

$$\text{Corr_ls} = \frac{\sum_{j=1}^n L_j / n}{L_i} \quad \text{avec } i \in [1, n]$$

Les coefficients (β / n) et (γ / n) représentent la variation de base pour chaque axe du manipulateur, avec β égal à quelques degrés et γ à quelques millimètres. Ces coefficients sont fonction du nombre d'axes n de manière à conserver des volumes de tirages valides sensiblement identiques quel que soit le nombre d'axes du manipulateur envisagé.

Les coefficients **Corr_p** et **Corr_ls** permettent de corriger $\Delta\Theta_{imax}$ en fonction de la position de l'axe considéré par rapport à la base du robot (**Corr_p** : correcteur lié position de l'axe par rapport à la base du manipulateur) et de la longueur du segment associé (**Corr_ls** : correcteur lié à la longueur du segment associé à l'axe considéré). Ces coefficients permettent "d'égaliser" les amplitudes de déplacement de l'organe terminal engendrées par les différents axes. Sans ces coefficients les axes auraient une influence inversement proportionnelle à leur éloignement de la base du robot et proportionnelle à la longueur du segment associé. Comme le montre le tableau IV.4, ces coefficients influent fortement sur le nombre d'essais global à effectuer pour des déplacements donnés. Ces résultats sont obtenus pour 100 déplacements identiques.

	8 axes		12 axes		16 axes	
	sans coeff	avec coeff	sans coeff	avec coeff	sans coeff	avec coeff
nb essais moyen	492	97	606	97	693	93
nb essais mini	417	61	516	59	602	52
nb essais max	632	169	698	162	738	157

Tableau IV.4 : influence des coefficients correcteurs

V.4 INFLUENCE CUMULEE DES DEUX OPTIMISATIONS

Le tableau IV.5 présente les récapitulatif cumulant les optimisations :

	8 axes		12 axes		16 axes	
	sans optimisation	avec optimisation	sans optimisation	avec optimisation	sans optimisation	avec optimisation
nb essais moyen	492	73	606	72	693	76
nb essais mini	417	21	516	20	602	28
nb essais max	632	129	698	159	738	160

Tableau IV.5 : influence cumulée des deux optimisations

Ce tableau met en évidence l'intérêt de ces deux stratégies qui permettent de diminuer sensiblement le nombre d'essais nécessaires pour effectuer un déplacement. Ces résultats sont primordiaux notamment en ce qui concerne l'évitement d'obstacles où le nombre d'essais a tendance à croître considérablement.

V.5 EXEMPLES DE DEPLACEMENTS

Nous considérons un robot plan constitué de 8 articulations pivot dont les axes sont parallèles. Les schémas suivants (figure IV.15) représentent différentes évolutions pour des positions et orientations de départ et d'arrivée identiques dans les deux exemples. L'exemple (a) a nécessité 38 essais de déplacement tandis que l'exemple (b) en a nécessité 74.

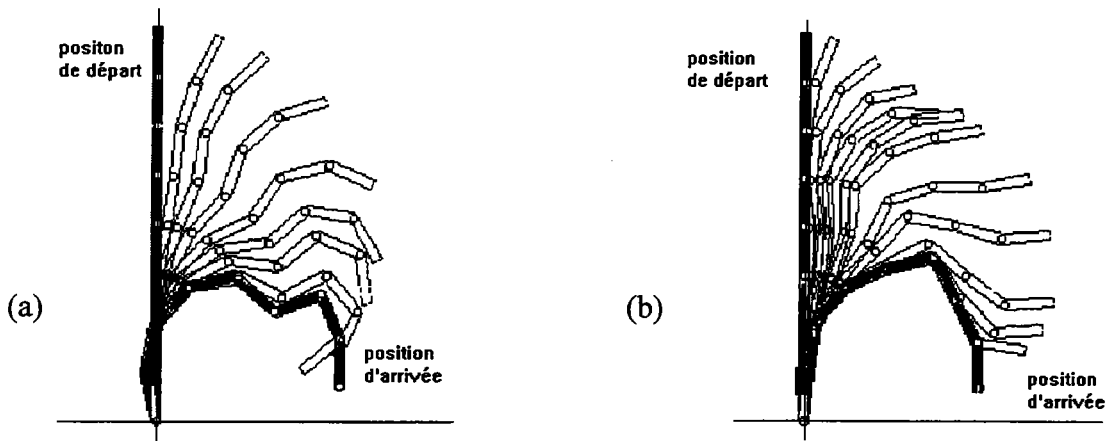


Figure IV.15 : exemples de déplacements

VI INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES

Nous étudions ci-après l'influence du nombre d'axes sur le nombre d'essais nécessaires pour effectuer un même déplacement et l'influence du nombre d'axes sur le temps global de calcul. Ces résultats nous permettent d'envisager les limites de la méthode pour un nombre d'axes maximal en ce qui concerne la génération en temps réel de trajectoires.

VI.1 INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES SUR LE NOMBRE D'ESSAIS

Les courbes présentées à la figure IV.16 montrent l'influence du nombre d'axes sur le nombre moyen d'essais nécessaires pour 100 déplacements identiques. La courbe (1) n'utilise pas les correcteurs **Corr_p** et **Corr_Is** tandis que la courbe (2) les intègre. La courbe (2) montre l'intérêt primordial de ces coefficients qui influent sur deux critères :

- minimisation globale du nombre d'essais pour effectuer un déplacement,
- minimisation de l'influence du nombre d'axes sur le nombre total d'essais effectués pour un mouvement donné.

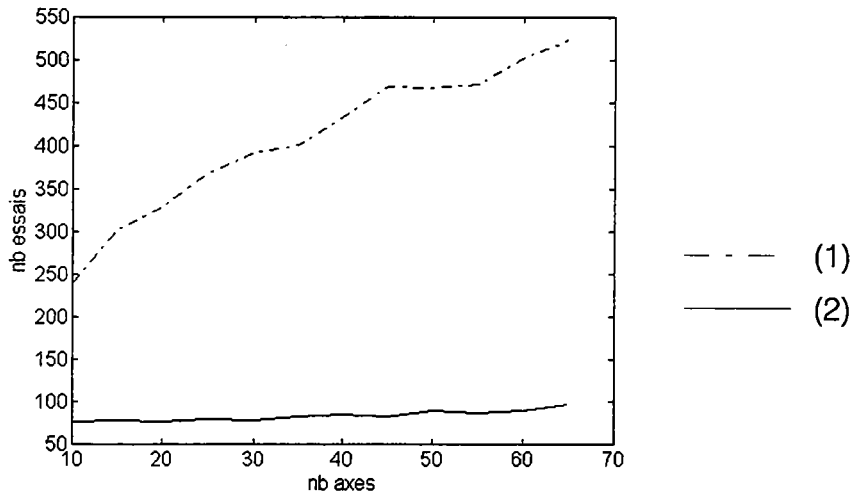


Figure IV.16 : influence du nombre d'axes sur le nombre d'essais

VI.2 INFLUENCE DU NOMBRE D'AXES SUR LE TEMPS DE CALCUL

La figure IV.17 nous présente les temps de calcul nécessaires en fonction du nombre d'essais pour des robots plans de 8, 20 et 40 axes devant effectuer un même déplacement. Les modèles géométriques utilisés sont paramétrables et non optimisés pour une structure spécifique. L'utilisation de modèles géométriques optimisés permet de diviser les temps globaux par quatre, ce qui est obtenu en prémultipliant et simplifiant les matrices homogènes associées aux différents axes. Ces résultats sont obtenus pour 10 déplacements identiques pour un même nombre d'axes. La non linéarité des résultats obtenus provient des erreurs de mesure des temps.

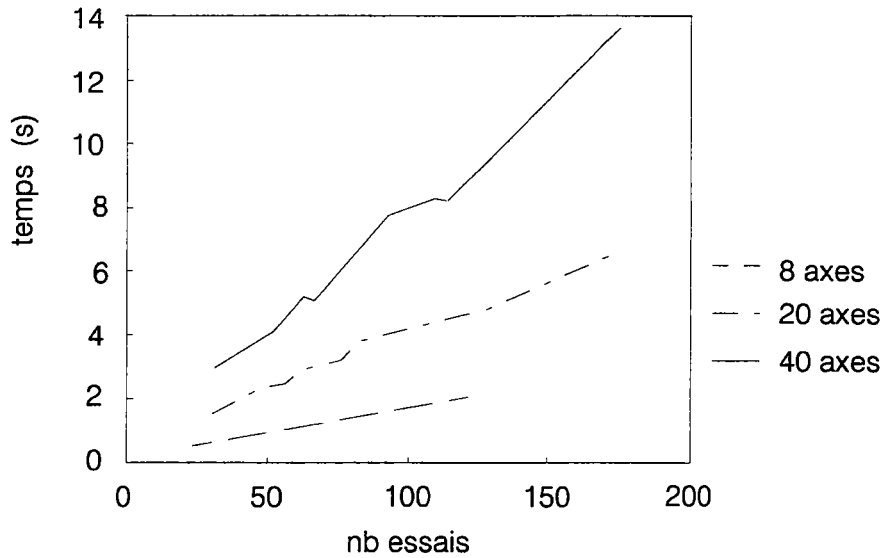


Figure IV.17 : influence du nombre d'axes sur le temps de calcul

VII EVITEMENT D'OBSTACLES

VII.1 INTRODUCTION

Nous envisageons ici d'appliquer la méthode de déplacement énoncée précédemment à un environnement dans lequel se situent des obstacles. Ces obstacles sont de forme et matière quelconques. L'objectif principal sera donc de générer une trajectoire reliant une posture **I** à une posture **C** dans cet environnement non structuré. Pour satisfaire à cet objectif, nous utilisons des capteurs qui permettent la détection des différents obstacles rencontrés au cours de l'évolution du manipulateur. Ces capteurs doivent fournir une information répondant aux conditions énoncées en III.

VII.2 METHODOLOGIE

VII.2.1 Utilisation de capteurs enveloppants

Dans ce cas nous envisageons l'utilisation d'un capteur unique par segment (figure IV.18). Tant que aucun obstacle n'est rencontré le déplacement du bras est celui décrit en IV.4. Lorsqu'un

obstacle est détecté par un des capteurs, le déplacement du bras est alors arrêté. L'arrêt est effectué quand la distance capteur de l'élément i (DC_i) est inférieure à la distance capteur maximale associée à un même segment (DC_{imax}) (figure IV.18). Un nouvel essai vérifiant les critères énoncés est alors calculé à partir de la posture P et le mouvement correspondant effectué. Le mouvement calculé s'effectue alors tant que les distances obtenues par les différents capteurs ne diminuent pas. Si une de ces distances vient à diminuer le mouvement est stoppé et un nouveau calcul d'essais est effectué.

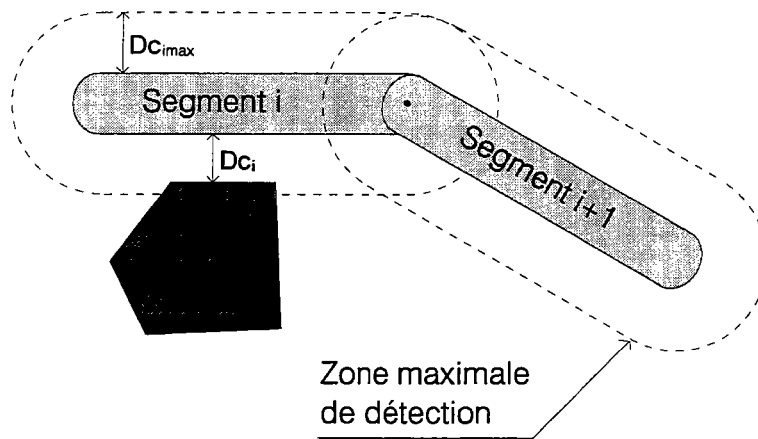


Figure IV.18 : zone de détection par le capteur enveloppant

L'algorithme général de la gestion du déplacement est présenté à la figure IV.19 :

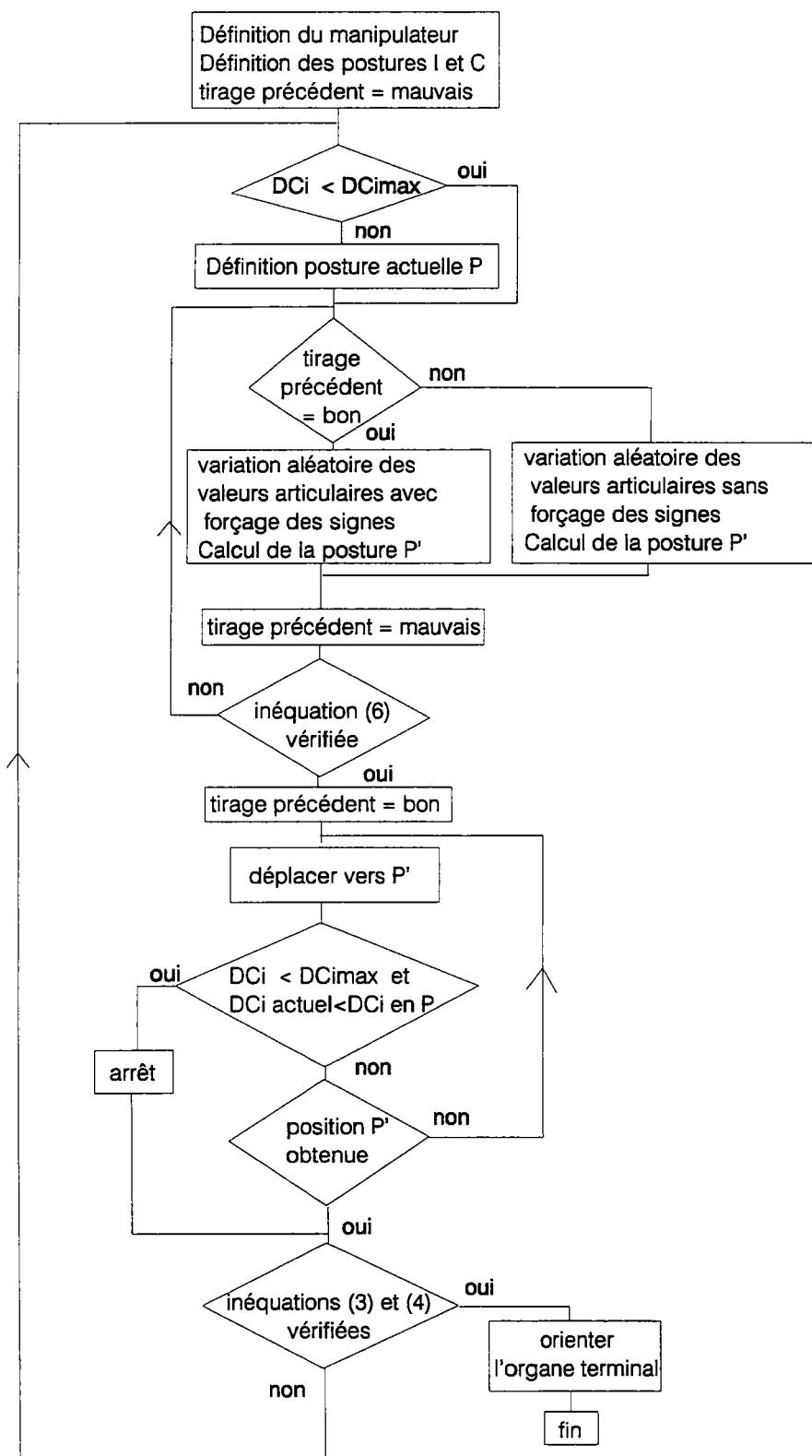


Figure IV.19 : algorithme pour utilisation de capteur enveloppant

VII.2.2 Utilisation de capteurs discrets

Cette méthode utilisant plusieurs capteurs sur un même segment (figure IV.20) a pour avantage de permettre la localisation de l'obstacle par rapport au repère de base du manipulateur. La localisation de l'obstacle est obtenue par le modèle géométrique du manipulateur ayant pour terminaison le capteur C_{ij} (i numéro du segment, j numéro du capteur associé au segment i). Le mouvement hors obstacle est le même que celui décrit précédemment (paragraphe VII.2.1.).

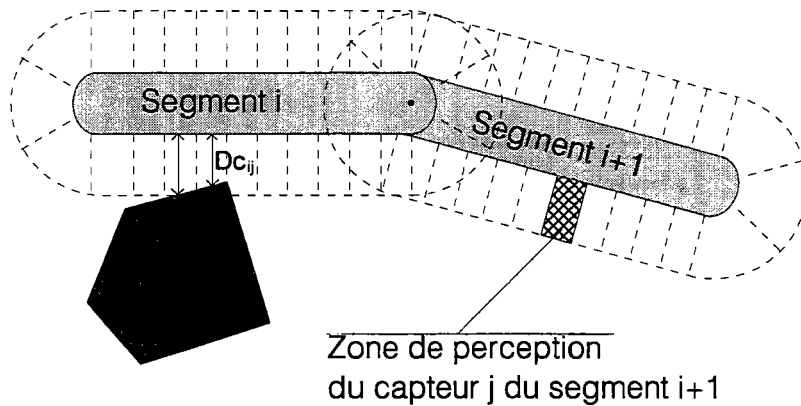


Figure IV.20 : zone de détection capteurs fins

Lorsqu'un obstacle est perçu par un capteur, sa position P_{obst} est calculée. Il est alors possible de déterminer le plan P_0 (figure IV.21) passant par le milieu du capteur C_{ij} et normal au segment défini par la position du capteur et par la position de l'obstacle. Les conditions d'acceptation de l'essai seront alors :

- la minimisation de la distance par rapport au but,
- l'évolution du capteur C_{ij} dans le demi-espace défini par le plan P_0 du côté du segment.

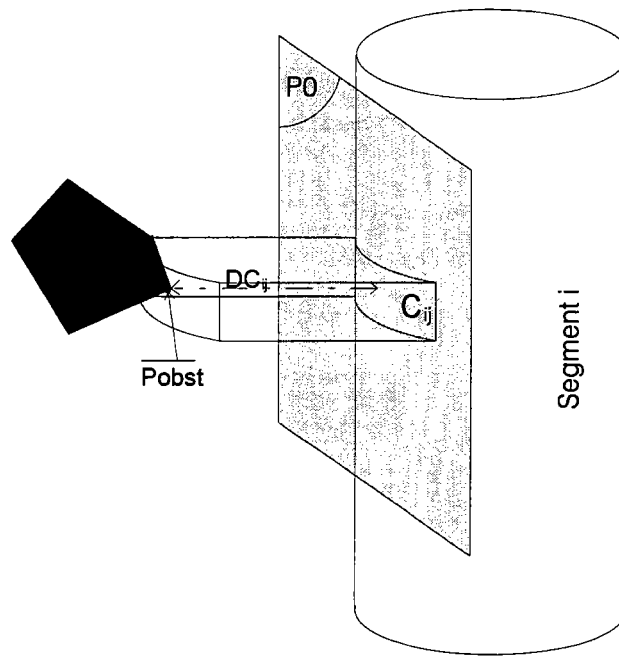


Figure IV.21 : détermination du plan P0

Cette méthode présente l'avantage évident de ne pas effectuer des essais de déplacement vers l'obstacle et donc de minimiser les temps de déplacement .

VII.3 CAPTEUR UTILISE

Bien que nous puissions envisager l'utilisation de capteurs de tout type (infrarouges, ultrason, laser...) nous avons retenu l'utilisation de capteurs capacitifs [POTT 93]. Ce capteur est actuellement en cours de modification dans notre laboratoire pour notre application particulière. Il est constitué d'un élément conducteur appelé sensoriel qui génère un champ électrique grâce à une électronique adaptée. Si une cible pénètre à l'intérieur du volume de scrutation, la capacité du sensoriel est modifiée. Cette variation sera utilisée dans l'algorithme précédemment défini pour agir sur le déplacement des différents segments.

Pour faciliter la mise en oeuvre du système nous préconisons l'emploi de capteurs de type enveloppant où le sensoriel est réalisé par une simple couche de peinture conductrice.

VII.4 SIMULATION

Pour des raisons de commodité et de coût nous avons donc retenu la méthode qui utilise des capteurs enveloppants. Nous avons programmé la méthode énoncée en VII.2.1. pour des robots plan multi-axes. Pour la simulation nous prenons en compte des obstacles ponctuels et nous calculons, pour chaque posture P' obtenue, la distance minimale entre chaque segment et chaque obstacle. Ce calcul est effectué (figure IV.22) après un changement de repère (T, τ) menant le repère de base (X_0, Y_0) en (X', Y') repère lié au segment i . Si la distance obtenue est inférieure au minimum désiré, la posture P' n'est pas adoptée et une nouvelle posture est calculée. Quelques résultats sont présentés à la figure IV.23. Les obstacles sont représentés par des cercles.

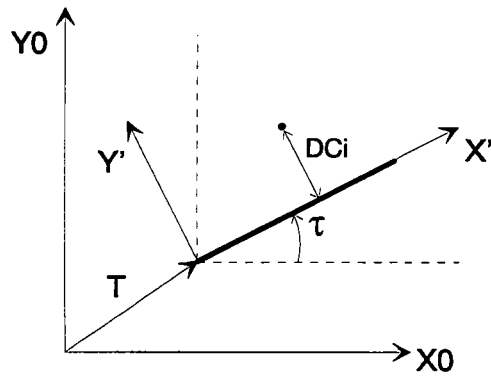


Figure IV.22 : calcul de DC_i

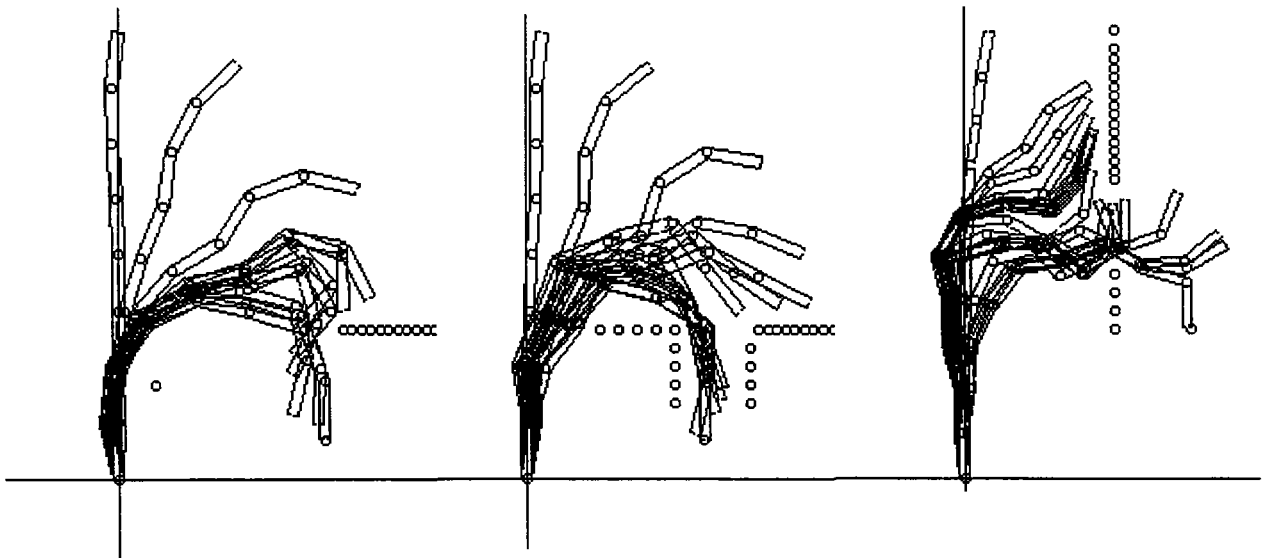


Figure IV.23 a) b) c) : exemples de déplacements avec obstacles

Pour améliorer les performances de la méthode, une stratégie supplémentaire a été utilisée : quand le capteur du dernier segment détecte un obstacle, on ne mène plus aléatoirement l'extrémité de l'avant dernier segment mais on gère alors le déplacement de l'organe terminal. Cette stratégie permet d'éviter une cassure trop importante du poignet lorsque le robot a tendance à se déplacer vers un obstacle et élimine certains cas de blocage notoirement lors de passages étroits (voir paragraphe VII.5.1.2).

Le tableau IV.6 présente les résultats obtenus pour 20 déplacements identiques à celui représenté à la figure IV.23 b).

	8 axes
nb essais moyen	786
nb essais mini	148
nb essais max	1741
temps moyen	2,63s

Tableau IV.6: nombre d'essai en déplacement avec obstacles

Le temps moyen présenté n'intègre pas le calcul de la distance par rapport aux obstacles. Les résultats obtenus restent compatibles avec une génération automatique et en temps réel de trajectoires. Cependant, il est à noter que certaines situations de blocage peuvent apparaître pour des raisons diverses.

VII.5 LIMITES DE LA METHODE ET APPLICATIONS

VII.5.1 Limites de la méthode

VII.5.1.1 Conditions générales d'évolution

Les conditions générales d'atteinte d'un point cible sont :

- la capacité morphologique du bras à atteindre l'objectif assigné en présence d'obstacles,
- l'existence d'un chemin dans l'espace libre tel que le déplacement de l'organe terminal suivant ce chemin minimise la distance par rapport au point cible.

VII.5.1.2 Possibilités de blocages

Le respect des conditions générales d'évolution étant un critère nécessaire mais pas suffisant, nous présentons les trois principaux cas de blocage pouvant survenir.

mauvaise posture

Il est possible, notamment lors de passages étroits (figure IV.24), que le manipulateur se trouve dans une configuration telle qu'il ne puisse continuer à progresser vers la cible. Dans notre application il sera alors possible à l'opérateur de repositionner correctement le manipulateur en vue de faciliter le passage de l'obstacle.

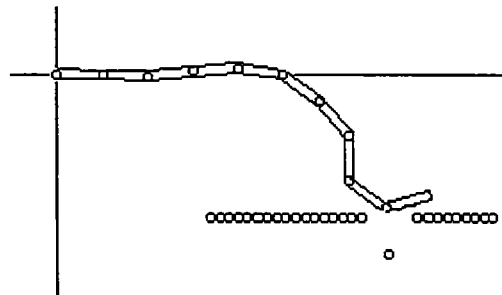


Figure IV.24 : blocage suite à une mauvaise posture

mauvais chemin

Lorsqu'il existe plusieurs chemins menant à l'objectif, le manipulateur emprunte le premier rencontré. Le fait d'emprunter ce chemin peut le conduire à des situations de blocages comme le montre la figure IV.25. Il faut noter que le choix entre différents chemins relève de la planification de

trajectoires et non de méthodes locales d'évitement d'obstacles. Si ce phénomène se produit, l'opérateur peut alors interrompre le mouvement et repositionner correctement l'organe terminal de telle manière que le manipulateur emprunte le chemin qui lui semble le plus favorable.

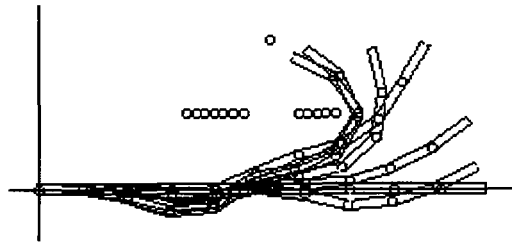


Figure IV.25 : blocage suite à engagement dans un mauvais chemin

minimum local

Lorsque le manipulateur se trouve dans un minimum local décrit par la méthode des potentiels, il ne lui est plus possible de progresser vers son objectif (figure IV.26). L'opérateur devra alors dégager le manipulateur de cette situation de blocage de telle manière qu'il puisse continuer son déplacement vers le point cible.

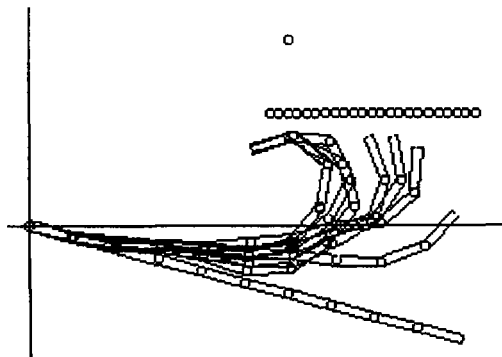


Figure IV.26 : blocage dans un minimum local

VII.5.2 Applications

Outre les capacités évidentes d'évitement d'obstacle en environnement inconnu, il est possible d'utiliser cette méthode en environnement connu. L'utilisateur définit alors des points de passage du préhenseur dans l'espace libre du manipulateur et la méthode présentée assure la non collision entre

les différents segments et les obstacles (figure IV.27). Les figures (a) et (b) présentent l'évolution vers un point intermédiaire, la figure (c) montre l'arrivée au point intermédiaire et la figure (d) l'arrivée au point but.

Lors de la définition des points de passage, l'opérateur devra rentrer les points de passage de manière à ce qu'ils satisfassent aux conditions minimales d'évolution énoncées au paragraphe VII.4.1.1.

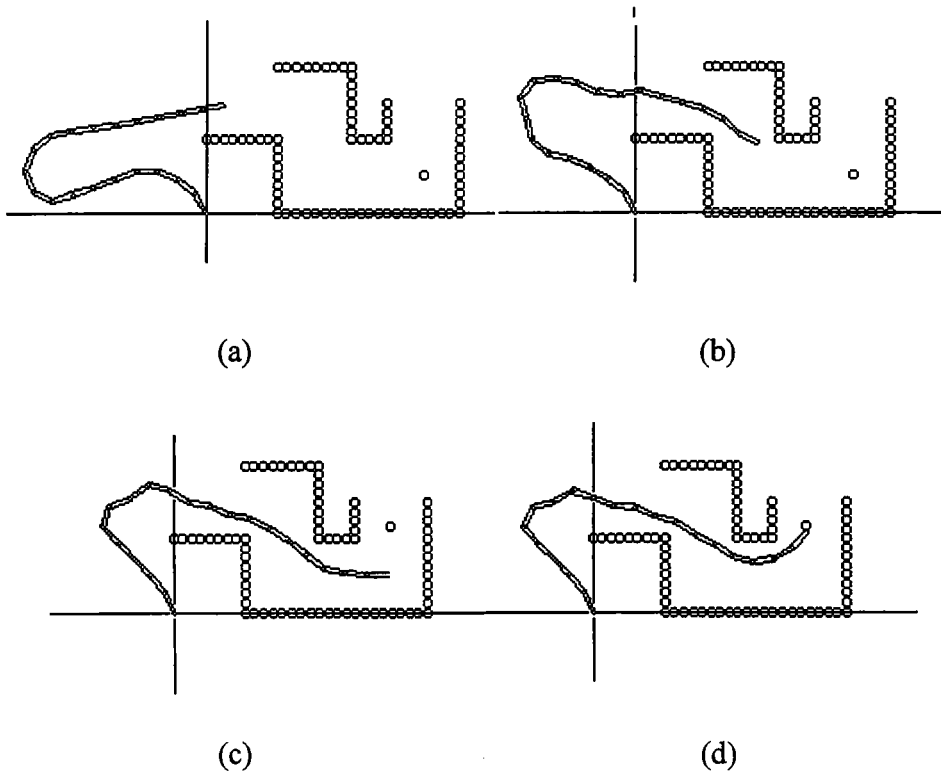


Figure IV.27 : déplacement en environnement connu

VIII GESTION CINEMATIQUE DE LA TRAJECTOIRE

VIII.1 INTRODUCTION

L'algorithme général de génération stochastique de trajectoire nous fournit un ensemble de configurations intermédiaires permettant de progresser de la posture initiale vers la posture finale. D'une manière générale la trajectoire est présentée à la figure IV.28 où L, M et N sont trois états intermédiaires. A chaque posture intermédiaire est associé un vecteur des configurations articulaires

$$\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_i, \dots, \Theta_n).$$

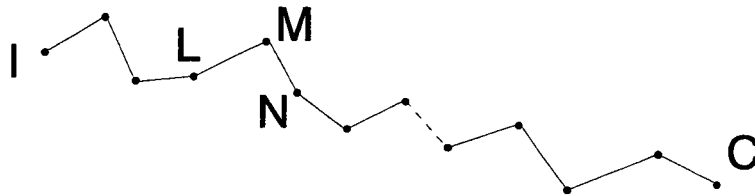


Figure IV.28 : postures intermédiaires

L'objectif consiste maintenant à déterminer une cinématique du manipulateur qui permet de gérer les déplacements selon certains critères. Pour se faire, nous supposons connues les vitesses, les accélérations et les décélérations maximales ($\dot{\theta}_{\max_i}$, $\gamma_{a \max_i}$, $\gamma_{d \max_i}$) des différentes articulations.

VIII.2 METHODOLOGIE

En considérant des vitesses articulaires nulles aux configurations articulaires intermédiaires, il est possible de déterminer entre deux postures consécutives les n profils trapézoïdaux pour les n axes, les vitesses articulaires optimales et les temps de parcours associés. La position et l'orientation de l'organe terminal sont alors gérées simultanément. Pour obtenir une synchronisation des différents axes, il est nécessaire d'égaliser les temps de déplacement de chaque articulation sur le plus grand des temps associés aux profils initiaux.

L'inconvénient majeur des profils de vitesse ainsi générés est qu'ils obligent à un arrêt du manipulateur en chaque posture intermédiaire. Pour éviter ce phénomène, nous proposons un "lissage" cinématique de la trajectoire.

A chaque position intermédiaire de l'organe terminal il est adjoint une sphère (figure IV.29), appelée sphère de raccordement, dont la valeur du rayon R_{acc} sera discutée ultérieurement.

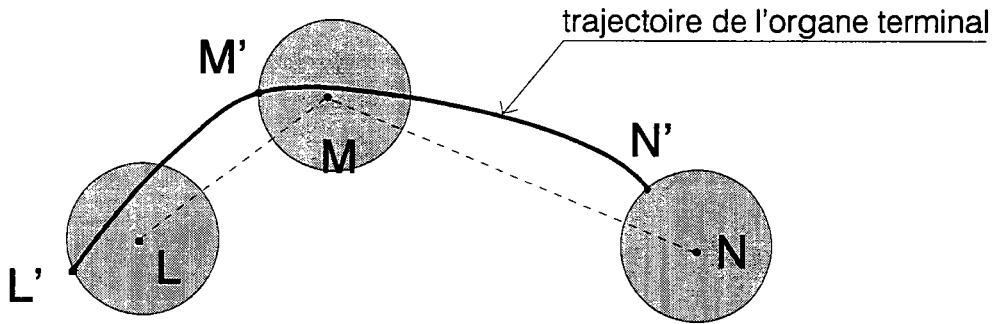


Figure IV.29 : sphères de raccordement

Au cours du déplacement l'organe terminal intersecte la sphère liée au point L en L' avec un vecteur des vitesses articulaires $\dot{\Theta}_{L'} = (\dot{\Theta}_{L'1}, \dot{\Theta}_{L'2}, \dots, \dot{\Theta}_{L'i}, \dots, \dot{\Theta}_{L'n})$. Il est alors possible de générer les profils des vitesses articulaires avec comme posture initiale celle associée à L' et comme posture finale celle associée à M avec $\dot{\Theta}_M = \vec{0}$. Le fait d'associer des vitesses articulaires nulles en M ne signifie pas l'arrêt "cinématique" du manipulateur car un nouveau profil des vitesses sera calculé en M' sauf si la posture associée à M est la posture finale C .

Les données initiales du problème sont définies par les équations :

$$\Theta_{L'} = (\Theta_{L'1}, \Theta_{L'2}, \dots, \Theta_{L'j}, \dots, \Theta_{L'n})$$

$$\dot{\Theta}_{L'} = (\dot{\Theta}_{L'1}, \dot{\Theta}_{L'2}, \dots, \dot{\Theta}_{L'j}, \dots, \dot{\Theta}_{L'n})$$

$$\Theta_M = (\Theta_{M1}, \Theta_{M2}, \dots, \Theta_{Mj}, \dots, \Theta_{Mn})$$

$$\dot{\Theta}_M = 0$$

Le profil de vitesse à générer pour l'axe d'indice i est présenté à la figure IV.30 :

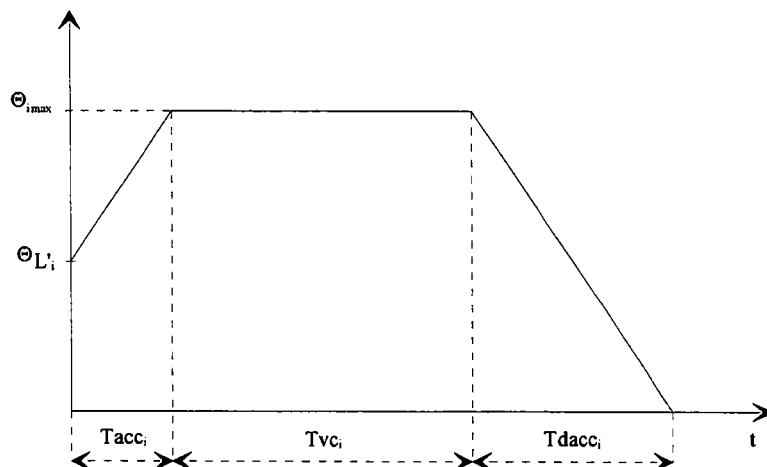


Figure IV.30 : profil de vitesse

Les équations qui permettent de résoudre ce problème s'écrivent :

$$(\Theta_M - \Theta_L) = \frac{1}{2} \cdot \gamma a_{\max_i} \cdot T_{\text{acc}_i}^2 + \dot{\Theta}_{\max_i} \cdot T_{\text{vc}_i} + \frac{1}{2} \cdot \gamma d_{\max_i} \cdot T_{\text{dacc}_i}^2$$

$$T_{\text{acc}_i} = \frac{\dot{\Theta}_{\max_i} - \Theta_L}{\gamma a_{\max_i}}$$

$$T_{\text{dacc}_i} = \frac{\dot{\Theta}_{\max_i}}{\gamma d_{\max_i}}$$

Ce système d'équations permet de déterminer T_{vc_i} . Une fois celui-ci résolu pour les n articulations, il est possible de déterminer T_{max} avec l'expression :

$$T_{\text{max}} = \max(T_{\text{acc}} + T_{\text{vc}} + T_{\text{dacc}}) \text{ avec } 1 \leq i \leq n$$

La seconde étape consiste à égaliser les temps des déplacements des différentes articulations en fonction de T_{max} . On notera $\dot{\Theta}_{\text{vc}_i}$ la vitesse de déplacement de l'axe i pendant T_{vc_i} . Le système d'équations devient alors :

$$(\Theta_M - \Theta_L) = \frac{1}{2} \cdot \gamma a_{\max_i} \cdot T_{\text{acc}_i}^2 + \dot{\Theta}_{\text{vc}_i} \cdot T_{\text{vc}_i} + \frac{1}{2} \cdot \gamma d_{\max_i} \cdot T_{\text{dacc}_i}^2$$

$$T_{\text{max}} = T_{\text{acc}_i} + T_{\text{vc}_i} + T_{\text{dacc}_i}$$

$$T_{\text{acc}_i} = \frac{\dot{\Theta}_{\text{vc}_i} - \Theta_L}{\gamma a_{\max_i}}$$

$$T_{\text{dacc}_i} = \frac{\dot{\Theta}_{\text{vc}_i}}{\gamma d_{\max_i}}$$

Ce système permet de poser une équation du second degré en $\dot{\Theta}_{\text{vc}_i}$, dont une seule des solutions est admissible. La figure IV.31 présente une trajectoire du centre de l'organe terminal avec trois points de passages intermédiaires et la figure IV.32 met en évidence les profils des vitesses générés. Le rayon des sphères aux points d'arrivée est :

$$R_{\text{acc}} = \text{dist}(\text{point départ}, \text{point d'arrivée}) / P$$

où P est un coefficient variable dont l'influence sera discutée au paragraphe suivant. Pour l'exemple suivant nous avons choisi $P=10$.

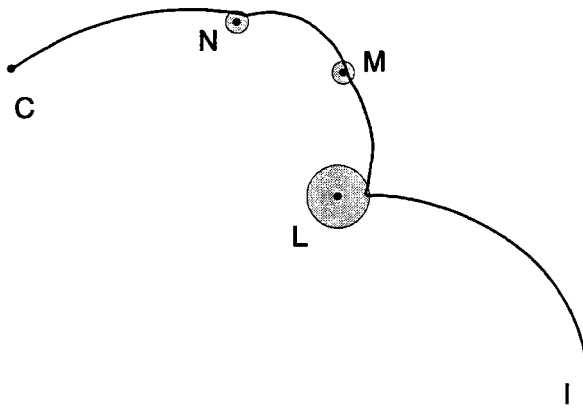


Figure IV.31 : trajectoire de l'organe terminal

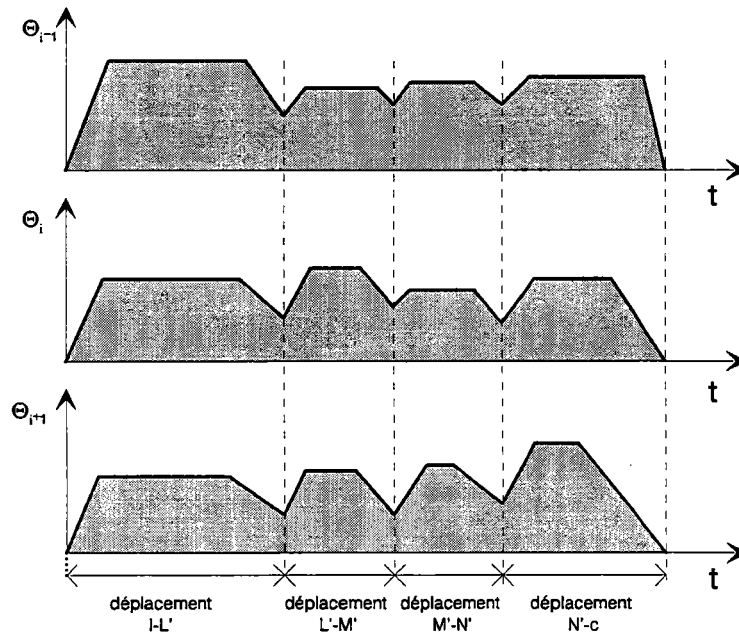


Figure IV.32 : profils des vitesses lissées

VIII.3 INFLUENCE DU RAYON DE LA SPHERE DE RACCORDEMENT SUR LA TRAJECTOIRE

Selon les principes précédemment énoncés, la trajectoire de l'organe terminal obtenue intersecte obligatoirement les différentes sphères de raccordement sans nécessairement passer par les points intermédiaires. Nous présentons à la suite l'influence du volume de ces sphères sur le déplacement global obtenu. La figure IV.33 met en évidence l'influence de **Racc** sur la trajectoire obtenue tandis que le tableau IV.7 met en évidence l'influence de **P** sur le temps global de parcours.

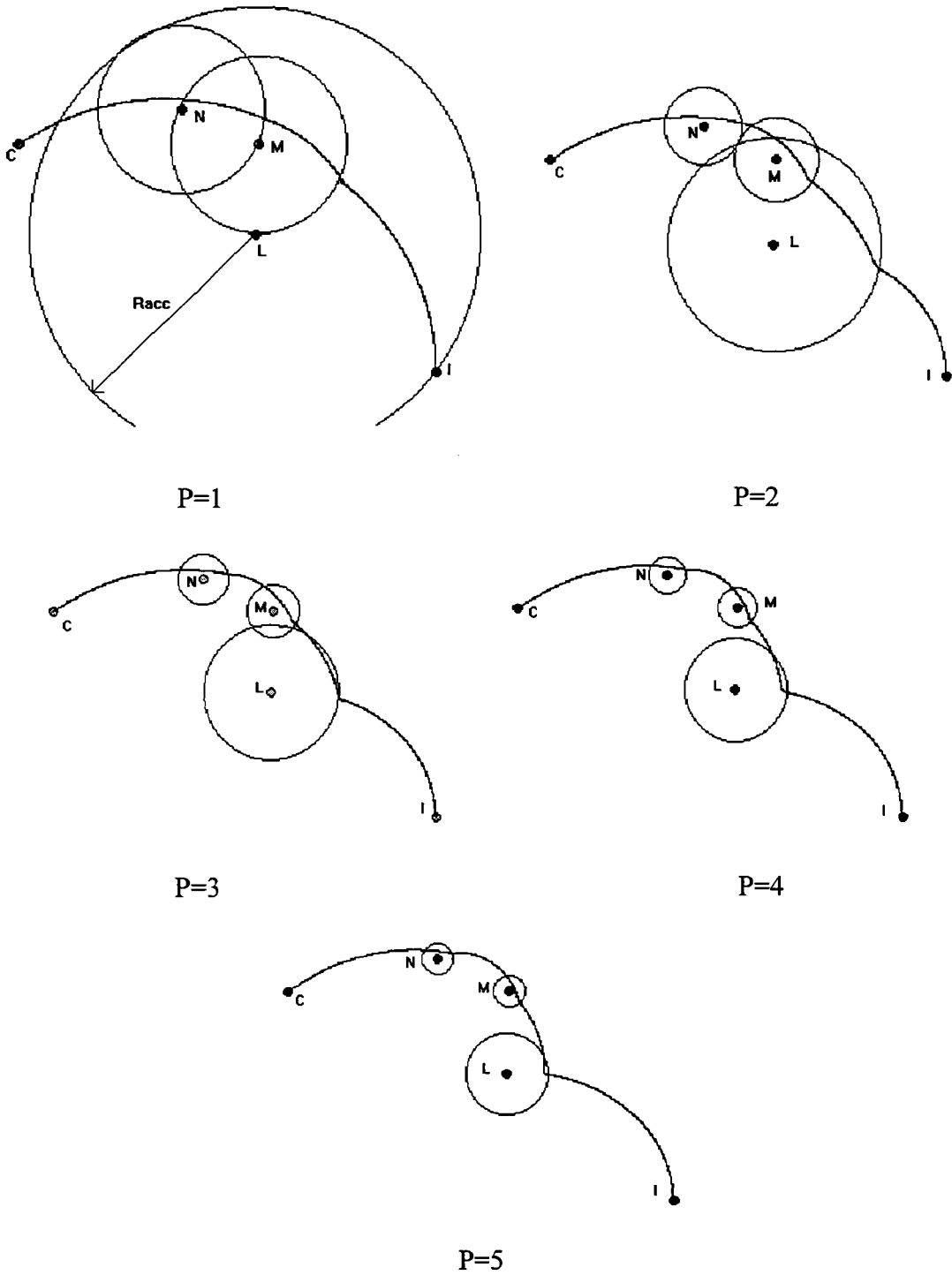


Figure IV.33 : influence du volume de la sphère de raccordement sur la trajectoire

P	1	2	3	4	5
TEMPS TOTAL	1	1.1	1.24	1.31	1.36

Tableau IV.7 : influence de **Racc** sur le temps de parcours

L'accroissement du rayon de raccordement influe fortement sur la géométrie de la trajectoire de l'organe terminal. En effet, plus ce rayon est élevé plus la trajectoire générée est lissée, ce qui a tendance à l'éloigner des points intermédiaires. Il est à noter que **Racc** influe aussi sur le temps total du parcours entre la posture initiale et la posture finale. Ainsi le choix de Racc résultera d'un compromis entre le temps total de parcours de la trajectoire et le passage à proximité des points intermédiaires.

IX CONCLUSION

Les parties précédentes ont mis en évidence l'intérêt de la méthode de génération stochastique en temps réel de trajectoire par rapport aux méthodes existantes. Le principal avantage réside dans sa capacité à gérer des robots présentant de grandes redondances dans un environnement non déterminé. Par rapport aux méthodes des contraintes et des potentiels cette méthode n'oblige pas à la localisation complète des obstacles et permet un déplacement à une vitesse cohérente lorsque la direction de la vitesse de déplacement est proche de la normale aux obstacles.

Aux vues des résultats obtenus, cette méthode s'avère adéquate en particulier lors d'évitements "simples" d'obstacles. Les temps de calcul sont compatibles avec notre type d'application où la rapidité d'évolution du manipulateur reste peu élevée. La mise en oeuvre de ces capteurs est aisée en considérant que ceux-ci peuvent se composer d'une seule couche de peinture métallique. Néanmoins, cette méthode locale mène à certains cas de blocage qui ne seraient être levés que par l'utilisation d'une méthode de planification globale. Cependant, nous pouvons considérer que l'utilisateur, après un certain temps d'apprentissage, sera apte à éviter la plupart des situations de blocages en positionnant correctement le manipulateur au début de la trajectoire.

La méthode de génération en temps réel de trajectoires proposée pourrait s'appliquer au déplacement de robot mobile en environnement non déterminé. Le robot mobile serait alors considéré comme un segment unique auquel on appliquerait des variations en translation et en rotation dans le plan.

CONCLUSION

CONCLUSION :

Ce mémoire a traité des problèmes relatifs aux manipulateurs embarqués de type téléthèse et plus généralement des robots de coopération.

Après avoir décrit au premier chapitre les différentes caractéristiques des téléthèses existantes, nous avons présenté au deuxième chapitre le manipulateur développé au L.A.E.I. à travers ses différents aspects originaux. Nous y avons en plus proposé une architecture de commande et une interface homme/machine adaptée au pilotage de robots de coopération. De l'étude des projets existants nous avons déduit la nécessité d'apporter des réponses et des solutions aux problèmes liés à la sécurité de l'opérateur.

Au troisième chapitre nous avons précisé l'importance de l'intégration des notions de sécurité à la conception. Nous avons énoncé les principales techniques et des notions novatrices permettant la mise en sécurité de l'opérateur suivant deux objectifs : la fiabilisation de la commande et l'évitement de collision. Nous avons présenté et formalisé la notion de zones de sécurité et proposé une maintenance adaptée. Il a été mis en évidence la nécessité de l'utilisation de méthodes permettant l'évitement automatique de collisions.

Le quatrième et dernier chapitre propose une méthode locale de génération de trajectoire et d'évitement d'obstacles appelée "Génération stochastique de trajectoires en temps réel avec contraintes d'environnement". Au cours de ce chapitre, il a été mis en évidence la capacité de la méthode énoncée à créer une trajectoire d'une posture initiale vers une posture cible. Nous avons alors proposé l'optimisation de cette méthode à travers différents aspects : le découplage "orientation/position", le forçage des signes des tirages aléatoires et le calcul pondéré des variations articulaires maximales. Les temps de calculs sont compatibles avec un déplacement cinématique quelconque de manipulateurs présentant une redondance élevée ce qui autorise la gestion en temps réel de la trajectoire. A partir des résultats obtenus nous avons proposé une méthode d'évitement et de contournement d'obstacles basée sur la détection d'éléments de l'environnement par un capteur de proximité. L'utilisation de détecteurs de proximité de type capacitif enveloppant a été préconisé en fonction de leurs performances et de leur facilité de mise en oeuvre. Nous avons mis en évidence les capacités de la méthode à éviter les obstacles et montré ses limites qui sont

globalement celles des méthodes locales d'évitement d'obstacles. La dernière partie du chapitre propose une approche, basée sur les profils de vitesses trapézoïdaux, de la gestion cinématique du déplacement avec raccordement aux points de passage intermédiaires.

Les perspectives essentielles des travaux énoncés résident dans l'implantation des principes relatifs à la sécurité et à l'évitement automatique de collisions sur le bras manipulateur développé dans notre laboratoire. Pour ce faire, il faudra implanter les différentes couches logicielles définies, leurs tâches associées et améliorer les capacités intrinsèques du détecteur de proximité capacitif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[AFNO 93]

Norme européenne " Robots manipulateurs industriels Sécurité".
NF EN 775 classement E61-110 , mai 1993.

[BACH 90] BACH J., ZEELLENBERG A., WINTER C.

"Wheelchair-mounted robot manipulator"
American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation 1990

[BARR 90] BARRAQUAND J., LATOMBE J.C.

"A Monte-Carlo algorithm for path planing with many degrees of freedom"
CH2876-1/90/0000/1712 \$01.00 1990 IEEE

[BARR 91] BARRAQUAND J.

"Automatic motion planing for complex articulated bodies"
Rapport interne Paris Research Laboratory JUNE 1991.

[BOP 92] BOP C.

" Modélisation mathématique pour la commande de robots. Application à la conception et à la réalisation d'un bras embarqué sur un fauteuil roulant pour handicapé moteur".
Thèse de Doctorat nouveau régime L.A.E.I. Metz, juillet 1992.

[BOP 93] BOP C., MUNERATO F., LE DREZEN A., LAURENT C.

"Bras manipulateur sur fauteuil pour handicapé moteur"
Premier congrès Franco-Japonais de mécatronique Besançon 1993.

[BOUR 92] BOUREL A., BOISDRON M.

"Compte rendu sur l'évaluation du télémanipulateur MANUS".
Association Française contre la Myopathie, Résidence la Forêt, documentation interne,
1992.

[BOUR 95] BOURHIS G., PINO P., AGOSTINI Y.

" Robotique mobile et assistance au pilotage des fauteuils roulants électriques"

Publication proposée à la revue d'automatique et de productique appliquées 1995

[BREL 93] BRELIVET L.

"Evaluation du système robotisé MASTER en centre spécialisé : l'expérimentation du C.R.F. de Kerpape".

Expérience en ergothérapie, cinquième série, éditions Masson, 1993.

[BREL 92] BRELIVET L.

"Télémanipulateur MANUS rapport d'évaluation".

Association Française contre la Myopathie, Centre de Rééducation de Kerpape, documentation interne, 1992.

[BROO 93] BROOKS R., STEIN. L

"Buiding brains for bodies"

Massachusetts Institute of Technology A.I. Memo N° 1439 August, 1993

[CEA 92] COMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

"SPRINT SP 53 STATE OF THE ART"

Rapport interne

[CHAR 93] CHARON Y.

"Premier pas du couple homme-singe : la vie reconquise"

Mutualité française, Janvier 1993.

[CHAR 91] CHARPENTIER P.

"Auto-test d'une mémoire programmée : deux solutions".

Revue Electronique N°4 janvier 1991.

[CHEU 92] CHEUNG E., LUMELSKY V.

"A sensitive skin system for motion control of robot arm manipulator"
Robotics and Autonomous Systems, Vol 10, 1992.

[COLB 89] COLBAUGH R., SERAJI H., GLASS K.L.

"Obstacle avoidance for redundant robots using configuration control"
Journal of Robotic Systems 6(6), 721-744 1989

[CUNI 92] CUNIN J.-C.

"Le télémanipulateur MANUS".
Réadaptation, N°387, 1992.

[GERA 89] GERARDIN J.P., VIGNERON C., CHARPENTIER P.

"Eléments de réponse au problème de la sécurité des dispositifs industriels à microprocesseurs".
I.N.R.S. Cahiers de notes documentaires N°135 2° trimestre 1989.

[GHOS 90] GHOSH K., PAQUES J.J.

"Etat des connaissances en Amérique du Nord"
Dispositifs électroniques sensibles, journées techniques, I.N.R.S., Vandoeuvre, 13 et 14
juin 1990.

[GUIT 88] GUITTET J.

"La robotique médicale"
Editions Hermes, 1988.

[HAMM 92] HAMMEL J.M., VAN DER LOOS H.F., PERKASH I.

"Evaluation of a vocational robot with quadriplegic employee"
Arch. Phys. Med. Rehabil. Vol 73, July 1992

[HILL 92] HILLMAN M., JEPSON J.

"Evaluation of a robotic workstation for the disabled"

J. Biomed. Eng., Vol. 14, May 1992.

[KAVR 94] KAVRAKIL., LATOMBE J.C.

"Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning"

1050-4729/94 \$03.00 1994 IEEE

[KHAT 86] KHATIB O.

"Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots"

Int. Journal of Robotics Research 5(1):90-99, 1986

[KOSS 86] KOSSMAN D.

"A multi-microprocessor-based control. Environment for industrial robots"

Thesis Mc Gill University 1986

[KWEE 89] KWEE H.H., DUIMEL J.J., SMITS J.J., TUINHOF DE MOED A.A., VAN WOERDEN J.A., L.W. V.D. KOLK, ROSIER J.C.

"The MANUS wheelchair-borne manipulator : system review and first results"

Second Workshop on Medical and Healthcare Robotics, Newcastle Upon Tyne, Sept 1989.

[LEDR 94] LE DREZEN A., MUNERATO F., BOP C., LAURENT C.

"Robotic arm to be mounted on a mobile base. Application to motor handicapped people"

4th National Conference On Fine Mechanics with International Participation "COMEFIN-4" Bucharest Romania, Oct 1994.

[LESI 92] LESIGNE B., DETRICHE J.-M.

"MASTER un robot d'assistance aux personnes totalement dépendantes"

Réadaptation, N°387, 1992.

[LUME 87] LUMELSKY V.

"Effect of kinematics on motion planning for planar robots arms moving admist unknown obstacles"

IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, JUNE 1987

[MD 94] MD PROSPECTVIVES

"

Rapport suite à contrat ANVAR /LAEI

[MOHA 93] MOHAMED O, KUMAR V., HARWIN W.

"An inexpensive pneumatic manipulator for rehabilitation robotics"

1050-4729/93 \$3.00 1993 IEEE

[MONC 87] MONCHY F.

"La fonction maintenance".

Collection Technologie, Masson, 1987.

[MOTA 90] MOTAMED C., DELEPLANQUE H.

"Application de la vision artificielle à la sécurité en robotique".

Dispositifs électroniques sensibles, journées techniques, I.N.R.S., Vandoeuvre, 13 et 14 juin 1990.

[NOVA 93] NOVAK J.P., FEDDEMA J.T., MINER N.E., STANFIELD S.A.

"Collision avoidance during teleoperation using whole arm proximity sensors coupled, to a virtual environnement"

SPIE Vol. 2057 1993

[PINO 95] PINO P., HENRIJON J., PRUSKI A.

"Capteur intelligent de profil plan pour la robotique mobile"

Revue d'automatique et de productique appliquées 1995

[POTT 92] POTTIER B.

"Etude et réalisation d'un détecteur de proximité capacitif dédié à la sécurité des personnes".

Thèse de Doctorat nouveau régime Université de Reims, 1992.

[POTT 93] POTTIER B., PRUSKI A., COUET C.

"Etude et réalisation d'un détecteur de proximité capacitif dédié à la sécurité en robotique"

Revue d'automatique et de productique appliquées P341-364 Vol n°6 -n°4/1993

[PRIO 90] PRIOR S.

"An electric wheelchair mounted robotic - a survey of potential users"

Journal of Medical Engineering & Technology, Volume 14, Number 4, 1990

[PRUS 84] PRUSKI A.

"Etude de capteurs tactiles à fibre de carbone. Application à l'assemblage de pièces mécaniques par robot".

Thèse de Doctorat de 3e cycle L.A.E.I. Metz, juillet 1984.

[SAIN 91] SAINTOT B., PAGLIERO D., BREMONT J.,

"Performances d'arrêt d'urgence des robots manipulateurs industriels".

I.N.R.S. Cahiers de notes documentaires N°143 2° trimestre 1991.

[SAIT 92] SAITO Y., HIGASHIHARA T., ITO H., OSHIMA T., MOMOSAKI K.

"A new approach in robot control systems for home nursing"

Journal of Robotics and Mecatronics, VOL 4, N°4, 1992.

[SCHW 84] SCHWEITZER A., GERARDIN J.-P.

"Méthodes permettant d'améliorer le niveau de sécurité des systèmes à logique programmée"

Electronique, Techniques et Industriel (Paris), N°12, novembre 1984.

[SCHW 86] SCHWEITZER A.

"Amélioration du niveau de sécurité des systèmes électroniques programmables par application du concept d'analyse de signature".

Programmable Electronic Systems Safety Symposium, Guernsey, mai 1986.

[SHAF 92] SHAFFER C., HERB G.

"A real time robot arm collision avoidance system"

IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol. 8, No. 2,

avril 1992

[SHAF 91] SHAFFER C.

"Real time robot arm collision detection for telerobotics"

Computers Elect. Engng Vol. 17, No. 3, pp 205-215, 1991

[SUN 87] SUN K., LUMELSKY V.

"Computer simulation of sensor-based robot collision avoidance in unknown environment"

Robotica (1987) volume 5, pp 291-302

[TOUR 92] TOURNASSOUD P.

"Planification et contrôle en robotique"

Editions HERMES 1992

[VAUT 89] VAUTRIN J.P., DEI-SVALDI D.

"Accidents du travail sur sites automatisés"

INRS, Cahiers de notes documentaires n°136, troisième trimestre 1989.

[VOGR 86] VOGRIG R., MOREL G., SEI-SVALDI D., VAUTRIN J.-P.

"Contribution de la sécurité d'un système automatisé par S.A.D.T."

I.N.R.S. Cahiers de notes documentaires N°123 2^e trimestre 1986.

Les travaux proposés dans ce mémoire sont relatifs au développement d'un bras manipulateur embarqué sur fauteuil roulant électrique.

Ce document présente les différents aspects abordés lors de la conception de téléthèse et plus généralement de robots de coopération. Une attention particulière est accordée aux problèmes liés à la sécurité de l'opérateur. Ce problème est divisé en deux sous-problèmes qui sont la fiabilisation générale du système et l'évitement de collision. A partir de ce dernier point nous proposons une méthode innovante : "la génération stochastique de trajectoire en temps réel avec contraintes d'environnement", qui permet à l'opérateur de manoeuvrer dans un univers non structuré. Cette méthode donne des résultats satisfaisants sous certaines restrictions et est compatibles avec une génération en ligne de trajectoire.

MOTS CLES : robotique - handicap - coopération - trajectoire - collision - stochastique

The work described in this thesis relates to the development of a manipulator mounted on an electric wheelchair.

This document presents the different aspects studied during the achievement of teletheses, and more broadly during the achievement of cooperative robots. A very special care is brought to problems relating to the operator's safety. This problem is divided into two sub-problems : the overall reliability of the system and the collision avoidance. From this last point a new approach to collision avoidance is proposed : "the randomized generation of trajectory in real time with restraining environment", which allows the operator to work in a non structured world. This method gives satisfying results with some reservations and is compatible with an on line generation of trajectories.

KEYWORDS : robotics - disability - cooperation - trajectory - collision - random