

REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUEUNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT D'ELECTRONIQUE

THESE DE MAGISTER

SPECIALITE ELECTRONIQUE

Option: Communication

*Thème***CONCEPTION ET REALISATION D'UN
SYSTEME ROBOTIQUE****Par
Mr. AMMOUR Nassim**

Présentée devant le jury:

Mr. A. GUESSOUM	Ph.D. M.C.	Président.
Mr. A. BENKHROUF	Ph.D. M.C.	Examineur.
Mr. H. OULD-ROUIS	Ph.D. C.C	Examineur.
Mr. K. AMMOUR	Ph.D. M.C.	Rapporteur.
Mr. B. KAZED	Master. C.C	Invité.

BLIDA, ALGERIE
1995

**CONCEPTION ET REALISATION
D'UN SYSTEME ROBOTIQUE**

DEDICACES

Je dédie cet humble travail à:

- toute ma famille,*
- mes amis,*
- et à tous ceux que j'aime.*



REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma vive gratitude à Mr. AMMOUR Kamel, qui a été à l'origine du sujet et qui m'a constamment guidé et orienté le long de ce projet.

Je remercie également Mr. GUESSOUM, Mr. BENKHROUF, Mr. OULD-ROUIS ainsi que Mr. KAZED pour leurs précieux conseils et leurs serviabilités qui sont des plus considérables.

Je remercie aussi Mr. ARBAOUI Amar pour son aide si précieuse.



Résumé

Ce projet met en relief les différents constituants menants à l'établissement d'un robot qu'on a nommé BMAN31. Le travail effectué porte sur le développement des différents axes assurant la réalisation d'un bras manipulateur. Les axes suivis sont: l'architecture mécanique, modélisation mathématique et matrice de passage, simulation sur ordinateur du bras, le système actionneur, le système sensoriel, contrôle des mouvements du robot et le système de communication homme-BMAN31.

Sous Titre:

LE ROBOT BMAN31

(Bras MANipulateur, 3 articulations, prototype 1)

Mots clés

Articulation, Base, Bras manipulateur, Champs d'intervention, Communication Homme-Machine, Effecteur, Environnement, Matrice de passage, Outil de travail, Poignet, Porteur, Robot, Segment, Support, Système Mécanique Articulé, Tâche, Variables généralisées, Variables opérationnelles, Variables articulaires.

Glossaire

Articulation: Système de liaison bilatérale limitant les possibilités de mouvement relatif entre deux segments adjacents.

Base: Support du bras manipulateur.

C.H.M: Communication Homme_Machine.

Effecteur: Outil de travail du robot, il entre en contact directe avec l'objet à manipuler.

Environnement: Représente des objets fixes ou mobiles, solides ou déformables, libres ou liés à d'autres.

Espace articulaire: L'ensemble des points déterminés par les coordonnées articulaires.

Espace de la tâche: Espace repéré par les coordonnées cartésiennes, dans le quel on définit la tâche et les objets à manipuler.

Matrice de Passage: Opérateur mathématique qui découle du modèle cinématique directe et inverse, et qui assure le passage de l'espace de la tâche à l'espace articulaire et vis_versa.

Moteur DCPM: (Direct Current Permanent Magnet motors), moteur à courant continu et à aimant permanent.

poignet: Ensemble des articulations qui lient le bout du porteur à l'effecteur.

Porteur: Ensemble bras et avant bras.

Segment: Corps solide et rigide qui constitue le bras et l'avant bras.

SMA: Système Mécanique Articulé.

Tâche: Présente une suite, continue ou discrète, d'actions exercées sur un environnement, pour en obtenir une modification adéquate à une situation donnée.

Variables généralisées: Coordonnées d'un point repéré dans le repère articulaire(repère des articulations du robot).

Variables opérationnelles: coordonnées d'un point repéré dans le repère de la tâche(l'espace cartésien).

Nomenclature

R	Résistance du circuit de l'induit et celle de la source de tension de commande,
L	Inductance du circuit de l'induit et celle de la source de tension de commande,
V	Tension de commande,
i	Courant de l'induit,
f	Coefficient de frottement visqueux,
j	Moment d'inertie de l'induit et des organes qu'il entraîne,
E	Force contre-électromotrice,
gm	Couple moteur,
gr	Couple résistant extérieur,
Kg	Coefficient de proportionnalité entre gm et le courant i,
KE	Coefficient de proportionnalité entre E et la vitesse w,
w	Vitesse angulaire de l'arbre du moteur,
t	Position angulaire de l'arbre du moteur.
c_i	le coefficient de frottement visqueux à la coordonnée X_{i1} .
g	la constante gravitationnelle,
K_i	le gain de l'amplificateur du moteur i,
L	= T - U est le lagrangien,
m_i	la masse du segment i,
q_i	la force généralisée à x_{i1} , $q_i = K_i u_i - c_i X_{i2}$,
T	l'énergie cinétique du système,
U	l'énergie potentielle dans le système,
u	= $[u_1 \ u_2 \ u_3]^T$ est le vecteur de contrôle,
u_i	la commande de l'articulation (signal de contrôle) en X_{i1} ,
X_{i1}	la coordonnée généralisée pour chaque degré de liberté,
X_{i2}	la dérivée de X_{i1} par rapport au temps,
X_L	= $[X_{12} \ X_{22} \ X_{32}]^T$ est le vecteur accélération,
X_L	= $[X_{12} \ X_{22} \ X_{32}]^T$ est le vecteur vitesse,
X_{2L}	= $[X_{212} \ X_{22}^2 \ X_{32}^2]^T$ est le vecteur centrifuge,
XX_L	= $[X_{12}X_{22} \ X_{12}X_{32} \ X_{22}X_{32}]^T$ est le vecteur coriolis.

SOMMAIRE

Conception et réalisation d'un système robotique.

Introduction	1
1- Introduction	1
2- Structure de la thèse	2
Suivi	3
1- Historique	3
2- Extraits de notice de constructeurs de robots	4
Cahier de charges	7
1- Simulation du robot BMAN31 sur PC	7
2- Simulation de la commande de l'articulation du BMAN31	7
3- Conception et réalisation du robot BMAN31	7
Chapitre I: Structure mécanique et système actionneur du robot BMAN31	
I-1- Introduction	8
I-2- Source d'énergie et actionneurs du robot BMAN31	8
I-2-1- Sources d'énergie	8
I-2-2- Le système actionneur du robot BMAN31	9
I-2-3- Choix de la source d'énergie et de type d'actionneurs	10
I-3- Structure mécanique du robot BMAN31	11
I-3-1- Système mécanisme articulé	12
I-3-2- Segments et articulations	12
I-3-3- Degrés de liberté	13
I-3-4- Faux degrés de liberté	13
I-3-5- Champs d'intervention du robot	15
I-4- Systèmes de coordonnées (configurations physiques)	15
I-4-1- Avantages et inconvénients des configurations physiques des robots	15
I-4-2- Choix des coordonnées	15
I-4-3- Les différentes classes des robots	16
Chapitre II: Modèle mathématique du robot BMAN31.	
II-1- Introduction	20
II-2- Le modèle mathématique du BMAN31	20
II-2-1- Le modèle cinématique direct	20
II-2-2- Matrice de passage	21
II-2-3- Le modèle cinématique inverse	21
II-3- Volume de travail	23
II-3-1- Frontières de l'espace de travail pour les BM plans	23
II-3-2- Détermination des équations des portions de la frontière Γ	23
II-3-3- Volume de travail tridimensionnel	27

II-4- Etude dynamique du BMAN31	27
II-4-1- Architecture du BMAN31	27
II-4-2- Les énergies potentielles U_i du S.M.A	28
II-4-3- Les énergies cinétiques des segments	29
II-4-4- Application de l'équation de LAGRANGE du second espèce:	29
II-4-5- Passage à la forme matricielle des équations dynamiques du BM	30
II-5- Etude cinématique du déplacement en ligne droite du bras manipulateur	32
II-5-1- Les équations mathématiques dans le repère cartésien	33
II-5-2- Les équations mathématiques dans le repère angulaire	34
Chapitre III: Commande du robot BMAN31	
III-1- Introduction	36
III-2- Contrôle des mouvements du robot	37
III-2-1- Les systèmes adaptatifs à modèle de référence	37
III-2-2- Les régulateurs auto-ajustables STR	37
III-3- Contrôle des mouvements du robot BMAN31	38
III-3-1- Modélisation du moteur DCPM	39
III-3-2- Description du modèle	40
III-4- Identification des paramètres du système	41
III-5- Conception du contrôleur	42
III-5-1- Contrôle à retour d'état	43
III-5-2- Le contrôleur PD	44
III-5-3- Implémentation du régulateur PD	45
III-5-4- Placement des pôles	46
III-6- Vitesse et position référence	47
III-6-1- La vitesse référence	47
III-6-2- La position référence	48
III-7- Contrôle des mouvements du robot BMAN31	48
Chapitre IV: Communication et définition de la tâche	
IV-1- Introduction	49
IV-2- Source d'informations du robot BMAN31	49
IV-2-1- Le système sensoriel du BMAN31	49
IV-2-2- Interface opérateur-BMAN31	49
IV-3- Communication et programmation de la tâche	50
IV-3-1- Le robot et son environnement	50
IV-3-1-1- Structure fonctionnelle	50
IV-3-1-2- L'environnement	50
IV-3-1-3- Les tâches	51
IV-3-2- Types de mouvement	52
IV-3-3- Niveaux de description d'une tâche	52
IV-3-3-1- Tâche objectif	52
IV-3-3-2- Tâche outil	52
IV-3-3-3- Tâche d'interaction	52
IV-3-3-4- Tâche robot	53
IV-3-4- Programmation de la tâche du BMAN31	54
IV-4- Planification des mouvements	54
IV-5- Trajectoire en ligne droite	54
IV-6- Boite de commande	54

Chapitre V: Réalisation du robot BMAN31	
V-1- Introduction	56
V-2- Structure mécanique du robot BMAN31	56
V-2-1- Les segments du BMAN31	57
V-2-2- Les articulations du BMAN31	57
V-2-3- Transmetteur du mouvement du BMAN31	63
V-3- Les actionneurs et les capteurs du robot BMAN31	63
V-3-1- Le système actionneur du robot BMAN31	64
V-3-2- Le système sensorielle du BMAN31	64
V-4- Commande des mouvements du robot BMAN31	64
V-4-1- Générateur du signal de commande	64
V-4-2- Circuit de retour	65
V-4-3- Circuit d'échantillonnage	65
V-4-4- Circuit d'initialisation des compteurs	66
V-4-5- Le calculateur de site	66
V-4-6- Modules de puissance	66
V-5- Boite de commande manuelle	67
V-6- Simulation sur PC du robot BMAN31	68
V-6-1- Simulation du robot BMAN31	68
V-6-2- Simulation de la loi de commande	74
Conclusion	83
Annexe I	i
Annexe II	iv
Annexé III	xxii
Bibliographie	

INTRODUCTION

1. Introduction:

Le bras humain, outil de travail par excellence, est nanti d'une motricité unique. L'homme saisit de sa main avec aisance des objets de tailles, formes et poids différents, et leur imprime une multitude de mouvements complexes, l'homme est capable de se déplacer et de faire des mouvements à volontés, de doser et d'orienter ses efforts dans l'espace en les adaptant aux charges et aux résistances subits. Les fonctions de gestion des mouvements et leur contrôle sont assurés par un organe vivant unique, le cerveau humain. Cette création vivante fait l'objet d'une référence d'orientation des recherches dans le domaine de la cybernétique.

Le développement technique dans le domaine de la mécanique a permis la réalisation d'automate doué d'une multitude de mécanismes variés capables de réaliser une large gamme de mouvements. Vinrent ensuite les ordinateurs, palliant aux problèmes de gestion et de contrôle des mouvements, jouant ainsi le rôle du cerveau humain.

Le développement des actionneurs et des capteurs a permis un couplage rigide entre l'unité de contrôle et l'architecture mécanique. Ce n'est qu'après avoir couplé ces deux sous systèmes que l'on a pu réaliser par des moyens techniques un automate versatile, le robot, capable de reproduire des mouvements et des procédés de travail qui ont toujours été considéré comme l'apanage de l'homme.

La conception et la réalisation de l'architecture mécanique du robot BMAN31 dérive d'une étude portée sur les différentes architectures des robots existants. Le déplacement et l'action de l'effecteur, dans l'environnement du robot, doivent suivre des trajectoires qui dérivent des contraintes de l'environnement, de l'harmonisation du mouvement et de la nature de la tâche à exécuter. Par conséquent, le contrôle des mouvements du bras devient nécessaire. De ce fait, le système actionneur doit être piloté par une loi de commande en boucle fermée. Les informations concernant les états du système sont fournies par un système sensoriel, conçu et réalisé à cette fin.

Ce mécanisme nanti de la faculté de se mouvoir avec la précision désirée, est sensé effectuer une action sur l'environnement. A cet dessein, on a recours à la définition de la tâche et la génération des plans d'action, menants à bien l'exécution de l'action désirée. Dans le but de communiquer la tâche au robot, un système de communication entre le robot et l'opérateur est réalisé. Le robot est équipé d'un calculateur de site, qui assure le contrôle, la gestion et le traitement des informations. Un calculateur éloigné permet à l'opérateur de traiter et communiquer la tâche au robot.

La robotique, avec tous les principaux constituants que peut contenir ce domaine, présentent les piliers de notre conception et réalisation du robot BMAN31. Ce dernier doit manipuler et exécuter des instructions à l'instar d'un être humain, afin de produire la tâche communiquée par l'opérateur.

2. Structure de la thèse:

Le premier chapitre expose les différentes sources d'énergie qui alimentent les robots, ainsi que l'architecture mécanique du robot BMAN31, et son système d'actionnement.

Lors du deuxième chapitre, les propriétés mathématiques, et la représentation géométrique qui permettent de décrire la structure mécanique articulée dotée d'articulations de rotation seront exposées, ainsi que l'étude dynamique et la détermination des matrices dynamiques du robot de classe 1.

Le troisième chapitre porte sur le contrôle des mouvements du robot, par l'établissement de la loi de commande qui pilote chacune des articulations du robot, ainsi que la description du système sensoriel.

Le quatrième chapitre représente la communication et la définition de la tâche, la génération des plans d'action et le système de communication qui assure la liaison opérateur - BMAN31.

Le cinquième chapitre porte sur les différentes phases menant à la réalisation du robot BMAN31. On traitera également dans ce chapitre les différentes étapes menant à l'établissement des programmes de simulation sur PC du robot et de sa loi de commande.

SUIVI

1. Historique:

L'homme a été fasciné depuis les temps préhistoriques par les êtres et les existences extraordinaires, les hommes mécaniques et d'autres créatures. Les anciens égyptiens ont construits des statues qui représentaient des dieux et qui fonctionnaient par des prêtres, ces derniers prétendaient que ces statues agissaient sous l'inspiration directe de dieu représenté par les statues. Leur but dans tout cela était d'impressionner et d'augmenter la foi ou combattre l'infidélité. Ce moyen a donné ses fruits et ils ont obtenus des bons résultats. Cet intérêt porté sur les hommes mécaniques, les robots et les autres créatures exotiques s'étend jusqu'à nos jours.

Durant l'apogée de la civilisation Grec, plusieurs siècles après, il y avait plusieurs créateurs de statues à fonctionnement hydraulique. La majorité de ces derniers ont été mis dans des temples et apparemment servaient à inspirer les fidèles spirituellement.

Les premiers automates, construits en Europe, durant le dix-septième et le dix-huitième siècle, étaient véritablement des merveilles mécaniques.

Même si les grecs, les romains et dernièrement les européens possédaient des machines robot, l'application robot revient au dramaturge tchèque Karel Capek. Dans le langage tchèque le mot robota veut dire travailleur fournissant des services obligatoires. En 1921 Capek écrit la pièce appelée R.U.R "Rassum's universal robots", dans cette pièce, les robots étaient des humanoïdes développés par Rossum et son fils pour être les serveurs de l'humanité.

Capek a essayé de décrire lui-même les performances de ses robots. Sa pièce théâtrale contient suffisamment de données qui permettent de définir la destination fonctionnelle du robot. Au sens de Capek le robot est un ensemble technique destiné à se substituer à l'homme pour exécuter des mouvements de travail, et c'est là sa tâche exclusive. Sa supériorité technique, de même que son intelligence étonnante, doivent lui permettre de ce mouvoir et de travailler avec plus de vitesse, de force, de précision que l'homme, d'être supérieur à l'homme sous ce rapport.

L'emploi par Capek du mot intelligence au sens commun, signifiant raison, faculté de résonner, niveau intellectuel, est devenu possible aujourd'hui. Le terme intelligence artificielle est devenu aujourd'hui, lui aussi, un terme scientifique et technique universellement adopté.

Isaac Asimov, un des meilleurs écrivains de la science fiction, est reconnu être le premier utilisateur du mot robotique, pour décrire la science qui traite les robots. Ses histoires avec les robots prévoyaient des problèmes qui ne se présentaient pas à l'époque, mais avec un réalisme possible. Ses trois lois sur les robots présentent des considérations de grande valeur pour les concepteurs modernes et les utilisateurs de robots. Ces lois sont:

1- Le robot ne doit pas nuire à l'être humain ou, à travers l'inaction, permettre à quelqu'un de le rendre nuisible.

2- Le robot doit toujours obéir à l'être humain, à moins que c'est en conflit avec la première loi.

3- Le robot doit se protéger contre la nocivité à moins que c'est en conflit avec la première ou la deuxième loi.

La robotique est considérée aujourd'hui comme un des grands axes du progrès scientifique et technique. La gamme des problèmes qui s'y posent est extrêmement large. Des centaines d'organismes et de sociétés dans les pays industrialisés mettent au point et commercialisent des robots de plus en plus sophistiqués, cherchent et découvrent de nouvelles et spectaculaires applications dans différentes industries. De nombreux centres de recherche oeuvrent pour multiplier les facultés des robots, les rendre encore plus fonctionnels.

L'implantation massive des robots promet des avantages techniques, économiques et sociaux inestimables, ils sont capables de se substituer avantageusement à l'homme afin d'assumer des tâches ingrates et monotones. Cette opinion découle d'une façon commune à des recherches technologiques, calculs économiques et pronostics scientifico-techniques.

2.Extraits de notice de constructeurs de robots:

En absence d'une normalisation rigoureuse, chaque constructeur rédige ses notices à sa manière.

Le robot AXERA:

Les robots AXERA (Renault Atomation) possèdent une électronique de commande qui est organisée autour du microprocesseur 16 bits INTEL 8086. possède la fonction initialisation automatique, et la fonction apprentissage (interactif avec l'opérateur).

Le robot SCEMI:

le robot SCEMI 6 P 01 possède une structure mécanique à six axes de rotations, une motorisation du type tout électrique (DC motors), vitesse angulaire maximale de chaque axe 233 degrés/s, vitesse linéaire maximale en bout de pince 2.7 m/s, une répétabilité de 0.04 mm. Chacun des six axes du robot est entraîné par un moteur DC, piloté par un asservissement en vitesse et en position.

Le robot SHAKEY:

Le robot SHAKEY [31], crée à Stanford Research Institute possède un système sensoriel très évolué, des capteurs tactiles, un télémètre, une caméra et un système de navigation particulier. SHAKEY est un chariot à trois roues, dont chacune est actionnée par un moteur électrique individuel, commandé par ordinateur. Combiné à un bras mécanique, cet automate représente un robot adaptatif mobile.

Le robot ERICC:

Le robot ERICC [30] possède un bras manipulateur constitué d'un socle et de cinq corps rigides articulés, animés de mouvements de rotation. Sa structure est du type RRRRR. Son effecteur est une pince à deux doigts, animé d'un mouvement d'ouverture et de fermeture à force de serrage contrôlée. Sa motricité est assurée par des moteurs DC et des moteurs pas à pas. Ces caractéristiques sont:

- Charge: 0.5 Kg maxi,
- Vitesse en bout de pince: 0.8 m/s,
- Répétabilité: 0.5 mm,
- Poids: 46 Kg,
- Cinq degrés de liberté: Base (29 mm, $\pm 135^\circ$), Epaule (328 mm, 135°), Coude (280 mm, 135°), Poignet ($\pm 90^\circ$), Rotation de la pince ($\pm 180^\circ$).

Le robot PUMA:

Le robot industriel PUMA 260 possède six articulations rotoïdes. Son contrôle est basé sur une architecture à neuf calculateurs, un calculateur iSBC 86/36 pour chaque articulation avec un coprocesseur 8087, ces derniers travaillent à 8 Mhz, et assurent les calculs du contrôleur en temps réel. Un calculateur superviseur calcule la trajectoire du robot dans l'espace cartésien, les résultats sont utilisés par les calculateurs des articulations, pour calculer la cinématique inverse en parallèle, afin d'atteindre la position correspondante à chaque articulation [32]. Un calculateur 186/51 permet au contrôleur du robot de communiquer avec le monde extérieur. Un calculateur iSBC 86/30, lié au calculateur superviseur et aux calculateurs des articulations, pour évaluer les équations dynamiques et les matrices jacobiniennes, qui sont utilisées dans les algorithmes de contrôle.

Le robot VERSATRAN:

Le robot VERSATRAN, de nom composé des termes VERSATile et TRANSfère, est développé par AMF, il est destiné à remplacer l'homme dans l'exécution de quelques tâches ingrates.

L'unité standard de VERSATRAN est un bras monté sur une colonne (axe vertical), cette dernière est supportée par une base. Trois articulations assurent la mobilité de VERSATRAN, une rotation au niveau de la base, une translation verticale le long de la colonne et une translation horizontale le long du bras. Cette mobilité RTT donne la possibilité au robot de se mouvoir dans le système de coordonnées cylindriques. Un poignet est monté sur le bout du bras, supportant ainsi un saisisseur.

Le système actionneur, qui pilote le bras, est un système hydraulique. Un vérin provoque le déplacement horizontal, un autre vérin produit le déplacement vertical, un moteur hydraulique assure la rotation de la base. Le système sensoriel du robot est à base de potentiomètres. Un système de commande à soupapes électromagnétiques assure le contrôle du débit de l'huile alimentant les actionneurs.

En plus des robots cités ci-dessus, plusieurs autres robots ont été réalisés, tels que ASIA, c'est un robot qui possède cinq degrés de liberté et un système actionneur à moteurs électriques. TRALFA, un robot développé par TRALFA NILS Underhaug A/S Company en Norvège, il est destiné à réaliser des tâches de peinture, c'est un robot à système actionneur hydraulique, possédant six degrés de liberté et une configuration angulaire. Le Japon, un des pays les plus industrialisés, possède ses empreintes dans ce domaine, ses compagnies sont KAWASAKI, JIRA, etc...

Cahier de charge

I. Simulation du robot BMAN31 sur PC:

1. Simulation de l'architecture mécanique du BMAN31 et de son environnement.
2. Un programme interpréteur générant les plans d'action, menant à bien l'exécution de la tâche de saisissement et de positionnement de l'objet à manipuler.
3. A partir des coordonnées de l'objet à manipuler, qui présentent les données d'entrées au programme de simulation, et des coordonnées des points intermédiaires générés, le passages aux coordonnées articulaires, et cela par le biais de la matrice de passage.
4. Planification de la trajectoire, et contrôle des mouvements du robot BMAN31.

II. Simulation de la commande de l'articulation du BMAN31:

1. Programme simulateur de l'actionneur(moteur DCPM).
2. Programme estimateur des paramètres de l'actionneur.
3. Programme générateur de la vitesse et de la position référence.
4. Programme générateur de la variable de commande.

III. Conception et réalisation du robot BMAN31:

1. Conception et réalisation de l'architecture mécanique du BMAN31.
2. Réalisation du système sensoriel.
3. Etablissement d'une ligne de communication avec le robot BMAN31.
4. Réalisation de la carte de d'acquisition et de traitement au niveau du calculateur de site.
6. Implémentation de la commande.

CHAPITRE I

**STRUCTURE MECANIQUE ET SYSTEME
ACTIONNEUR**

DU ROBOT BMAN31

I.1 Introduction:

Les aspects technologiques de la robotique concernent tous les constituants et éléments matériels qui interviennent dans la fabrication et dans le fonctionnement des robots: sources d'énergie, système actionneur, structure, équipement sensoriel et commande.

L'utilité principale dans l'utilisation d'un robot est d'effectuer une, ou plusieurs actions sur son environnement. A cette fin, le robot doit être pourvu d'actionneurs, fournissant l'énergie mécanique nécessaire. L'actionneur étant un convertisseur d'énergie, nécessite une source d'énergie. Différentes sources d'énergie peuvent être utilisées, d'où l'existence de plusieurs types d'actionneurs.

L'énergie fournie par l'actionneur, assure la motricité de la structure mécanique du robot. Cette dernière est conçue en respectant les contraintes de l'environnement, des tâches à accomplir, des objets à manipuler, du matériel existant et des capacités du concepteur lui-même.

Le but de ce chapitre est de présenter l'architecture du robot BMAN31, son système actionneur, sa configuration, d'effectuer un inventaire des principales sources d'énergie utilisées en robotique et d'étudier les divers types d'actionneurs ainsi que leurs caractéristiques.

I.2 Source d'énergie et actionneurs du robot BMAN31:

En robotique, les sources d'énergie et les actionneurs les plus fréquemment utilisés sont du type électrique et fluide. Sans exclure l'utilisation d'autres formes d'énergie: énergie mécanique, thermique, nucléaire.

I.2.1 Sources d'énergie:

a. Energie électrique:

C'est de loin, la forme d'énergie la plus maniable et celle dont la transmission s'effectue le plus facilement. Son usage est assez fréquent en robotique. L'énergie électrique nécessaire est obtenue par différentes méthodes: conversions électromécaniques (réseaux électriques basse tension, les groupes électrogènes), conversions électrochimiques (piles traditionnelles, piles à combustibles, accumulateurs).

b. Energie fluide:

L'énergie fluide existe sous deux formes: l'énergie pneumatique et l'énergie hydraulique.

Le stockage de l'énergie pneumatique consiste à emmagasiner du gaz sous pression dans un réservoir qui, pour des questions de sécurité et de durée de vie (corrosion) doit être largement surdimensionné. Elle peut être disponible par l'intermédiaire des postes fixes (alimentant des organes de puissance comme les moteurs et les vérins). Bien que sa densité d'énergie stockable soit assez faible (pression allant jusqu'à 7 bars), l'énergie pneumatique présente un double intérêt: elle se conserve presque indéfiniment et sa puissance instantanée est relativement élevée (1 kg d'azote à 250 bars délivre jusqu'à 80 kW).

L'huile sous pression fournit des puissances importantes. La source initiale d'un système hydraulique est un moteur électrique puissant et à vitesse constante actionnant une pompe hydraulique. L'huile sous pression est stocké dans un accumulateur. Le filtrage de l'huile est nécessaire pour protéger les électrosoupapes qui pilotent les actionneurs hydrauliques comme les vérins, l'actionneur rotatoire et les moteurs hydrauliques. Le refroidissement du système hydraulique est assuré par l'écoulement de l'eau à travers les parois du réservoir de l'huile sous pression.

c. Autres formes d'énergie:

Les autres formes d'énergie qui peuvent être utilisées sont du type mécanique, thermique et nucléaire. Il existe deux formes d'énergie mécanique: l'énergie potentiel et l'énergie cinétique.

L'énergie électrique est choisie pour alimenter les actionneurs du robot BMAN31. Ce choix est établi après l'étude effectuée antérieurement.

1.2.2 Le système actionneur du robot BMAN31:

En robotique le système actionneur comprend deux parties: l'organe actionneur proprement dit, générateur de force ou de couple (moteur, vérin) et l'organe transmetteur, qui assure le déplacement du point d'application des forces en les adaptant aux caractéristiques mécaniques du manipulateur (réducteur, système de transmission par câble, par courroie...).

a. Les actionneurs:

Les actionneurs utilisés en robotique sont du type électrique, pneumatique ou hydraulique. Les actionneurs électriques les plus employés sont les moteurs à courant continu et pas à pas. Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques sont les vérins et les moteurs pas à pas. Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques reposent sur le même principe de fonctionnement, par contre, leur réalisation et leur performances sont profondément différentes compte tenu de la nature et de la pression des fluides utilisés.

Les moteurs DC sont très utilisés pour assurer la motricité des systèmes, ils possèdent deux organes indépendants, l'inducteur qui crée le champ magnétique et qui induit un enroulement de conducteurs électriques appelé l'induit. Les différents types de moteurs DC sont: les moteurs shunt, série, compound et le moteur à aimant permanent (DCPM motor).

Le moteur DCPM présente des caractéristiques fort intéressantes, un champ statorique constant produit par un aimant permanent, une caractéristique vitesse/couple linéaire dans une zone étendue, seul l'induit est alimenté, sens de rotation facile à inverser, exige moins de puissance et moins de refroidissement. Ces caractéristiques ont favorisé le moteur DCPM dans le choix de l'élément de base du système actionneur du robot BMAN31.

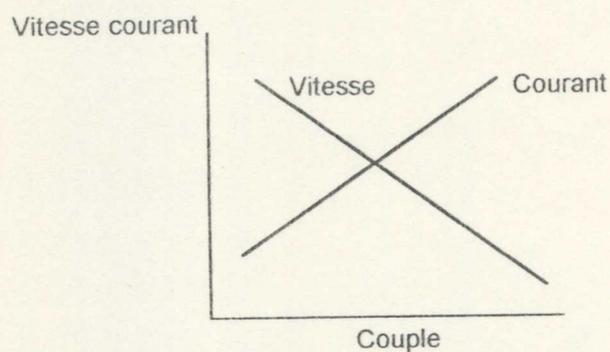


Fig.I.1: caractéristiques couple - vitesse du moteur DCPM

b. Les transmetteurs:

L'énergie mécanique issue des actionneurs doit passer par un système transmetteur avant d'être utilisée. Le système transmetteur assure également l'adaptation du mouvement: réduction de vitesse, de déplacement, changement de direction du mouvement, transformation du mouvement (mouvement circulaire en mouvement rectiligne ou inversement). Les différents types de transmetteurs de mouvement sont: roues de friction, système à engrenages, poulies et courroies, roue dentées et chaînes...

Un système de transmission de mouvement par courroies est utilisé dans le robot BMAN31, assurant ainsi une diminution du poids de la partie mobile dans l'espace.

I.2.3 Choix de la source d'énergie et du type d'actionneurs:

Le plus souvent, plusieurs solutions se présente et le concepteur doit effectuer un choix. Les spécifications du cahier des changes ainsi que des critères techniques et technologiques relatifs au matériel sont déterminants dans ce choix. On peut citer:

- Fonctionnement autonome du robot (batterie d'accumulateurs pour moteurs électriques, bouteille de gaz comprimé pour vérins pneumatiques).

- Fonctionnement en local ou en usine avec déplacement limité du robot (énergie électrique, pneumatique, hydraulique).
- Mouvement du manipulateur: rectiligne (vérin pneumatique si déplacements rapides avec effort faibles ou moyens, vérins hydrauliques si déplacements lents avec efforts importants), circulaire (moteurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques).
- Mouvement d'une articulation: les moteurs permettent d'obtenir un positionnement précis, leur mise en place nécessite généralement une transmission mécanique. Les vérins sont moins précis mais leurs montage est plus facile.
- Les possibilités d'asservissement.
- Dans les milieux inflammables ou explosifs, les actionneurs hydrauliques sont recommandés pour des raisons de sécurité.
- L'énergie pneumatique fournit des puissances plus faibles que celles fournies par l'énergie hydraulique, mais les soupapes pneumatiques sont plus simples et à coût moins élevé.
- En raison de la compressibilité du gaz, la position de la partie mobile de l'actionneur dépend de sa charge. Il n'est donc pas possible de réaliser avec ce dispositif un asservissement en position en boucle ouverte, avec une charge variable. En revanche la compressibilité du gaz permet à l'accumulateur de supporter les régimes de surcharges brutales et d'assurer leur amortissement.

I.3 Structure mécanique du robot BMAN31:

La structure mécanique et l'équipement sensoriel influencent fortement sur le fonctionnement et les performances d'un robot, cette structure résulte de l'association des liaisons mécaniques élémentaires qui constituent le système mécanique à géométrie variable appelé squelette, destinée à supporter et positionner l'organe terminal du manipulateur.

I.3.1 Système mécanique articulé:

Dans l'ordre de définir la structure mécanique du robot BMAN31, nous allons décrire les éléments qui le composent. Étant donné que la structure mécanique du robot est d'une importance primordiale pour l'établissement de la matrice de passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées articulaires, la précision dans l'usinage des pièces est exigée.

Extérieurement, un robot se constitue d'un support (véhicule ou support fixe), le bras et l'effecteur. La figure (fig.I.2) met en évidence les trois sous-ensembles d'un robot, le véhicule, le porteur, l'effecteur (ou organe terminal). Fréquemment, le découplage entre le porteur et le véhicule est adopté.

a. L'effecteur:

C'est l'organe terminal, son rôle est capital car il agit directement sur les objets extérieurs, et il impose ses exigences aux restes de la structure mécanique.

b. Porteur:

La mise en oeuvre d'un effecteur pour l'exécution d'une tâche donnée nécessite presque toujours la réalisation de mouvements bien déterminés. Le porteur est un système mécanique à géométrie variable lié à un corps de référence permettant, par des mouvements d'amplitudes limitées, de déplacer et d'orienter l'effecteur, le corps de référence lié au porteur constitue sa base.

c. Véhicule:

C'est un système mécanique libre capable de mouvements d'amplitudes non limitées a priori (Chariot auto-moteur, Engin sous-marin ...).

d. Opérateur:

On désigne par le terme opérateur le système constitué d'un porteur et un effecteur: opérateur de manutention, opérateur de soudage, opérateur de perçage,... etc. On rencontre des robots mono-opérateurs et aussi multi-opérateurs, robots à plusieurs bras.

Remarque:

La structure des manipulateurs, ressemblant souvent à la morphologie du bras humain, l'emploi des mots épaule, bras, coude, poignet, main et doigt sont désignés pour l'identification des différentes parties de la structure du robot.

I.3.2 Segments et articulations:

Un porteur est un mécanisme polyarticulé constitué de segments et d'articulations.

a. Segments Si:

C'est des corps solides rigides, susceptibles de mouvements par rapport à la base du porteur. L'un des segments au moins est articulé sur le corps de base, lequel est aussi appelé segment initial S_0 . Celui qui porte l'effecteur est le segment terminal S_n .

Ils sont aptes à supporter les charges transportées par le robot. Le robot BMAN31 possède des segments fabriqués par des plaques et des tuyaux en aluminium, afin de réduire le poids et de fournir de l'espace pour les fils électriques de contrôle.

b. Articulations Ai:

Les types d'articulations les plus utilisées sont: l'articulation rotoïde (R) du type charnière (elle autorise exclusivement la rotation autour d'un axe) et l'articulation prismatique (T) du type glissière (elle autorise exclusivement la translation le long d'un axe).

BMAN31 possède des articulations rotoïdes. Elles sont fabriquées avec la plus grande précision possible, pour maintenir la position désirée du bras. Des roulements à billes sont utilisés afin de permettre des mouvements sans secousses et précis.

I.3.3 Degrés de liberté:

Un solide S possède six degrés de liberté, car sa position à un instant déterminé peut être fixée par la donnée de six paramètres indépendants, soit le vecteur $X(\theta, \alpha, \beta, x, y, z)$ (Fig.I.3). Le nombre de degrés de liberté du robot dépend de son architecture.

Les trois paramètres x, y, z sont les coordonnées d'un point particulier de S repéré par le trièdre $R_{0}O_0, X_0, Y_0, Z_0$ dans l'espace. Les paramètres θ, β, α sont les angles nautiques (lacet, tangage, roulis) définissant l'orientation par rapport à un trièdre fixe R_0 d'un repère R_3 attaché à S (Fig.I.4). Le paramètre α définit l'angle de rotation du poignet autour de l'axe du bras, c'est le paramètre roulis. Le paramètre θ définit l'angle de rotation du poignet en haut et en bas, il présente le paramètre tangage. Le paramètre β définit l'angle de rotation du poignet à gauche et à droite, il présente le paramètre lacet (Fig.(I.5).

Remarque:

Le nombre de degrés de liberté d'un S.M.A est défini comme étant le nombre de paramètres indépendants fixant la situation de l'organe terminal à chaque configuration possible des segments et des liaisons qui forment le bras.

I.3.4 Faux degrés de liberté:

Lorsque plusieurs articulations sont entraînées par le même actionneur, les variables articulaires correspondantes sont fonction d'une même grandeur (déplacement induit par le moteur). Le même problème se retrouve lorsque l'on a deux moteurs différents mais asservis à la même consigne.

Comme exemple, si on prend l'articulation rotoïde, on remarque que pour deux articulations, on a un seul moteur, donc la première entraîne la deuxième, et les deux articulations présentent un seul degré de liberté. Les deux paramètres α_1, α_2 sont linéairement dépendants par la relation $\alpha_1 = -\alpha_2$ (Fig.I.6).

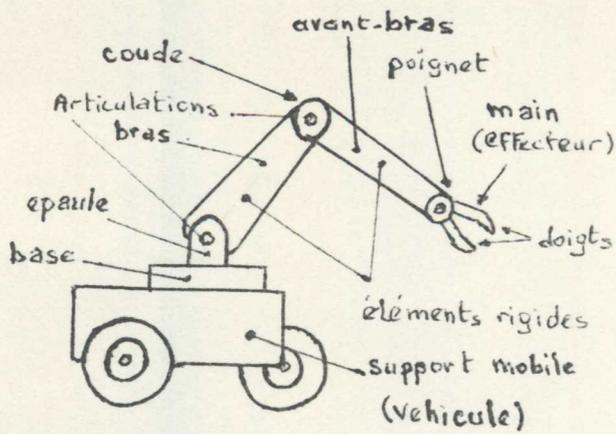


Fig.I.2 Constituants d'un robot.

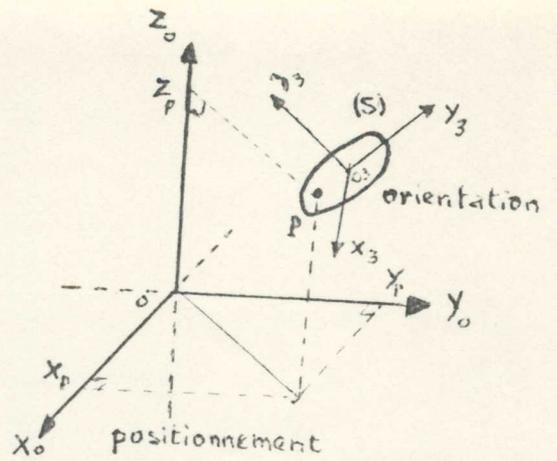


Fig.I.3 Degrés de Liberté.

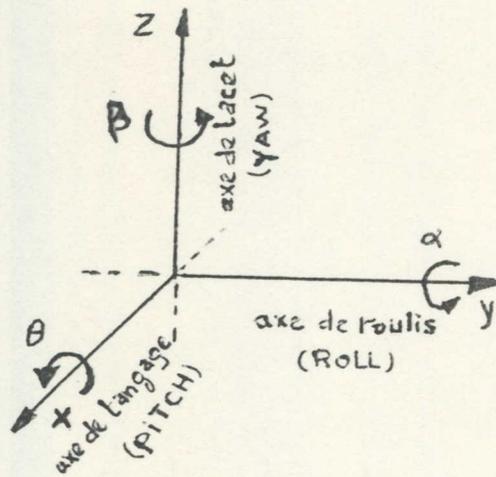


Fig.I.4 Axes d'orientation du poignet.

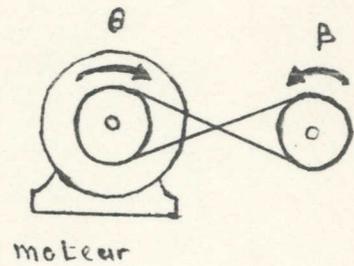


Fig.I.6 Faux degrés de Liberté.

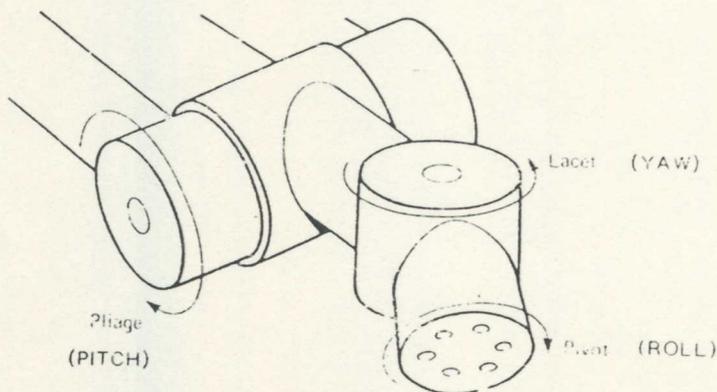


Fig.I.5 structure du poignet.

1.3.5 Champs d'intervention du robot:

Le champ d'intervention du robot représente l'ensemble des points de l'espace accessibles par son organe terminal, il est entièrement déterminé par la structure du manipulateur, longueur des éléments rigides, amplitudes maximales de la rotation des articulations et du déplacement des bras télescopique, ces amplitudes sont toujours limités par des butées, ce qui se traduit par une réduction du champs d'exploration (Fig.I.7).

Remarque:

D'une manière générale, une structure comportant des degrés de liberté de rotation possède un champs d'intervention plus étendu qu'une structure utilisant des degrés de liberté de translation.

1.4 Systèmes de coordonnées (configurations physiques):[Annexe I]

La représentation des mouvements nécessite l'emploi de systèmes de coordonnées. Il y a différentes configurations utilisées dans la robotique, représentées dans des différents systèmes de coordonnées.

Les coordonnées cartésiennes (trois articulations de translation, x, y, z), coordonnées cylindriques (deux articulations de translation plus une articulation de rotation, R, θ, z). Les coordonnées sphériques (deux articulations de rotation et une articulation de translation, R, θ, ϕ). Les coordonnées angulaires (trois articulations de rotations α, β, θ).

1.4.1 Avantages et inconvénients des configurations physiques des robots: [Annexe I]

L'étude des principaux avantages et inconvénients des configurations est établie dans le but de faciliter le choix selon la nature de la tâche à accomplir.

1.4.2 Choix des coordonnées:

Le robot BMAN31 possède une configuration angulaire. D'après cette comparaison [Annexe I], et cette petite vue sur les avantages et les inconvénients, les coordonnées angulaires assurent une bonne performance, et elles sont les plus proches de ceux du bras humain.

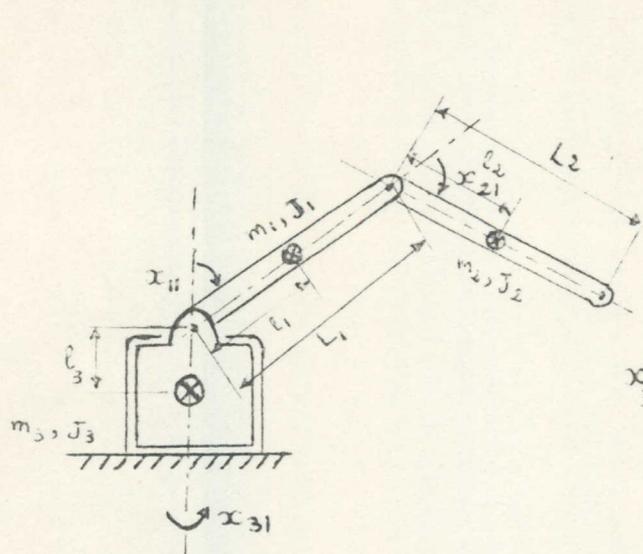
Le majeur avantage de cette configuration est la possibilité d'atteindre chaque partie du volume de travail, et le majeur inconvénient est la difficulté de visualisation et du contrôle. Le même point dans l'espace peut être atteint par plusieurs chemins, ce qui pose la difficulté de décision du meilleur chemin.

L'utilisation d'un ordinateur pour le contrôle du bras angulaire est nécessaire. La plus part des robots développés durant ces dernières années ont la configuration angulaire à cause de leur flexibilité, et le fait que toutes les articulations peuvent être protégées facilement.

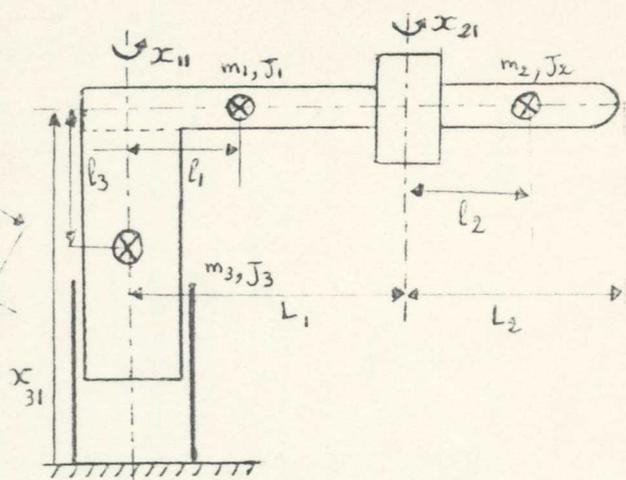
Les robots hydrauliques de ce type sont: Devilbiss, Trallfa, Cincinatti Milacron, et Nordson. Les robots électriques de cette configuration sont: Unimate, Puma, et Asea.

I.4.3 Les différentes classes des robots:

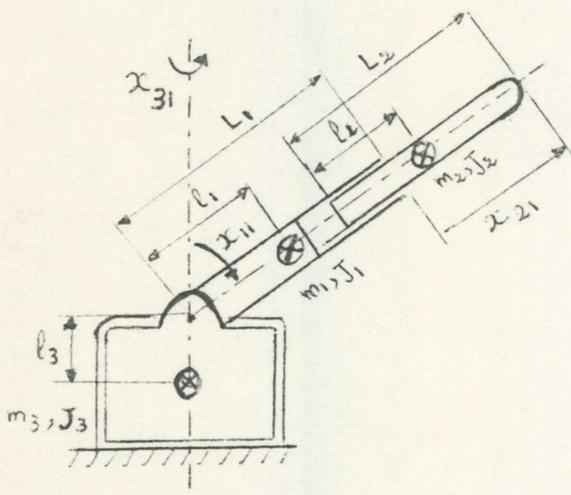
Le nombre de degrés de liberté ainsi que le type d'articulation présentent les caractéristiques de la classification des principaux robots industriels commercialisés. La figure (Fig.I.8) résume toutes les classes des robots.



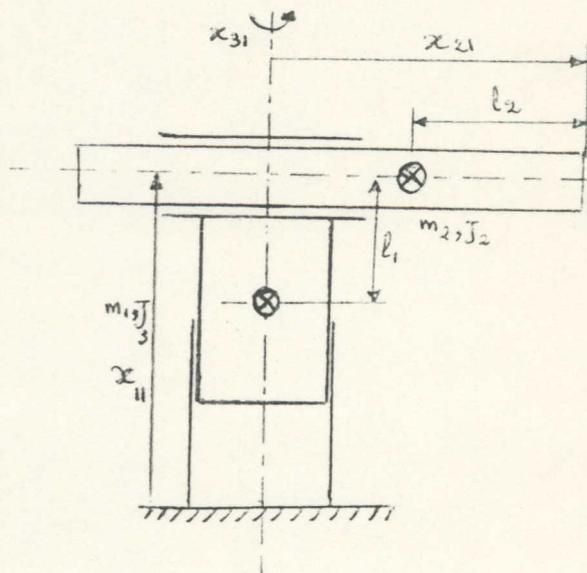
CLASSE 1
P: [1.2.3]



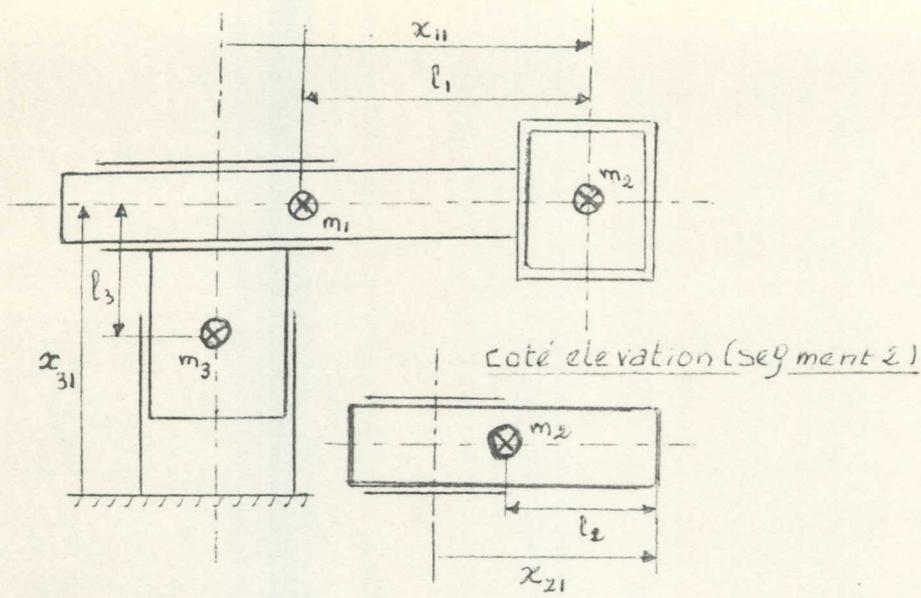
CLASSE 2
R: [1.2]
P: [3]



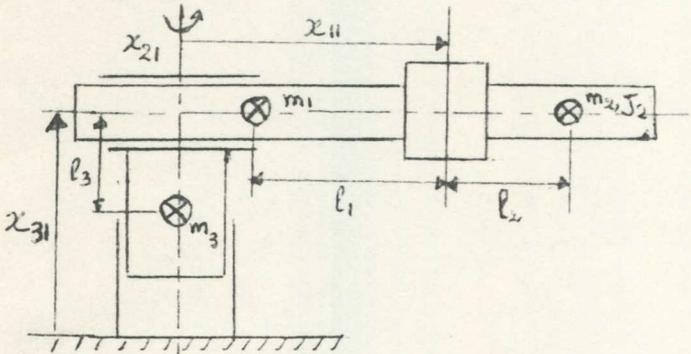
CLASSE 3
R: [1.3]
P: [2]



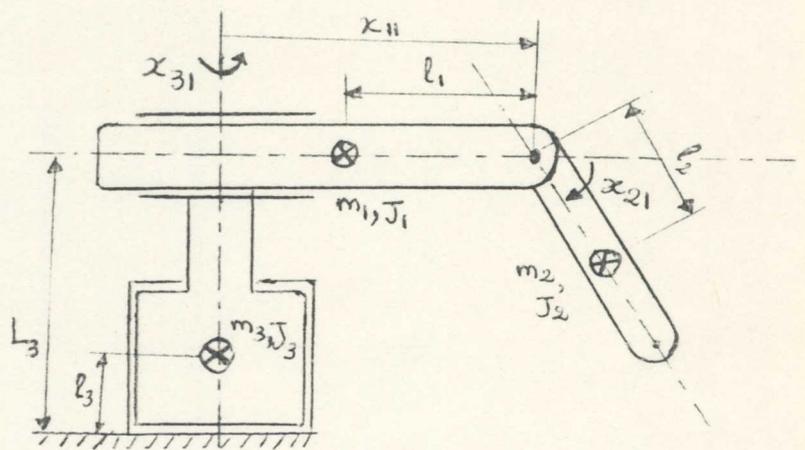
CLASSE 4
R: [3]
P: [1.2]



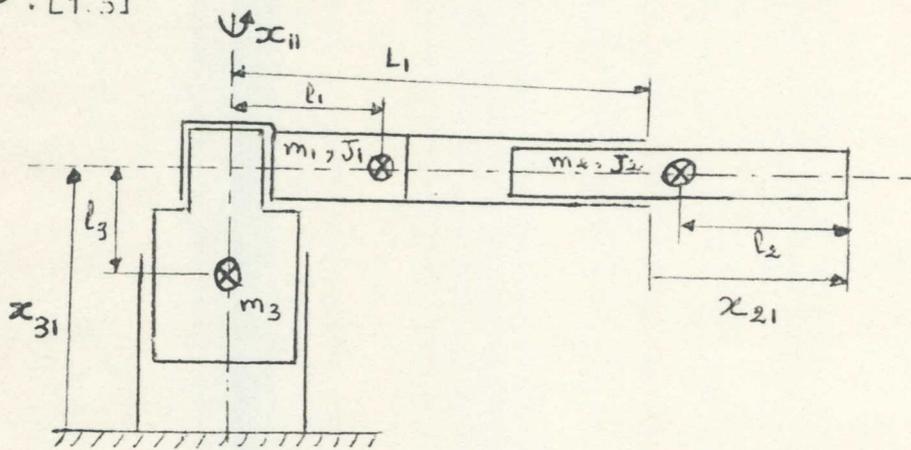
Classe 5
P: [1.2.3]



Classe 6
R: [2]
P: [1.3]



Classe 7
R: [2.3]
P: [1]



Classe 8
R: [1]
P: [2.3]

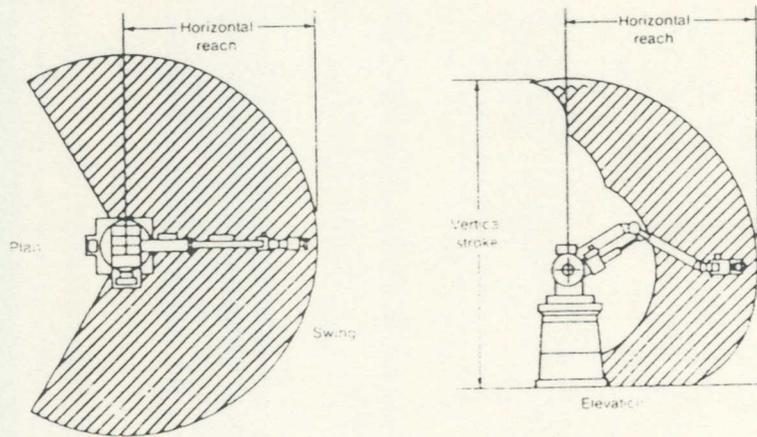


Fig.I.7 Champs d'intervention
d'un robot à structure angulaire.

CHAPITRE II

MODELE MATHEMATIQUE DU ROBOT BMAN31

II.1 Introduction:

Du point de vue structural, la géométrie d'un BM est relativement simple. Un BM représente une chaîne d'éléments, ou de segments, reliés par des couples cinématiques. Cependant, la disposition spatiale des segments et la configuration variable du BM au cours de ses mouvements, compliquent notablement le problème de description de ses caractéristiques géométriques, cinématiques et dynamiques.

Le but de ce chapitre est d'établir le modèle mathématique du robot BMAN31, nécessaire à la synthèse de la partie commande. L'établissement du modèle cinématique direct et du modèle cinématique inverse, qui permet la génération de la matrice de passage des coordonnées opérationnelles aux coordonnées articulaires. Ensuite, le volume de travail du BMAN31 sera déterminé. Enfin, Le modèle dynamique de ce dernier sera établi.

II.2 Le modèle mathématique du BMAN31:

La cinématique du bras d'un robot traite les mouvements du bras par rapport à un système de coordonnées fixe, par convention, la base du robot est prise comme référence, et toutes les configurations sont calculées par rapport à un point de référence de la base, et cela en connaissant les dimensions des articulations et des segments du bras.

La structure angulaire est adoptée pour le robot BMAN31, ces couples cinématiques sont du type rotoïdes. Ce choix est établi après une comparaison effectuée antérieurement, entre les différentes structures robotiques. Le choix des dimensions des segments est dérivé du choix du volume de travail, et par conséquent, de la portée désirée du robot BMAN31.

II.2.1 Le modèle cinématique direct:

Le robot BMAN31 possède une chaîne cinématique formée de trois segments et de trois couples cinématiques rotoïdes. Les segments de l'avant-bras et celui du bras possèdent la même longueur L , tandis que le segment de la base possède une longueur L_0 différente de L . (Fig. II.1)

Le modèle cinématique direct est représenté par un système d'équations qui permet la détermination des coordonnées opérationnelles x_i d'un point c appartenant au segment terminal du BM dans le repère cartésien, à partir des coordonnées angulaires du robot dans le repère angulaire.

Le passage du domaine des coordonnées généralisées Θ au domaine des variables opérationnelles X est assuré par la fonction de position F .

$$F: \Theta \rightarrow X$$

$$x \rightarrow F(\theta).$$

tel que:

$$x_c = L [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)] \cos(\theta_3)$$

$$y_c = L [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)] \sin(\theta_3)$$

$$z_c = L [\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2 - \theta_1)]$$

II.2.2 Matrice de passage: (Matrice de changement du système de coordonnées).

La tâche du robot est définie dans son environnement comme une suite de mouvements et de manipulations d'objets repérés par un repère cartésien. Cependant, l'évolution du bras est assurée par des actionneurs qui pilotent les articulations rotoïdes dans le cas d'une configuration angulaire du bras manipulateur. Pour adapter le robot à son environnement du point de vue tâche-consigne, le changement de système de coordonnées s'impose.

La détermination de la matrice de passage des variables opérationnelles X_i aux variables généralisées θ_i est obtenue à partir de l'architecture du S.M.A. et par l'établissement du modèle cinématique inverse.

II.2.3 Le modèle cinématique inverse:

Le champ d'exploration du BM est défini par l'ensemble des points appartenants au volume d'une hémisphère extérieure, de rayon $2L$. Le passage de l'ensemble X à l'ensemble des configurations Θ , est assuré par la fonction de position inverse F^{-1} .

Le problème de positionnement de l'effecteur d'un BM consiste à trouver une solution admissible, située dans Θ , de l'équation de position pour le second membre donné.

$$F(\theta) = x$$

Pour résoudre ce problème il faut calculer la fonction de position inverse F^{-1} .

F^{-1}

$$X \rightarrow \Theta : \text{tel que: } \theta = F^{-1}(x)$$

Soit le point $X_c(x_c, y_c, z_c)$ tel que X_c appartient à X , on veut trouver le point $\theta(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ tel que θ appartient à Θ , l'espace des configurations qui vérifie la fonction de position, [Annexe II].

Le système d'équations qui assure le passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées angulaires est donné par:

$$\theta_1 = \text{Arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$$

$$\theta_2 = \text{Arctg}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + \text{Arctg}\left(\sqrt{\frac{4L^2}{x^2 + y^2 + z^2} - 1}\right)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \text{Arctg}\left[\frac{z - L \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2} - L \cos(\theta_2)}\right]$$

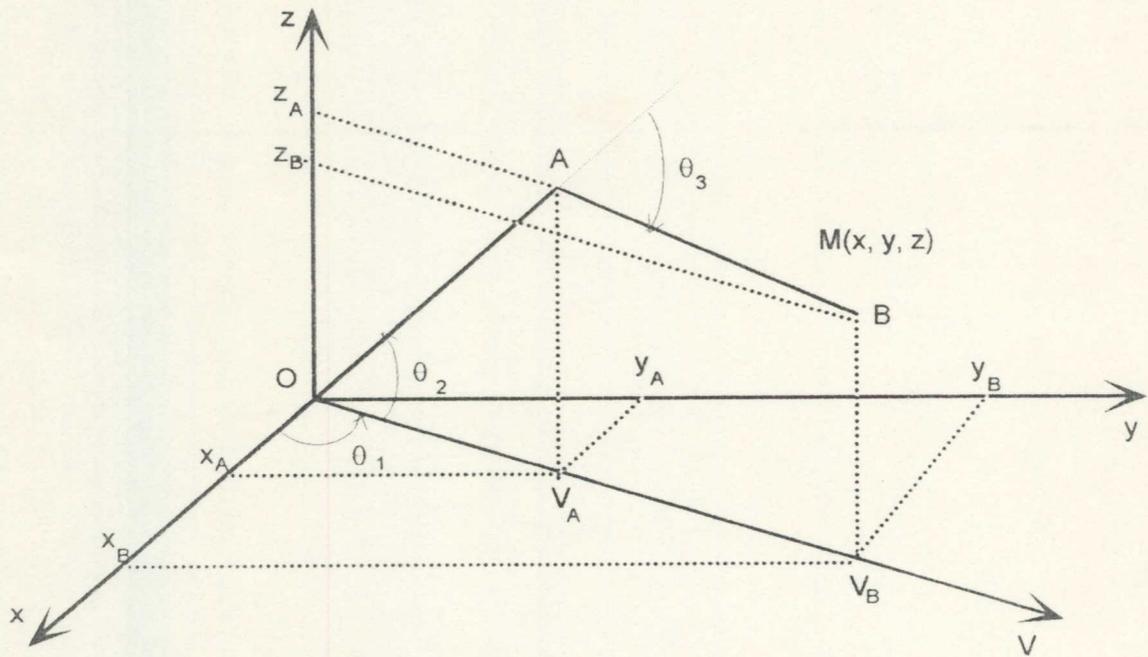


Fig.II.1: Bras en fil de fer

II.3 Volume de travail:

L'ensemble des valeurs admissibles du paramètre x décrit un domaine D_0 qu'on appelle espace de travail du BM, c'est le domaine des valeurs de la fonction de position de l'effecteur du BM $F(\phi)$.

II.3.1 Frontières de l'espace de travail pour les BM plans:

Soit le BM à articulations rotoïdes, l'espace de travail dépend de l'architecture du BM. On analyse le mécanisme à trois segments dont la fonction de position est de la forme.

$$x_c = L (\cos(\phi_1) + \cos(\phi_1 + \phi_2))$$

$$y_c = L (\sin(\phi_1) + \sin(\phi_1 + \phi_2))$$

Les angles de rotations sont soumis à des contraintes limitants leurs déplacements. Soit les angles de rotations données par:

$$d_{i0} \leq \phi_i \leq d_{if}$$

On utilise des considérations géométriques pour construire la frontière Γ . Γ_1 et Γ_3 constituent des portions de frontière extérieures, tandis que Γ_2 et Γ_4 constituent des portions de frontière intérieures (voir fig.II.2).

II.3.2 Détermination des équations des portions de la frontière Γ :

1. L'équation de la portion Γ_1 :

C'est un arc de cercle de rayon $2L$ limité par les points c_1 , c_2 , et de centre l'origine o .

$$x = 2L \cos(\phi)$$

$$y = 2L \sin(\phi) \quad \text{avec } d_{10} \leq \phi \leq d_{1f}$$

2. L'équation de la portion Γ_2 :

C'est un arc de cercle de rayon L et de centre O_2 limité par les points c_1 et c_2 .

$$x = L \cos(d_{1f} - \phi) + x_{o2}$$

$$y = L \sin(d_{1f} - \phi) + y_{o2} \quad \text{avec } 0 \leq \phi \leq d_{2m}$$

3. L'équation de la portion Γ_3 :

C'est un arc de cercle de rayon L et de centre O_3 limité par les points c_3 et c_4 .

$$\begin{aligned}x &= L \cos(d_{10} + \phi) + x_{o3} \\y &= L \sin(d_{10} + \phi) + y_{o3} \quad \text{avec } 0 \leq \phi \leq d_{2m}\end{aligned}$$

4. L'équation de la portion Γ_4 :

C'est un arc de cercle de rayon r et de centre l'origine O , limité par les points c_2 et c_4 .

$$\begin{aligned}r &= 2L \left| \sin((\pi - d_{2m})/2) \right| \\x &= r \cos(\phi - (d_{2m}/2)) \\y &= r \sin(\phi - (d_{2m}/2)) \quad \text{avec } d_{10} \leq \phi \leq d_{1r}\end{aligned}$$

On subdivise la surface environnante du robot en quatre zones distinctes, séparées par les droites Δ_i . Ces dernières sont déterminées par des angles de balayage limites de chaque zone Ψ .

Les équations des droites Δ_i passant par l'origine.

$$\Delta_i: y = \tan(\Psi_i) x \quad \text{où:}$$

$$\Psi_1 = d_{1r}, \quad \Psi_2 = d_{1r} - (d_{2m}/2), \quad \Psi_3 = -d_{1r}, \quad \Psi_4 = d_{1r} + (d_{2m}/2)$$

La zone 1 est délimitée par les portions d'arcs Γ_1, Γ_4 et les droites Δ_1 et Δ_3 .

La zone 2 est délimitée par les portions d'arcs Γ_1, Γ_2 et les droites Δ_1 et Δ_2 .

La zone 3 est délimitée par les portions d'arcs Γ_3, Γ_4 .

La zone 4 est délimitée par les droites Δ_1 et Δ_4 .

Chaque point peut être représenté par un vecteur ox , o étant l'origine. Le vecteur ox peut être défini par l'angle d'orientation Ψ et le module ρ tel que:

pour le point $X(x,y)$ on a:

$$\Psi = \arctg(y/x)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

On définit D_0 le domaine des points admissibles du paramètre X . Soit D_i l'ensemble des points appartenants à la zone i , on a donc:

$$D_0 = D_1 \cup D_2 \cup D_3$$

Le point X est défini par ses coordonnées polaires.

$X(x,y)$ tel que:

$$x = \rho \cos(\psi)$$

$$y = \rho \sin(\psi)$$

$$X \in D_1 \Leftrightarrow 2L \sin((\pi-d_{2m})/2) \leq \rho \leq 2L, \psi_3 \leq \psi \leq \psi_2$$

$$X \in D_2 \Leftrightarrow 2L \cos(d_{1r}\psi) \leq \rho \leq 2L, \psi_2 \leq \psi \leq \psi_1$$

$$X \in D_3 \Leftrightarrow 2L \sin((\pi-d_{2m})/2) \leq \rho \leq 2L \cos(\psi-d_{1i}), \psi_4 \leq \psi \leq \psi_3$$

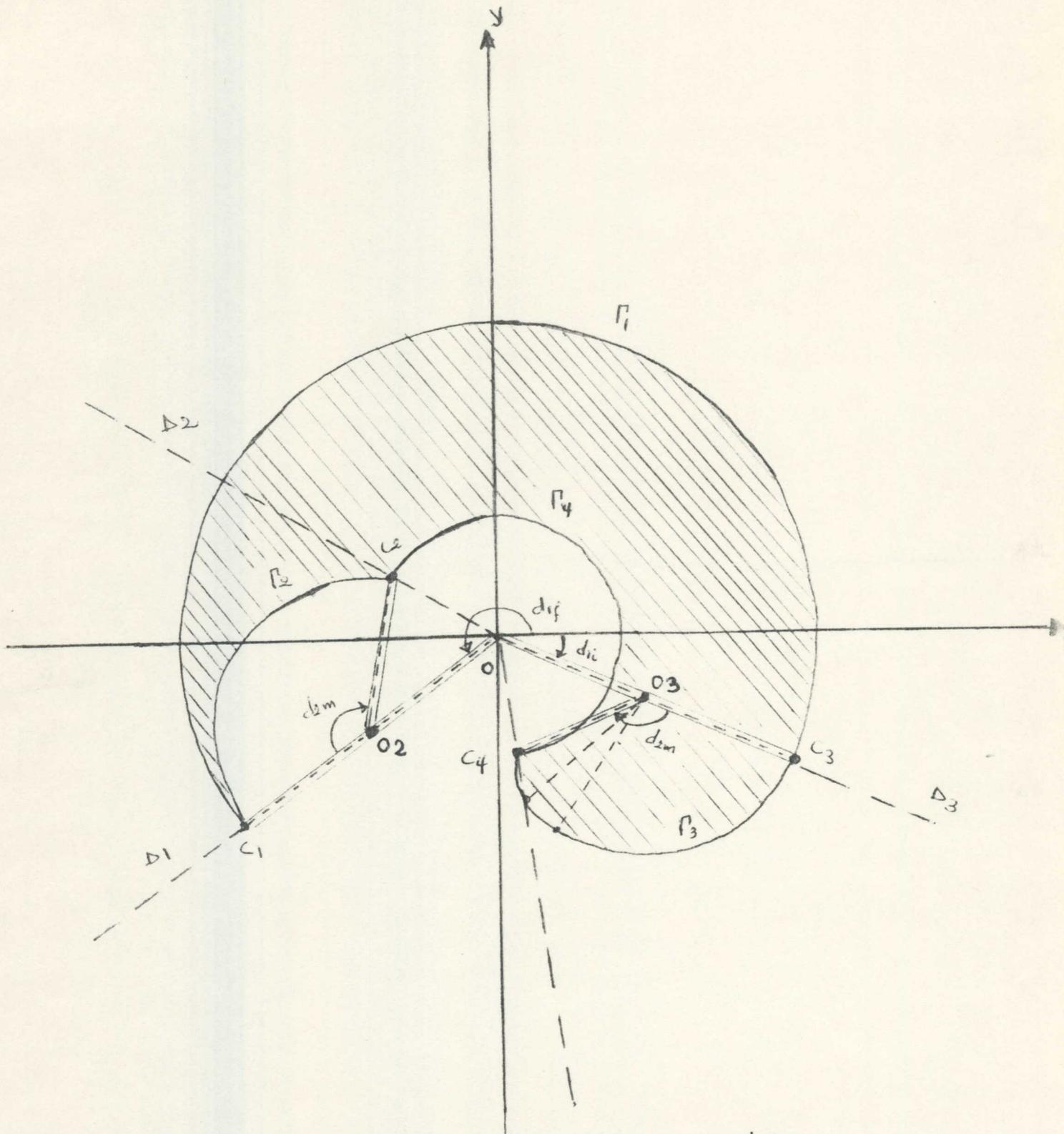


Fig. II.1: Frontières du B.M. plan

II.3.3 Volume de travail tridimensionnel:

Soit $C(x,y,z)$ le point à atteindre dans l'espace environnant du robot, on détermine le plan $\Omega(w,z)$ contenant le point C comme suit:

Soit l'angle de rotation horizontal α , il possède une excursion $\Delta\alpha$ tel que:

$$\alpha = \arctg(y/x) \text{ si } x = 0 \Rightarrow \alpha = \pi/2 + K\pi$$

$$w = x/\cos(\alpha) \quad \alpha \neq \pi/2$$

Ainsi les plans constituant le volume de travail sont définis par l'angle α tel que:

$$\Omega_{\alpha}(w,z) : \quad \begin{array}{l} \alpha = \arctg(y/x) \\ w = x/\cos(\alpha) \quad \alpha \neq \pi/2 \\ z \end{array}$$

II.4 Etude dynamique du BMAN31:[AnnexeII]

Tout système obéit dans son évolution à des lois physiques. Un bras manipulateur est un système formé de segments et d'articulations, les interactions entre ces derniers et les segments produisent le mouvement du bras, afin d'augmenter la précision du mouvement désiré, l'établissement d'une bonne commande nécessite la connaissance de la dynamique du bras manipulateur.

II.4.1 Architecture du BMAN31:

Il s'agit de décrire, à ce stade de l'étude d'un système robotique, la géométrie du bras manipulateur à l'aide d'une représentation, en vue d'une modélisation mathématique nécessaire à la synthèse de la partie commande [33].

Les trois sous ensembles d'un robot sont :

- le support (mobile ou fixe),
- le porteur,
- l'effecteur.

Le porteur du robot est constitué dans notre cas de trois segments rigides de longueurs L_1, L_2, L_3 , de masses (concentrées dans leur centre de gravité) m_1, m_2, m_3 .

Dans notre cas le robot possède trois articulations rotatives:

- l'articulation A1 lie le premier segment à l'épaule,
- l'articulation A2 lie le premier segment au deuxième segment du porteur, elle forme le coude,
- l'articulation A3 lie le porteur au support.

Concernant les distances on a (fig.II.4):

$l_1 = \text{dist (A1 et C.G1)}$.

$l_2 = \text{dist (A2 et C.G2)}$.

$l_3 = \text{dist (A3 et C.G3)}$.

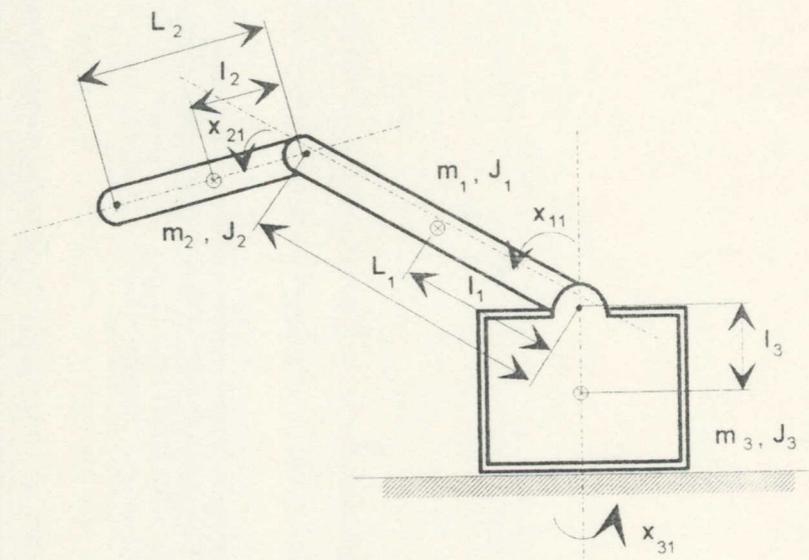


Fig.II.4: Bras manipulateur de classe 1

II.4.2 Les énergies potentielles U_i du S.M.A:

Les différentes énergies potentielles des segments constituant le robot sont

(fig.II.5):

$$U_1 = m_1 g l_1 \cos(X_{11})$$

$$U_2 = m_2 g [l_1 \cos(X_{11}) + l_2 \cos(X_{11} + X_{21})]$$

$$U_3 = - m_3 g l_3$$

avec: q_i : la force généralisée en X_{i1}
 C_i : coefficient de frottement visqueux en X_{i1}
 u_i : signal de commande en X_{i1}

1. L'équation dynamique de la première articulation (2)

$$[J_{x1} + m_2 L_{21} + J_{x2} + 2m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21})] \ddot{x}_1 + [J_{x2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21})] \ddot{x}_2 + [C1] \dot{x}_1 + [-m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21})] \dot{x}_2^2 + [-(J_{x1} + m_2 L_{21} - J_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) - (J_{x2} - J_{2p}) \cos(x_{11} + x_{21}) \sin(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21})] \dot{x}_2 \dot{x}_3 + [-2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}) x_1 \dot{x}_2 + [-(m_1 l_1 + m_2 L_1) \sin(x_{11}) - m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21})] g] = K_1 u_1$$

2. L'équation de Lagrange pour la deuxième articulation:

$$[J_{x2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21})] \ddot{x}_1 + [J_{x2}] \ddot{x}_2 + [C2] \dot{x}_2 + [m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}) x_1 [-(J_{x2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21})] \dot{x}_2 \dot{x}_3 + [-m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21})] g] = K_2 u_2$$

3. L'équation dynamique de la troisième articulation:

$$[(J_{x1} + m_2 L_{21}) \sin^2(x_{11}) + J_{1p} \cos^2(x_{11}) + J_{x2} \sin_2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + J_3 + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \sin(x_{11} + x_{21})] \ddot{x}_3 + [c_3] \dot{x}_3 + [2(J_{x1} + m_2 L_{21} - J_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) + 2(J_{x2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21})] \dot{x}_1 \dot{x}_3 + [2(J_{x2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21})] \dot{x}_2 \dot{x}_3 = K_3 u_3$$

II.4.5 Passage à la forme matricielle des équations dynamiques du BM:

On pose les équations dynamiques obtenues sous la forme matricielle :

$$M \ddot{X}_L + C \dot{X}_L + D X_L^2 + E X X_L + F g = K_L u$$

où: M , C , D , E , F et K_L sont des matrices à temps variable (time-varying matrices) à dimensions appropriées.

On pose $J^* = J_{x1} + m_2 L_{12}$:

1. Etablissement de la matrice M (3*3)

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = j_1 + j_{x2} + 2m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{12} = j_{x2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{21} = j_{x2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{22} = j_{x2},$$

$$M_{33} = j_1 \sin^2(x_{11}) + j_{1p} \cos^2(x_{11}) + j_{x2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) \\ + j_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + j_3 + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \sin(x_{11} + x_{21}).$$

2. Etablissement de la matrice C (3*3) :

$$C = \text{Diag}[c_1 \ c_2 \ c_3]$$

3. Etablissement de la matrice D (3*3) :

$$D = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & 0 & D_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12} = -m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$D_{13} = -(j_1 - j_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) - (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \\ \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}),$$

$$D_{21} = m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$D_{23} = -(j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \\ - m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21}).$$

4. Etablissement de la matrice E (3*3) :

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}$$

$$E_{11} = -2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$E_{32} = -(j_1 - j_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) + (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \\ \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}),$$

$$E_{33} = (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \\ + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21}).$$

Une variation de la vitesse d'une façon triangulaire est adoptée le long de la trajectoire linéaire.

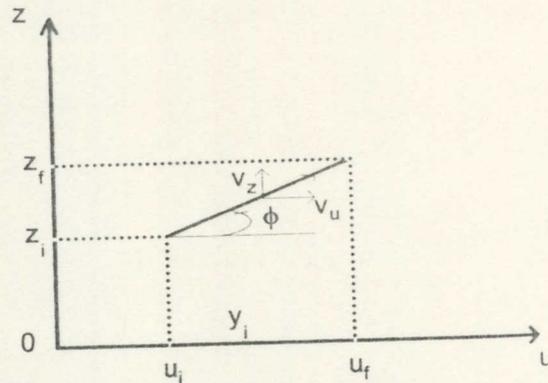


Fig.II.7: Trajectoire linéaire dans le repère uoz

II.5.1. Les équations mathématiques dans le repère cartésien:

On a les équations analytiques de la vitesse:

$$\begin{cases} V(t) = a \cdot t & 0 \leq t \leq t_m \\ V(t) = -a \cdot t + c & t_m \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (1)$$

Les équations de la trajectoire en ligne droite:

$$\begin{cases} z = p \cdot u + k \\ p = \frac{z_f - z_i}{u_f - u_i} \quad \text{pente} \\ k = z_i - p \cdot u_i \quad \text{constante} \end{cases} \quad (2)$$

Avec:

$$\begin{cases} u_i = \frac{x_i}{\cos \theta_1} \\ u_f = \frac{x_f}{\cos \theta_1} \end{cases} \quad (3)$$

On a les composantes de la vitesse:

$$\begin{cases} v_u(t) = v(t) \cdot \cos \phi = \dot{u} \\ v_z(t) = v(t) \cdot \sin \phi = \dot{z} \\ \phi = \arctg\left(\frac{z_f - z_i}{x_f - x_i} \cos \theta_1\right) \end{cases} \quad (4)$$

On a:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{u} \cdot \cos \theta_1 \\ \dot{y} = \dot{u} \cdot \sin \theta_1 \\ \dot{z} = \dot{z} \end{cases} \quad (5)$$

On obtient:

$$\begin{cases} \dot{x} = v(t) \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta_1 \\ \dot{y} = v(t) \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta_1 \\ \dot{z} = v(t) \cdot \sin \phi \end{cases} \quad (6)$$

II.5.2. Les équations mathématiques dans le repère angulaire:

On a la matrice de passage aux coordonnées angulaires:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{Arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \\ \theta_2 &= \text{Arctg}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) + \text{Arctg}\left(\sqrt{\frac{4L^2}{x^2 + y^2 + z^2} - 1}\right) \\ \theta_3 &= \theta_2 - \text{Arctg}\left[\frac{z - L \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2} - L \cos(\theta_2)}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

Après les dérivations nécessaires, on obtient:

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{x}{D_1} \left[\frac{z}{D_2} + \frac{1}{D_3} \right] \cdot \dot{x} - \frac{y}{D_1} \left[\frac{z}{D_2} + \frac{1}{D_3} \right] \cdot \dot{y} + \frac{1}{D_1} \left[D_2 - \frac{z}{D_3} \right] \cdot \dot{z} \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\theta}_{3x} &= \frac{-L \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2x} \cdot [D_2 - L \cdot \cos \theta_2] - \left[\frac{x}{D_2} + L \cdot \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2x} \right] \cdot (z - L \cdot \sin \theta_2)}{(D_2 - L \cdot \cos \theta_2)^2 + (z - L \cdot \sin \theta_2)^2} \\ \dot{\theta}_{3y} &= \frac{-L \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2y} \cdot [D_2 - L \cdot \cos \theta_2] - \left[\frac{y}{D_2} + L \cdot \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2y} \right] \cdot (z - L \cdot \sin \theta_2)}{(D_2 - L \cdot \cos \theta_2)^2 + (z - L \cdot \sin \theta_2)^2} \\ \dot{\theta}_{3z} &= \frac{(1 - L \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2z}) \cdot [D_2 - L \cdot \cos \theta_2] - [L \cdot \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_{2z}] \cdot (z - L \cdot \sin \theta_2)}{(D_2 - L \cdot \cos \theta_2)^2 + (z - L \cdot \sin \theta_2)^2} \end{aligned} \right.$$

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_{3x} \cdot \dot{x} + \dot{\theta}_{3y} \cdot \dot{y} + \dot{\theta}_{3z} \cdot \dot{z} \quad (9)$$

Avec:

$$\left\{ \begin{aligned} D_1 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ D_2 &= (x^2 + y^2)^{1/2} \\ D_3 &= \left(\frac{4 \cdot L^2}{D_1} - 1 \right)^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

CHAPITRE III

COMMANDE DU ROBOT BMAN31

III.1 Introduction:

Une importante caractéristique de distinction entre les robots se représente dans la méthode d'actionnement choisie. Elle présente la source de la puissance motrice qui entraîne les segments aux positions désirées, elle est appliquée au niveau des articulations, soit directement, soit à travers des câbles, engrenages, bandes et courroies, ou par d'autres moyens. Il y a quatre types d'actionneurs majeurs en utilisation aujourd'hui, les actionneurs hydrauliques, pneumatiques, les moteurs électriques DC et les moteurs pas à pas.

La mobilité du robot BMAN31 est assurée par des moteurs DCPM, ces actionneurs sont des moteurs à courant continu et à aimant permanent (permanent magnet, direct current motors). Ces derniers possèdent une caractéristique couple_courant linéaire dans une zone étendue, ce qui facilite leur commande.

Afin d'exécuter le mouvement cartésien désiré, il est pratiquement impossible de calculer les trajectoires de l'articulation correspondante à la même vitesse que celle du servo, à cause de la complexité du planning du mouvement à exécuter en temps réel [27]. Au lieu de cela, seulement chaque N^{ième} position de l'articulation est calculée le long de la trajectoire avec les positions intermédiaires qui sont linéairement interpolées [4]. Une fois la prochaine position de l'articulation déterminée (calculée ou interpolée), le régulateur de position de l'articulation doit essentiellement assurer que la trajectoire désirée est suivie.

Le contrôle des robots industriels est basé sur des servocommandes à technologie de haute précision. Le bout du bras est positionné par des servos au niveau des articulations. Dans la plupart des applications, l'utilisation d'une boucle de retour qui mesure les positions du bout du bras est évitée, la précision est réalisée par la combinaison de la raideur mécanique et des bons servos.

Le robot est un système non linéaire, cela est due au couplage mécanique non linéaire entre les différents mouvements, les variations dans le moment d'inertie et le coefficient de frottement, et cela conformément à la géométrie du robot. Le déplacement du bras manipulateur durant l'exécution de la tâche, établie et communiquée par l'utilisateur, est soumis à des contraintes d'harmonisation du mouvement et du contact avec l'environnement, sous cette optique, le pilotage des mouvements du robot par une loi de commande devient impératif. Pour pallier à ces contraintes, une commande adaptative est utilisée. Cette dernière adapte le contrôleur du système qui est variant dans le temps. La commande adaptative exige une connaissance, implicite ou explicite, sur les variations qui affectent le système à commander. A cette fin, on a recours à l'identification des paramètres du système.

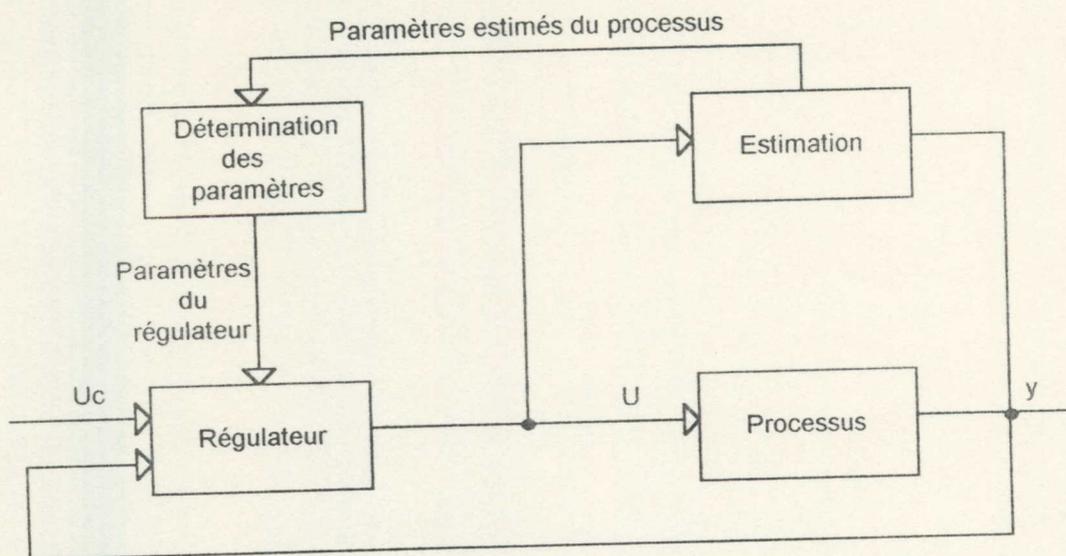


Fig.III.2: Diagramme bloc du régulateur auto-ajustable

Les paramètres inconnus sont estimés en temps réel. Plusieurs méthodes d'estimation peuvent être utilisées. L'approximation stochastique, moindres carrées, moindres carrées étendus ou généralisés, la variance instrumentale et maximum de vraisemblance. Idem en ce qui concerne les régulateurs, plusieurs méthodes de régulation peuvent être utilisées. Variance minimale, quadratique linéaire, placement des pôles et modèle de poursuite.

Le principe du STR est basé sur l'estimation des paramètres du processus. L'approche la plus directe est d'estimer les paramètres de la fonction de transfert du processus. Cela donne un algorithme adaptatif indirect. Les paramètres du régulateur ne sont pas mis à jour directement, mais indirectement via l'estimation du modèle du processus. Néanmoins, il est souvent possible de paramétrer le modèle par les paramètres du régulateur, de telle manière que ces derniers peuvent être estimés directement. Cela est appelé l'algorithme adaptatif direct.

Dans le contexte du STR, les méthodes indirectes sont appelées les contrôleurs auto-ajustables explicites. La mise à jour directe des paramètres du régulateur est appelée le contrôleur auto-ajustable implicite.

III.3 Contrôle des mouvements du robot BMAN31:

Pour l'exécution de la tâche définie dans l'espace cartésien, le contrôle des mouvements du robot manipulateur se ramène au contrôle de ces articulations individuellement. Le succès dans les études avancées sur la robotique, dans une large mesure, repose sur la solution de plusieurs questions fondamentales, encore cruciales au contrôle bas-niveau. le servo-

positionnement de l'articulation du robot manipulateur représente un tel exemple, le plan de mouvement peut être bien achevé uniquement si les trajectoires de l'articulation sont bien exécutées.

Dans le but de maîtriser le mouvement du bras manipulateur, et d'imposer le déplacement voulu avec les vitesses désirées, le contrôle des actionneurs s'impose. Un asservissement en position et en vitesse des moteurs est utilisé à cette fin.

III.3.1 Modélisation du moteur DCPM:

Le moteur DC est un transducteur de couple qui assure la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Le couple développé par l'arbre du moteur est directement proportionnel au flux du champs magnétique du stator et du courant dans l'armature de l'induit du moteur (fig.III.3).

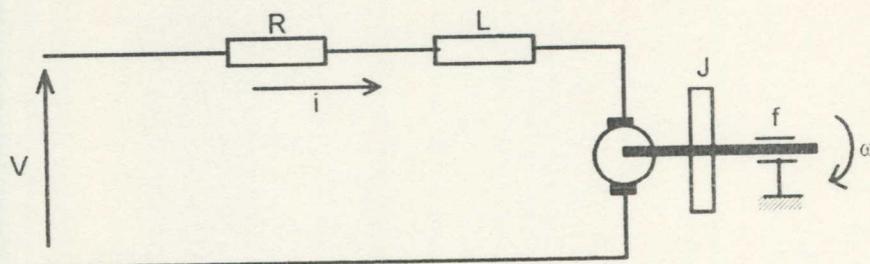


Fig.III.3: Synoptique du moteur DCPM

On a la fonction de transfert du moteur DCPM (fig.III.4).

$$\frac{v}{W} = K_E + \frac{(R + Ls)(f + Js)}{K_r}$$

On pose $K_t = K_E = K_r$, on obtient:

$$\frac{\Omega}{v} = \frac{K_t}{K_t^2 + Rf(1 + \frac{L}{R}s)(1 + \frac{J}{f}s)}$$

Soit: $\tau_e = L/R$ constante de temps électrique.

$\tau_m = J/f$ constante de temps mécanique.

or on a: $L \ll R \Rightarrow \tau_m \gg \tau_e$.

$$\Rightarrow \tau_m \tau_e \approx 0 \text{ et } \tau_m + \tau_e \approx \tau_m.$$

$$\Rightarrow \frac{\Omega(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{(K_t^2 + Rf) \left(1 + \frac{RJ}{K_t^2 + Rf} s\right)}$$

On pose: $K = K_t / (K_t^2 + Rf)$
 $\tau = JR / (K_t^2 + Rf)$

$$Y(s) = \frac{K}{(1 + \tau s)}$$

Par intégration de la variable Ω on obtient la variable position θ :

$$\Rightarrow \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{K}{s(1 + \tau s)}$$

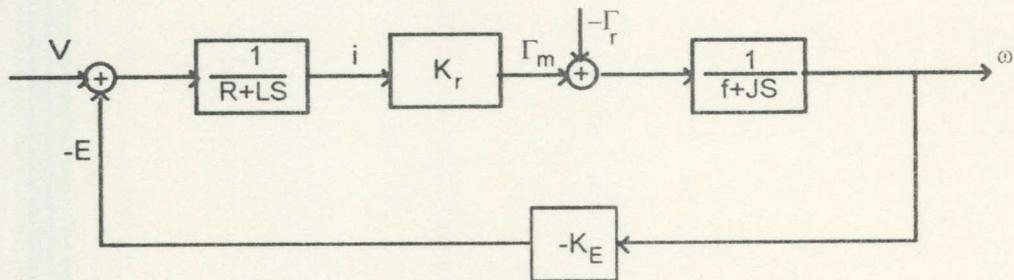


Fig.III.4: Diagramme bloc du moteur DCPM

III.3.2 Description du modèle:

Dans le but de traiter les informations par un ordinateur, on doit passer au domaine discret. Pour cela, on utilise un échantillonneur bloqueur d'ordre zéro, sa fonction de transfert est donnée par:

$$B_0(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$$

où T présente la période d'échantillonnage. La nouvelle fonction de transfert Y(s) est donnée par:

$$Y(s) = B_0(s) \cdot H(s) = \frac{K(1 - e^{-sT})}{s^2(1 + \tau s)} \quad \text{avec } H(s) = K / (1 + \tau s).$$

Pour passer au domaine Z, après le passage au domaine temporel, on calcule la transformée en Z de la fonction y(t).

$$Y(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

avec: $b_1 = K[T - \tau(1 - e^{-T/\tau})]$,
 $b_2 = K[\tau(1 - e^{-T/\tau}) - Te^{-T/\tau}]$,
 $a_2 = e^{-T/\tau}$,
 $a_1 = -(1 + a_2)$.

Le système dans son évolution subit des perturbations susceptibles d'affecter ses paramètres (a_1 , a_2 , b_1 , b_2). Le signal de commande, qui est fonction des paramètres du système, doit réagir à ces perturbations pour éviter toute instabilité indésirable. La connaissance de ces paramètres à tout instant est par conséquent nécessaire.

III.4 Identification des paramètres du système:

Dans le but de connaître les paramètres a_i , b_i du système dans les instants adéquats, on a recours à des méthodes mathématiques d'estimation des paramètres d'une fonction. On applique la méthode des moindres carrés récursives RLS [29]. Ce choix découle de la souplesse de cette méthode.

L'estimateur RLS (Recursive Least Square):

Une équation récursive peut être déterminée à partir de la fonction de transfert $Y(z)$.

$$\frac{\theta(z)}{v(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}$$

On passe au domaine temporel, on obtient:

$$\theta(k) - \theta(k-1) = a_2 [\theta(k-1) - \theta(k-2)] + b_1 v(k-1) + b_2 v(k-2)$$

On pose: $e(k) = \theta(k) - \theta(k-1)$

On obtient:

$$e(k) = a_2 e(k-1) + b_1 v(k-1) + b_2 v(k-2)$$

Les équations de l'estimateur RLS sont dans ce cas:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k-1) [Y(k) - e(k) \theta(k-1)]$$

Où $\theta(k)$ représente le vecteur paramètre à estimer.

$$\theta(k) = [a_2(k), b_1(k), b_2(k)]^T$$

$Y(k) = e(k)$ c'est un scalaire.

$\phi(k)$ c'est le vecteur des entrées sorties mesurées.

$$\phi(k) = [e(k-1), v(k-1), v(k-2)]$$

La matrice de correction K est défini comme suit,

$$K(k-1) = \frac{P(k-1)\phi(k)}{\lambda I + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)}$$

Avec:

$$P(k) = \frac{[I - K(k-1)\phi^T(k)]\phi(k)}{\lambda}$$

La matrice $P(k)$ est proportionnelle à la variance des estimations, sa valeur initiale est:

$P(0) = \alpha I$ où α est une valeur arbitraire très élevée, elle présente une condition de la convergence. L'estimateur converge vers les paramètres du processus lorsque P tend vers zéro. I étant la matrice identité.

III.5 Conception du contrôleur:

Le contrôle PID a été largement utilisé comme loi de contrôle pour dériver le couple correcteur fournissant la commande de position de l'articulation. PID possède trois gains, K_p (proportionnel), K_i (intégrale) et K_d (dérivée), Pour calculer le couple correcteur de l'erreur de position. Dans l'espace de temps continu, le contrôleur PID possède la forme:

$$\tau_{PID} = K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int e dt$$

où τ_{PID} représente le couple correcteur, et e représente l'erreur de position. Le gain proportionnel correspond à la raideur de l'articulation, le gain de la dérivée fournit l'amortissement nécessaire pour stabiliser le système, et le gain de l'intégrale élimine l'erreur statique en régime permanent, en augmentant la raideur du régime permanent. La plupart du temps, il est désirable d'utiliser des gains de telle manière à obtenir un système résultant possédant la plus grande raideur possible exécutant toujours un mouvement critiquement amorti.

Au début, les robots industriels étaient contrôlés par les contrôleurs PID au niveau des articulations. ces dernières étaient traités comme étants des systèmes découplés, et les interactions dynamiques entre eux étaient ignorées [28]. Cela est partiellement due à l'absence de connaissances sur le comportement de la dynamique du robot comme système, et partiellement due à l'affirmation que l'effet des erreurs, causées par l'absence de la compensation dynamique, peut être diminué considérablement par la présence d'un gain élevé du servo de l'articulation.

Bien qu'on peut utiliser les équations dynamiques pour calculer les couples des articulations, donnant les positions, les vitesses, et les accélérations désirées des articulations, il y a un nombre de raisons pour lesquelles les contrôleurs PID occupent une partie importante du contrôle des robots.

Primo, la modélisation dynamique d'un robot manipulateur a ses limitations dans lesquelles les paramètres des équations dynamiques ne sont jamais exactement connus. Secundo, il y a des effets non linéaires telles que les frottements de l'articulation et la flexibilité du segment, qui sont extrêmement difficiles à modéliser et à identifier. Tertio, il y a des situations où une version simplifiée du modèle dynamique est employée dans l'ordre d'achever l'estimation efficacement. Pour toutes ces raisons, les erreurs de position possèdent une occurrence limitée, et le robot doit encore se fier aux servos PID de ces articulations.

III.5.1 Contrôleur à retour d'état:

Un contrôleur PID peut être utilisé pour implémenter un servo en commande de position, ce contrôleur peut être pris comme contrôleur à retour d'état, où les états sont: la position θ , la vitesse angulaire ω , et l'intégrale de l'erreur de position ($\theta_r - \theta$).

La référence θ_r est appliquée uniquement à l'intégrale, cette structure est appelée "SET-POINT-ON-I-ONLY" (fig.III.5). La fonction de transfert du système bouclé est donnée par:

$$\frac{\theta}{\theta_r} = \frac{h_3 b_1 (z + \frac{b_2}{b_1})}{z - c_1 z^2 + c_2 z^3 - c_3}$$

avec: $c_1 = h_1 b_1 + h_2 K (1-a_2) + 2a_2$
 $c_2 = h_1 (b_2 - b_1) + 2k (1-a_2) h_2 + h_3 b_1 + 1 + 2a_2$
 $c_3 = k (1-a_2) h_2 + a_2 - b_2 (h_3 - h_1)$

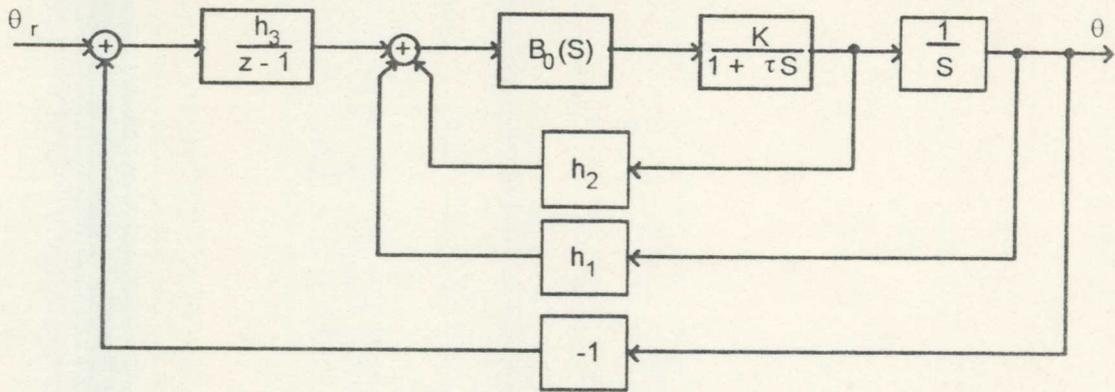


Fig.III.5: Diagramme bloc du régulateur PID

L'introduction d'un intégrateur dans un contrôleur élimine l'erreur statique en régime permanent, sachant que la fonction de transfert du moteur possède un intégrateur, l'intégrateur possède par conséquent une légère influence sur la précision, la complexité du contrôleur peut être réduite en utilisant un contrôleur PD.

III.5.2 Le contrôleur PD:

Il possède deux gains, le gain proportionnel et le gain dérivé. La représentation du moteur DC dans l'espace d'état discret est comme suit:

$$H_{\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{K(1 - e^{-sT})}{s^2(1 + \tau s)}$$

$$H_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K(1 - e^{-sT})}{s(1 + \tau s)}$$

Après passage au domaine Z, on obtient:

$$H_{\omega}(z) = \frac{\omega(z)}{v(z)} = \frac{Kz^{-1}[1 - e^{-T/\tau}]}{1 - e^{-T/\tau}z^{-1}}$$

on applique la transformée en Z inverse, on obtient:

$$\begin{aligned} \omega(k) - e^{-T/\tau}\omega(k-1) &= K[1 - e^{-T/\tau}]v(k-1) \\ \Rightarrow \omega(k+1) &= e^{-T/\tau}\omega(k) + K[1 - e^{-T/\tau}]v(k) \end{aligned}$$

d'autre part on a:

$$H_{\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{K(1 - e^{-sT})}{s^2(1 + \tau s)}$$

on passe à la transformée en Z:

$$H_{\theta}(z) = \frac{KT}{z-1} - \tau H_{\omega}(z)$$

$$\Rightarrow \frac{\theta(z) - \tau\omega(z)}{v(z)} = \frac{KTz^{-1}}{1-z^{-1}}$$

on passe à la transformée inverse:

$$\theta(\kappa + 1) = \theta(\kappa) + \tau(1 - e^{-T/\tau})\omega(\kappa) + K[T - \tau(1 - e^{-T/\tau})]v(\kappa)$$

on obtient donc le système suivant:

$$\theta(\kappa + 1) = \theta(\kappa) + \tau(1 - e^{-T/\tau})\omega(\kappa) + K[T - \tau(1 - e^{-T/\tau})]v(\kappa)$$

$$\Rightarrow \omega(\kappa + 1) = e^{-T/\tau}\omega(\kappa) + K[1 - e^{-T/\tau}]v(\kappa)$$

on pose:

$$a_1 = \tau[1 - e^{-T/\tau}]$$

$$a_2 = e^{-T/\tau}$$

$$a_3 = K[T - \tau(1 - e^{-T/\tau})]$$

$$a_4 = K[1 - e^{-T/\tau}]$$

III.5.3 Implémentation du régulateur PD:

Les valeurs h_1 et h_2 représentent les paramètres du contrôleur. Le signal de commande issu de la boucle fermée, représenté dans la (fig.III.6), est donné par:

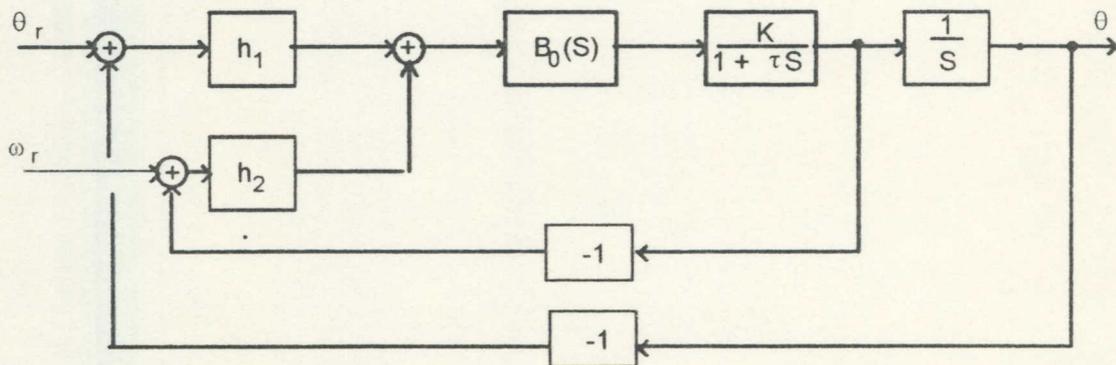


Fig.III.6: Diagramme bloc du régulateur PD

$$v = h_1 (\theta - \theta_r) + h_2 (\omega - \omega_r).$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée, représentée dans la (fig.III.6), est donnée par:

$$\frac{\theta}{\theta_r} = \frac{-z(h_2 a_4 + h_1 a_3) + h_1(a_3 a_2 - a_1 a_4) + h_2 a_4}{z^2 - z(h_1 a_3 + h_2 a_4 + a_2 + 1) + h_1(a_3 a_2 - a_1 a_4) + h_2 a_4 + a_2}$$

III.5.4 Placement des pôles:

L'équation caractéristique du système en boucle fermée est donnée par:

$$D(z) = z^2 - z(h_1 a_3 + h_2 a_4 + a_2 + 1) + h_1(a_3 a_2 - a_1 a_4) + h_2 a_4 + a_2$$

avec:

$$\begin{aligned} a_1 &= \tau(1 - e^{-T/\tau}) \\ a_2 &= e^{-T/\tau} \\ a_3 &= b_1 = K[T - \tau(1 - e^{-T/\tau})] \\ a_4 &= K(1 - a_2) = K(1 - e^{-T/\tau}) \\ b_2 &= a_1 a_4 - a_3 a_2 \end{aligned}$$

Pour placer les pôles (ξ et w_n donnés), il suffit de comparer le polynôme caractéristique $D(z)$ avec le polynôme caractéristique désiré, donné par:

$$(z - p_1)(z - p_2) = z^2 - z(p_1 + p_2) + p_1 p_2.$$

où :

$$p_1 + p_2 = 2[e^{-\xi w_n T}] \cos[w_n T(1 - \xi^2)^{1/2}]$$

$$p_1 p_2 = e^{-2\xi w_n T}$$

On obtient en fin de compte, les gains du régulateur PD:

$$h_1 = \frac{2e^{-\xi w_n T} \cos[w_n T(1 - \xi^2)^{1/2}] - e^{-2\xi w_n T} - 1}{a_3(1 - a_2) + a_4 a_1}$$

$$h_2 = \frac{e^{-2\xi w_n T} - a_2 - (a_2 a_3 - a_4 a_1) h_1}{a_4}$$

Le signal de commande est donné par:

$$v = h_1(\theta - \theta_r) + h_2(\omega - \omega_r).$$

On voit clairement que si le système subit des perturbations, affectant les paramètres a_i , les paramètres h_i compensent l'effet de ces perturbations pour maintenir l'emplacement des pôles.

III.6 Vitesse et position référence:

Le moteur dans son fonctionnement, suit une trajectoire référence θ , afin d'atteindre la position consigne θ_c , cette dernière étant fournie, la trajectoire référence est générée à partir d'une vitesse référence w_r , dont l'allure est judicieusement choisie dans le but d'obtenir un asservissement en position.

III.6.1 La vitesse référence:

Le système débute son mouvement en suivant une vitesse référente linéaire (mouvement accéléré) jusqu'à atteindre la moitié de la trajectoire référence, à ce moment le système atteint la vitesse maximale du mouvement, ce point représente le début d'un mouvement décéléré. Il atteint la position consigne avec une vitesse nulle. Les équations fournissant les différentes vitesses sont: (Fig.III.7)

$$w_r = a t \quad \text{pour } 0 \leq t \leq t_{1/2}$$

$$w_r = (a q_c)^{1/2} - a t \quad \text{pour } t_{1/2} \leq t \leq t_r$$

on a:

θ_c : position consigne

$t_{1/2}$: temps de parcours de la moitié de la trajectoire

t_r : temps de parcours de la totalité de la trajectoire

$$t_{1/2} = (\theta_c/a)^{1/2}$$

$$t_r = 2 t_{1/2}$$

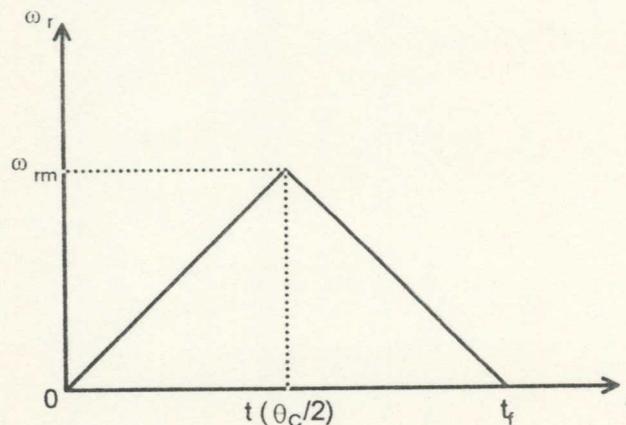


Fig.III.7: Vitesse référence

III.6.2 La trajectoire référence:

On intégrant les équations des vitesses références, on obtient les équations de la trajectoire référence.

$$\theta_r = a t^2 / 2 \quad \text{pour } 0 \leq t \leq t_{1/2}$$

$$\theta_r = 2 (a \theta_c)^{1/2} t - (a t^2)/2 - \theta_c/2 \quad \text{pour } t_{1/2} \leq t \leq t_r$$

L'allure de la position référence est donnée dans la (fig. III.8).

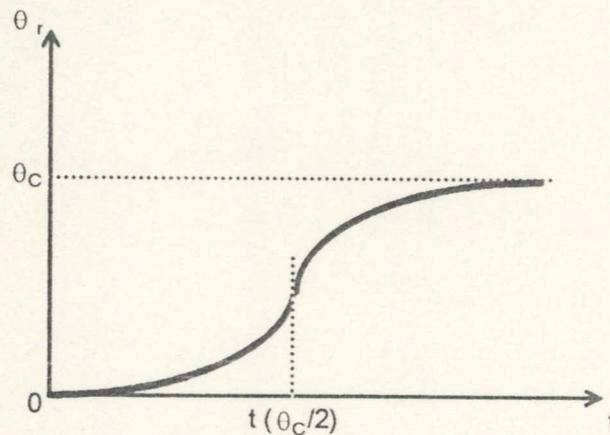


Fig.III.8: Trajectoire référence

III.7 Contrôle des mouvements du robot BMAN31:

Le système mécanique articulé, équipé d'un système actionneur à base du moteur DCPM, nécessite une commande pour piloter ces mouvements lors de son évolution dans son environnement, suivant ainsi les trajectoires nécessaires pour l'exécution de la tâche fournie. Le système de contrôle du BMAN31 comporte les modules suivants: un calculateur, une carte d'interface, le module de commande, une circuit d'échantillonnage et le circuit de retour.

Le calculateur assure le calcul des variables de commande $N_i(t)$, ces derniers présentent des données qui seront acheminées par le calculateur et fournit au circuit PIT. Le PIT génère les signaux PWM (pulse wave modulation) correspondant aux variables de commande des moteurs $U_i(t)$. Le nombre $N_i(t)$ est fonction des variables de retour $\theta_i(t)$ et des variables de référence $\theta_r(t)$. Le calculateur saisit la variable de retour du compteur de la position de l'articulation. Ces opérations sont effectuées au rythme de l'horloge du calculateur qui est de 1MHz, et qui se répète au rythme de la fréquence d'échantillonnage qui est de 100 Hz.

CHAPITRE IV

COMMUNICATION ET DEFINITION

DE LA TACHE

IV.1 Introduction:

Lorsqu'un opérateur humain désire confier un travail à un robot, il doit non seulement lui indiquer la tâche à accomplir, mais également la façon d'opérer. L'information est parmi les fonctions essentielles intervenant dans l'exécution d'une tâche, son évolution assure un développement dans le sens de l'autonomie du robot. Pour l'exécution d'une tâche, l'utilisateur raisonne souvent dans l'espace de la tâche, en terme de situation de l'organe terminal, en coordonnées opérationnelles, par rapport à l'objet.

Le but de ce chapitre est d'exposer les différentes sources d'information du robot BMAN31, son système sensoriel et son interface avec l'opérateur. Par la suite, La communication et la programmation de la tâche du BMAN31 seront explicitées, ainsi que les types de mouvement des robots, les différents niveaux de description et de programmation de la tâche. Après, la planification de la trajectoire et la trajectoire en ligne droite seront présentées. Enfin, une présentation de la simulation du robot BMAN31 sera effectuée.

IV.2 Sources d'informations du robot BMAN31:

Un robot doit être situé par rapport à trois entités, une source d'énergie, un environnement de travail et une source d'information, définissant la tâche à accomplir, et émanant d'un opérateur humain, en temps réel ou en temps différé, selon que le robot fonctionne en mode autonome ou en mode coopératif. L'information constitue la source des données qui permettent l'élaboration des commandes pilotant le robot, pour exercer les actions matérielles désirées sur l'environnement.

IV.2.1 Le système sensoriel du BMAN31:

Le BMAN31 est équipé d'un système sensoriel basé sur le codeur optique, ce dernier est conçu et réalisé afin de mesurer les états internes du robot. Chaque articulation est pourvue d'un capteur de position et de vitesse. Ce dernier est constitué d'une roue graduée en zones opaques et en zones transparentes, de largeur 2° , la roue et l'articulation possèdent le même axe de rotation. Un émetteur récepteur infrarouge détecte le passage des zones transparentes, mesurant ainsi, l'angle de rotation de chaque articulation.

IV.2.2 Interface opérateur-BMAN31:

C'est la partie matériel de la C.H.M, dans la partie commande du système elle est d'autant plus développée que le rôle de l'opérateur est grand. Dans le mode entièrement automatique, cette interface est réduite. Elle comprend un calculateur éloigné, qui permet à l'opérateur de communiquer avec le robot, et un calculateur de site, assurant le traitement et le contrôle.

L'opérateur communique avec le BMAN31 par le biais d'un ordinateur éloigné. A ce niveau, l'opérateur programme la tâche, le calculateur effectue la transformation des coordonnées, produisant ainsi le passage des coordonnées opérationnelles aux coordonnées articulaires, avant d'être transmises. Les données transitent via le port série RS232C du calculateur, une modulation FSK, une modulation AM et le canal de transmission (la voie hertzienne). A la réception, l'information subit une démodulation AM, suivie d'une démodulation FSK avant d'être acquiescée par le calculateur de site. Ce dernier traite cette information et élabore les signaux de commande adéquats pour l'exécution de la tâche transmise.

IV.3 Communication et programmation de la tâche:

La communication la plus séduisante pour l'opérateur est la communication Homme-Homme, en langage naturel. La communication la plus utilisée aujourd'hui, du point de vue industriel, est la communication en langage écrit, elle se traduit par la programmation de la tâche à l'aide d'un langage informatique, si possible spécifique à la robotique, et cela en réalisant des instructions spéciales, orientées vers l'exécution des tâches robotiques, par une transformation d'un langage informatique général en un langage robotique.

Pour les systèmes robotiques les plus simples, il y a un manipulateur, avec quelques types d'effecteurs, l'objet à manipuler, et un environnement. le programme de contrôle du robot doit contrôler les mouvements du manipulateur et l'effecteur pour l'exécution de la tâche, et cela en réalisant le calcul de la trajectoire, l'ouverture et la fermeture de l'effecteur, et l'évitement des collisions avec l'environnement.

IV.3.1 Le robot et son environnement:

Un robot peut être défini comme un système technologique capable de remplacer ou d'assister un opérateur humain dans l'exécution des tâches matérielles diversifiées.

IV.3.1.1 Structure fonctionnelle:

Le robot doit être situé par rapport à trois entités, une source d'énergie, un environnement de travail et une source d'informations définissant la tâche à accomplir et émanant d'un opérateur humain, en temps différé ou en temps réel selon que le robot fonctionne en mode autonome ou en mode coopératif (apprentissage, télé-opération, assistance,...).

IV.3.1.2 L'environnement:

Dans un poste de travail, l'environnement de l'opérateur est constitué d'objets, fixes ou mobiles, solides ou déformables, libres ou liés à d'autres, qui

doivent être pris en compte dans la réalisation des différentes tâches.

L'environnement peut être défini par deux caractéristiques:

a- Contraintes particulières du milieu ambiant. C'est le domaine général d'activité dans lequel se situent les fonctions à remplir,

- Atelier de production d'objets manufacturés (industrie mécanique, automobile, textile,...),

- Chantiers (bâtiments, travaux publics),

- Sites d'extraction et de traitement de matières premières,

- Exploitations agricoles ou forestières,

- Milieux hostiles (fonds marins, espace, milieux terrestres exposés à des pollutions aux risques divers),

- Ambiances sanitaires (hôpitaux, laboratoires bio-médicaux).

b- Caractéristiques particulières des objets sur lesquels porte le travail.

- La forme,

- Le volume,

- La température,

- Les dimensions,

- L'état de surface,

- La composition interne,

- La déformabilité,

- La variabilité dimensionnelle,

- Les contraintes de manipulation liées aux risques d'endommagement.

De ces caractéristiques, on peut conclure qu'on ne peut pas parler des constituants d'un robot dans l'absolu, il faut avoir présent à l'esprit la variété des tâches et des conditions de travail pour admettre la diversité des solutions, et apprécier leur adéquation à une situation donnée.

IV.3.1.3 Les tâches

Un robot doit être conçu pour effectuer un certain métier, c'est-à-dire une famille déterminée de tâches dans un type défini d'environnement. Chaque tâche consiste en une suite, continue ou discrète, d'actions exercées sur cet environnement pour en obtenir une modification déterminée à l'avance. On trouve deux types de tâches, les tâches à poste fixe (manutention, transformation, fixation,...), et les tâches à poste mobile (convoyage, exploration, récolte,...).

IV.3.2 Types de mouvement:

Les mouvements du robot peuvent être classifiés par quatre types:

- contrôle en série des articulations: les articulations se déplacent séparément sans interaction entre leurs mouvements, ce type de mouvement prend un temps d'exécution inacceptable.
- pivotement de toutes les articulations en même temps.
- les mouvements de toutes les articulations commencent et s'arrêtent en même temps, mais le mouvement total du bras est irrégulier, et n'est pas approprié pour quelques tâches.
- contrôle à ligne droite (rectiligne), exige que le contrôleur du robot fait une série de calculs complexes à un rapport élevé pour assurer que le chemin est droit dans la tolérance voulue. Ce genre de mouvement est très utilisé.

IV.3.3 Niveaux de description d'une tâche:

La description de la tâche doit comporter les éléments nécessaires et suffisants, permettant la génération d'action en vue de l'exécution correcte de la tâche par le robot. Les quatre points de vue de description sont: tâche objectif, tâche outil, tâche interaction et la tâche robot.

IV.3.3.1 Tâche objectif

- Etat initial:
 - Nom, forme, couleur, dimension, etc...
 - Position du C.D.G de l'objet (x_0, y_0, z_0)
 - Orientation de l'objet ($\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$)
- Etat évolutif: Loi d'évolution spatiale de l'objet $x_c(t), y_c(t), z_c(t), \alpha(t), \beta(t), \gamma(t)$.
- Etat permanent: Paramètres caractéristiques, poids, densité,...
- Etat final: $x_{fg}, y_{fg}, z_{fg}, \alpha_f, \beta_f, \gamma_f$
- Ensemble des zones interdites: Obstacle 1, obstacle 2, etc...
- Propriétés du milieu: fumée, rayonnement, peinture, etc...

IV.3.3.2 Tâche outil:

- Procédé: Outil 1, outil 2, ...
- Normes: Pression, couple, vitesse,...

IV.3.3.3 Tâche d'interaction:

Paramètres provenant de l'interaction entre le robot et l'environnement (force de réaction par exemple).

IV.3.3.4 Tâche robot:

- Coordonnées cartésiennes X.
- Variable articulaire Θ , configuration du robot.
- Variables de commande V.

La description de la tâche selon les quatre niveaux peut être adaptée à une exploitation informatique. Cette dernière peut être conduite selon quatre niveaux hiérarchisés qui dépendent de l'outil de programmation utilisé (**fig.IV.1**). Ces niveaux sont le niveau actionneur, le niveau effecteur, le niveau objet et le niveau objectif.

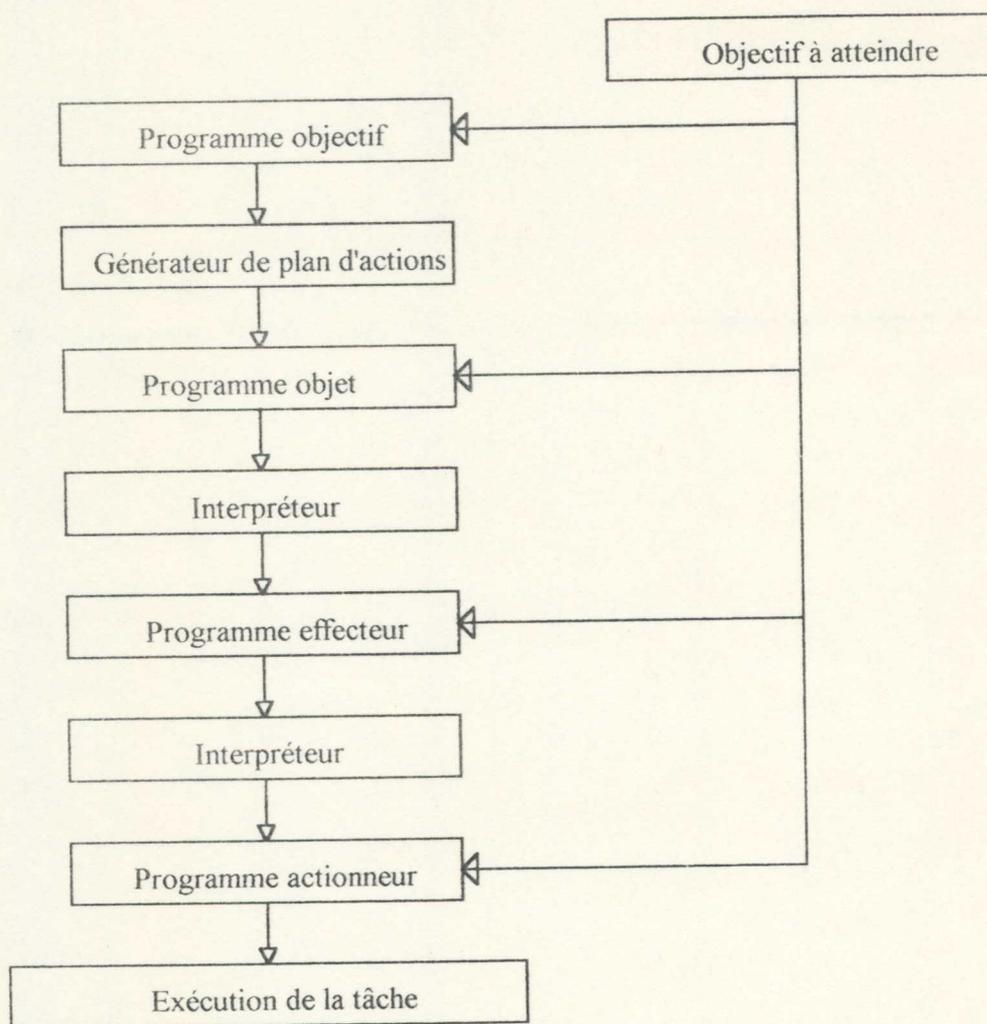


Fig.IV.1: Synoptique des quatre niveaux de programmation de la tâche

IV.3.4 Programmation de la tâche du BMAN31:

La robotisation d'une tâche consiste à la subdiviser en sous-tâches élémentaires, qui seront traduites en un ensemble d'instructions appartenant à un langage robotique. L'interpréteur du langage traduit ces instructions en un ensemble de trajectoires. En suivant ces trajectoires, le robot exécute des mouvements, réalisant ainsi la tâche établie dans le programme.

Une simulation du robot BMAN31 sur PC a été réalisée, utilisant le programme générateur d'actions précédant, pour l'exécution de la tâche de saisissement.

IV.4 Planification des mouvements:

La planification des mouvements du robot dans l'espace dérive des contraintes de la tâche et du milieu environnant. La planification du chemin concerne la détermination du chemin optimal permettant au robot de relier le point de départ au point d'arrivée sans collision. En raison du caractère long et fastidieux de la planification de chemin, de nombreuses recherches en ce sens sont menées pour développer des générateurs automatiques de chemin.

LOZANO-PEREZ [8] a discuté trois classes d'algorithmes destinés à planifier l'évitement des obstacles: Hypothèse et test, fonction de pénalité et l'espace libre explicite. Une autre approche, développée par LOZANO-PEREZ [23] pour l'évitement des obstacles, appelée configuration de l'espace (C-space). Un programme réalisé par Mayers et Agin [24], utilise l'approche du mouvement pas à pas.

IV.5 Trajectoire en ligne droite:

Plusieurs tâches robotiques exigent le déplacement en ligne droite du BM lors de leur exécution. Dû à la nature des liaisons rotoïdes, un manipulateur à géométrie angulaire aura plus de difficultés à suivre un chemin droit qu'une courbe. Inversement pour les manipulateurs à géométrie cartésienne. La méthode la plus simple pour obtenir un mouvement cartésien en ligne droite, consiste à contrôler le BM dans l'espace opérationnel, et ceci en calculant d'une manière continue le modèle cinématique inverse pour chaque point du chemin.

IV.6 Boite de commande:

Le déplacement du bras à travers les points désirés, est possible en utilisant une boîte de commande. Cette dernière contient des circuits électroniques de contrôle, qui délivrent des signaux de contrôle, commandés par l'opérateur par le biais de boutons poussoirs, des interrupteurs et des potentiomètres, qui sont manipulés selon la séquence des mouvements désirés.

Ce type de commande prend son ampleur pour les applications dans des environnements dangereux, ou lorsque la tâche est difficile à programmer. La boîte de commande est utile pour la programmation par apprentissage.

L'apprentissage pour les systèmes point à point, est effectué par le déplacement manuel du bras du robot, jusqu'à atteindre le point désiré. L'enregistrement des coordonnées de ce dernier est effectuée par l'actionnement d'une touche, qui déclenche le processus de lecture des états des capteurs de position du robot, suivie de leur mémorisation.

Au lieu de déplacer le bras du robot physiquement à travers la séquence des points désirés, il est possible d'utiliser la boîte de commande pour obtenir les mêmes résultats.

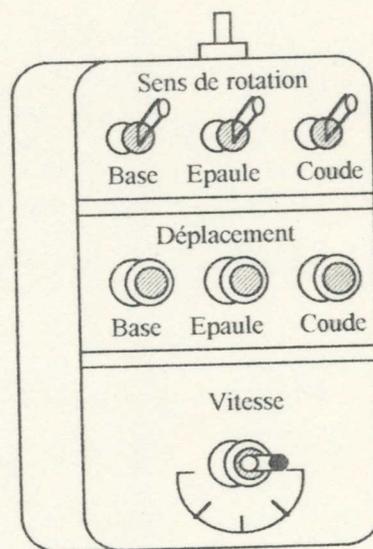
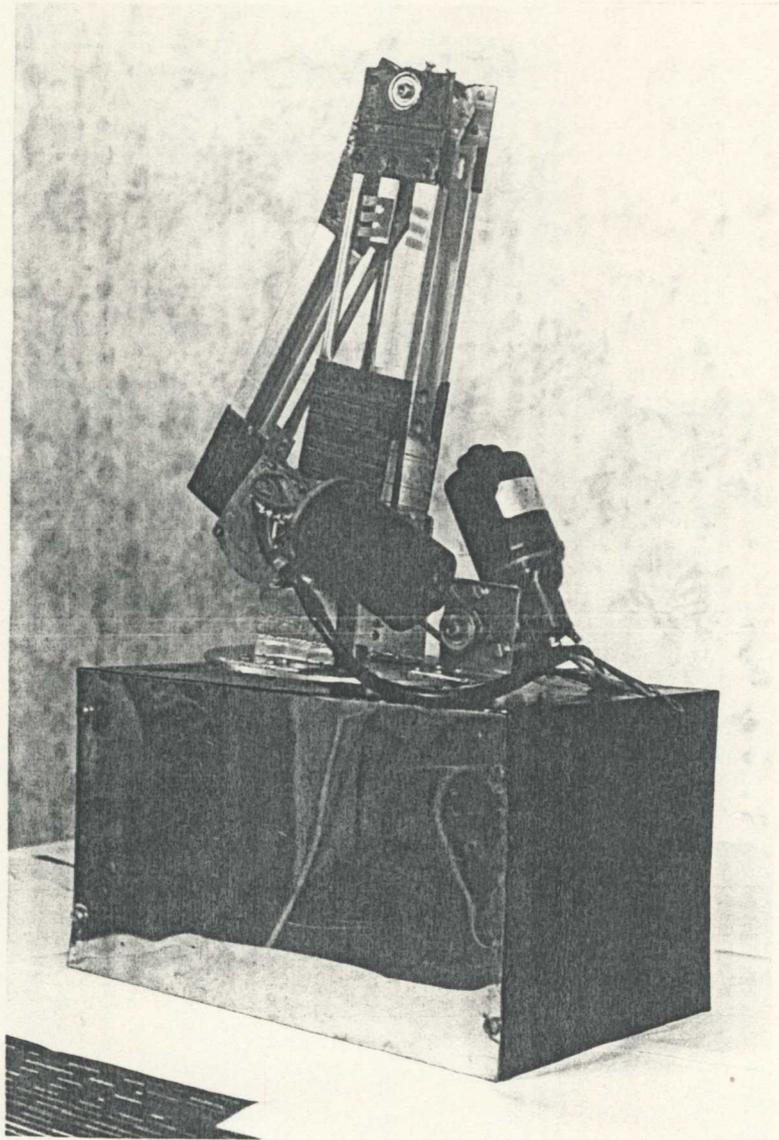


Fig.IV.2: Boite de commande manuelle du BMAN31

CHAPITRE V

REALISATION DU ROBOT BMAN31



Le robot BMAN31

V.1 Introduction:

Les chapitres précédents portent sur l'étude des principaux constituants d'un robot, qui présente les piliers de la réalisation du robot BMAN31. Au cours de ce chapitre, les différentes phases de la réalisation du robot BMAN31 vont être explicitées, ainsi que sa simulation et les résultats obtenus.

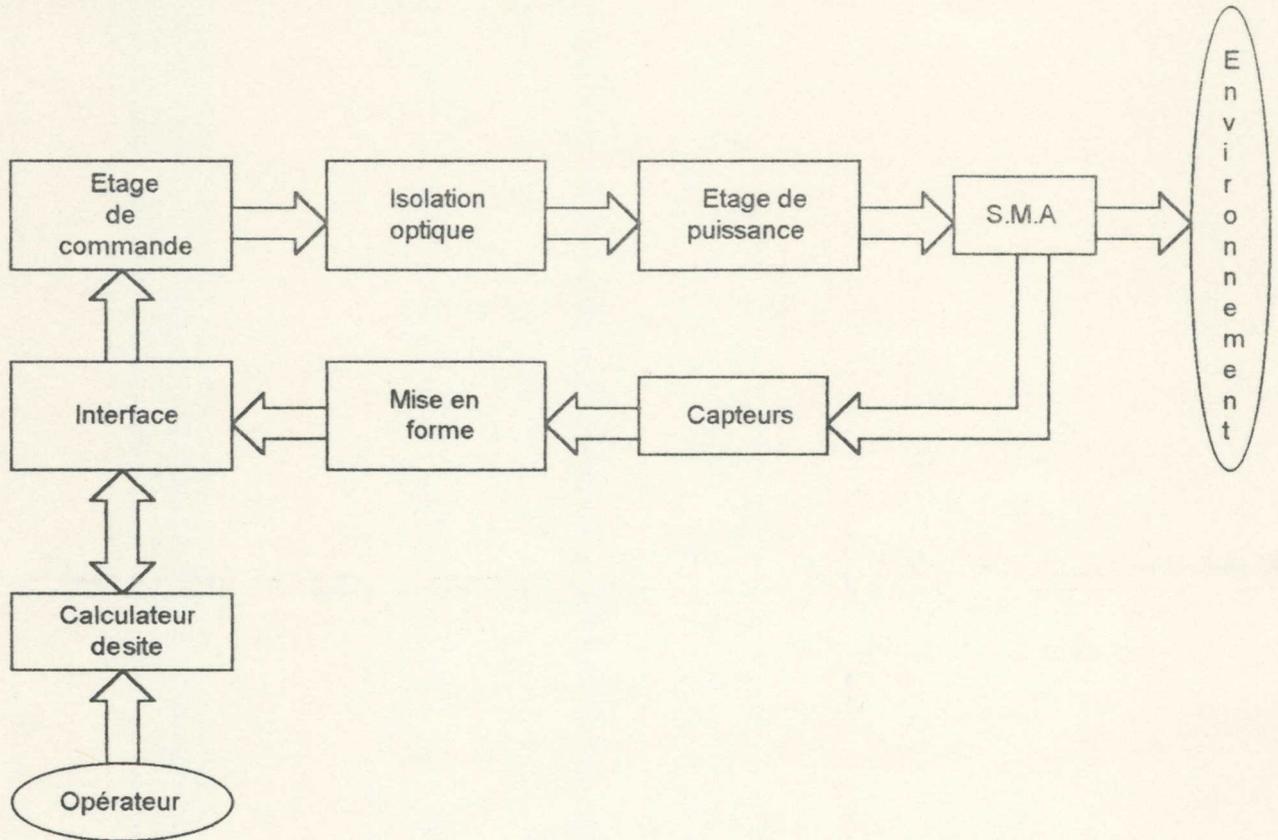


Fig.V.1: Synoptique général des constituants du robot BMAN31

V.2 Structure mécanique du robot BMAN31:

En robotique, la structure mécanique présente la partie matériel qui évolue dans l'environnement en se déplaçant suivant les contraintes de la tâche à exécuter. Plusieurs types d'architectures mécaniques existent, elles sont définies sous forme de classes (chapitre I).

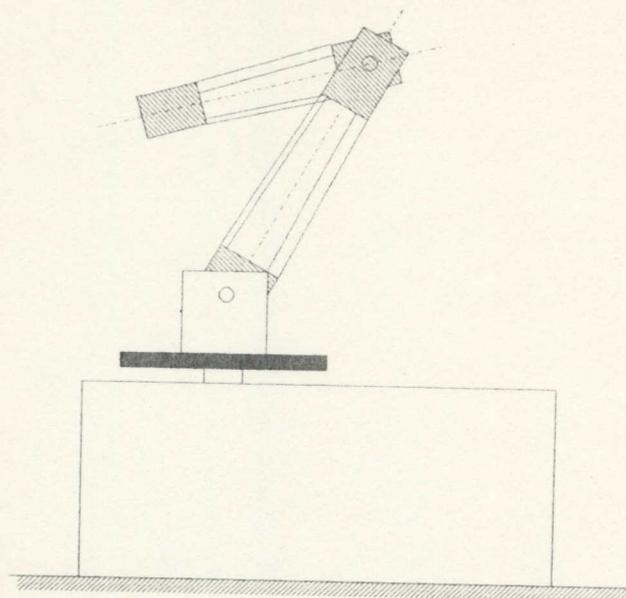


fig.V.2: Architecture mécanique du BMAN31

le robot BMAN31 possède une architecture mécanique rotoïde, de classe 1 [RRR]. La figure V.6 montre l'architecture mécanique du robot BMAN31. Pour pallier au problème du poids, le matériel utilisé dans la réalisation des segments du BMAN31 est de l'aluminium. Ce dernier possède une faible masse volumique et présente une rigidité acceptable. De cette manière on réduit le couple résistant que doit supporter l'actionneur, et par conséquent, on augmente la possibilité d'établir une bonne commande.

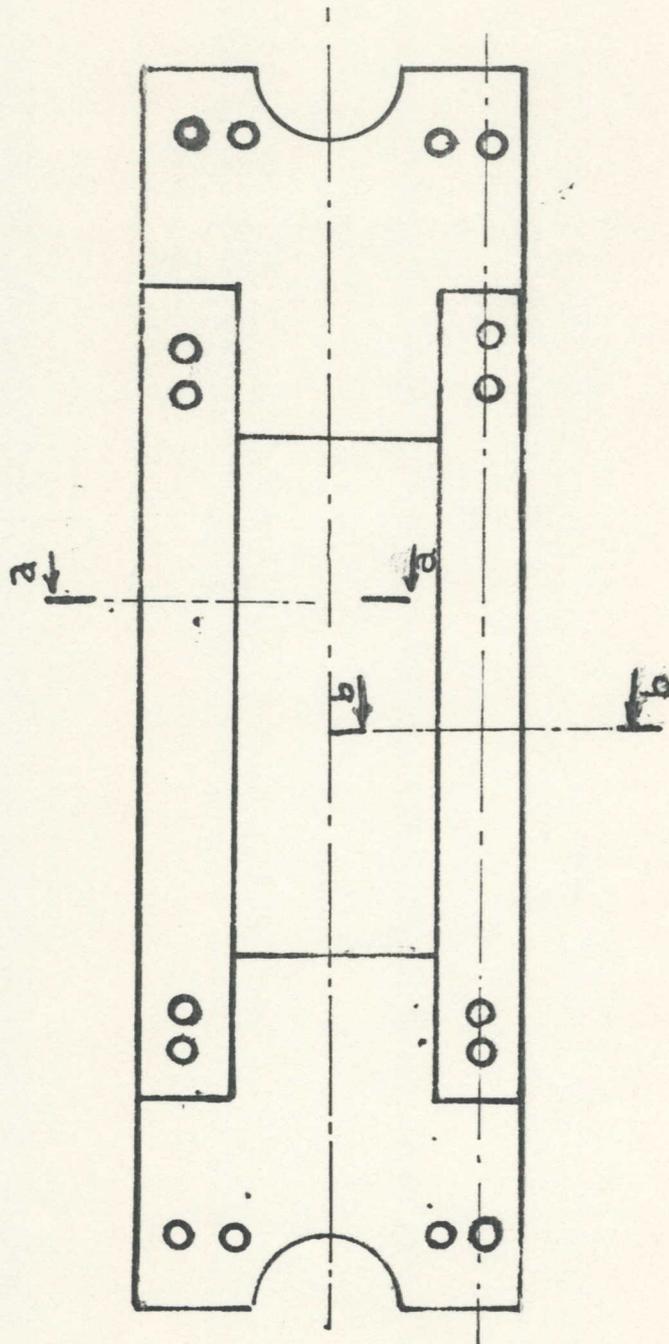
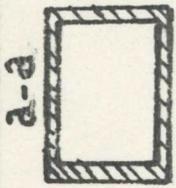
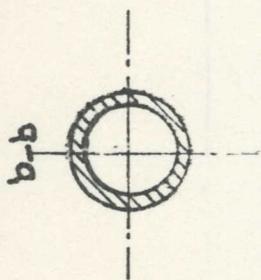
V.2.1 Les segments du BMAN31:

La figure V.3 illustre la structure du segment avant-bras. Celle du bras est élucidée dans la figure V.4. Les segments du bras et avant-bras possèdent la même longueur $L=30$ cm.

V.2.2 Les articulations du BMAN31:

Le robot BMAN31 est du type [RRR], par conséquent trois articulations assurent les liaisons entre les segments. Ces articulations sont à base de roulements, ces derniers assurent une bonne motricité au niveau de chaque articulation, diminuent les frottements, les vibrations et les glissements. Ces derniers peuvent causer des erreurs de positions.

La figure V.5 élucide l'articulation de la base. L'articulation de l'épaule, liant la base à l'avant-bras, est montrée dans la figure V.6. L'articulation coude, liaison avant-bras bras, est illustrée par la figure V.7.

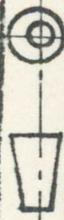


N. AMOUR

SEGMENTS - AVANT - BRAS

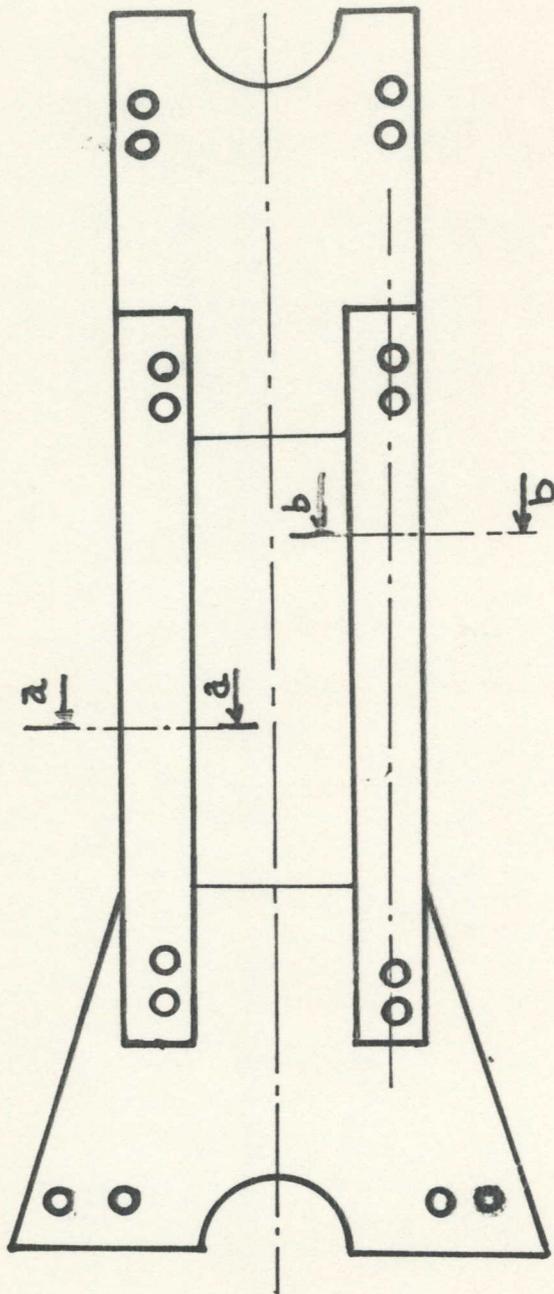
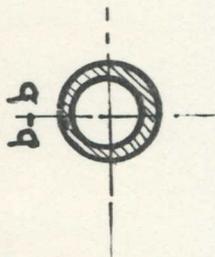
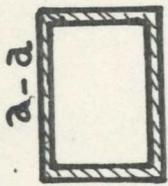
Ech: 1:2

I.N.E.S. ELECTRONIQUE . BLIDA

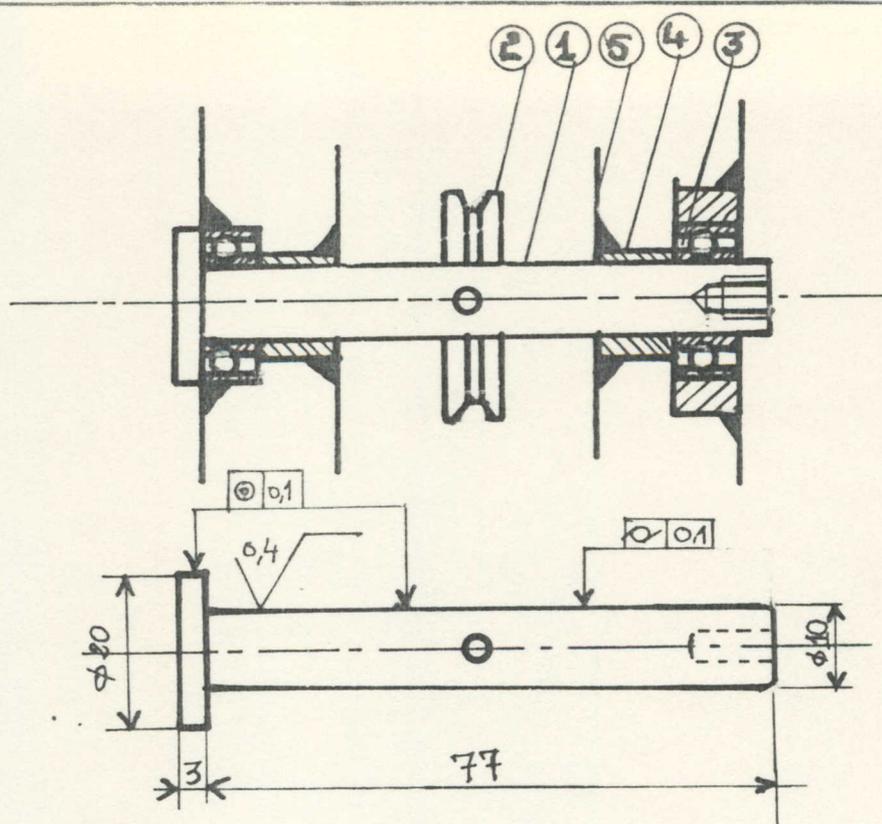


D. 12-1994

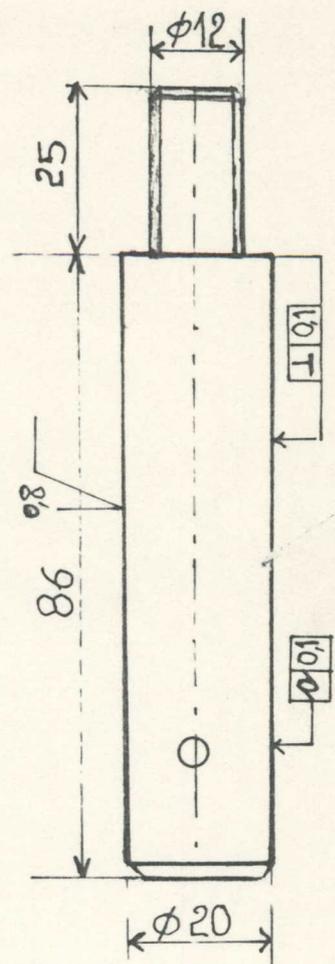
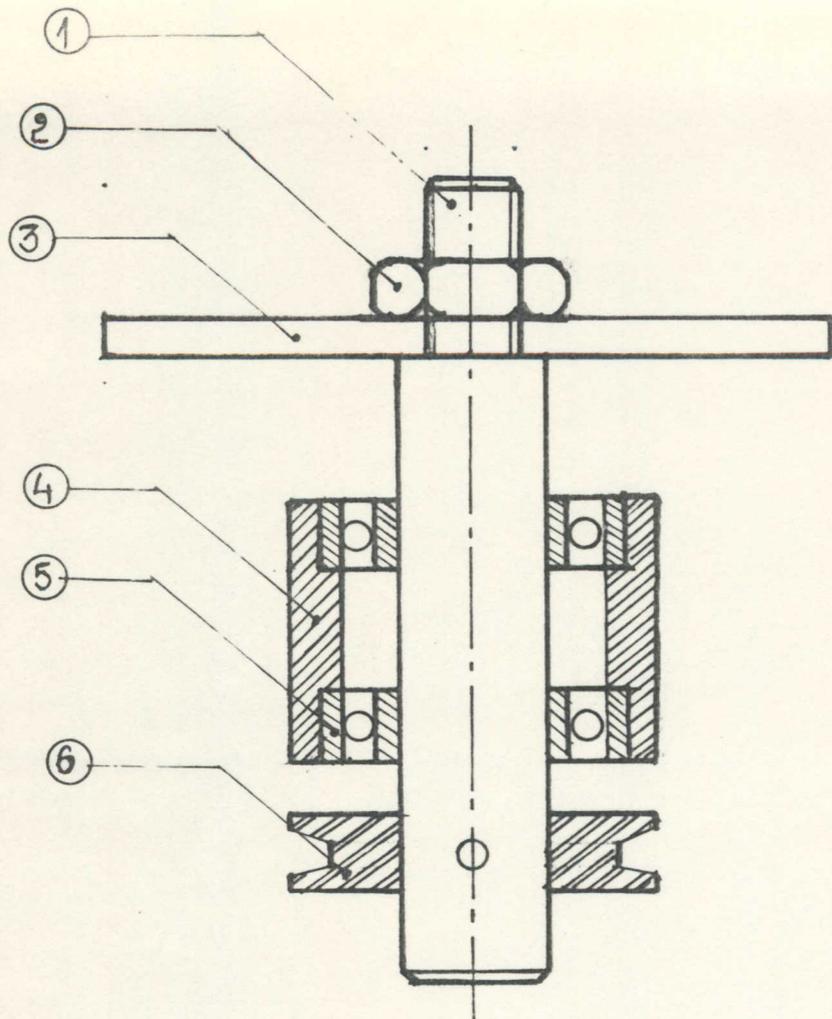
N° 5

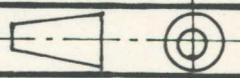


N. AMOUR	SEGMENT. BRAS	
Ech: 1:2	I.N.E.S. ELECTRONIQUE BLIDA	D: 12-1994
		N: 4



5	04	TOLE DES SEGMENTS		/
4	03	BAGLIES		/
3	02	ROULEMENTS BC		/
2	01	POULIE		/
1	01	ARBRE AXE		/
REP/NS		DESIGNATION	MATIERE	OBS
N. AMOUE	AXE COUDE			
				D: 12-1994
Ech: 1:1	I.N.E.S ELECTRONIQUE BLIDA			N° 2



6	01	POLLIE	AS13G	/
5	02	ROULEMENT	/	/
4	01	PALIER	XC38	/
3	01	PLATEAU	E24	/
2	01	ECROU	E24	/
1	01	AXE (ARBRE)	XC38	/
REP	NB	DESIGNATION	MATIERE	OBS
AXE DE BASE			AMMOUR	
				Ech: 1:1
I.N.E.S ELECTRONIQUE . BLIDA			PLC : N° 5	Juin 1994

V.2.3 Transmetteur du mouvement du BMAN31:

L'actionnement de l'articulation coude peut s'effectuer en plaçant un actionneur au niveau du coude, par une liaison actionneur-articulation directe. Dans cette structure, le poids de l'actionneur s'ajoute au poids des segments et des articulations, provoquant ainsi un grand couple résistant qui s'applique à l'articulation de l'épaule, l'actionneur de cette dernière peut ne pas supporter ce couple, ce qui rend sa commande difficile, voire impossible. Pour surmonter ce problème, un système de transmission de mouvement est utilisé.

Un système de transmission de mouvement par courroies est utilisé pour l'actionnement de l'articulation coude du robot BMAN31. A partir de l'actionneur coude qui est placé sur la plate forme mobile de la base, le mouvement est transmis à l'articulation coude par des courroies et des poulies, ces dernières sont montées sur les articulations épaule et coude figure V.7, idem pour l'articulation de base. Un système de transmission de mouvement est utilisé, fournissant ainsi la possibilité de placer le capteur au niveau de l'articulation de la base.

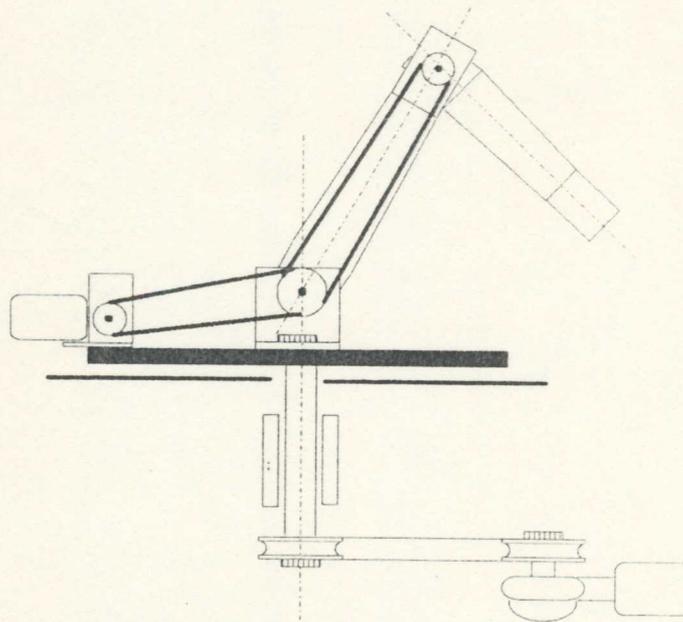


Fig.V.8: Système de transmission par courroies du robot BMAN31

V.3 Les actionneurs et les capteurs du robot BMAN31:

Parmi les constituants de base d'un robot, figure le système actionneur et le système sensoriel. Le système actionneur assure la motricité de la structure mécanique du robot. Le système sensoriel fournit la possibilité de connaître l'état du système lors de son évolution.

V.3.1 Le système actionneur du robot BMAN31:

Le système actionneur du BMAN31 est constitué de trois moteurs DCPM et d'un système de transmission par courroies. Chaque moteur assure la motricité de chaque articulation.

Le moteur DCPM est constitué de deux grandes parties, l'inducteur et l'induit. Le rôle de l'inducteur, ou stator, est de créer le flux magnétique dans lequel tourne l'induit. Ce dernier, appelé rotor, est un bobinage alimenté par le biais des collecteurs et par conséquent parcouru par un courant, tourne sous l'effet d'une force électromagnétique.

V.3.2 Le système sensoriel du BMAN31:

Le signal issu du capteur en fourche et qui porte l'information sur l'état de l'articulation attaque une étape de mise en forme suivie d'un étage détecteur de flancs. Ce traitement permet de fournir une impulsion après chaque transition et par conséquent, la détection d'une rotation d'un pas élémentaire.

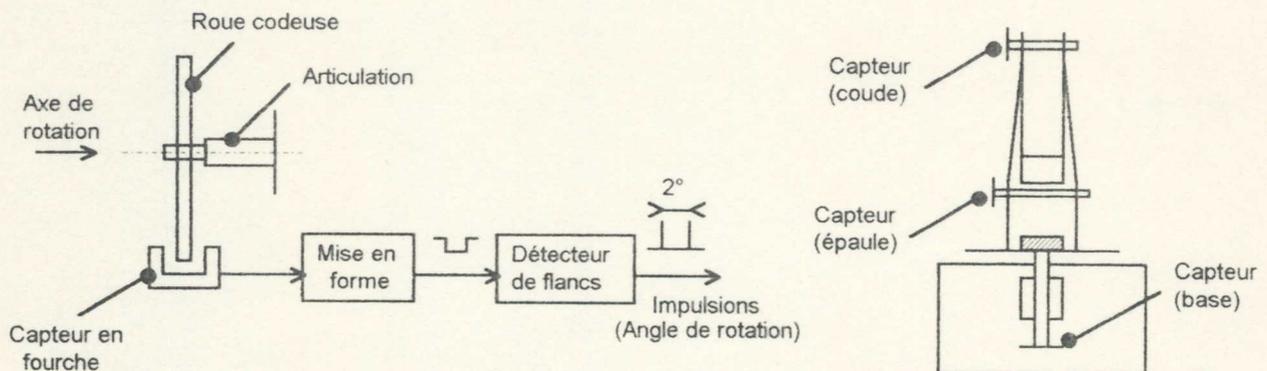


Fig.V.9: Système sensoriel du BMAN31

V.4 Commande des mouvements du robot BMAN31:

A ce niveau d'étude, on développe la partie HARD, conçue et réalisée dans le but de permettre, d'une part la génération des signaux de commande proportionnels aux variables de commande calculées au niveau du calculateur de site et d'établir, d'autre part, les variables d'état du système issues des capteurs, et cela avant leur acquisition par le calculateur.

V.4.1 Générateur du signal de commande:

Le circuit intégré PIT est un circuit compteur temporisateur, possédant six modes d'utilisation programmables. En fonctionnant en mode zéro, le PIT génère des créneaux de durée programmable, qui sont en fonction de l'horloge et du nombre programmé, fournit par conséquent la possibilité d'utiliser le principe de la commande par PWM de l'actionneur.

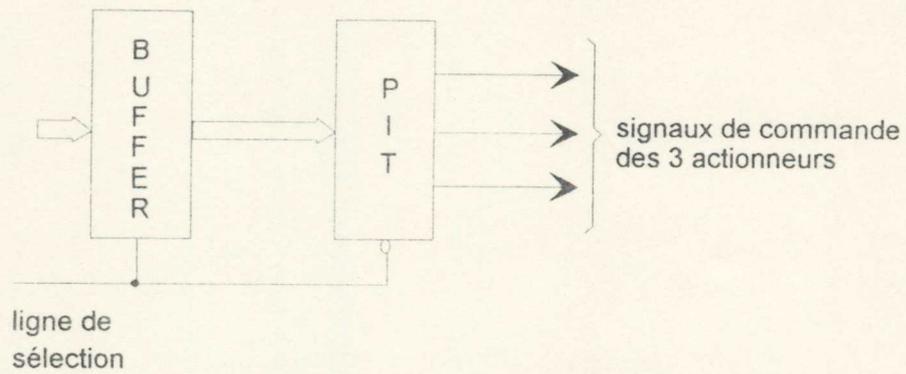


Fig.V.10: Circuit générateur des signaux de commande PWM

V.4.2 Circuit de retour:

Les impulsions en provenance du capteur de chaque articulation excitent un compteur qui formule le nombre des impulsions reçues. Le calculateur de site acquiert le contenu de chaque compteur après chaque période d'échantillonnage, permettant ainsi la connaissance de l'état du système.

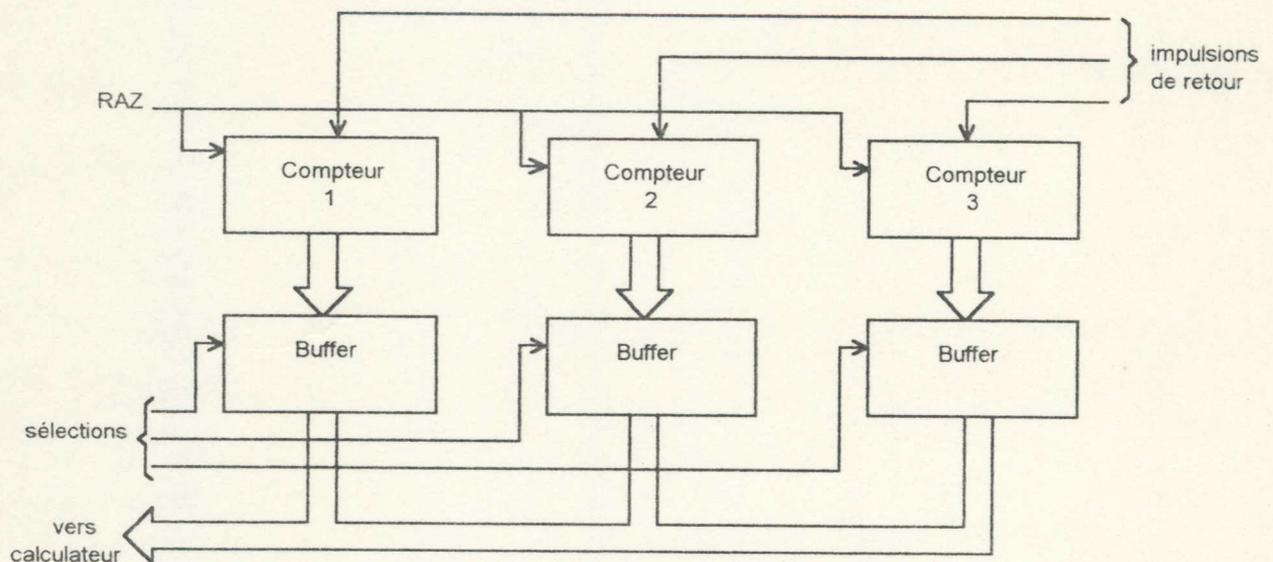


Fig.V.11: Circuit de retour du BMAN31

V.4.3 Circuit d'échantillonnage:

Ce circuit permet de délivrer l'information sur les instants durant lesquels le calculateur peut acquérir les informations sur l'état du système. Comme il fourni au PIT la période du signal de commande.

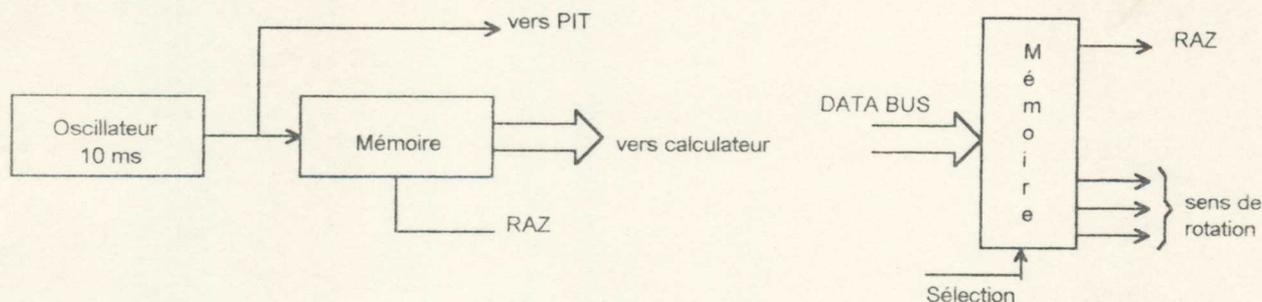


Fig.V.12: Circuit d'échantillonnage et de fixation du sens de rotation

V.4.4 Circuit d'initialisation des compteurs:

Le calculateur peut accéder en écriture à une zone mémoire de quatre bits, le premier bit provoque la remise à zéro des compteurs de position, les trois bits qui restent déterminent le sens de rotation des actionneurs des trois articulations.

V.4.5 Le calculateur de site:

Les calculs, la gestion et le traitement des informations sont assurés par un calculateur de site. Un micro-ordinateur, ORIC ATMOS 48K, joue le rôle du calculateur de site, il est connecté au BMAN31 par des connecteurs RS 232C.

Ainsi, un moyen direct est mis à la disposition de l'utilisateur pour communiquer avec le robot BMAN31. Il peut établir n'importe quel programme de commande et cela à la limite du possible.

V.4.6 Modules de puissance:

Après l'établissement du signal de contrôle qui est destiné au pilotage de l'actionneur, une modulation est nécessaire pour l'actionnement du moteur DCPM. Cette modulation assure l'alimentation nécessaire de l'actionneur par l'énergie proportionnelle au signal de contrôle, cette tâche détermine le rôle de la carte de puissance.

Le module de puissance, étant un moyen de communication entre l'étage de commande et l'étage de puissance, nécessite une protection, cette dernière est assurée par un isolement optique entre les deux étages.

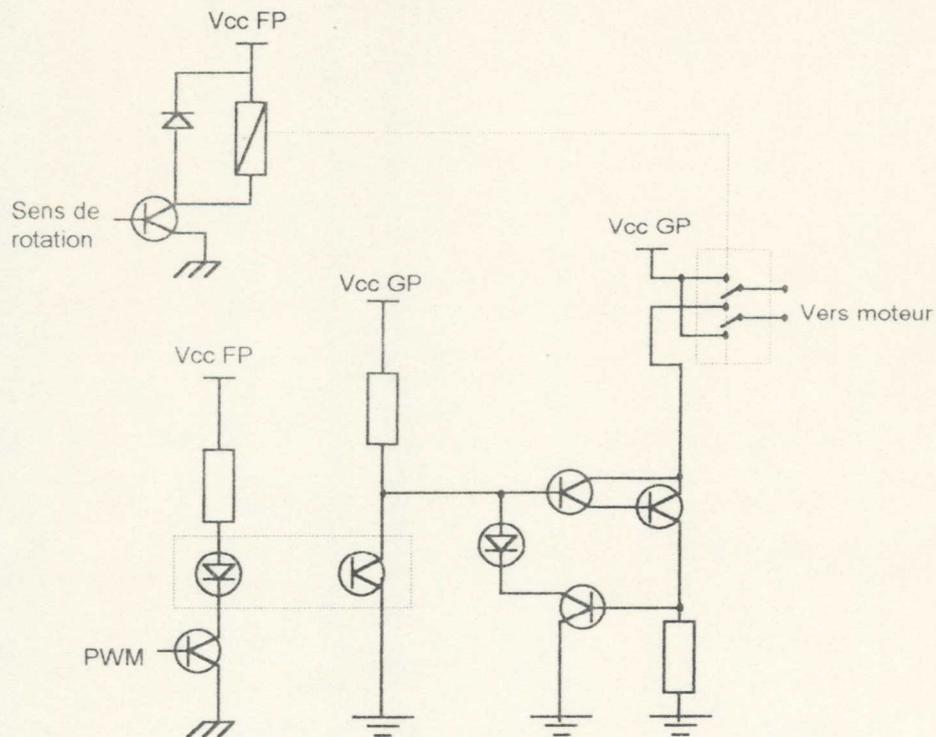


Fig.V.13: Carte de puissance

V.5 Boite de commande manuelle:

Un circuit de commande manuelle a été réalisé dans le but de fournir à l'utilisateur la possibilité de contrôler les mouvements du robot manuellement. Dans ce cas l'utilisateur ferme la boucle de retour. Un clavier formé de boutons poussoirs et d'interrupteurs est utilisé pour le contrôle de chaque articulation. La vitesse est ajustée par le moyen d'un potentiomètre.

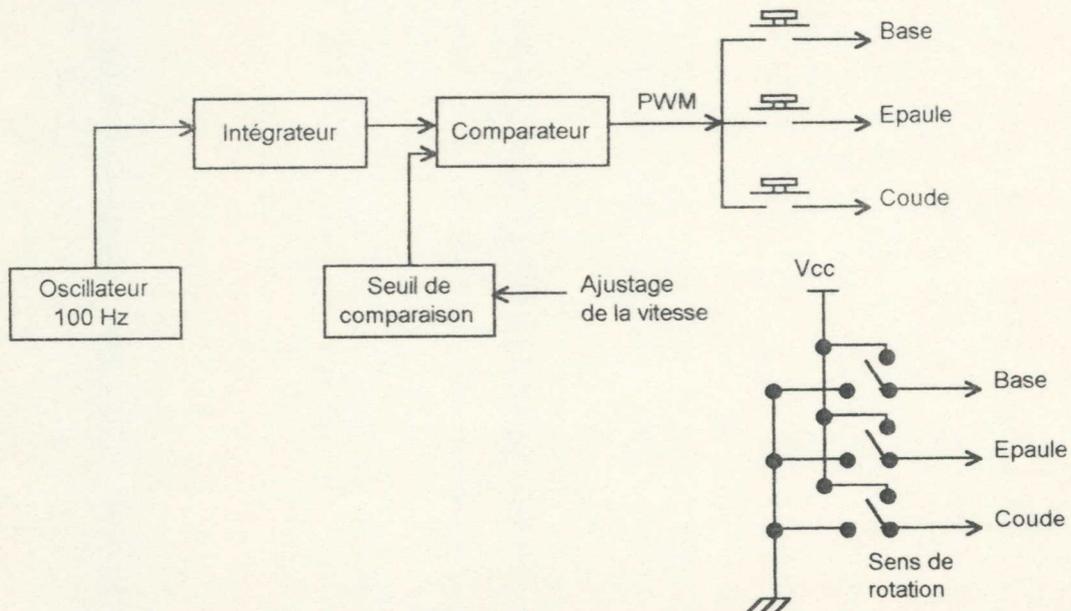


Fig.V.14: Synoptique du circuit de la boite de commande

V.6 Simulation sur PC du robot BMAN 31

Dans le but de vérifier les équations mathématiques établies dans le chapitre IV, lors du calcul de la matrice de passage d'une part et d'autre part le comportement du robot lorsqu'il est piloté par une loi de commande, une simulation sur PC a été effectuée.

V.6.1 Simulation du robot BMAN 31

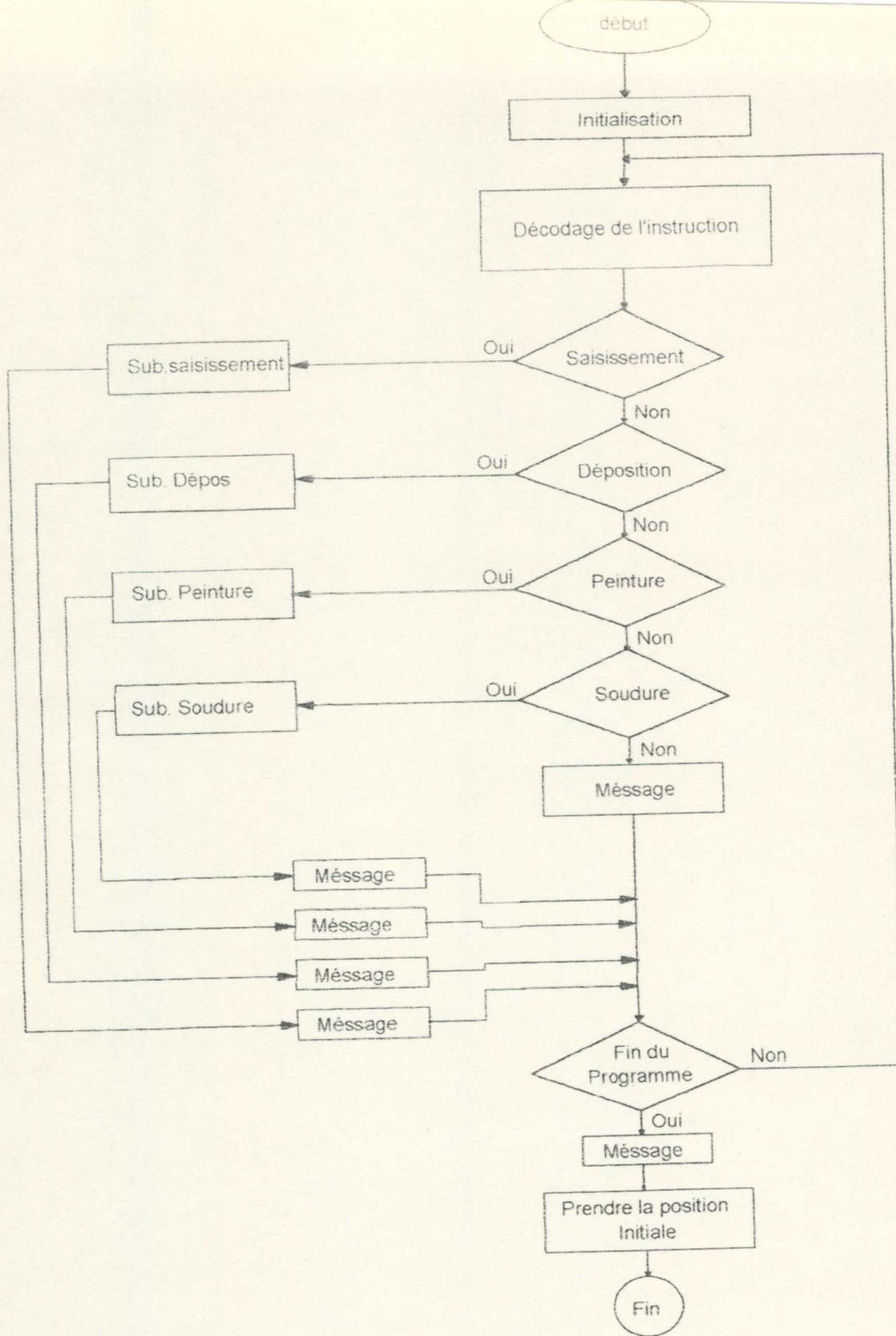
L'objectif à atteindre dans cette simulation est d'établir un programme qui fournit la possibilité de visualiser la structure mécanique du BMAN 31, d'effectuer la mobilité de cette structure, de communiquer et de définir la tâche au robot et enfin d'exécuter cette dernière.

Au niveau du programme principal, (**fig.V.15**), après l'initialisation, un décodage de l'instruction sera effectué, définissant ainsi la nature de la tâche à exécuter. Un test fourni le branchement au sous-programme correspondant.

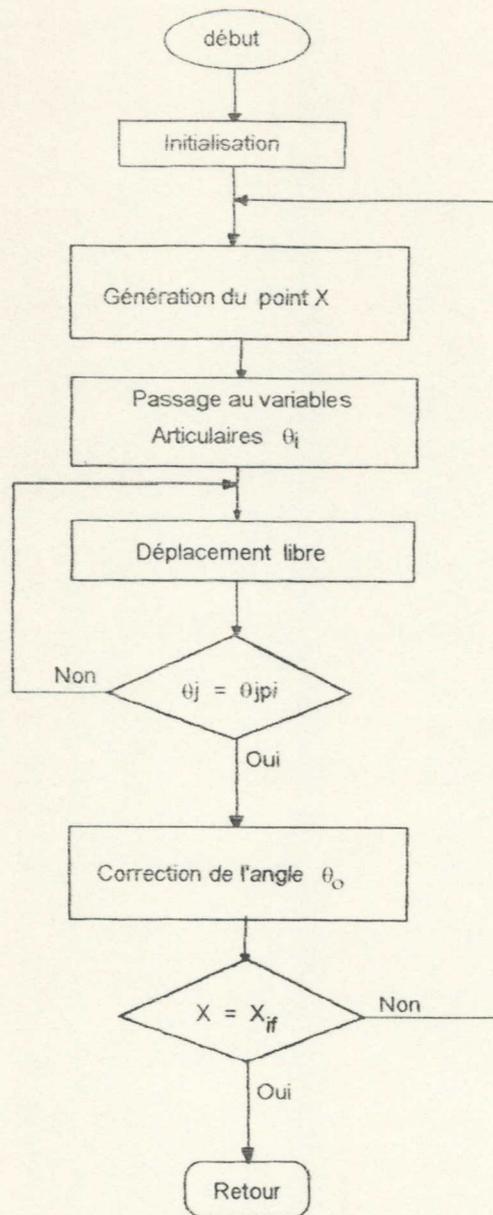
Les sous-programmes développés pour la réalisation de quelques tâches sont: Sous-programme de saisissement (**fig.V.16**), sous-programme de déposition (**fig.V.17**), sous-programme de déplacement en ligne droite (**fig.V.18**).

L'information de la trajectoire, fournie par le programme au robot BMAN31, est sous la forme des coordonnées de départ et des coordonnées d'arrêt, et cela dans l'espace opérationnel. Des points intermédiaires peuvent être fournis par le programme dans le but de définir la forme de la trajectoire désirée, pour l'exécution de la tâche. Ces points peuvent être arbitraires et peu distants entre eux dans le cas d'éviction des obstacles.

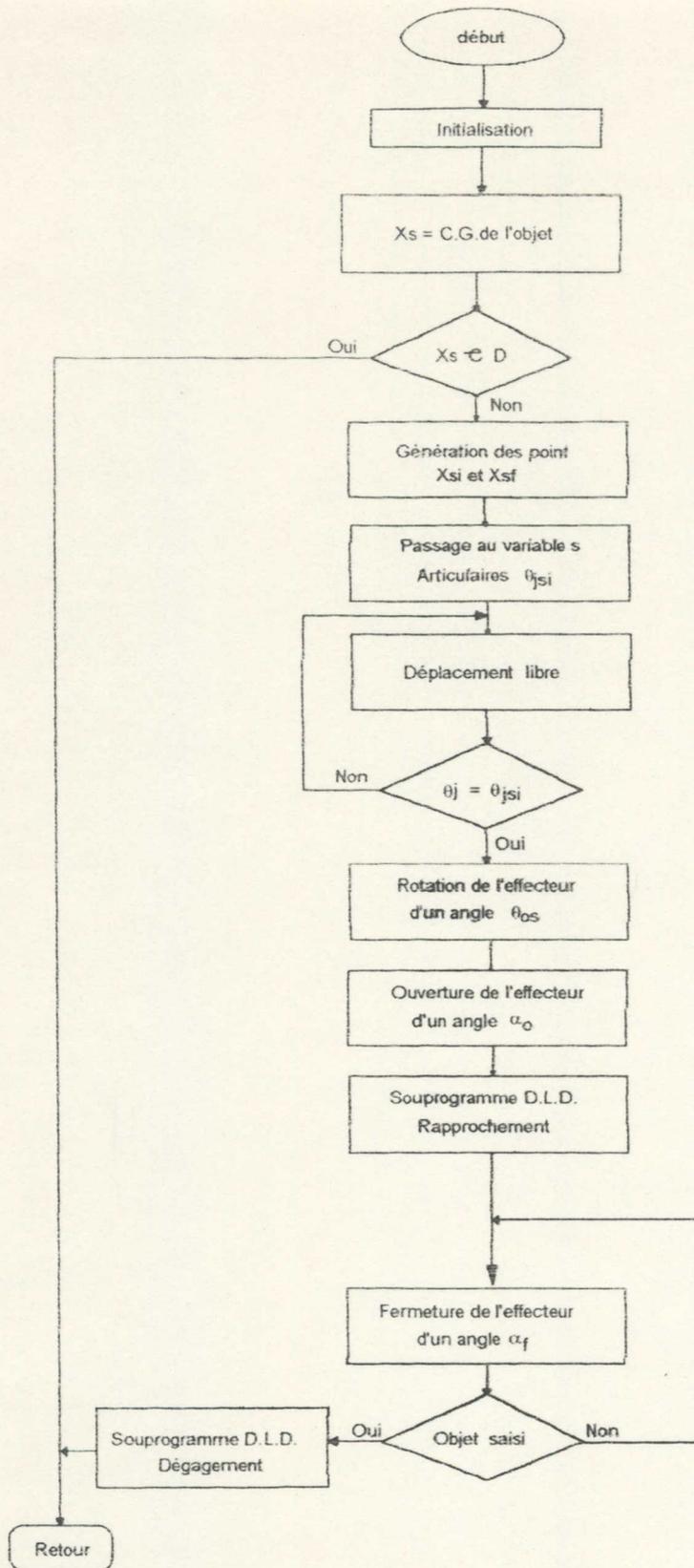
La description de la tâche, pour le robot BMAN31, se fait au niveau objectif. A ce niveau, les informations fournies par l'opérateur sont: Les coordonnées du centre de gravité de l'objet à manipuler, les coordonnées du point de l'emplacement final de l'objet et les dimensions de l'objet.



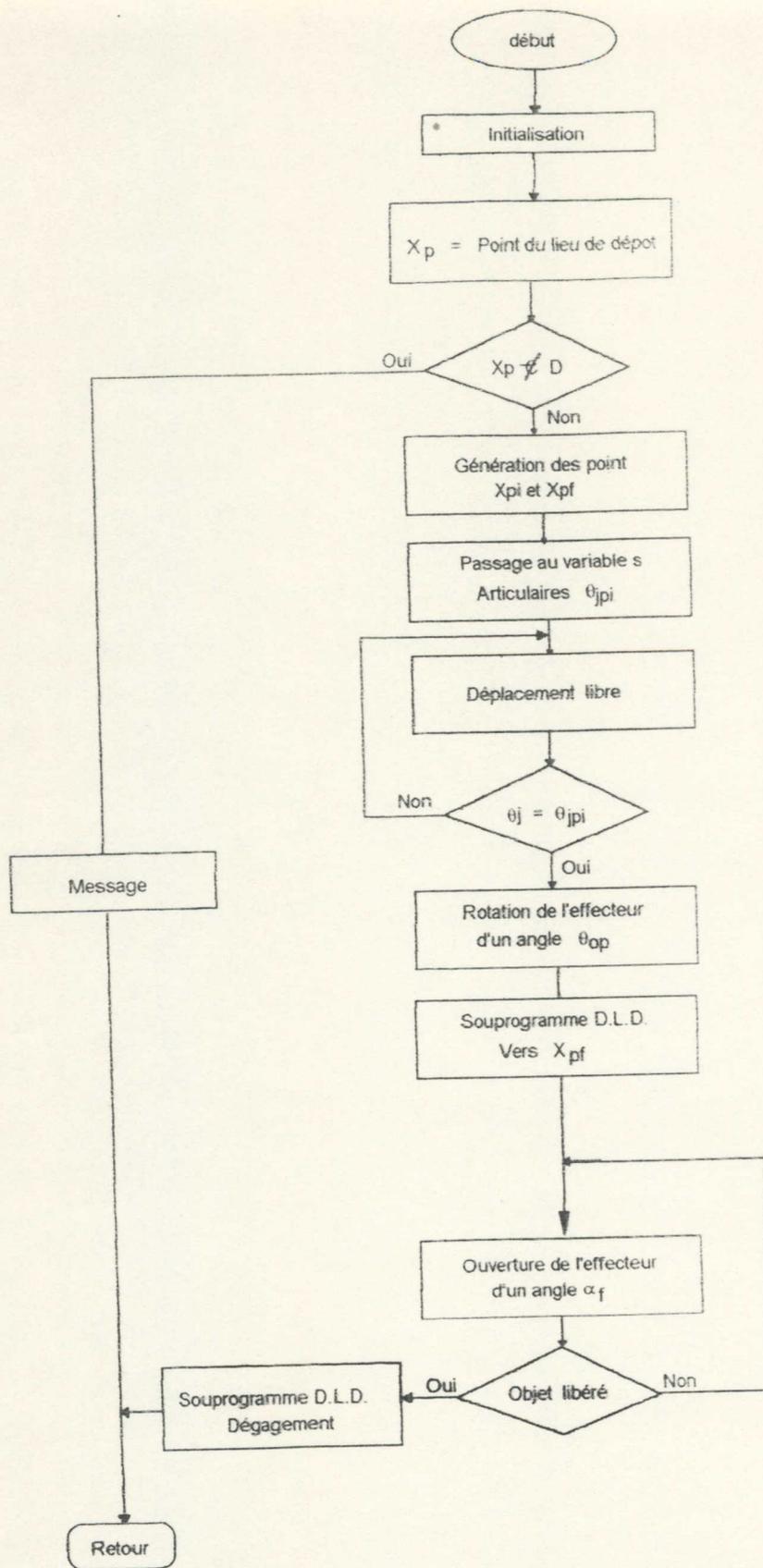
Organigramme du Programme Principal.



Organigramme du sousprogramme de déplacement en ligne droite D.L.D.



Organigramme Du Souprograme De Saisissement.



Organigramme Du Souprogramme De Déposition.

La programmation de la tâche se fait au niveau objectif. Les informations données par l'opérateur sont traitées par un programme d'interprétation, qui génère les plans d'actions nécessaires à l'exécution de la tâche. Pour un programme définissant la tâche de saisissement d'un objet, dans le but de le déplacer et le mettre dans un emplacement défini, les plans d'actions sont:

1. Tester si l'objet se trouve hors du champs d'intervention du robot. si c'est le cas, envoyer un message, sinon continuer.
2. Définition de la tâche: saisissement, positionnement, peinture, soudure,...
3. génération du point de positionnement du poignet par rapport à l'objet, les coordonnées de ce point sont fonction des dimensions de l'effecteur et de l'objet,
4. orientation de l'effecteur dans la direction de l'objet,
5. ouverture de l'effecteur d'un angle défini en fonction du volume de l'objet,
6. Déplacement de l'effecteur en ligne droite jusqu'à un point généré par le programme interpréteur, de telle manière à faire pénétrer une portion de l'objet dans une partie du volume délimité par les parois du saisisseur,
7. durant l'opération précédente, assurer une correction de l'angle d'orientation de l'effecteur vers l'objet,
8. fermeture de l'effecteur d'un angle défini en fonction de l'angle d'ouverture et du volume de l'objet à manipuler,
9. déplacement de l'effecteur, et positionnement du poignet en un point défini par l'interpréteur en fonction des coordonnées du point à atteindre,
10. l'orientation de l'effecteur dans la direction du point à atteindre,
11. déplacement de l'effecteur jusqu'à unir le centre de gravité de l'objet avec le point désiré,
12. ouverture de l'effecteur et abandon de l'objet,
13. déplacement de l'effecteur pour cause d'éloignement,
14. fermeture de l'effecteur d'un angle pré défini,
15. exécution d'une autre tâche, sinon prendre la position initiale.

Une simulation du robot BMAN31 sur PC a été réalisée, utilisant le programme générateur d'actions précédant, pour l'exécution de la tâche de saisissement.

V.6.2 Simulation de la loi de commande

L'actionneur du robot BMAN 31, le moteur DCPM, est piloté par une loi de commande, qui donne la possibilité d'imposer au moteur la vitesse et la trajectoire références à suivre. Une simulation su PC de la loi de commande, qui pilote l'actionneur le long de la trajectoire préétablie, a fournie la possibilité d'observer le comportement du moteur et de comparer sa réponse avec la réponse désirée. Par conséquent, cette simulation a permis la vérification des équations établies au chapitre IV.

La structure mécanique du robot affecte, durant son évolution dans l'espace, les paramètres des actionneurs au niveau de chaque articulation. Ces perturbations qui provoquent le changement des variables au sein du système à commander, rend par conséquent l'actionneur de l'articulation un système à paramètres variables dans le temps. Pour surmonter cette contrainte, une simulation d'une loi de commande adaptative a été réalisée au chapitre IV.

L'organigramme de la figure (Fig.V.19) élucide les différentes étapes menant à l'établissement du programme de la simulation. L'étape d'initialisation comporte essentiellement les phases suivantes:

- L'angle de rotation consigne de l'actionneur θ_c , ce dernier représente une variable dans les équations de la position référence $\theta_r(t)$ et de la vitesse référence $\dot{\theta}_r(t)$.
- Fixation des instants de perturbation K_0T et K_1T .
- Initialisation des variables.

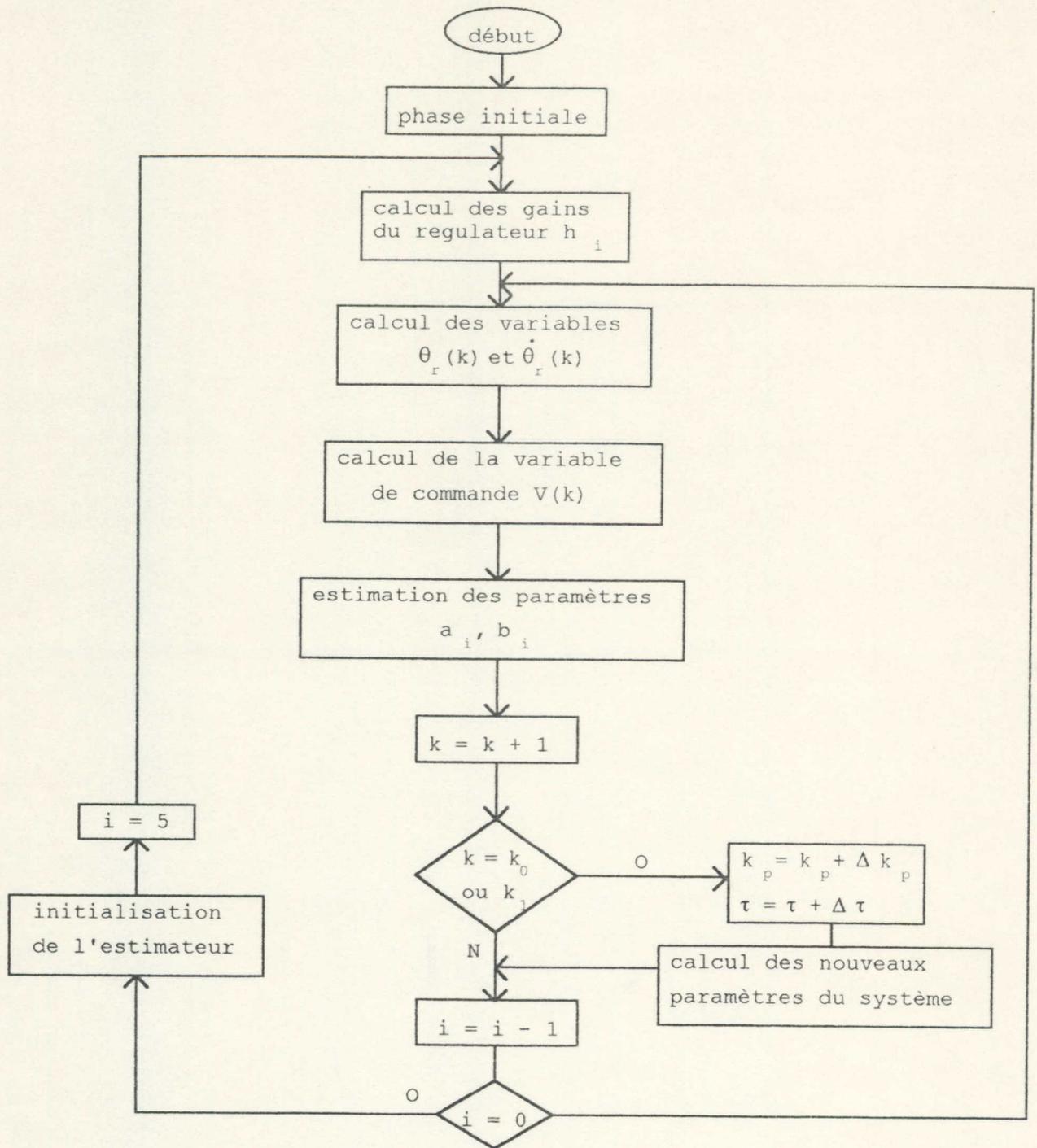


Fig.V.19: Organigramme de la simulation de la loi de commande

La figure (Fig.V.21) montre les réponses du système actionneur à la loi de commande. On remarque l'oscillation amortie au niveau de la courbe de la vitesse du moteur, c'est le moment des perturbations, ces dernières provoquent la réaction du régulateur qui assure le réajustement nécessaire pour suivre la vitesse référence exigée.

La figure (Fig.V.20) illustre le comportement de l'estimateur RLS pour l'identification des paramètres K et τ du moteur DCPM. Après quatre itérations l'estimateur converge vers les valeurs théoriques que nous avons imposées dans la fonction de transfert du moteur DCPM. Pour une période d'échantillonnage de 10 ms, cette réponse se traduit par un temps d'identification de 40 ms nécessaire pour la réinitialisation de l'estimateur. Les paramètres K et τ sont calculés à partir de l'estimation des paramètres a_i et b_i du système.

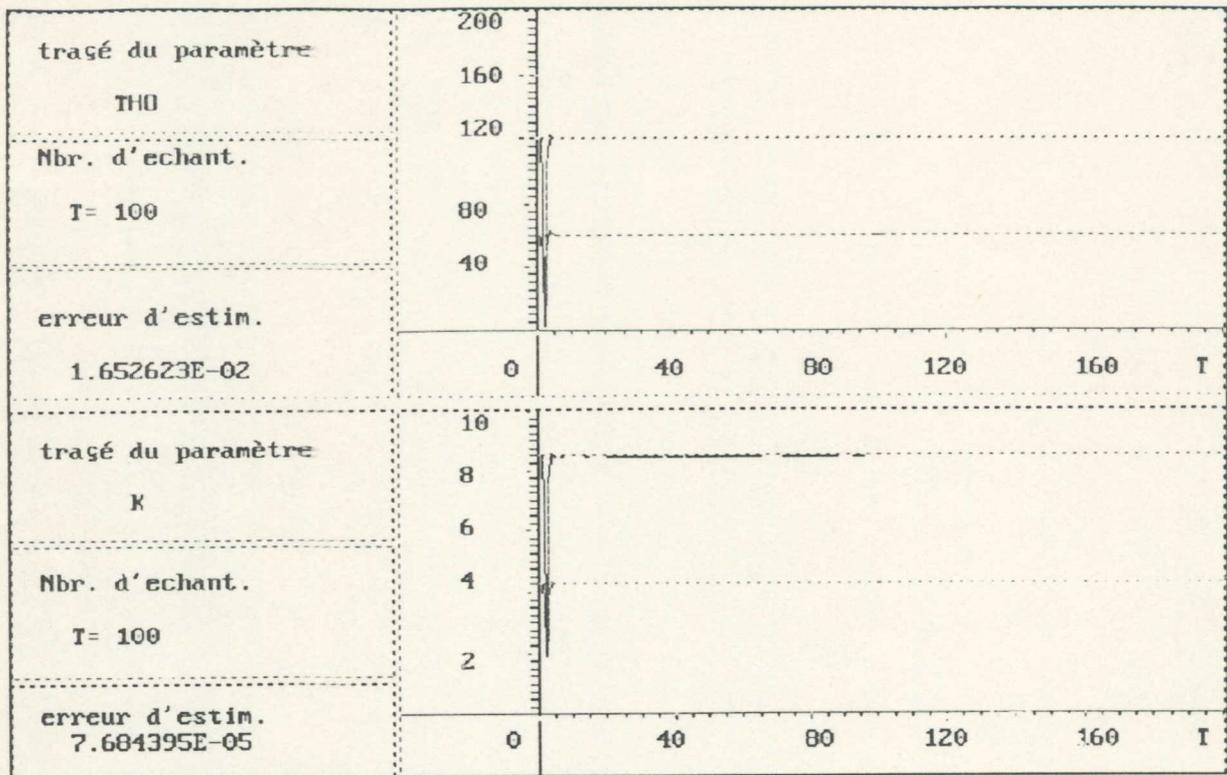


Figure 1: Esimateur des parametres du moteur D.C.P.M (K et THO)
Fig. V.20

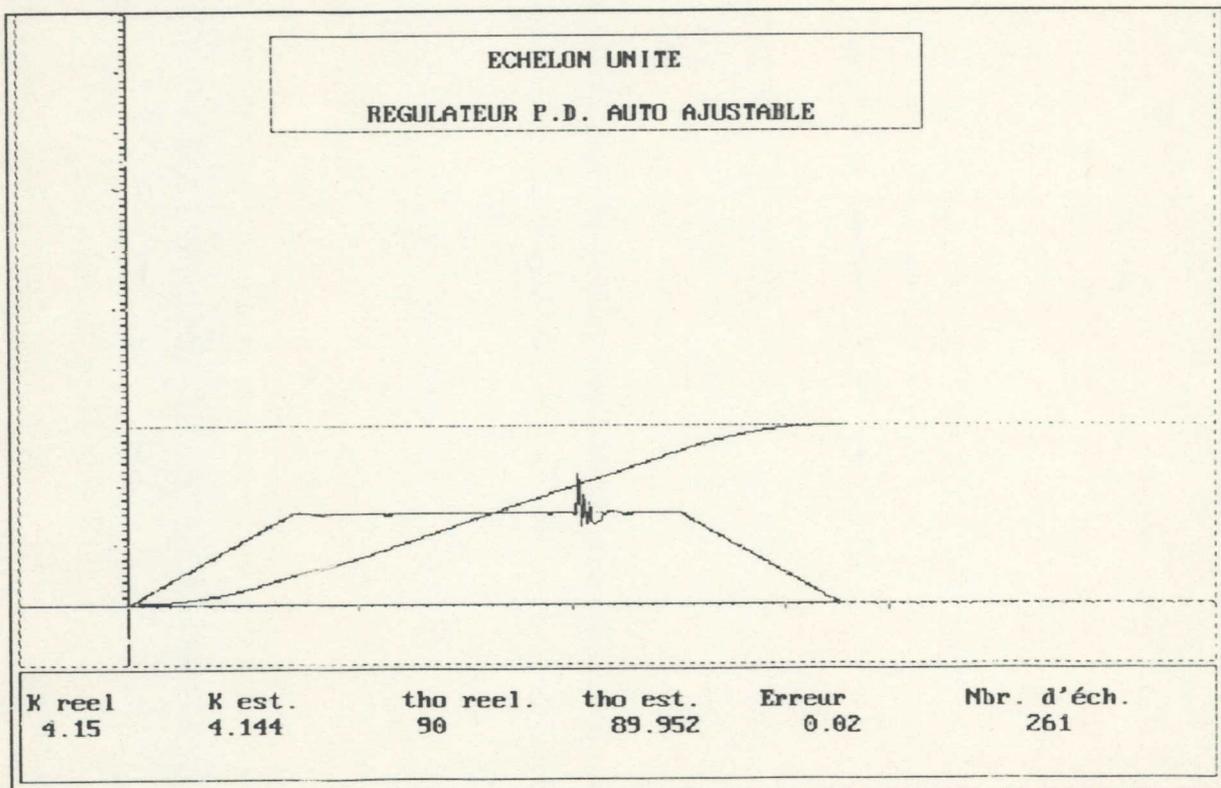


figure 2: L'effet du regulateur sur la position et la vitesse
Fig.V.21

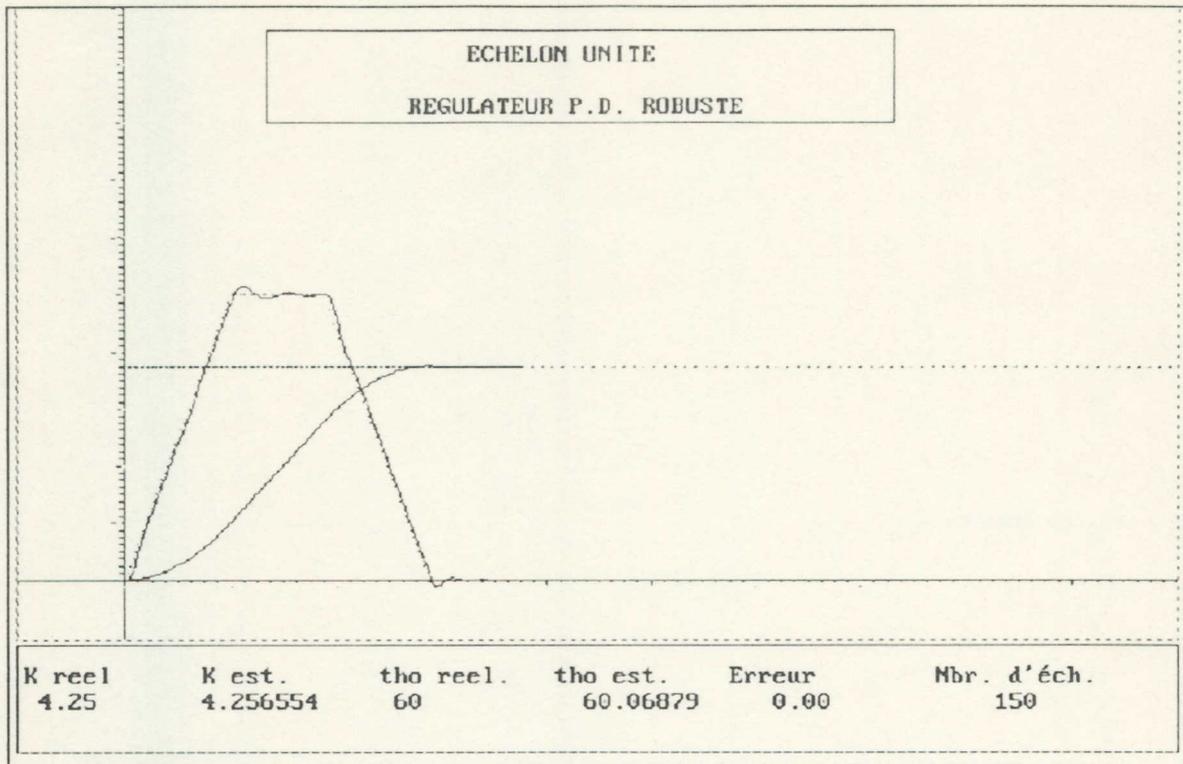


Fig.V.22: Courbes de réponse (vitesse et position) de l'actionneur piloté par un régulateur PD à paramètres fixes

La figure (Fig.V.22) élucide les courbes de la réponse de l'actionneur en vitesse et en position, ce dernier est piloté par un régulateur PD à paramètres fixes. On remarque les effets des perturbations provoquées à des instants de 200 ms d'écart, ces effets sont clairs sur la courbe de la vitesse. Cette loi de régulation est appliquée pour contrôler les mouvements du robot BMAN31 simulé sur PC.

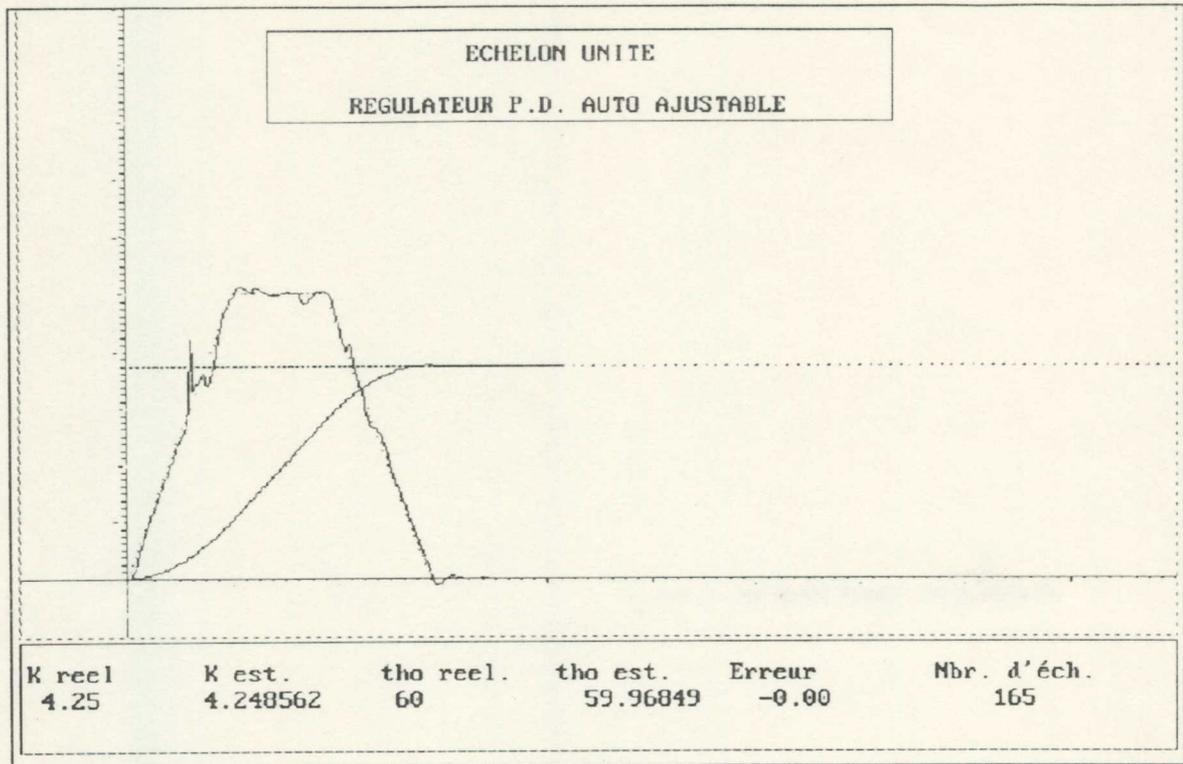


Fig.V.23: Courbes de réponse (vitesse et position) de l'actionneur piloté par un régulateur PD à paramètres autoajustables STR

La figure (Fig.V.23) montre, pour une vitesse référence et une trajectoire référence identiques à celle de la figure (Fig.V.22), les courbes de réponse du même actionneur piloté par un régulateur à paramètres variables STR. On remarque les effets des perturbations, qui se traduisent par une réaction tonique du régulateur, pour corriger la trajectoire du mouvement de l'actionneur en compensant les effets des perturbations. On peut voir clairement sur la courbe de la vitesse les variations brusques au voisinage des instants des perturbations, menant ainsi, la trajectoire du mouvement de l'actionneur à suivre la trajectoire référence.

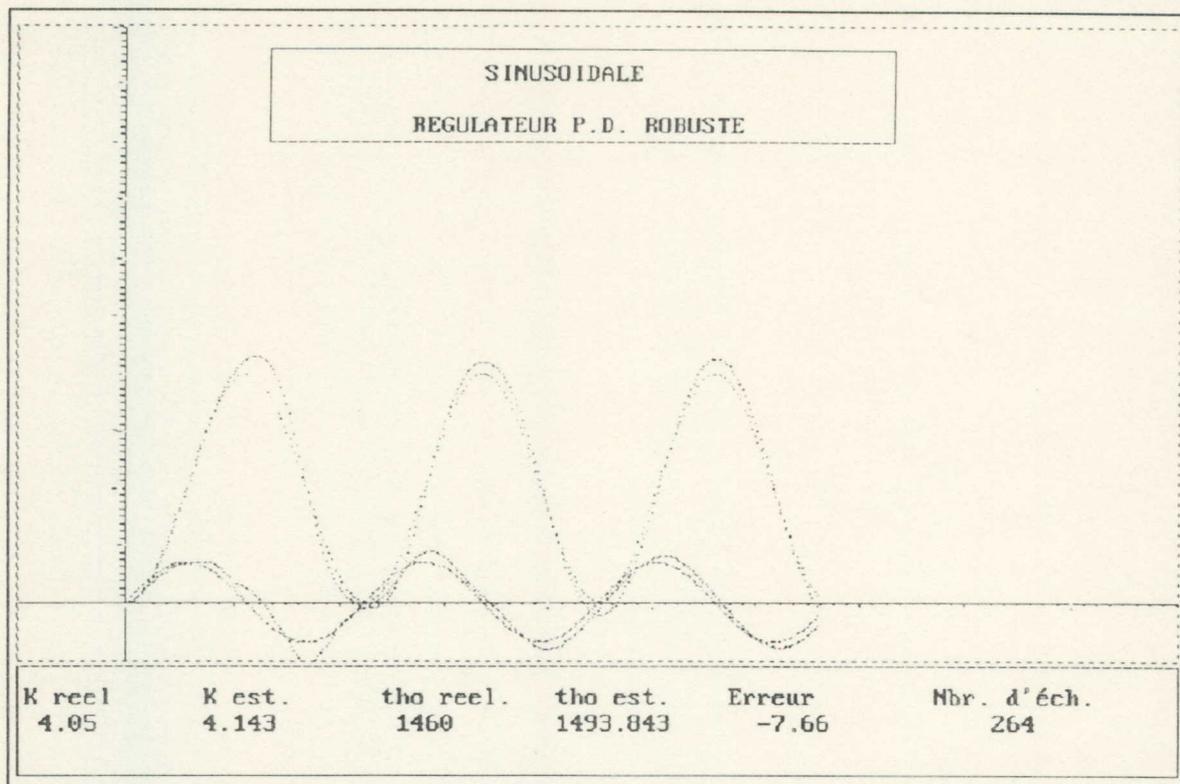


Fig.V.24: Courbes de réponse (vitesse et position) de l'actionneur piloté par un régulateur PD à paramètres fixes, la vitesse référence étant sinusoïdale

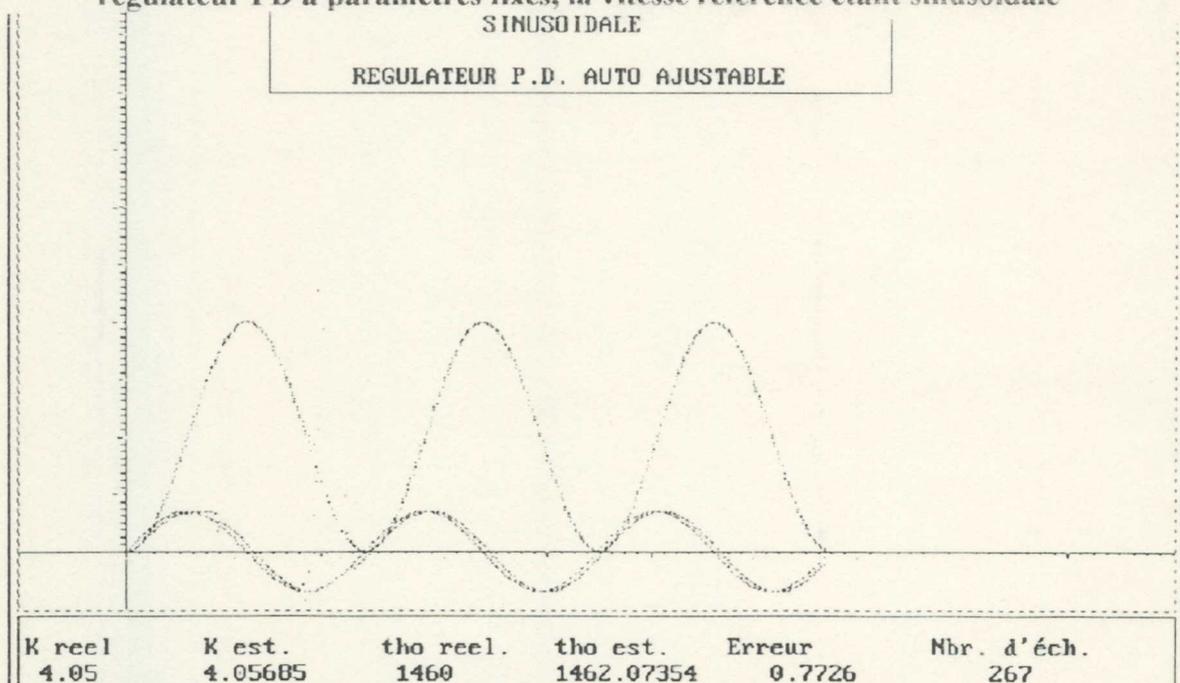


Fig.V.25: Courbes de réponse (vitesse et position) de l'actionneur piloté par un régulateur PD à paramètres variables STR, la vitesse référence étant sinusoïdale

Pour une vitesse référence sinusoïdale, et par comparaison entre les courbes des figures (Fig.24-25), on remarque clairement la supériorité du régulateur STR dans la poursuite de la trajectoire référence qui se traduit par une meilleure précision.

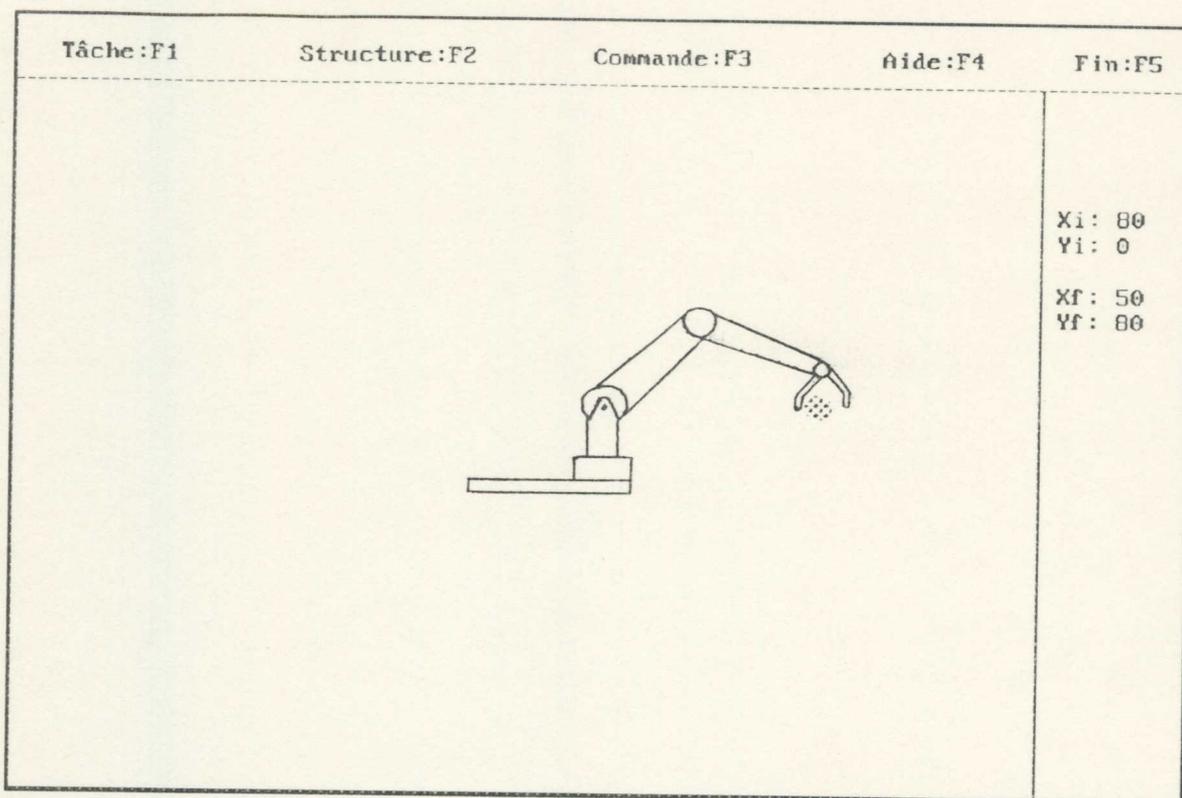


Fig.V.26: Simulation du robot BMAN31 sur PC

La figure (Fig V.26) présente une position de la simulation du bras du BMAN31 lors de l'exécution d'une tâche de saisissement et de dépôt d'objets.

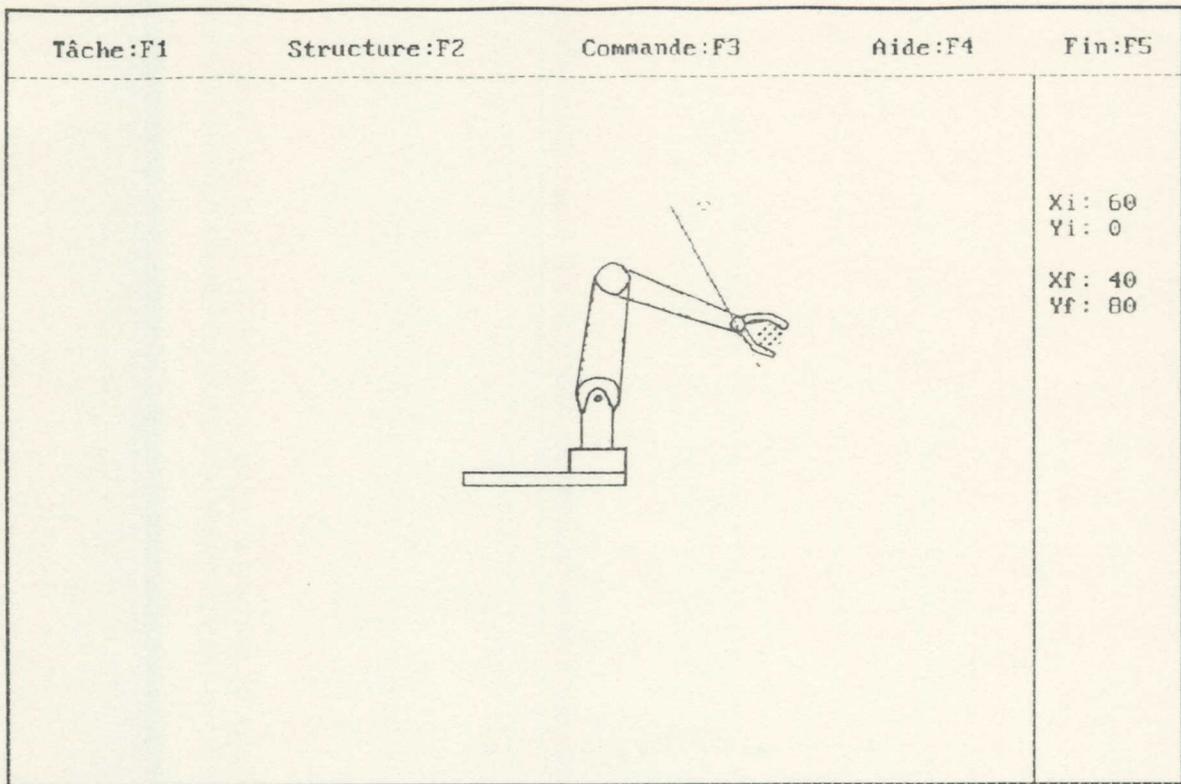


Fig.V.27: Déplacement du bras en ligne droite

La figure (Fig.V.27) montre le déplacement en ligne droite du bras du robot BMAN31. Ce dernier est contrôlé par un régulateur PD à paramètres fixes. La vitesse référence possède une forme triangulaire.

CONCLUSION

L'homme possède la particularité d'assurer la continuité dans le développement des connaissances en se basant sur les expériences et les découvertes des générations précédentes. Il a employé toute son intelligence et ses moyens pour développer les sciences et les techniques qui favorisent son bien-être et qui lui assurent une existence aisée dans son environnement. Le robot, une des créations humaines, est conçu pour remplacer l'homme et exécuter des tâches ingrates et monotones.

Nous avons réalisé, durant le déroulement du projet BMAN31, un bras manipulateur possédant un système mécanique à configuration géométrique angulaire, un système actionneur qui assure sa motricité, un système sensoriel qui fournit les informations sur l'état du bras, une carte d'interface qui permet le contrôle du bras par un ordinateur, une carte de commande et une boîte de commande manuelle qui fournit à l'opérateur la possibilité de positionner le bras et de réaliser la tâche directement. Le robot BMAN31 peut être vu d'un oeil didactique, car il fournit à l'utilisateur la possibilité de tester ses programmes de contrôle des mouvements du bras et de vérifier les programmes qui réalisent les tâches.

Le poids du bras était un problème à surmonter lors de la réalisation du BMAN31. Le couple résistant que doit supporter l'actionneur dépend de la longueur du bras, de son poids et celui de l'effecteur et de l'objet ainsi que des frottements au niveau des articulations. Le couple résistant le plus grand est celui de l'actionneur de l'épaule, ce dernier supporte tout le bras.

Les capacités du ordinateur de site du BMAN31 sont très limitées, l'ORIC ATMOS 48 Ko de 1 MHz d'horloge ne fournit pas assez de liberté au programmeur dans le choix du programme de commande et de gestion du robot BMAN31.

La conception et la réalisation du robot BMAN31, ce dernier étant notre première expérience, nous élucide plusieurs voies d'amélioration et de sophistication. Un travail futur peut se projeter sur plusieurs axes de recherche, menant à l'établissement d'un robot plus sophistiqué.

La structure mécanique, la trajectoire du bras et l'harmonie du mouvement, les actionneurs, la vision et les autres équipements sensoriels, les langages robotique, le traitement et la reconnaissance de la parole, l'intelligence artificielle présentent des créneaux de recherche divers.

Le système opérateur du robot est conçu dans le but de supporter, véhiculer et positionner l'effecteur dans l'espace environnant des objet à manipuler. Ce dernier étant l'outil de travail, entre en contact direct avec l'objet à manipuler. Par conséquent, l'harmonie du mouvement dans l'exécution de la tâche, présente un phénomène qui nécessite une grande précision. La fonction précision émane de plusieurs sources. La rigidité du matériaux, sa masse, la précision dans l'usinage des pièces des articulations et des segments, la loi de commande du pilote des mouvements du robot, des actionneurs et les capteurs présentent des facteurs de différent poids qui forment la fonction précision.

Le mécanisme du poignet est conçu pour orienter l'effecteur par rapport au repère placé au bout de l'opérateur où il doit être fixé, son rôle est de supporter la main ou le saisisseur ou tout autre effecteur. Généralement, le poignet fournit trois degrés de liberté. Il est alimenté par des moteurs électriques, systèmes hydraulique ou pneumatiques. Il est souhaitable que le mécanisme du poignet soit peu volumineux et plus résistant. De plus, il est préférable que tous ces mouvements possèdent le même centre.

Le traitement et la reconnaissance de la parole présentent un outil très important qui facilite la communication homme-robot. En s'orientant vers le langage naturel, l'homme communique plus aisément la tâche au robot et par conséquent, il surmonte les difficultés rencontrées durant la programmation de la tâche, cette dernière sera remplacée par une simple prononciation de quelques termes. De la même manière, avec les moyens de la télécommunication qui existent aujourd'hui, le robot peut informer l'homme, en lui communiquant les informations désirées que peut obtenir le robot sur l'environnement où il se trouve.

Pour plusieurs tâches performées par le robot, la vision est la source d'information la plus importante sur l'environnement du robot, la reconnaissance des contours des objets, la perception de certaines relations parmi ces objets, et les réponses appropriées à une scène donnée présentent la fondation de l'activité totale du robot. Une partie du problème repose sur le fait que la sophistication du système visuel humain rend par comparaison le système du robot pâle. Encore, même le système visuel rudimentaire peut augmenter les capacités du robot et peut permettre les activités qui peuvent autrement être difficiles, voir impossibles à performer.

La vision et le traitement d'image permettent l'acclimatation du robot dans son environnement. Elle donne au robot la possibilité de changer d'environnement sans avoir recours à l'homme. La vision est un moyen sensoriel très important, elle augmente l'autonomie du robot et facilite la communication de la tâche.

ANNEXE I

I.1 Systèmes de coordonnées (configurations physiques)

a. Les coordonnées cartésiennes:

Trois directions x , y , z sont spécifiées, les directions des coordonnées sont orthogonales (angles droits entre eux) (fig.I.1).

b. Les coordonnées cylindriques:

Le mouvement du bras du robot décrit la surface d'un cylindre si le rayon du bras est fixe. Les coordonnées sont R , θ , z , R étant le rayon du bras, θ est la position angulaire, et z la position dans la direction verticale (fig.I.2).

c. Les coordonnées sphériques:

La surface décrite par le bras est une hémisphère de rayon R , les coordonnées sont R , θ , ϕ . θ est la rotation autour de la verticale à la base du support du bras. ϕ est la rotation dans le plan vertical au plan de la base (fig.I.3).

d. Les coordonnées angulaires:

Tous les mouvements sont angulaires, trois angles sont spécifiés, α , β , θ . α est l'angle de rotation du bras par rapport à l'axe vertical au plan de la base (support du bras), β est l'angle de rotation entre le plan de la base et le premier membre du bras, θ est l'angle de rotation entre le premier membre du bras et le second, le bras peut atteindre le maximum de portions du volume sphérique. La forme du volume atteint dépend des longueurs des segments du bras (fig.I.4).

I.2. Avantages et inconvénients des configurations physiques des robots:

a. Coordonnées cartésiennes:

- mouvoir dans trois directions et de cette façon on obtient une visualisation facile.
- estimation, calcul facile.
- structure très rigide pour les longueurs, puisqu'ils sont supportés de deux cotés.
- impose un volume d'opération large, tandis que l'espace entier n'est pas utilisé.
- impose la plus grande surface pour toutes les configurations.
- exposition des guides, qui demandent une couverture dans l'atmosphère sale ou corrosif.

b. Coordonnées cylindriques:

- visualisation et calcul facile.
- actionneurs linéaires bien adaptés à l'utilisation des actionneurs hydrauliques. Par conséquent, peut se pourvoir d'une grande puissance.
- bon accès dans les cavités et les ouvertures des machines.
- volume d'accès restreint.
- impossibilité d'atteindre le volume cylindrique auprès du support vertical, ou le sol.
- l'exposition des actionneurs du rayon est vertical; difficulté de protection contre la poussière et les liquides.

c. Coordonnées sphériques:

- couverture d'un large volume pour un seul support central.
- deux actionneurs rotoïdes peuvent être facilement couverts.
- coordonnées complexes, visualisation et contrôle difficile.
- un actionneur linéaire, qui peut être protégé.

d. coordonnées angulaires:

- toutes les articulations sont rotoïdes, flexibilité maximale, chaque location du volume total peut être atteinte.
- les articulations peuvent être protégées complètement, bonne utilisation dans la poussière ou dans les locations corrosives, ou sous-marines.
- impose des actionneurs plus chers quand l'hydraulique est utilisée, mais une bonne adaptation pour les moteurs électriques.
- visualisation et le contrôle sont très difficiles dans cette configuration.

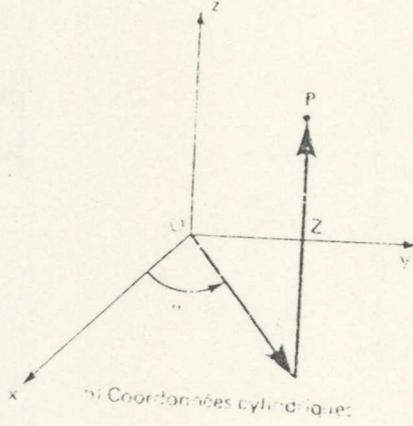
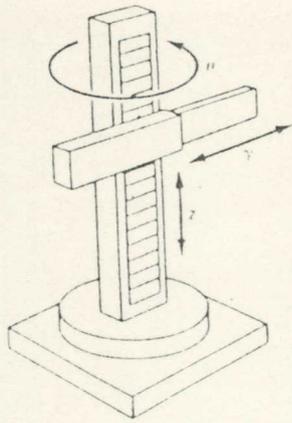


fig I.7

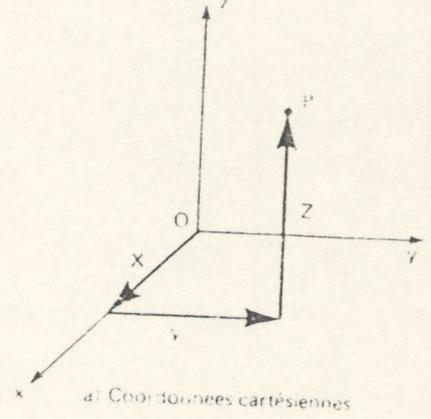
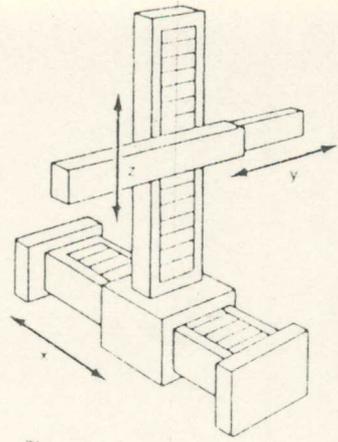


fig I.8

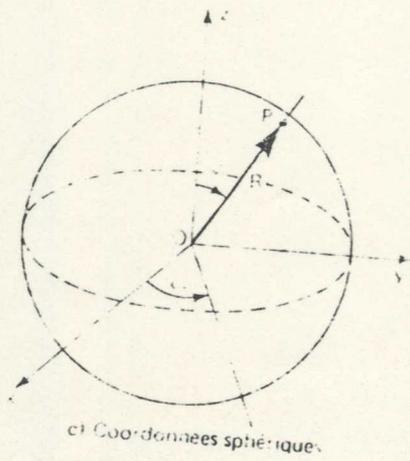
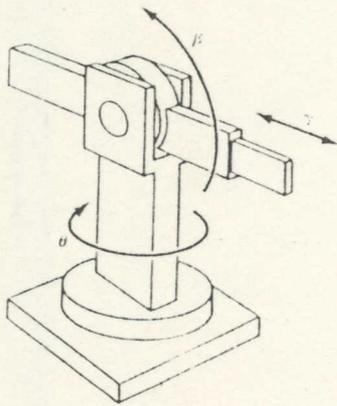


fig I.9

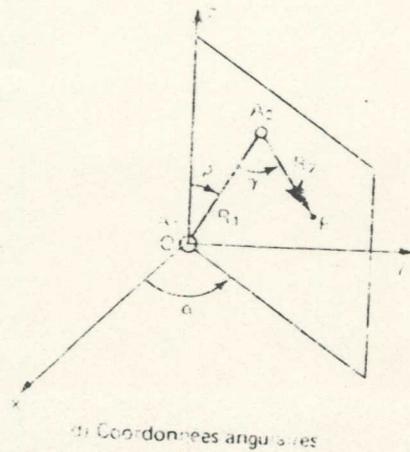
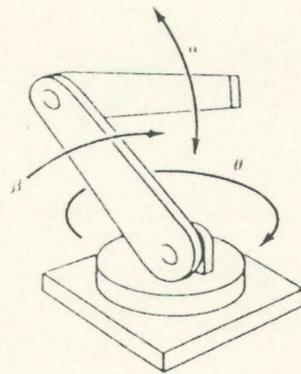


fig I.10

ANNEXE II
Modèle Cinématique Inverse
et Matrice de Passage

II.1 Modèle Mathématique Inverse et Matrice de Passage:

Le porteur du robot BMAN31 est constitué de deux segments. Le bras, de longueur $[OA]$, lié à la base par l'articulation de l'épaule. L'avant-bras, de longueur $[AB]$, lié au bras par l'articulation du coude (fig.II.1). Soit L , la longueur de chaque segment du porteur, on a:

$$[OA]=[AB]=L$$

Le champs d'exploration du BM est défini par l'ensemble θ , incluse dans \mathbb{R}^3 les points appartenant au volume d'une hémisphère supérieure de rayon $R=[OA]+[AB]=2L$, et de centre O . Etant donné un point $M(x,y,z) \in \mathbb{R}^3$, on veut, à partir des coordonnées du point M , déterminer les angles d'orientation θ des segments $[OA]$ et $[AB]$.

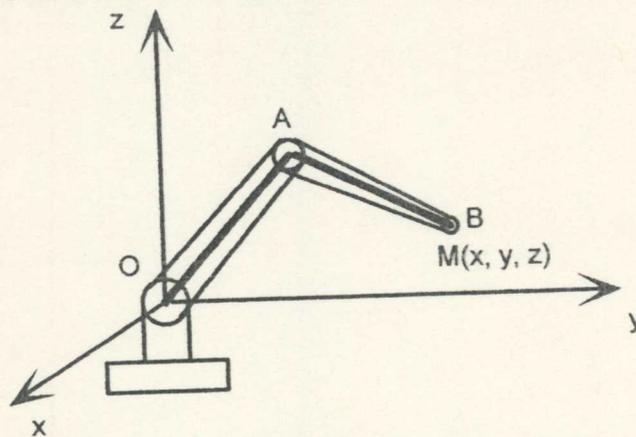


Fig.II.1: Repérage du bras en vue de la détermination de la matrice de passage

La variable généralisée θ_1 sélectionne le plan verticale (P) incluant le point M (fig.II.2).

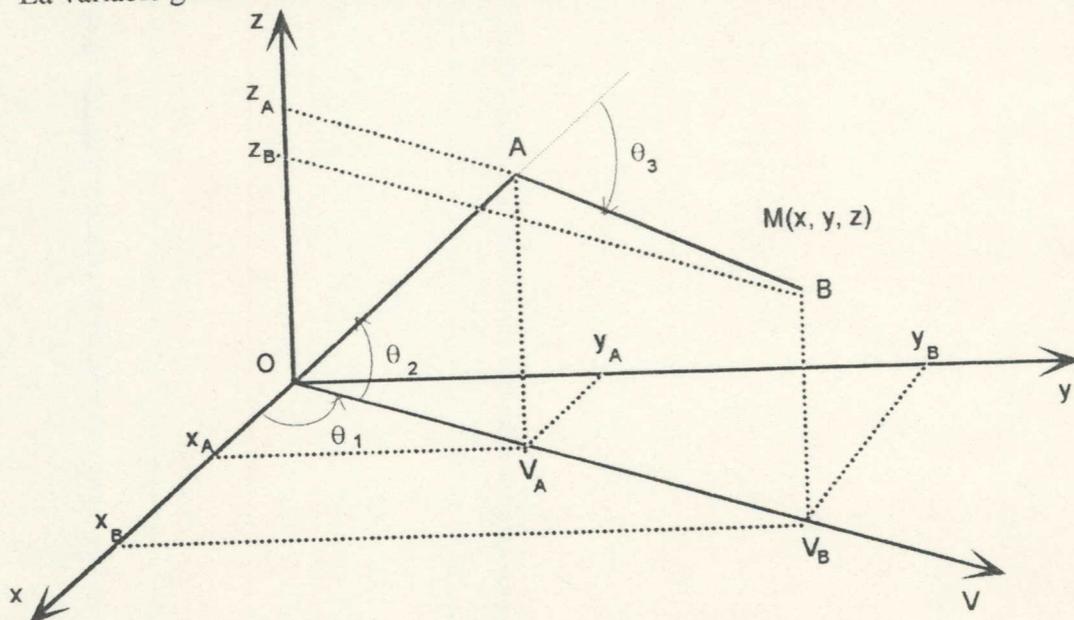


Fig.II.2: Le bras en fil de fer

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{4L^2 - V_B^2 - Z_B^2} \quad (7)$$

De (5), (6) et (7):

$$\phi_1 = \text{Arctg} \sqrt{\frac{4L^2}{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} - 1} \quad (8)$$

De (3), (4) et (8):

$$\theta_2 = \text{Arctg}\left(\frac{z_B}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}\right) + \text{Arctg}\left(\sqrt{\frac{4L^2}{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} - 1}\right) \quad (9)$$

Du triangle rectangle ADB, on calcul l'angle d'orientation du segment avant-bras θ_3 :

$$\text{tg}(\phi_3) = \frac{(z_A - z_B)}{(V_B - V_A)} \quad (10)$$

$$\text{Or on a: } \theta_3 = \theta_2 + \phi_3 \quad (11)$$

De (10) et (11), on obtient:

$$\theta_3 = \theta_2 - \text{Arctg}\left(\frac{z_B - L \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2 - L \cos(\theta_2)}}\right) \quad (12)$$

avec: $V_A = L \cos(\theta_2)$ et $z_A = L \sin(\theta_2)$.

En fin, on peut déterminer le vecteur des variables généralisées θ , pour atteindre le point B de coordonnées (x_B, z_B, z_B) comme suit:

$$\begin{cases} \theta_1 = \text{Arctg}\left(\frac{y_B}{x_B}\right) \\ \theta_2 = \text{Arctg}\left(\frac{z_B}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}\right) + \text{Arctg}\left(\sqrt{\frac{4L^2}{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2} - 1}\right) \\ \theta_3 = \theta_2 - \text{Arctg}\left(\frac{z_B - L \sin(\theta_2)}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2 - L \cos(\theta_2)}}\right) \end{cases}$$

II.2 Etude dynamique du bras manipulateur de classe 1:

II.2.1 Calcul des énergies potentielles U_i du SMA:

II.2.1.1 Calcul de l'énergie potentielle du corps 1 U_1 :

$$U = \vec{P} \cdot \vec{h} \quad \text{avec:} \quad \begin{array}{l} P: \text{ Poids du corps.} \\ h: \text{ Hauteur du corps par rapport à la référence } U=0. \end{array}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= P_1 \cdot h_1 \\ &= m_1 \cdot g \cdot h_1 \\ \text{On a } h_1 &= l_1 \cos(x_{11}) \\ \Rightarrow U_1 &= m_1 \cdot g \cdot l_1 \cos(x_{11}) \end{aligned}$$

II.2.1.2 Calcul de l'énergie potentielle du corps 2 U_2 :

$$\begin{aligned} U_2 &= P_2 \cdot h_2 = m_2 \cdot g \cdot h_2 \\ \text{On a: } h_2 &= H - a \quad \text{avec: } a = l_2 \cos \theta \quad \text{et } \theta = \pi - (x_{11} + x_{21}) \\ \Rightarrow a &= -l_2 \cos(x_{11} + x_{21}) \end{aligned}$$

Or:

$$\begin{aligned} H &= L_1 \cos(x_{11}) \Rightarrow h_2 = L_1 \cos(x_{11}) + l_2 \cos(x_{11} + x_{21}) \\ \Rightarrow U_2 &= m_2 \cdot g \cdot [L_1 \cos(x_{11}) + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})] \end{aligned}$$

II.2.1.3 Calcul de l'énergie potentielle du corps 3 U_3 :

$$\begin{aligned} U_3 &= P_3 \cdot h_3 = m_3 \cdot g \cdot (-l_3) \\ \Rightarrow U_3 &= -m_3 \cdot g \cdot l_3 \end{aligned}$$

Donc les différentes énergies potentielles des segments constituant le bras sont:

$$\begin{cases} U_1 = m_1 \cdot g \cdot l_1 \cos(x_{11}) \\ U_2 = m_2 \cdot g \cdot [L_1 \cos(x_{11}) + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})] \\ U_3 = -m_3 \cdot g \cdot l_3 \end{cases}$$

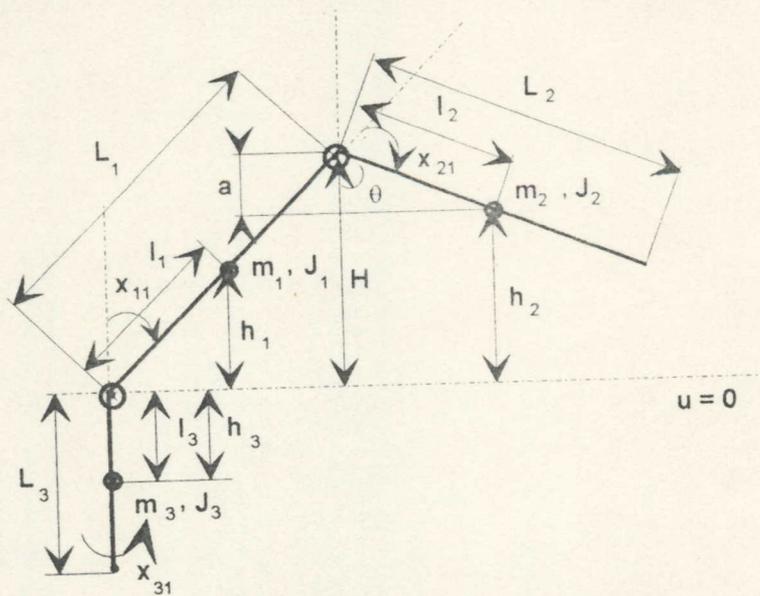


Fig.II.1: Bras manipulateur en fil de fer pour la détermination des différentes énergies potentielles

II.2.2 Calcul des énergies cinétiques des segments:

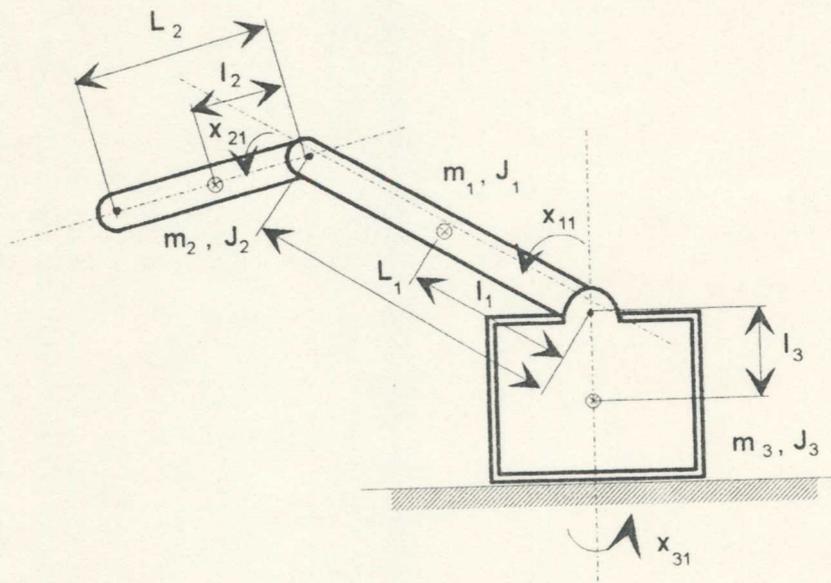


Fig.II.2: Dimensions du bras pour la définition des différentes énergies cinétiques

II.2.2.1 Calcul de l'énergie cinétique du corps 3 T_3 :

Le corps 3 tourne avec une vitesse angulaire $\dot{x}_{31} = \dot{x}_{32}$ autour de l'axe OY, or le centre de gravité du corps 3 appartient à l'axe OY, donc:

$$T_3 = \frac{1}{2} J_3 \cdot \dot{x}_{32}^2$$

II.2.2.2 Calcul de l'énergie cinétique du corps 1 T_1 :

Le corps 1 est animé d'un mouvement composé de deux vitesses angulaires

$$\dot{x}_{11} = \dot{x}_{12} \text{ et } \dot{x}_{31} = \dot{x}_{32}$$

$$\text{Donc : } T_1 = T_1(x_{12}) + T_1(x_{32})$$

Calcul de $T_1(x_{12})$:

La masse m_1 tourne autour de la droite Δ_1 avec une vitesse angulaire \dot{x}_{12} à une distance l_1 de Δ_1 , en appliquant le théorème de Huyghens:

$$T_1(x_{12}) = \frac{1}{2} (J_1 + m_1 \cdot l_1^2) \cdot \dot{x}_{12}^2 = \frac{1}{2} J_{x_1} \dot{x}_{12}^2 \text{ avec : } J_{x_1} = J_1 + m_1 \cdot l_1^2$$

Calcul de $T_1(x_{32})$:

$$\text{On a : } T_1(x_{32}) = \frac{1}{2} J_y \cdot \dot{x}_{32}^2$$

Le repère (xoy) est tourné d'un angle x_{11} par rapport au repère (Δx o Δy) dans le sens anti horaire, donc, on a:

$$J_y = J_{\Delta x} \cdot \sin^2 x_{11} + J_{\Delta y} \cdot \cos^2 x_{11} + 2 \cdot J_{\Delta x \Delta y} \cdot \sin x_{11} \cdot \cos x_{11}$$

$J_{\Delta x \Delta y}$: étant le moment centrifuge, or puisque le C.G de m_1 appartient à Δ_y qui est un des deux axes, donc, $J_{\Delta x \Delta y} = 0$.

On a:

$$J_{\Delta x} = J_1 + m_1 \cdot l_1^2, \quad J_{\Delta y} = J_{1p} \quad \text{c'est le moment d'inertie polaire, donc:}$$

$$T_1(x_{32}) = \frac{1}{2} [(J_1 + m_1 \cdot l_1^2) \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cdot \cos^2 x_{11}] \cdot \dot{x}_{32}^2$$

Donc:

$$T_1 = \frac{1}{2} J_{x_1} \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2} [(J_1 + m_1 \cdot l_1^2) \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cdot \cos^2 x_{11}] \cdot \dot{x}_{32}^2$$

II.2.2.3 Calcul de l'énergie cinétique du corps 2 T_2 :

La masse m_2 tourne autour de oy avec une vitesse angulaire \dot{x}_{32} , et autour de oz avec une vitesse angulaire composée. Donc, on a:

$$T_2 = T_2(x_{32}) + T_2(\omega)$$

Calcul de $T_2(x_{32})$:

On a:

$$T_2(x_{32}) = \frac{1}{2} J_y \cdot x_{32}^2$$

$$\text{Or: } J_y = J_2 + m_2 \cdot H_2^2$$

$$H_2 = x_A + (x_B - x_A) \quad \text{or: } x_A = L_1 \cdot \sin x_{11}$$

$$\begin{aligned} \text{et: } x_B - x_A &= l_2 \cdot \sin(\pi - (x_{11} + x_{21})) \\ &= l_2 \cdot \sin(x_{11} + x_{21}) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow H_2 = L_1 \cdot \sin x_{11} + l_2 \cdot \sin(x_{11} + x_{21})$$

$$\Rightarrow H_2^2 = L_1^2 \cdot \sin^2 x_{11} + l_2^2 \cdot \sin^2(x_{11} + x_{21}) + 2 \cdot L_1 \cdot l_2 \cdot \sin x_{11} \cdot \sin(x_{11} + x_{21})$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow J_y &= J_2 + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + m_2 l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21}) + \\ &+ 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= J_2 \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_2 \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \\ &+ m_2 l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow J_y &= J'_{x_2} + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \\ &+ 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \end{aligned}$$

$$\text{Avec: } J'_{x_2} = J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21})$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow T_2(x_{32}) &= \frac{1}{2} \left[J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \right. \\ &\left. + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \right] x_{32}^2 \end{aligned}$$

Calcul de $T_2(\omega)$

La masse m_2 est mobile autour de l'axe (oz) avec une vitesse angulaire ω composée de plusieurs vitesses angulaires qu'on déterminera ultérieurement.

Le point B (centre de gravité du segment de masse m_2) possède un rayon de

courbure r , on calcul son module $|r|$.

$$|r|^2 = x_B^2 + y_B^2 \quad \text{or} \quad y_B = y_A - (y_A - y_B)$$

$$y_A - y_B = l_2 \cos[\pi - (x_{11} + x_{21})] = -l_2 \cos(x_{11} + x_{21})$$

$$y_A = L_1 \cos x_{11}$$

$$\Rightarrow y_B = L_1 \cos x_{11} + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})$$

On a : $x_B = x_A + (x_B - x_A)$ avec : $x_A = L_1 \sin x_{11}$

et $x_B - x_A = l_2 \sin[\pi - (x_{11} + x_{21})] = l_2 \sin(x_{11} + x_{21})$

$$\Rightarrow x_B = L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21})$$

$$\Rightarrow |r|^2 = [L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21})]^2 + [L_1 \cos x_{11} + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})]^2$$

$$= L_1^2 \sin^2 x_{11} + l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21}) + 2L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) + L_1^2 \cos^2 x_{11} + l_2^2 \cos^2(x_{11} + x_{21}) + 2L_1 l_2 \cos x_{11} \cos(x_{11} + x_{21})$$

$$= L_1^2 + l_2^2 + 2L_1 l_2 [\cos x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}) + \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})]$$

$$\Rightarrow |r|^2 = L_1^2 + l_2^2 + 2L_1 l_2 \cos x_{21}$$

Avec : $r : \begin{cases} x_r = L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \\ y_r = L_1 \cos x_{11} + l_2 \cos(x_{11} + x_{21}) \end{cases}$

Calcul de la vitesse linéaire du C.G de m_2 (point B):

$$\dot{r} = \frac{dr}{dt}, \quad \text{tel que :} \quad \begin{cases} \dot{x}_r = \frac{dx_r}{dt} \\ \dot{y}_r = \frac{dy_r}{dt} \end{cases}$$

Et on a:

$$\dot{y}_r = -L_1 \sin x_{11} \cdot x_{12} - l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cdot x_{12} - l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cdot x_{22}$$

$$\dot{x}_r = -[L_1 \sin x_{11} \cdot x_{12} - l_2 \sin(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12} - l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cdot x_{22}$$

Calcul du carré du module de la vitesse linéaire:

$$|\dot{r}|^2 = \dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_r^2 = & [L_1 \cos x_{11} + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})]^2 \cdot x_{12}^2 + [l_2 \cos(x_{11} + x_{21})]^2 \cdot x_{22}^2 + \\ & + 2[L_1 l_2 \cos x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}) + l_2^2 \cos^2(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12} \cdot x_{22} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_r^2 = & [L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21})]^2 \cdot x_{12}^2 + [l_2 \sin(x_{11} + x_{21})]^2 \cdot x_{22}^2 + \\ & + 2[L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) + l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12} \cdot x_{22} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\dot{r}|^2 = & [L_1^2 \cos^2 x_{11} + l_2^2 \cos^2(x_{11} + x_{21}) + 2L_1 l_2 \cos x_{11} \cos(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12}^2 \\ & + l_2^2 \cos^2(x_{11} + x_{21}) \cdot x_{22}^2 + \\ & + 2[L_1 l_2 \cos x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}) + l_2^2 \cos^2(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12} \cdot x_{22} + \\ & + [L_1^2 \sin^2 x_{11} + l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21}) + 2L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12}^2 + \\ & + [l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{22}^2 + \\ & + 2[L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) + l_2^2 \sin^2(x_{11} + x_{21})] \cdot x_{12} \cdot x_{22} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow |\dot{r}|^2 = [L_1^2 + l_2^2 + 2L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12}^2 + l_2^2 x_{22}^2 + 2[l_2^2 + L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12} x_{22}$$

On remarque que la vitesse linéaire du C.G de m_2 est composé de trois vitesses angulaires. On a:

$$\begin{aligned} |\mathbf{r}|^2 \cdot m_2 \cdot |\omega|^2 &= |\mathbf{r}|^2 \cdot m_2 \frac{|\dot{r}|^2}{|\mathbf{r}|^2} = m_2 |\dot{r}|^2 \\ &= (m_2 L_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12}^2 + m_2 l_2^2 x_{22}^2 + 2(m_2 l_2^2 + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12} x_{22} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow 2T_2(\omega) &= (J_2 + m_2 l_2^2 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12}^2 + (J_2 + m_2 l_2^2) x_{22}^2 + \\ &+ 2(J_2 m_2 l_2^2 + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12} x_{22} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow T_2(\omega) = \frac{1}{2} (J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12}^2 + \frac{1}{2} J_{x_2} x_{22}^2 + \\ + (J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12} x_{22}$$

Donc:

$$T_2 = \frac{1}{2} [J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12}^2 + \frac{1}{2} J_{x_2} x_{22}^2 + \\ + \frac{1}{2} [J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \\ + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})] x_{32}^2 + [J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12} x_{22}$$

On peut résumer les différentes énergies cinétiques des différents segments constituant le bras manipulateur.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{1}{2} J_{x_1} \cdot x_{12}^2 + \frac{1}{2} [(J_1 + m_1 \cdot l_1^2) \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cdot \cos^2 x_{11}] \cdot x_{32}^2 \\ T_2 = \frac{1}{2} [J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12}^2 + \frac{1}{2} J_{x_2} x_{22}^2 + \\ + \frac{1}{2} [J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \\ + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})] x_{32}^2 + [J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot x_{12} x_{22} \\ T_3 = \frac{1}{2} J_3 \cdot x_{32}^2 \end{array} \right.$$

II.2.3 Application de l'équation de Lagrange de seconde espèce

Afin d'établir les équations dynamiques qui régissent le mouvement du bras manipulateur, on utilise le Lagrangien, on a:

$$L = \sum_{i=1}^3 (T_i - U_i)$$

T_i : étant les énergies cinétiques des segments.

U_i : les énergies potentielles.

Détermination de L:

$$\begin{aligned}
 L = & \left\{ \frac{1}{2} J_{x_1} \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2} [(J_1 + m_1 \cdot l_1^2) \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cdot \cos^2 x_{11}] \cdot \dot{x}_{32}^2 - m_1 \cdot g \cdot l_1 \cos(x_{11}) \right\} + \\
 & + \left\{ \frac{1}{2} [J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot \dot{x}_{12}^2 + \frac{1}{2} J_{x_2} \dot{x}_{22}^2 + \right. \\
 & + \frac{1}{2} [J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + \\
 & + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})] \dot{x}_{32}^2 + \\
 & \left. + [J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot \dot{x}_{12} \dot{x}_{22} - m_2 \cdot g \cdot [L_1 \cos(x_{11}) + l_2 \cos(x_{11} + x_{21})] \right\} + \\
 & + \left\{ \frac{1}{2} J_3 \cdot \dot{x}_{32}^2 + m_3 \cdot g \cdot l_3 \right\}
 \end{aligned}$$

On pose: $L = L_1 + L_2 + L_3$ avec:

$$L_1 = T_1 - U_1, L_2 = T_2 - U_2, L_3 = T_3 - U_3$$

x_{ii} : étant les coordonnées généralisées, l'équation de Lagrange de seconde espèce est:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_{i2}} \right] - \frac{\partial L}{\partial x_{i1}} = q_i \quad \text{avec: } \dot{x}_{i2} = \dot{x}_{i1}, q_i = K_i \cdot U_i - C_i \cdot \dot{x}_{i2}$$

avec: q_i : c'est la force généralisée en x_{i1} .

C_i : coefficient de frottement visqueux en x_{i1} .

U_i : signal de commande en x_{i1} .

II.2.3.1 Application de l'équation de Lagrange pour la première articulation x_{11} :

On a:

$$\frac{\partial L_1}{\partial x_{12}} = J_{x_1} \cdot x_{12} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_1}{\partial x_{12}} \right] = J_{x_1} \cdot \ddot{x}_1$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial x_{12}} = (J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12} + (J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{22}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_2}{\partial x_{12}} \right) &= (J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot \ddot{x}_1 - (2m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_2 \cdot \dot{x}_1 + \\ &+ (J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot \ddot{x}_2 - (m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_2^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L_3}{\partial x_{12}} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_3}{\partial x_{12}} \right) = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial x_{12}} \right) &= J_{x_1} \cdot \ddot{x}_1 + (J_{x_2} + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot \ddot{x}_1 - (2m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_2 \cdot \dot{x}_1 + \\ &+ (J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot \ddot{x}_2 - (m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_2^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial x_{11}} = \frac{1}{2} (2J_{x_1} \sin x_{11} \cos x_{11} - J_{1p} \cdot 2 \sin x_{11} \cos x_{11}) \cdot \dot{x}_3^2 + m_1 g l_1 \sin x_{11}$$

$$\Rightarrow - \frac{\partial L_1}{\partial x_{11}} = ((J_{1p} - J_{x_1}) \sin x_{11} \cos x_{11}) \cdot \dot{x}_3^2 - m_1 g l_1 \sin x_{11}$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial x_{11}} = \frac{1}{2} (J_{x_2} \cdot 2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - 2J_{2p} \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21})) +$$

$$+ 2m_2 L_1^2 \sin x_{11} \cos x_{11} + 2m_2 L_1 l_2 (\cos x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})) +$$

$$+ \sin x_{11} \cos(x_{11} + x_{21})) \cdot \dot{x}_3^2 + m_2 g (L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21}))$$

$$\Rightarrow \frac{\partial L_2}{\partial x_{11}} = ((J_{2p} - J_{x_2}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1^2 \sin x_{11} \cos x_{11} - m_2 L_1 l_2 (\cos x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) + \sin x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}))) \cdot \dot{x}_3^2 - m_2 g (L_1 \sin x_{11} + l_2 \sin(x_{11} + x_{21}))$$

$$\frac{\partial L_3}{\partial x_{11}} = 0$$

On remplace dans l'équation suivante:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_{11}} + C_1 \dot{x}_1 = K_1 U_1$$

on obtient l'expression de l'équation dynamique de la première articulation:

$$\left[J_{x_1} + m_2 L_1^2 + J_{x_2} + 2m_2 L_1 l_2 \cos x_{21} \right] \cdot \ddot{x}_1 + \left[J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21} \right] \cdot \ddot{x}_2 + [C_1] \cdot \dot{x}_1 + \left[-m_2 L_1 l_2 \sin x_{21} \right] \cdot \dot{x}_2^2 + \left[-(J_{x_1} + m_2 L_1^2 - J_{1p}) \sin x_{11} \cos x_{11} - (J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}) \right] \cdot \dot{x}_3^2 + \left[-2m_2 L_1 l_2 \sin x_{21} \right] \cdot \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \left[-(m_1 l_1 + m_2 L_1) \sin x_{11} - m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \right] g = K_1 \cdot U_1$$

II.2.3.2 Application de l'équation de Lagrange pour la deuxième articulation x_{21} :

On a:

$$\frac{\partial L_1}{\partial x_{22}} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_1}{\partial x_{22}} \right] = 0$$

$$\text{et } \frac{\partial L_2}{\partial x_{22}} = J_{x_2} \cdot x_{22} + (J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot x_{12}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_2}{\partial x_{22}} \right] = J_{x_2} \cdot \ddot{x}_2 + (J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}) \cdot \ddot{x}_{11} - (m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_1 \cdot \dot{x}_2$$

et:

$$\frac{\partial L_3}{\partial x_{22}} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_3}{\partial \dot{x}_{22}} \right] = 0$$

et $\frac{\partial L_1}{\partial x_{21}} = 0$

et $-\frac{\partial L_2}{\partial x_{21}} = -(m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \ddot{x}_1^2 + ((J_{2p} - J_{x_2}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \cos(x_{11} + x_{21})) \ddot{x}_3^2 + (m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}) \cdot \dot{x}_1 \cdot \ddot{x}_2 - (m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21})) \cdot g$

et $\frac{\partial L_3}{\partial x_{21}} = 0$

On remplace dans l'équation suivante:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_{22}} + C_2 \dot{x}_2 = K_2 U_2$$

On obtient l'expression de l'équation dynamique de la deuxième articulation:

$$\boxed{\begin{aligned} & [J_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos x_{21}] \cdot \ddot{x}_1 + [J_{x_2}] \cdot \ddot{x}_2 + [C_2] \cdot \dot{x}_2 + [m_2 L_1 l_2 \sin x_{21}] \cdot \dot{x}_1^2 + \\ & - (J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}) \cdot \dot{x}_3^2 + \\ & + [-m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21})] g = K_2 \cdot U_2 \end{aligned}}$$

II.2.3.3 Application de l'équation de Lagrange pour la troisième articulation x_{31} :

On a:

$$\frac{\partial L_1}{\partial x_{32}} = (J_{x_1} \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cos^2 x_{11}) x_{32}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_1}{\partial \dot{x}_{32}} \right) = (2J_{x_1} \sin x_{11} \cos x_{11} \dot{x}_1 - 2J_{1p} \cos x_{11} \sin x_{11} \dot{x}_1) \dot{x}_3 + (J_{x_1} \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cos^2 x_{11}) \ddot{x}_3$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_1}{\partial \dot{x}_{32}} \right) = (2(J_{x_1} - J_{1p}) \sin x_{11} \cos x_{11}) \dot{x}_1 \dot{x}_3 + (J_{x_1} \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cos^2 x_{11}) \ddot{x}_3$$

On a:

$$\frac{\partial L_2}{\partial x_{32}} = (J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21})) x_{32}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_2}{\partial x_{32}} \right) &= \left[J_{x_2} 2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_1 + J_{x_2} 2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_2 - \right. \\ &- J_{2p} 2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_1 - J_{2p} 2 \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_2 + \\ &+ m_2 L_1^2 2 \sin x_{11} \cos x_{11} \dot{x}_1 + 2m_2 L_1 l_2 (\sin(x_{11} + x_{21}) \cos x_{11} \dot{x}_1 + \\ &+ \sin x_{11} (\cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_1 + \cos(x_{11} + x_{21}) \dot{x}_2)) \dot{x}_3 + \left. \left[J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + \right. \right. \\ &\left. \left. + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \right] \ddot{x}_3 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_2}{\partial x_{32}} \right) &= \left[J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + m_2 L_1^2 \sin^2 x_{11} + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11} + x_{21}) \sin x_{11} \right] \ddot{x}_3 + \\ &+ \left[2(J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1^2 \sin x_{11} \cos x_{11} + 2m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}) \right] \dot{x}_1 \dot{x}_3 + \\ &+ \left[2(J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \cos(x_{11} + x_{21}) \sin x_{11} \right] \dot{x}_2 \dot{x}_3 \end{aligned}$$

On a:

$$\frac{\partial L_3}{\partial x_{32}} = J_3 x_{32} \Rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_3}{\partial x_{32}} \right) J_3 \ddot{x}_3$$

$$\text{et: } \frac{\partial L_1}{\partial x_{31}} = 0, \quad \frac{\partial L_2}{\partial x_{31}} = 0, \quad \frac{\partial L_3}{\partial x_{31}} = 0$$

On remplace dans l'équation:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial x_{32}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_{31}} + C_3 \cdot \dot{x}_3 = K_3 \cdot U_3$$

On obtient l'équation dynamique de la troisième articulation:

$$\begin{aligned} & \left[(J_{x_1} + m_2 L_1^2) \sin^2 x_{11} + J_{1p} \cos^2 x_{11} + J_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21}) + J_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + J_3 + \right. \\ & \left. + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \sin(x_{11} + x_{21}) \right] \cdot \ddot{x}_3 + [C_3] \cdot \dot{x}_3 + \left[2(J_{x_1} + m_2 L_1^2 - J_{1p}) \sin x_{21} \cos x_{11} + \right. \\ & \left. + (J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}) \right] \cdot \dot{x}_1 \dot{x}_3 + \\ & \left[2(J_{x_2} - J_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin x_{11} \cos(x_{11} + x_{21}) \right] \dot{x}_2 \dot{x}_3 = K_3 \cdot U_3 \end{aligned}$$

II.2.3 Passage à la forme matricielle:

On pose les équations dynamiques obtenues sous la forme matricielle:

$$M \cdot \ddot{x}_L + C \cdot \dot{x}_L + D \cdot x_L^2 + E \cdot \dot{x} \dot{x}_L + F \cdot g = K_L \cdot u$$

où M, C, D, E, F, K_L sont des matrices à temps variable (Time-Varying Matrices) à dimension appropriée.

On pose: $J^* = J_{x_1} + m_2 \cdot L_1^2$, on obtient:

1. Etablissement de la matrice M (3*3)

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = j_{1^*} + j_{x_2} + 2m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{12} = j_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{21} = j_{x_2} + m_2 L_1 l_2 \cos(x_{21}),$$

$$M_{22} = j_{x_2},$$

$$M_{33} = j_1 \cdot \sin^2(x_{11}) + j_{1p} \cos^2(x_{11}) + j_{x_2} \sin^2(x_{11} + x_{21})$$

$$+ j_{2p} \cos^2(x_{11} + x_{21}) + j_3 + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \sin(x_{11} + x_{21}).$$

2. Etablissement de la matrice C (3*3) :

$$C = \text{Diag}[c_1 \ c_2 \ c_3]$$

3. Etablissement de la matrice D (3*3) :

$$D = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & 0 & D_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12} = -m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$D_{13} = -(j_{1p} - j_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) - (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}),$$

$$D_{21} = m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$D_{23} = -(j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) - m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21}).$$

4. Etablissement de la matrice E (3*3) :

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}$$

$$E_{11} = -2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{21}),$$

$$E_{32} = -(j_{1p} - j_{1p}) \sin(x_{11}) \cos(x_{11}) + (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(2x_{11} + x_{21}),$$

$$E_{33} = (j_{x2} - j_{2p}) \sin(x_{11} + x_{21}) \cos(x_{11} + x_{21}) + 2m_2 L_1 l_2 \sin(x_{11}) \cos(x_{11} + x_{21}).$$

5. Etablissement de la matrice F (3 * 1) :

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_1 = -(m_1 l_1 + m_2 L_1) \sin(x_{11}) - m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21}),$$

$$F_2 = -m_2 l_2 \sin(x_{11} + x_{21}).$$

6. Etablissement de la matrice K_L (3 * 3) :

$$K_L = \text{Diag}[K_1 \ K_2 \ K_3]$$

$$\ddot{X}_L = [\ddot{X}_1 \ \ddot{X}_2 \ \ddot{X}_3]^T, \dot{X}_L = [\dot{X}_1 \ \dot{X}_2 \ \dot{X}_3]^T$$

$$\dot{X}_L^2 = [\dot{X}_1^2 \ \dot{X}_2^2 \ \dot{X}_3^2]^T, \dot{X}\dot{X}_L = [\dot{X}_1\dot{X}_2 \ \dot{X}_1\dot{X}_3 \ \dot{X}_2\dot{X}_3]^T$$

ANNEXE III
LES LANGAGES ROBOTIQUES

Les langages robotiques

Quelques images entièrement nouveaux développés pour le contrôle du robot sont [14], [16], [8]:

- Le langage **MHI [18]**: développé par H.A. ERNEST en 1960-1961, c'est le premier langage robotique capable de décrire des opérations avec des commandes programmables.

- Le langage **AL [20]**: développé à STANFORD UNIVERSITY en 1974, il a été amélioré. C'est un système de programmation de haut niveau pour la spécification des tâches de manipulation comme l'assemblage d'un objet à partir des parties.

- Le langage **AML**: (1977 - présent), conçu par IBM Software Engineers, spécialement pour le contrôle des processus de fabrication, incluant les robots.

Quelques langages produits par modification et extension de langages déjà existants sont:

- **WAVE [19]**: (1970-1975) développé à l'université de Stanford, possédant plusieurs caractéristiques, les plus importantes sont:

1- Spécification de la capacité de soumission aux contraintes dans les coordonnées cartésiennes.

2- Coordination des mouvements des articulations pour la fourniture de la continuité des vitesses et des accélération à travers la trajectoire.

3- Description des positions de l'effecteur dans les coordonnées cartésiennes.

4- Capacité de surveillance du mouvement, des informations sensorielles sont utilisées pour arrêter le mouvement quand l'effecteur touche quelque chose.

- **VAL** (1975 - présent): Développé par Victor Sheinman pour Unimation Corporation par extension du langage Basic. Il utilise des mots simples pour décrire les opérations à faire par le robot.

- **PAL**: Développé par Richard Paul à Stanford par l'extension du langage Pascal.

- **HELP**: Dveloppé par General Electric Company pour ses robots, basé sur le Pascal.

- **JARS**: Développé par Robotics & Teleoperators Group of NASA's Jet Propulsion Laboratory en 1979. Son langage de base est le Pascal. Il a fournit une capacité de

programmation de haut niveau pour appuyer les recherches sur le contrôle et la manipulation des robots.

- **RPL**: Conçu par SRI International, son langage de base est le Fortran.

- **MCL** (1978 - présent): Développé par Mc Donnell Douglas.

Un exemple de programmation utilisé dont la définition d'une tâche pour le robot PUMA fabriqué par Unimation, cet exemple dans le langage VAL est comme suit:

OPEN 100;	: ouvre la main 100 mm
APPRO PICK, 50;	: approcher du bloc appelé PICK
SPEED 30;	: ralentir pour le prochain mouvement
MOVES PICK;	: va directement au bloc
GRASP 20;	: ferme la main à 20 mm
MOVE HOLD;	: tenir le bloc jusqu'à la position HOLD
SIGNAL 5;	: informer BARM qu'on est prêt
WAIT 6;	: attendre, informer BARM de le prendre
OPEN 100;	: libérer le bloc
DEPART 100;	: retir toi hors du chemin
SIGNAL -5;	: informer BARM qu'on est retiré
MOVE PARK;	: tout est fait, va à la position de stationnement.

BARM signifie Bleu ARM (Bras bleu).

VAL fournit pour le contrôle des vitesses, saisissement, mouvement du bras et la signalisation des instructions dans une structure très simple. Ces instructions sont implantées par des SUBROUTINES en Basic.

Le besoin de la signalisation aux autres robots et machines est effectué efficacement par les commandes WAIT et SIGNAL qui prennent lieu dans des évènements bien spécifiques.

Le système PUMA 6 micro-calculateurs Motorola 6502, pour contrôler les six différents mouvements du bras, plus une micro-calculateur DEC LSI-11 16 bits, pour contrôler tout le système. Un fichier disque, un clavier et une boîte d'apprentissage qui fournissent des capacités de stockage, d'entrée et d'apprentissage pour le robot PUMA. La boîte d'apprentissage possède des boutons poussoirs ou des claviers de commande qui contrôlent le bras dans ses mouvements à travers des séquences de pas. Après le choix des séquences de pas satisfaisant, l'opérateur peut mémoriser la représentation digitale des séquences de pas dans la mémoire du micro-calculateur et dans le fichier disque. C'est une méthode puissante de programmation.

BIBLIOGRAPHIE

Liste des références

- [1] P.LOPEZ, "Commande Des Systemes Robotiques."
Editests, 1986.
- [2] M.GORDON, "L'informatique et La robotique."
Edition CASTEILLA - Collection A.Capliez, 1989.
- [3] L.A.Dessaint et AL, "A DSB-Based Adaptative Controler For Smooth Positioning System."
IEEE Transactions On Industrual Electronics.
Vol.37, N°5, October 1990.
- [4] H.ZANG, G.TROTT and R.P.PAUL, "Minimum Delay PID Control of Interpolated Joint Trajectories of Robot Manipulators."
IEEE Transactions on Industrual Electronics.
Vol.37, N°5, October 1990.
- [5] K.J.ASTROM and B.WITTENMARK, "Adaptative Control."
Addision Wesley Publishing Company, 1989.
- [6] A.A.KOBRINSKI et A.E.KOBRINSKI, "Bras Manipulateurs des Robots.",
1985.
- [7] M.BRADY and AL, Robot Motion:Planning and Control.
M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1983.
- [8] T. L. PEREZ, "Task Planning." in [7]. pp.473-498.
- [9] L.I.Lieberman and M. A. Wesley, "AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mecanical Assembly." IBM Journal of Research and Developement, July 1977, pp. 321-333.
- [10] M. Mason, "Compilience." in [8], pp. 305-322.
- [11] E. A. Torerro, "Tomorrow's Computers,"
IEEE Spectrum, November 1983.

- [12] G. MacCalla and N. Cercone, "Approaches to Knowledge Representation," *IEEE Computer*, Vol. 16 No. 10, October 1983.
- [13] P. H. Winston, *Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1977.
- [14] S. Bonner and K. G. Shin, "A Comparative Study of Robot Languages," *IEEE Computer*, Vol. 15, No: 12, December 1982, pp. 82-96.
- [15] Conference Proceedings, 13th International Symposium on Industrial Robots and Robot 7, April 17-21, 1983, Chicago, III. Robotics International of SME, Dearborn, Mich. 1983.
- [16] W. A. Cruver, B. L. Soroka, J. J. Craig, and T. L. Turner, "Evaluation of Commercially Available Robot Programming Languages." in [15], 1983, pp. 12-58 to 12-68.
- [17] T. L. Perez, "Robot programming." *Proceeding of the IEEE*, Vol. 71, No.7, July 1983.
- [18] H. A. Ernest, "MH-1, A computer Operated Mecanical hand." Doctoral thesis submitted, December, 1961. Mussachusetts Institute of Technology.
- [19] R. P. C. Paul, "WAVE: A Model-Based Language for Manipulater Control." *Industrial Robot*, Vol. 4, 1977, pp. 10-17.
- [20] R. Finkel, R. Taylor, R. Bolles, R. Paul and J. Feldman, "An Overview of AL, A Programming System for Automation," fourth IJCAI (International Joint Conference on Artificial Intelligence), September3-8, 1975, pp. 758-765.
- [21] T. L. Perez and M. A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles," *Communication of ACM*, Vol. 22, October 1979, pp. 560-570.
- [22] M. Brady, J. M. Holerbach, T. L. Johnson, T. L Perez, M. T. Mason, eds.:*Robot Motion:Planning and Control*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1982.

- [23] T. L. Perez, "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements," IEEE, Vol. SMC-11, No. 10, Oct. 1981, pp. 681-689. Reprinted in [22].
- [24] J. k. Mayers and G. J. Agin, "Designing a Collision Avoidance Systems for Robot Controllers." Robotics World, Vol. 1, No. 1, January 1983, pp. 36-39.
- [25] G. Coince, C. Palvin, A. Benzaken, A. Bucherles, J. P. Krief et A. Labarrere, "Problèmes liés à l'énergie: Etude exploratoire," Publication de l'I.R.I.A, Projet Spartacus, Aout 1976.
- [26] R. Bennoffille, J. Robert, "Principes généraux des convertisseurs directs d'énergie," Dunod Université, Paris 1971.
- [27] R. H. Taylor, "Planning and Execution of Straight Line Manipulator Trajectories," IBM J. Res. Development, Vol. 23, No. 4, pp. 424-426, 1979.
- [28] Breaking A Way From VAL or How to Use Your PUMA Whithout Using VAL," Unimation, Inc., Dambury, CT. 1982.
- [29] Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark "Adaptative Control." Lund Institute of technology.
- [30] A. ABI-AYAD, "Coordination des mouvements dans le formalisme homogène, pilotage par calculateur extérieur en position et en vitesse", D.E.A., GARI/I.N.S.A.T, Septembre 1985.
- [31] GHOSAL A., ROTH B., "Instantaneous properties of multi degries of freedom motions", Part I.II. A.S.M.E, Journal of mechanism, "Transmission and Automation in Design", 1987, V.109, n°1, pp.107-125.

- [32] H. ZHANG and R. P. PAUL, "Parallel solution to robot inverse kinematics", in proc. 1988 IEEE, Int.Conf. Robotics Automat. (Philadelphia), Apr. 1988, pp.1140-1145.
- [33] IEEE, "Generalized Manipulator Dynamics, With Regard to Model Reference Adaptative Control", Int. J. Control., 1989, Vol. 50, n°6, pp.2249-2268.