

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT Génie Électrique  
Option Automatique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

CONCEPTION ET COMMANDE  
D'UN BRAS DE ROBOT  
3 R

Proposé par :

**M. C. SOUAMI**

Etudié par :

**CHETOUANE Fatah**  
**MALOUM Abdelmalek**

Dirigé par

**M. C. SOUAMI**

PROMOTION

**Juillet 1994**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Génie Électrique  
Option Automatique

# CONCEPTION ET COMMANDE D'UN BRAS DE ROBOT 3 R

M. C. SOUAMI

CHETOUANE Fatah  
MALOUM Abdelmalek

M. C. SOUAMI

Juillet 1994

## DÉDICACES ....

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents , avec leurs  
patience et leurs encouragement continue .*

*à Salha, Lila et zineb ainsi qu'a tout mes frères et sœurs.  
à mes amis , particulièrement Merouani Tarek, hamid, didin,  
zoheir, badi, tarek, toudert ...*

*CHETOUANE fatah*

## DÉDICACES ....

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents , qui se sont  
privés de pas mal de choses pour voir leurs enfants réussir,  
avec leurs patience et leurs encouragement continue .*

*A la mémoire de mes grands parents,paternels,maternels.*

*A la mémoire de mon frère BOUALEM.*

*A tout mes frères et soeurs.*

*A mes ami(e)s avec qui j'ai passé mes meilleurs moments,  
particulièrement Ferhat ...*

*A CHETOUANE Fatah.*

*MALOUM Abdebnalek.*

Remerciements

Nous tenons à remercier M<sup>r</sup> M.C souami qui a accepté de diriger notre travail, et qui nous a été toujours, utile par ses conseils et son encouragement continu. durant notre travail. Aussi, nous remercions tout le personnel du centre culturel IBN KHALDOUN de Rouiba, qui a mis à notre disposition ses moyens matériels pour achever ce travail. Merci aussi, à toute personne qui a contribué de près ou de loin à créer le climat favorable sans le quel notre travail n'aurait pas vu le jour.

SOMMAIRE

<u>Chapitre 1.</u>	<u>Introduction à la robotique.</u>	Page
1-1	Historique.....	1
1-2	Définition et classification des robots.....	2
1-3	Composition et types de robots.....	3
1-4	Cahier des charges.....	6
1-5	Resumé.....	7
<u>Chapitre 2.</u>	<u>Etude structurelle et prototype</u> .....	8
2-1	Introduction.....	8
2-2	Description de la structure du bras.....	8
2-3	Bureau d'étude.....	9
2-3-1	Choix de la chaîne cinématique.....	9
2-3-2	Choix de l'élément moteur.....	11
2-4	Conclusion.....	14
<u>Chapitre 3.</u>	<u>Modélisation</u> .....	16
3-1	Introduction.....	16
3-1-1	Problème cinématique direct.....	16
3-1-2	Représentation D-H.....	18
3-2	Problème dynamique d'un robot.....	21
3-2-1	Energie cinétique.....	21
3-2-2	Energie potentielle.....	22
3-3	Equations mécaniques.....	23

Conception & commande d'un bras de robot 3-R

3-4	Modélisation de l'actionneur.....	24
3-5	Equations du mouvement.....	25
3-5-1	Introduction.....	25
3-5-2	Equations du mouvement en B-F	
3-5-3	Equations du mouvement en B-D	
<b>Chapitre 4.</b>	<b><u>Analyse et dimensionnement mécanique.....</u></b>	<b>30</b>
4-1	Introduction.....	30
4-2	description du processus de dimensionnement mécanique.	
4-3	Choix de la technique.....	31
4-4	Bilan des efforts.....	31
4-5	Calcul de la barre équivalente.....	32
4-6	Etude mécanique.....	35
4-6-1	Calcul à la résistance.....	35
4-6-2	Calcul de la rigidité.....	37
4-7	Application au bras de robot didactique.....	39
4-8	Exemple de résultats.....	40
4-9	Conclusion.....	41
<b>Chapitre 5.</b>	<b><u>Organe de commande.....</u></b>	<b>42</b>
5-1	Introduction.....	42
5-2-1	Capteur de position angulaires.....	42
5-2-2	Caractéristiques et choix du capteur.....	42
5-3	Choix des actionneurs.....	44
5-2-1	Introduction.....	48
5-2-2	Types d'interfaces.....	48
1-	Conversion numérique - analogique.....	48
2-	Conversion analogique - numérique.....	50
3-	Spécifications des interfaces analogiques.....	51
b-	Interface série.....	51
c-	Interface parallèle.....	52
5-2-3	Echantillonnage - blocage.....	52
5-2-4	Amplification de puissance.....	52
5-2-5	Acquisition des données.....	52
<b>Chapitre 6.</b>	<b><u>Commande du bras de robot.....</u></b>	<b>54</b>

Conception & commande d'un bras de robot 3-R

6-1	Planificateur de trajectoires.....	54
6-1-1	Introduction.....	54
6-1-2	Méthode 4-3-4.....	57
6-2	Commande proportionnelle - dérivé.....	60
6-2-1	Introduction.....	60
6-2-2	PD à haute fréquences.....	60
b-	Algorithme de réglage.....	63
c-	Cahier des charges.....	64
d-	Choix de la période d'échantillonnage.....	64
f-	Dimensionnement du régulateur.....	65
6-3	Commande adaptative avec modèle de référence.....	66
6-3-1	Introduction.....	66
6-3-2	Formulation du problème.....	66
6-3-3	Structure du système de commande.....	67
6-3-4	Analyse autour d'un point de fonctionnement...	68
6-3-5	Généralisation pour une trajectoire de fonct..	71
6-3-6	Application.....	73
6-4	comparaison et conclusion.....	74



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE 1

INTRODUCTION A LA ROBOTIQUE

1-1 HISTORIQUE :

Le développement des technologies nouvelles, particulièrement l'électronique et la mécanique de précision a donné naissance à une nouvelle discipline qui est la ROBOTIQUE. Cette discipline entreprend le mariage de sciences et de techniques différentes pour réaliser et contrôler des ensembles de production que sont les robots. Les robots sont destinés à remplacer l'homme dans une grande majorité de tâches, domestiques et industrielles, particulièrement dangereuses.

Le premier robot industriel a été commercialisé par la firme "UNIMATION", en 1961. Mais ce n'est qu'aux années 1975, et par la naissance de la production automatisée que les robots ont commencé à jouer un rôle déterminant en prenant la place de l'opérateur humain sur les chaînes de différentes productions.

Cette façon de produire a été reconnue par les entreprises industrielles, comme étant un moyen efficace d'accroître la productivité, et de diminuer les risques de nuisance. d'après un rapport publié par LE ROBOT INSTITUT OF AMERICA, en 1981, les chaînes de production à travers le monde comptaient 22000 robots dont :

- 63.6 % au JAPON.
- 21.0 % au U.S.A.
- 6.3 % en R.F.A.
- 3.2 % en GRANDE BRETAGNE.
- 3.1 % en SUEDE.
- 2.7 % en FRANCE.

Une autre statistique montre que ce nombre est passé à 460000 en 1989. Cet accroissement dans la population des robots, permet de prédire la croissance de leur nombre.

1-2 DÉFINITION ET CLASSIFICATION DES ROBOTS:

Il est difficile de donner une définition qui permet de caractériser d'une façon complète et exacte le robot, du reste des machines automatiques existantes.

Le ROBOT INSTITUT OF AMERICA définit un robot comme étant un manipulateur à fonctions multiples, pouvant être programmé pour réaliser automatiquement des tâches variées éventuellement répétitives. La JIRA (japon industrial robot industry association) a répertoriée six classes de robot [18]:

**R1- MANIPULATEUR MANUEL :**

Ce système est un robot qui est actionné par un opérateur humain.

**R2- ROBOT A SÉQUENCE DE TRAVAIL FIXE :**

Ce système réalise d'une façon répétitive une succession d'opération, suivant un ordre, difficile voir impossible à modifier.

**R3- ROBOT A SÉQUENCE DE TRAVAIL ÉVOLUTIVE :**

Il diffère du robot précédent par la facilité avec laquelle, la séquence des opérations est modifiable.

**R4- ROBOT COPIEUR :**

Ce type de robot est capable de reproduire d'une façon éventuellement répétitive des mouvements, qui ont été exécutés sous assistance humaine et enregistrés dans une mémoire.

**R5- ROBOT A COMMANDE NUMÉRIQUE :**

Ce robot exécute des opérations qui sont directement programmées, et présente la possibilité d'être contrôlé numériquement.

**R6- ROBOT INTELLIGENT :**

Ce type de robot est doté de moyens sensoriels de perception de l'environnement, comme la vision, la peau artificielle, il peut se gérer de façon autonome durant certaines opérations, et peut formuler une nouvelle stratégie d'évolution, pour tenir compte d'un changement dans son environnement. Cette catégorie, représente 5 % des robots actuelles et est en nette croissance.

### 1-3 COMPOSITION ET TYPES DE ROBOTS :

En général, les robots se composent de trois unités de base

- 1- unité de commande .
- 2- source d'énergie .
- 3- bras manipulateur, et organe terminale.

Ces trois unités peuvent être intégrées ou séparées .  
les types connus de bras manipulateurs sont :

#### - ROBOT A STRUCTURE CARTÉSIENNE : (fig 1-1)

Il peut effectuer une translation suivant chaque axe (ox, oy, oz). son volume de travail est un cube.

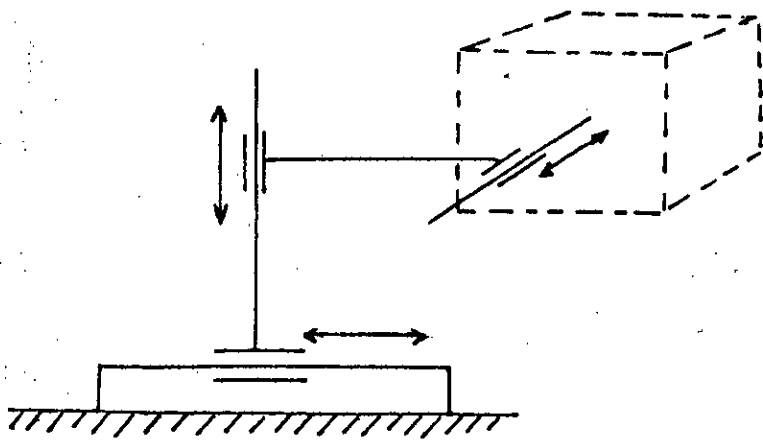
#### - ROBOT A STRUCTURE CYLINDRIQUE : (fig 1-2)

Il peut effectuer une translation suivant l'axe oy et oz et une rotation autour de oz, son volume de travail est un cylindre.

#### - ROBOT A STRUCTURE POLAIRE : (fig 1-3)

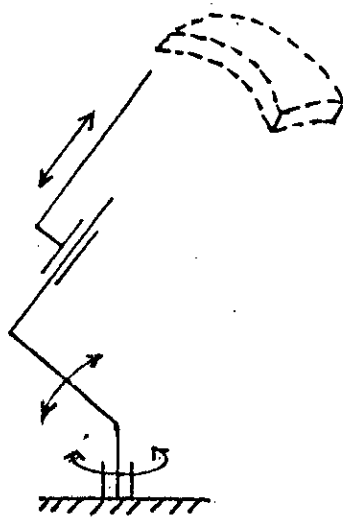
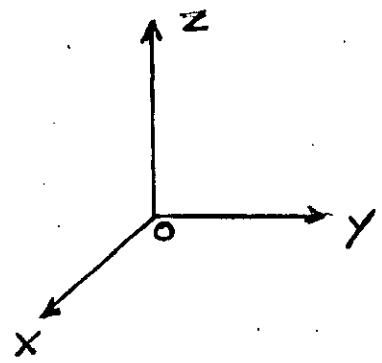
Il peut translater suivant oy, aussi il a deux rotations, une autour de ox, l'autre autour de oz . Son volume de travail est une portion de sphère.

#### - ROBOT A STRUCTURE ARTICULÉE : (fig 1-4)



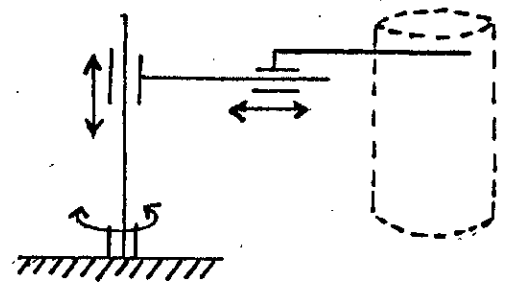
structure cartésienne

< FIG 1-1 >



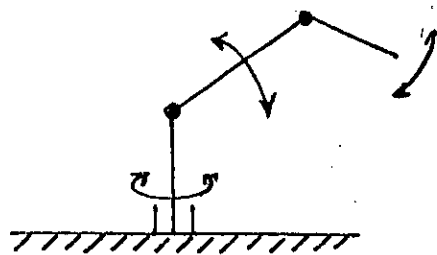
< FIG 1-3 >

structure polaire



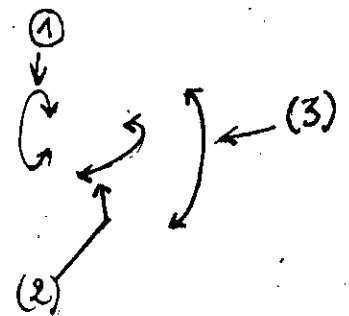
< FIG 1-2 >

structure cylindrique



< FIG 1-4 >

structure articulée



- 1-roulis
- 2- Lacet
- 3-Tangage

Plus complexe à commander, il nécessite des systèmes de compensation, à cause des variations de ces paramètres d'inertie lorsque sa configuration change. Il est composé de :

- **ÉPAULE :**

C'est la base, elle tourne autour de  $o_x$  et de  $o_z$  .

- **COUDE :**

Effectue une rotation par rapport à l'épaule dans le plan vertical .

- **POIGNET :**

Il représente la dernière pièce de la chaîne, il peut effectuer trois mouvements :

-Lacet : Rotation dans le plan horizontal.

-Tangage : Rotation dans le plan vertical .

-Roulis : Rotation autour de l'axe du coude .

Son volume de travail peut être plus grand que celui à structure cartésienne de trente fois [10] , il est mieux adapté pour la saisie d'objets placés en des endroits difficilement accessibles.

Il existe d'autres types de bras peu répandus qu'on peut citer parmi eux :

- **ROBOT SCARA [14] :**

Est caractérisé par ces articulations qui se trouvent tous dans le plan horizontal .

- **ROBOT SPIN [14] :**

Est constitué d'un seul corps à base d'anneaux métalliques à grande flexibilité, ce qui lui permet de prendre des configurations très compliquées.

- ROBOT SUSPENDU [14] :

Ressemble à un gyromètre suspendu dans le plan vertical. Il se déplace d'un point à un autre en oscillant verticalement. L'IRB 1000 de la société ASEA en est un exemple.

1-3 UTILISATION DES ROBOTS ET AVANTAGES :

Les robots industriels ont des applications très variées : en 1981 le Japon possédait 14000 robots dont:

40 % servait dans les opérations de manutention et chargement de machines outils à l'usine:

30 % serve dans les opérations d'assemblages, de composants .

15 % pour les procédés de soudage, peinture et recouvrement de surfaces par des produits anti-corrosion.

15 % avait des applications dans d'autres domaines qui peuvent être :

- Des applications militaires : désamorçage des bombes, robot guetteur, ...etc.

- Des applications médicales : chirurgie, assistance des malades, ...etc.

- ou autres.

L'utilisation industrielle des robots présente quatre avantages certains :

-1- Les robots assurent une automatisation pré-étudiée, donc réduisent le temps de démarrage de la production [14].

-2- Le temps nécessaire à la mise au point finale des programmes indispensables à chaque nouvelle installation est diminué [14].

-3- Les robots peuvent être réutilisés après chaque

application et aussi dans d'autres fonctions ce qui procure une souplesse dans les chaînes de productions.

-4- Ils assurent une exécution de tâches d'une façon rapide, précise et avec une qualité maintenue dans le temps, ce qui réduit le prix de revient par unité.

1-4 CAHIER DES CHARGES :

Il comporte les points suivants:

**-ÉTUDE ET FORMALISATION DE LA STRUCTURE DU ROBOT:**

-Le robot est à structure articulée à 3 degrés de liberté (RRR),démontable en modules.

-Chaque module est à base de tubes.

-Chaîne cinématique et motorisation au niveau de chaque articulation .

-L'organe terminale non compris.

**- MODÉLISATION ET SIMULATION:**

-Modèle globale du robot.

-Logiciel de conception.

-Logiciel de simulation.

**- COMMANDE DU BRAS DE ROBOT:**

-Interface au calculateur.

-Générateur de trajectoire.

-Commande PID.



-Commande MRAC.

1-5 RÉSUMÉ:

Au chapitre 2: on présente la structure du robot, ainsi que les organes actionneurs utilisés en robotique, un choix est élaboré ainsi qu'une table de données.

Au chapitre 3: on établit les équations dynamiques régissant le mouvement, et les résultats de simulation .

Au chapitre 4: une étude du point de vue RDM de chaque liaison et une évaluation du coût seront présentés.

Au chapitre 5: on élabore un choix des organes de commande , la commande du bras est formulée suivant différentes techniques au chapitre 6.

Nous terminerons notre travail par des conclusions.

CHAPITRE 2

ETUDE STRUCTURELLE ET PROTOTYPE

### 2-1 INTRODUCTION:

Dans ce chapitre on propose la structure du bras de robot à concevoir suivant les spécifications du cahier de charges, la formalisation finale sera conclue après discussion de quelques solutions.

### 2-2 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DU BRAS :

Le robot est à structure articulée ,à trois degrés de liberté toutes rotoides .Comme précisé dans le cahier de charge le robot doit être démontable en modules , chaque liaison peut être ajoutée ou retranchée de la chaîne du manipulateur,d'ou la nécessité de prévoir une structure facilement démontable avec chaque liaison qui doit avoir son propre organe actionneur positionné à sa proximité afin de permettre une opération couplage / découplage aisée et sans altérer le mécanisme propre aux autres liaisons .

-La figure 2-1: Représente la structure , ainsi que le placement des organes de couplages entre liaisons .Elle se compose des éléments suivants:

#### - LA BASE :

Elle se fixe au sol , et renferme l'élément actionneur (moteur,chaînes cinématique ) de la liaison (1) elle est le support de la structure .

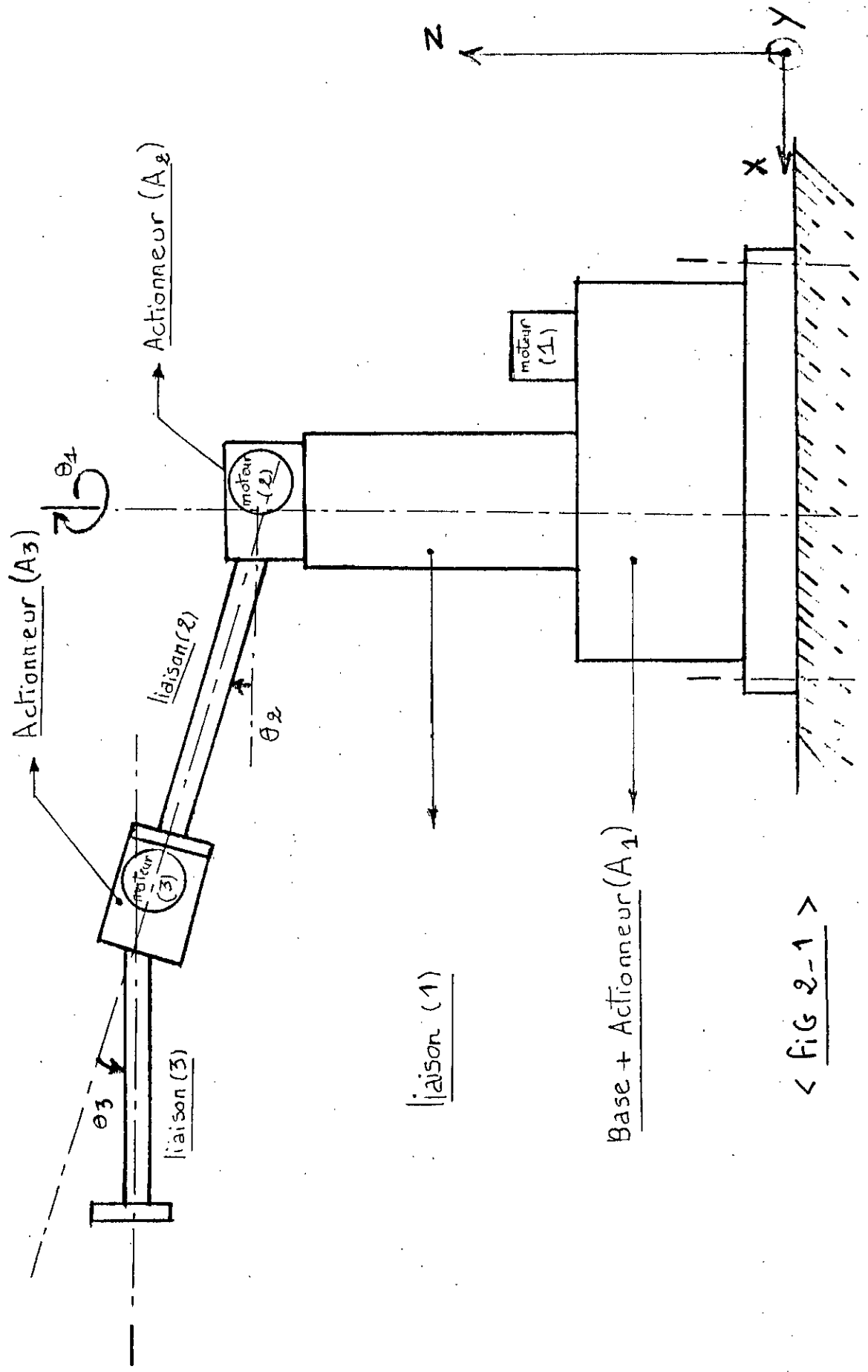
#### - LIAISON 1 :

élément modulaire communiquant la rotation autour de l'axe verticale à tout la structure .

#### - LIAISON 2,3 :

éléments modulaires, permettant le changement de

structure du manipulateur



< FIG 2-1 >

configuration par rotation relative et par rapport aux axes sortants du plan de la feuille , et passant par leurs extrémités

- ORGANES  $A_2, A_3$  :

C'est les actionneurs qui transmettent le mouvement aux liaisons 2 et 3 respectivement . Chaque actionneur  $A_i$  est fixé sur la liaison (i-1) et transmet le mouvement à la liaison (i)  $i= 2,3$  l'actionneur  $A_1$  se trouve dans la base :(cf-fig 2-3).

### 2-3 BUREAU D'ÉTUDE :

La solution à proposer , porte sur la nature du mécanisme que doit comporter chaque organe  $A_i$  et le type de la motorisation qui convient .Chacun des actionneurs  $A_1, A_2$  et  $A_3$  comporte essentiellement :

-Une chaîne cinématique pour transmettre la puissance vers la liaison.

-Un élément moteur .

-Arbre de sortie, sur lequel peut être fixée la liaison .

-Dispositif de fixation sur la liaison précédente.

#### 2-3-1 CHOIX DE LA CHAÎNE CINÉMATIQUE :

Le mouvement à la sortie doit être une rotation ; on peut utiliser :

a)-Le système roue dentée - crémaillère .

b)-Les engrenages ( droits ou coniques ).

a)-système roue dentée - crémaillère : (cf fig 2-2-A).

Permet de transformer le mouvement de translation d'une crémaillère à un mouvement de rotation de la roue dentée. le couple transmis est important, aussi ce système est de constitution simple est robuste. Cependant le moteur à utiliser doit être linéaire (vérin), ce qui rend l'installation encombrante pour des déplacement angulaires

importants: car on doit aménager un espace libre égale au moins à la longueur maximale du vérin plus la longueur de la crémaillère.

**b)-les engrenages :[11]**

Ils permettent la transmission du mouvement circulaire à partir d'un moteur rotatif en variant la vitesse et le couple.

-les engrenages droits : (cf fig 2-2-B).

Dans ce type d'engrenages :

-Les arbres moteur, récepteur sont parallèle et se trouvent en général dans le même plan .

-Ils sont sollicités par les efforts qui sont : la flexion, la torsion.

-Les efforts axiaux sont quasi inexistant, donc le guidage en rotation peut se faire par des roulements à une seule rangé de billes.

-Puisque les roues dentées se trouvent dans le même plan, l'espace qu'ils occupent en largeur est sensiblement supérieur à leurs épaisseurs, ce qui permet d'avoir un boîtier plat donc peu encombrant.

-Cependant, puisque le contact entre dents se fait par prise directe, leur fonctionnement est source de bruit. [11]

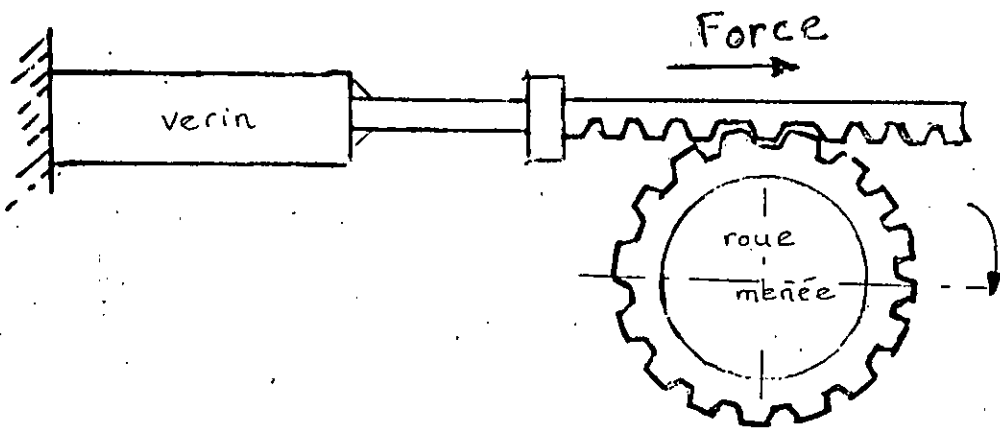
- les engrenages coniques : (cf fig 2-2-C)

Dans ce type d'engrenages : [11]

-Les arbres se trouvent dans des plans différents en général leurs axes sont perpendiculaires.

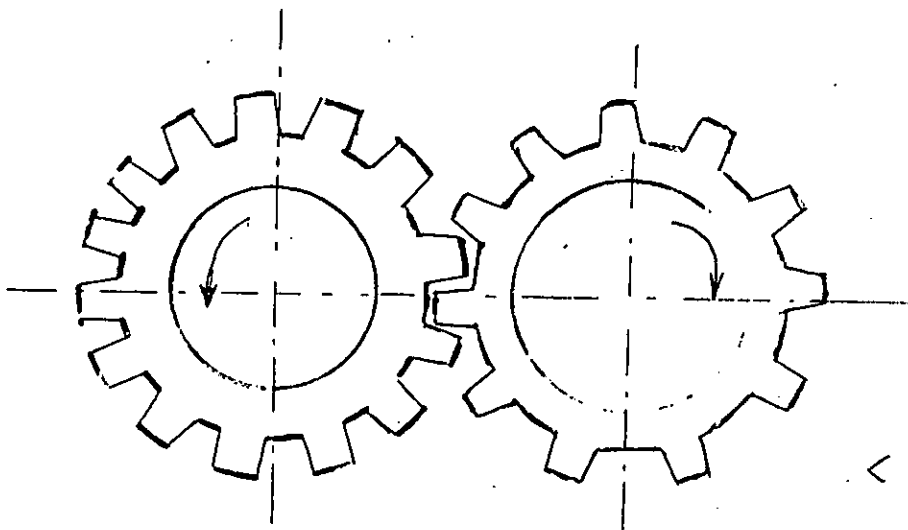
-Ils sont sollicités par : La flexion, la torsion et la compression, cette dernière mène obligatoirement à l'emploi des roulements coniques où les roulements à double rangé de billes.

-Les roues dentées occupent une longueur égale au moins à



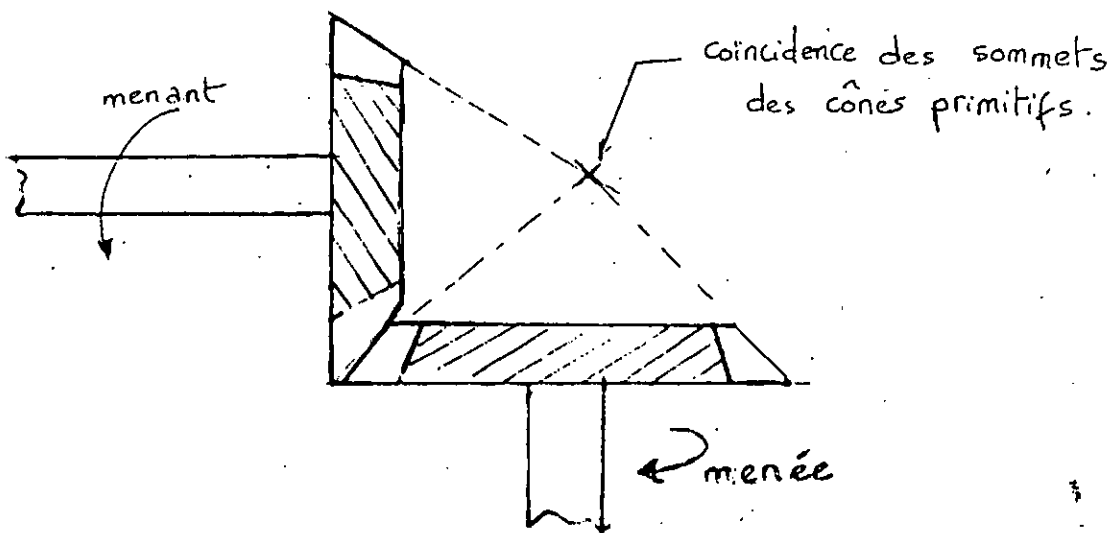
< FIG 2-2-A >

roue dentée - crémailler



< FIG 2-2-B >

engrenages droits



engrenages coniques

< FIG 2-2-C >

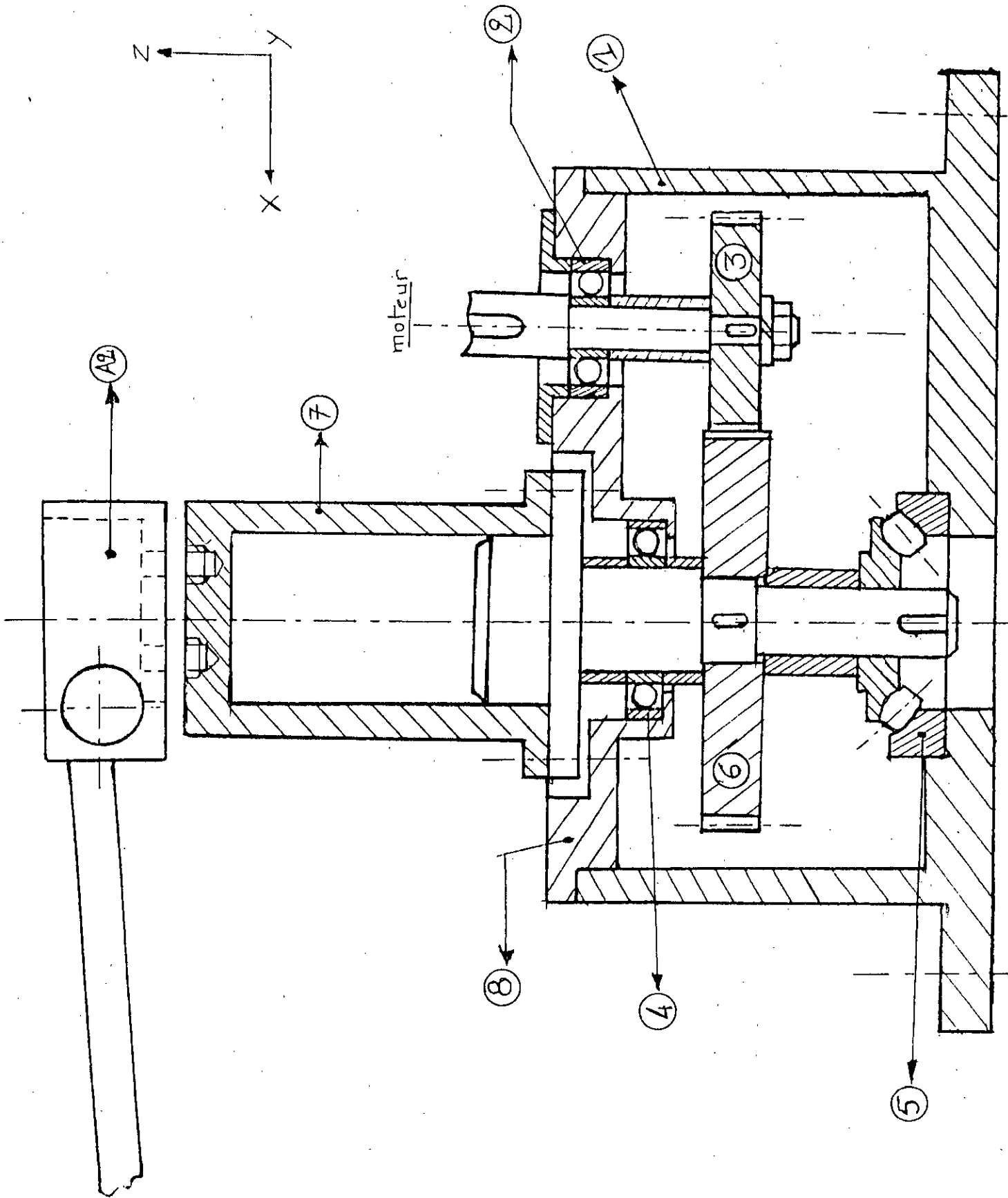


Fig 2-3 = chaîne cinématique de la base



-Les roues dentées occupent une longueur égale au moins à leurs diamètres dans chaque plan, ce qui réduit la possibilité d'avoir un boîtier plat et peu encombrant.

-Leurs montage nécessite un réglage de position par cales lent et cher à réaliser, afin d'obtenir la coïncidence des sommets des deux cônes primitives.

-Le contacte entre les dents se fait d'une façon progressive ce qui rend leur fonctionnement silencieux par rapport aux engrenages droits.

Par comparaison des points précédents, nous optons pour une chaîne cinématique à base d'engrenages cylindriques droits, qui remplissent les critères de simplicité de montage ainsi que leurs encombrements et prix de revient réduit par rapport aux autres solutions.

Le problème du bruit peut être éliminé en utilisant des matériaux spéciaux citant à titre d'exemple : [11]

-Le bois naturel ou comprimé.

-Cuivre en rondelles collées.

-Matière plastique, carton goudronné, ...etc, qui procurent

une bonne qualité du point de vue résistance, frottement et silence.

### 2-3-2 CHOIX DE L'ELEMENT MOTEUR : [14][18]

Le choix précédent mène à l'utilisation d'un moteur rotatif.

- les moteurs électriques :

Ils peuvent être à courant continu ou à courant alternatif.

Ils présentent les avantages suivants :

- Procurent un fonctionnement silencieux.
- Systèmes fiables et de maintenance facile.
- Rendement énergétique assez élevé ( 0.95 - 0.98 ).
- Permettent des déplacements précis.

Cependant, les moteurs à courant continu ont un rapport couple/masse relativement faible par rapport aux autres familles d'actionneurs.

Par contre les moteurs à courants alternatif triphasé sont utilisés pour les puissance dépassant les 3 kW, le problème dans leurs utilisation se pose au niveau de leurs commande qui est non linéaire [18].

-les moteurs hydrauliques :

Ils peuvent être à palettes ou centrifuges parmi leurs avantages :

- Ils développent un rapport couple/masse énorme, ils sont indispensable dans la manipulation des pièces lourdes.
- Insensibles aux champs produits par les rayonnements électromagnétiques et radioactifs.
- Permettent des déplacements précis.

Cependant, leurs utilisation présente les inconvénients suivants :

-L'installation est sujettes à des fuites.

-Nécessite l'emploi de pompes, qui consomment de l'énergie au travail et au repos, car elles doivent maintenir l'huile toujours sous pression.

-Nécessite dans leurs commande l'emploi d'organes transducteur comme les électro-valves qui coûtent cher, et qui demandent une maintenance qualifiée.

-Aussi leurs utilisation nécessite des dispositifs de filtrage d'huile, car les électro-valves sont très sensibles aux impuretés.

**-Les moteurs pneumatiques :**

-Ils ont presque la même technologie avec les moteurs hydrauliques, sauf que le fluide n'est plus incompressible, il s'agit de l'air comprimé.

Ils présentent les avantages suivants :

-Ils développent un rapport couple/masse important par rapport aux actionneurs électriques.

-Ils sont insensibles aux perturbations électromagnétiques.

-Ils ont une constitution simple et robuste.

Leurs inconvénients sont :

-D'être difficilement contrôlables, cela est dû au fait que l'air change de volume d'une façon aléatoire à cause des variations de la température et de l'humidité.

-Ils sont pas précis.

-Ils ont un fonctionnement bruyant, avec des fuites fréquentes. Ils conviennent, pour les déplacement qui se font d'une

manière " tout ou rien ".

#### 2-4 CONCLUSION :

L'installation hydraulique ou pneumatique pour trois organes actionneurs (  $A_1, A_2, A_3$  ), nécessite un arsenal d'accessoires ( pompes, réservoirs, filtres, électro-valves, ... ), qui sont chers et qui demandent une maintenance qualifiée.

Les moteurs électriques, sont très simple pour la maintenance et très fiables, puisque la structure à animer n'est pas destinée pour la manutention d'objets lourds mais pour un but didactique, l'organe moteur pour lequel on opte est le moteur à courant continu.

#### 2-5 MÉCANISME DES ACTIONNEURS :

La figure (2-3) montre la chaîne cinématique de l'élément  $A_1$  à la base du manipulateur. Elle se compose d'un boîtier (1) qui renferme les éléments suivants :

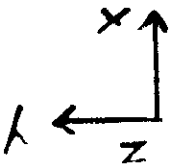
-Un arbre moteur guidé par un roulement à bille (2), logé dans le couvercle (8). Sur l'extrémité de l'arbre est fixé le pignon menant (3), le plus proche possible du roulement pour éviter une flexion trop importante.

-L'arbre récepteur est guidé par un autre roulement à bille (4), logé dans (8) et une butée à rouleaux coniques (5) qui sert aussi à compenser la charge axiale.

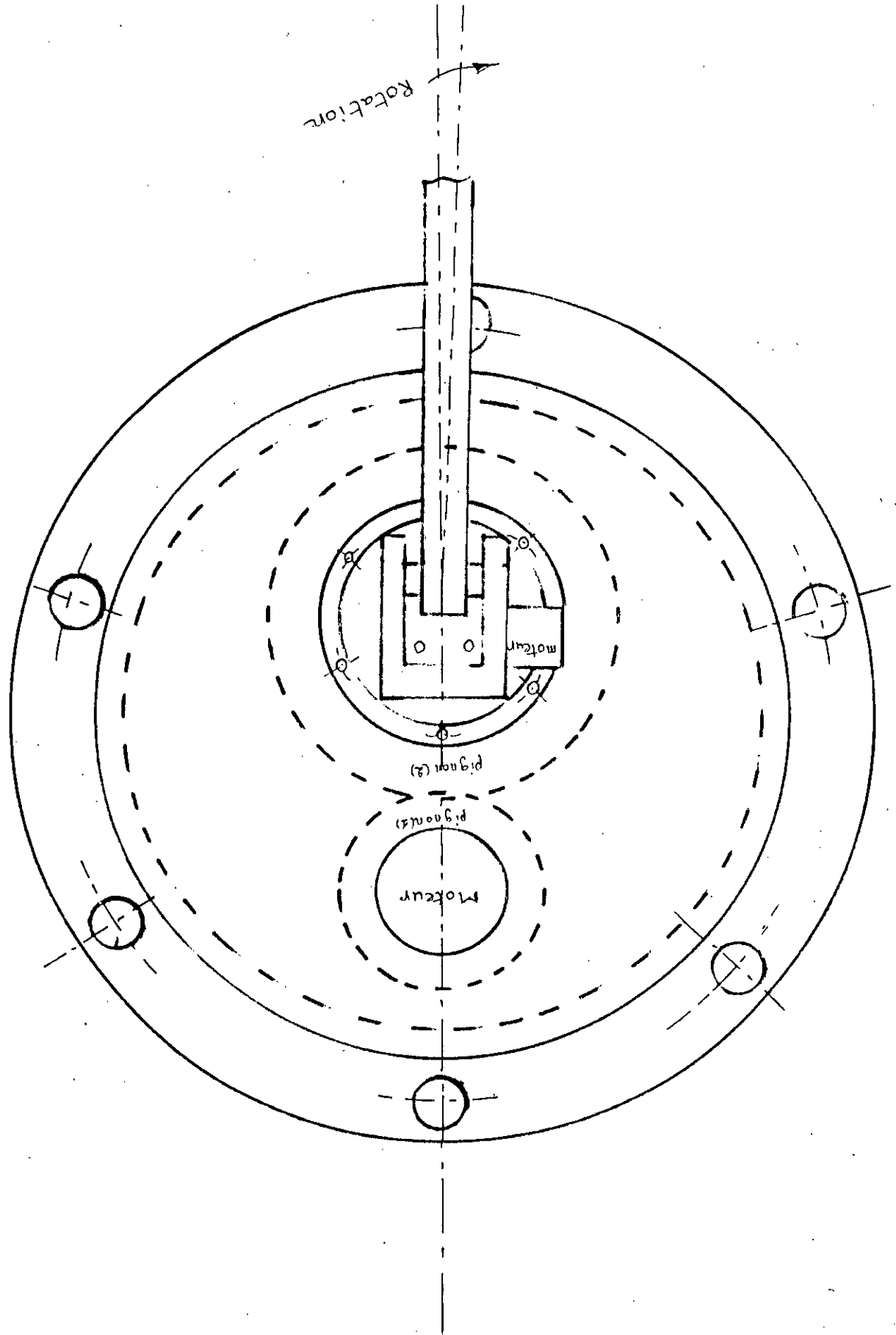
-La roue dentée (6) transmet la rotation au cylindre (7).

-L'élément actionneur  $A_2$  est fixé sur (7).

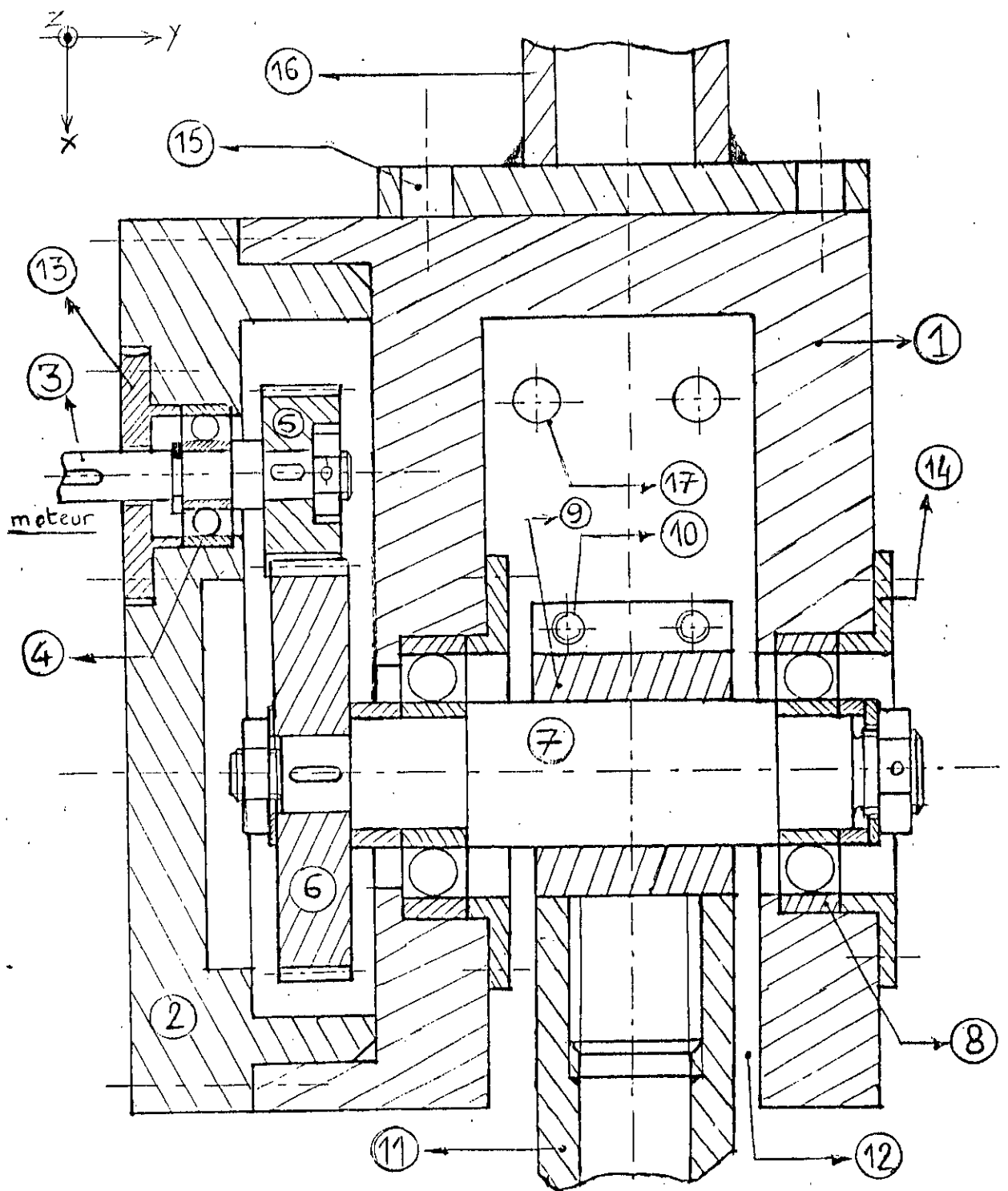
-Le moteur se fixe à l'extérieur du boîtier (1).



< FIG 2-4 >

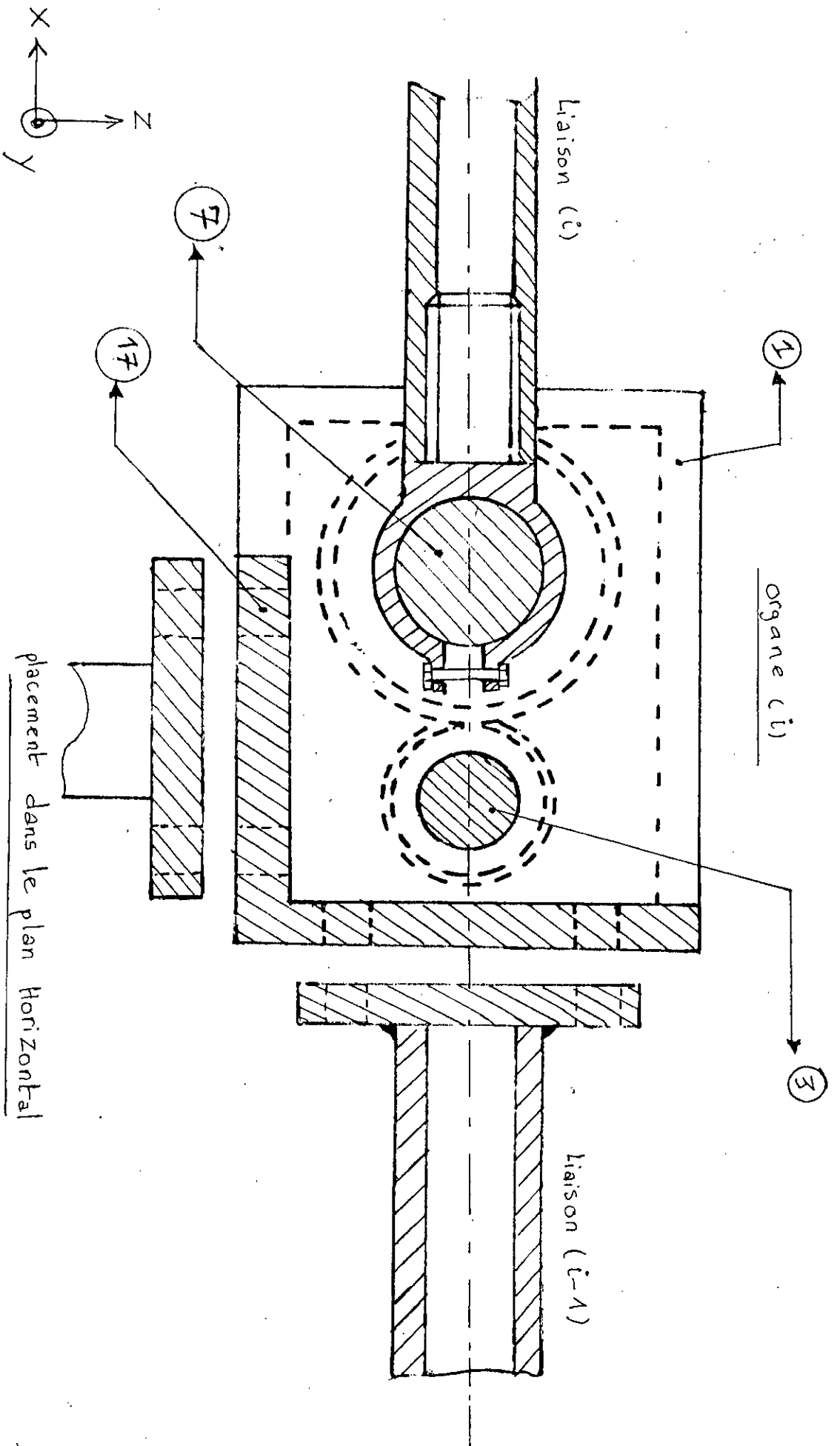


vue de dessus de la structure



< FIG 2-5 >

Vue en coupe de l'élément A<sub>2</sub> ou A<sub>3</sub>



< FIG 2-6 >

CHAPITRE 3  
MODELISATION



### 3-1 - INTRODUCTION :

Pour qu'on puisse faire une étude sur la cinématique d'un robot quelconque ,deux problèmes majeurs se présentent :

-étant donne les paramètres de jonction  $q(t)=(q_1(t), \dots, q_n(t))$  et les paramètres géométriques de liaison ,où  $q(t)$  est le vecteur de coordonnées généralisées et  $n$  le nombre de degré de liberté ,quelle est alors la position et l'orientation de l'organe terminal du robot ? [9]

-étant donne la position et l'orientation désirée pour un robot ,quelles sont alors les paramètres de jonction correspondants?

-La première question se réfère à ce qu'on appelle dans le langage de la robotique ,le problème cinématique directe ,tandis que la deuxième se réfère au problème cinématique inverse [9]. Dans notre travail on se limitera à faire l'étude du problème cinématique direct.

#### **3-1-1 -PROBLEME CINÉMATIQUE DIRECT:**

Ce problème consiste à trouver des matrices de transformation qui relient deux système de coordonnées différents. Des matrices  $[3 \times 3]$  expriment la rotation d'un repère par rapport à un autre, un vecteur qui exprime la translation, la combinaison de la matrice et le vecteur nous donne une matrice  $[4 \times 4]$  appelée : **MATRICE HOMOGENE** et grâce à cette matrice on peut aboutir aux équations cinématiques directes.

a) -matrice de rotation:

Un point p donné se repère par son vecteur dans deux référentiels différents comme le montre la fig (3-1).

$$P_{xyz} = (p_x \ p_y \ p_z)^t$$

$$P_{uvw} = (p_u \ p_v \ p_w)^t$$

avec:

$$(O, \vec{I}_x, \vec{J}_y, \vec{K}_z) \quad , \quad (O, \vec{I}_u, \vec{J}_v, \vec{K}_w)$$

les deux repères d'ou l'on tire les relations :

$$p_x = \vec{I}_x \cdot \vec{P}$$

$$p_y = \vec{J}_y \cdot \vec{P}$$

$$p_z = \vec{K}_z \cdot \vec{P}$$

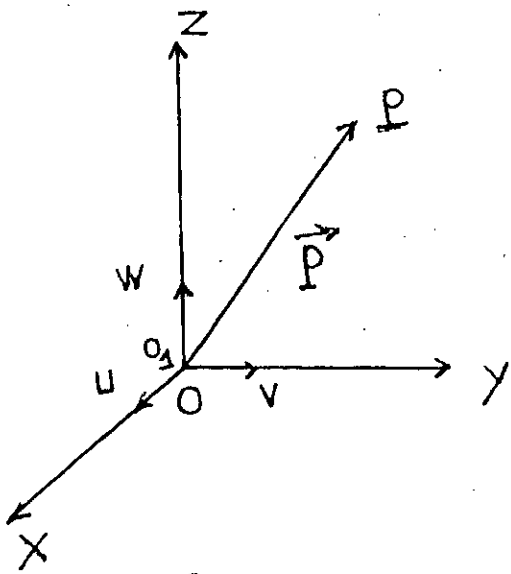
$$\vec{P} = p_u \cdot \vec{I}_u + p_v \cdot \vec{J}_v + p_w \cdot \vec{K}_w$$

d'ou:

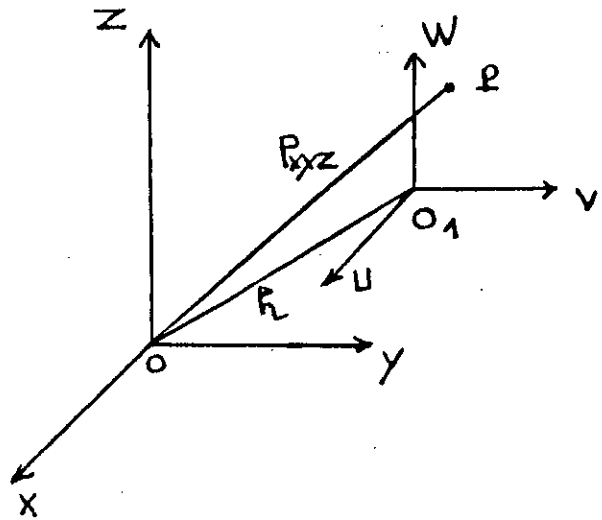
$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{I}_x \cdot \vec{I}_u & \vec{I}_x \cdot \vec{J}_v & \vec{I}_x \cdot \vec{K}_w \\ \vec{J}_y \cdot \vec{I}_u & \vec{J}_y \cdot \vec{J}_v & \vec{J}_y \cdot \vec{K}_w \\ \vec{K}_z \cdot \vec{I}_u & \vec{K}_z \cdot \vec{J}_v & \vec{K}_z \cdot \vec{K}_w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{pmatrix} \Leftrightarrow P_{xyz} = R \cdot P_{uvw}$$

ou R représente la matrice de rotation.

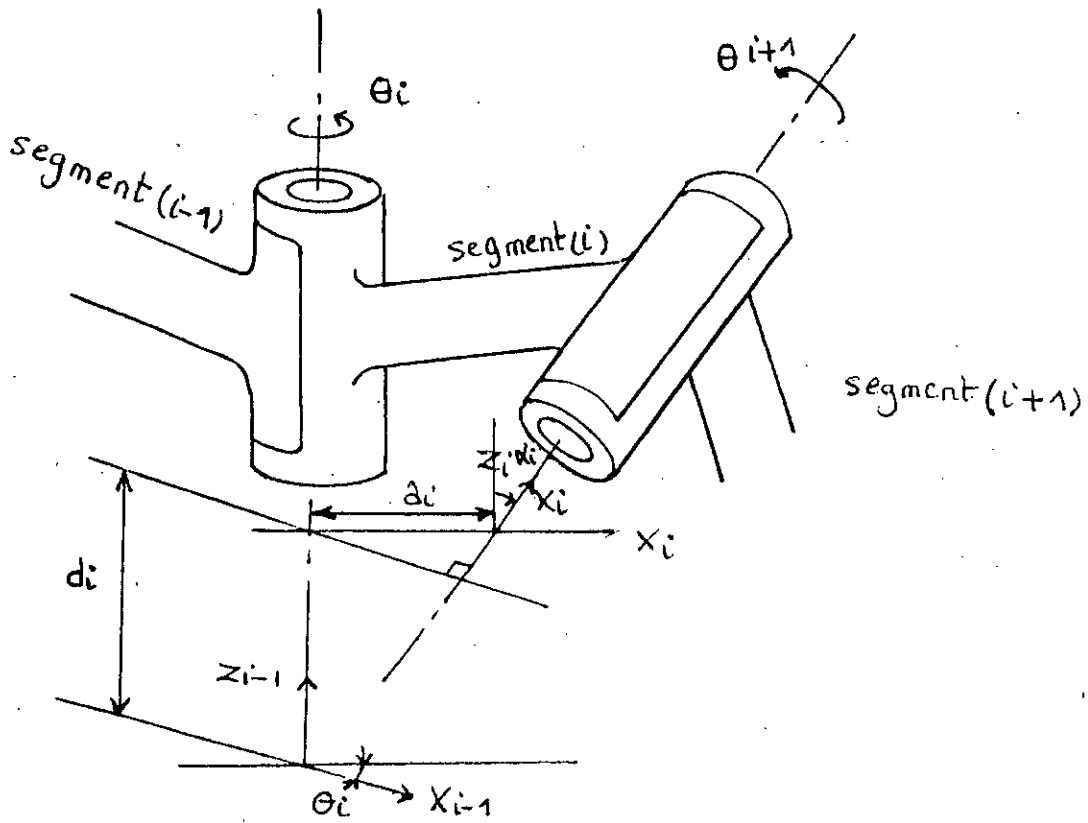
$$R_{xz} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Matrice de rotation} \\ \text{par rapport à OX d'un} \\ \text{angle } \alpha \end{matrix}$$



< Fig 3-1 >



< Fig 3-2 >



< Fig 3-3 >

Definition des axes suivant les  
conventions de D-H.

$$R_{y\phi} = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Matrice de rotation} \\ \text{par rapport à OY d'un} \\ \text{angle } \phi \end{array}$$

$$R_{z\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{Matrice de rotation} \\ \text{par rapport à OZ d'un} \\ \text{angle } \theta \end{array}$$

b)-le vecteur de déplacement:

$$\vec{P}_{xyz} = \vec{P}_{uvw} + \vec{E}$$

$$\vec{E} = ( dx \ dy \ dz )^t$$

c)-matrice homogène:

$$T = \begin{pmatrix} R_{[3 \times 3]} & h_{[3 \times 1]} \\ f_{[1 \times 3]} & 1 \end{pmatrix}$$

- \* T étant la matrice homogène.
- \* La sous matrice [3x3] représente la matrice de rotation .
- \* La sous matrice [3x1] représente le vecteur de déplacement .
- \* La sous matrice [1x3] représente le perspective utilisé , généralement dans les problèmes de vision (camera).
- \* La sous matrice [1x1] représente la norme.

### 3-1-2 -REPRÉSENTATIONS D-H: [18][9][17]

Un robot manipulateur est constitué d'une séquence de liaisons connectées par des jonctions, et chaque paire (jonction ,liaison) constitue un degré de liberté. Les jonctions et liaisons sont numérotées à partir de la base qui est fixée et qui porte zéro (0) comme numéro, la jonction (i) est le point de connexion entre la liaison (i-1) et (i). L'axe de jonction est établie à la connexion de deux liaisons, cette jonction devra avoir deux normales connectées à elle, une de chaque liaison. La position relative de telles liaisons connectés (i-1,i) est donnée par  $d_i$  qui n'est d'autre que la distance mesurée le long

de l'axe de jonction (i-1), entre les normales.

L'angle de jonction  $\theta_i$  entre les deux normales est mesuré dans le plan normal à l'axe de la jonction.

Le paramètre  $a_i$  est la distance mesurée le long de la normale commune, i.e la distance entre les axes  $Z_{i-1}$  et  $Z_i$  mesurée sur l'axe  $X_i$ .

$\alpha_i$  : est l'angle entre les axes de jonction ( $Z_i$  et  $Z_{i-1}$ ) mesurée dans le plan perpendiculaire à  $a_i$ .

Donc quatre paramètres sont associés à chaque liaison ( $a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$ ) ou  $\alpha_i, a_i$  déterminent la structure de la liaison et  $d_i, \theta_i$  déterminent la position relative de la liaison voisine.

a) -Définition des axes : [18][17][9]

\* L'axe  $Z_{i-1}$  correspondant au déplacement du segment  $i$  dans le référentiel  $i-1$ .

\* L'axe  $X_i$  est choisi perpendiculaire à  $Z_{i-1}$ .

\*\* Si  $Z_i$  et  $Z_{i-1}$  ne se coupent, on choisit  $X_i$  colinéaire avec la perpendiculaire commune à  $Z_i$  et  $Z_{i-1}$ .

\*\* Si  $Z_i$  et  $Z_{i-1}$  se coupent, l'orientation de  $X_i$  n'est pas définie.

\* l'axe  $Y_i$  est choisi de telle façon à former un trièdre orthonormé :  $Y=Z \times X$ .

De ce qui précède on peut schématiser d'une façon globale

toutes les définitions comme le montre la figure (3-3).

En 1955 Denavit-Hartenberg, ont proposés une méthode matricielle pour qu'on puisse décrire la rotation et la translation des liaisons les unes par rapport aux autres. Leur méthode consiste à établir la matrice homogène [4x4] en respectant leurs conventions qui sont comme suit:

- 1 -Faire une rotation d'un angle  $\theta_i$  autour de  $Z_{i-1}$  de telle façon à aligner  $X_{i-1}$  avec  $X_i$ .
- 2 -Translater le long de  $Z_{i-1}$  d'une distance  $d_i$  pour coïncider les axes  $X_i$  et  $X_{i-1}$ .
- 3 -Translater le long de  $X_i$  d'une distance  $a_i$  pour coïncider les origines  $o_{i-1}$  et  $o_i$ .
- 4 -Roter autour de  $x_i$  d'un angle  $\alpha_i$  pour ramener les deux systèmes à une coïncidence totale, d'où la matrice homogène de D-H.

$$A_i^{i-1} = T_{Z_{i-1}, d_i} \cdot T_{\theta_i, Z_i} \cdot T_{a_i, X_i} \cdot T_{\alpha_i, X_i} \quad (3-5)$$

$$A_i^{i-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_i^{i-1} = \begin{pmatrix} c\theta & -c\alpha_i s\theta & s\alpha_i s\theta & a_i c\theta \\ s\theta & c\theta c\alpha_i & -s\alpha_i c\theta & a_i s\theta \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ pour une jonction révolutionnaire}$$

$$A_i^{i-1} = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -S\alpha_i C\theta_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{pour une jonction} \\ \text{prismatique car} \\ a_i = 0 \end{array}$$

On notera également :

$${}^0 T_i = {}^0 A_1^{-1} A_2 \dots A_{i-1}^{-1} A_i = \Pi^{i-1} A_j \quad (j = 1, \dots, i) \quad (3-6)$$

pour notre prototype les repères sont représentés à la fig (3-4).

**3-2 PROBLEME DYNAMIQUE D'UN ROBOT :**

**3-2-1 ENERGIE CINÉTIQUE:**

L'énergie cinétique d'une particule de masse dm placée au point (i) s'exprime par : [18]

$$dEC_i = \frac{1}{2} tr \left( \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^i \frac{\partial T_i^o}{\partial q_k} X_k dm X^t \frac{\partial T_i^{t,o}}{\partial q_j} q_k q_j \right) \quad (3-7)$$

par intégration de tout les éléments de masse dm appartenant au segment (i), l'énergie du segment considéré est :

$$\iiint_C dEC_i = \frac{1}{2} tr \left( \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^i \frac{\partial T_i^o}{\partial q_k} \left( \iiint_C X_k dm X^t \right) \frac{\partial T_i^{t,o}}{\partial q_j} q_k q_j \right) \quad (3-8)$$

L'intégrale triple est connue comme étant la matrice de pseudo-inertie du segment (i) et elle notée J<sub>i</sub> :

$$J_i = \iiint_i \begin{pmatrix} x_i^2 dm & x_i y_i dm & x_i z_i dm & x_i dm \\ x_i y_i dm & y_i^2 dm & y_i z_i dm & y_i dm \\ x_i z_i dm & x_i y_i dm & z_i^2 dm & z_i dm \\ x_i dm & y_i dm & z_i dm & dm \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

L'énergie CINÉTIQUE totale ( KC ) d'un ensemble articulé formé de n segments s'exprime en sommant les énergies cinétique de chaque système d'où :

$$KC = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} \text{tr} \left( \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial T_i^o}{\partial q_k} J_i \frac{\partial T_i^o}{\partial q_j} \dot{q}_k \dot{q}_j \right) + \frac{1}{2} \text{tr} \left( \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial T_n^o}{\partial q_k} (J_n + J_L) \frac{\partial T_n^o}{\partial q_j} \dot{q}_k \dot{q}_j \right) \quad (3-10)$$

où  $J_L$  : la matrice d'inertie de la charge.

### 3-2-2 ÉNERGIE POTENTIELLE(EP):

$$V = - \left( \sum_{i=1}^n (m_i g^t T_i^o X_{i,j}) \right) - m_L g^t T_n^o X_{n,n,L} \quad (3-11)$$

$$g = (0 \ 0 \ -g_o \ 0)^t$$

$X_{(i,i)}$  : les coordonnées du centre de gravité du segment (i), relativement au repère (i).

$X_{(n,n,L)}$  : les coordonnées du centre de gravité de la charge relativement au repère n.



**3-3 EQUATIONS MECANQUES:**

Les équations mécaniques d'un segment (i) appartenant à un système articulé sont déduites des formules de LAGRANGE : [15][18]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial F}{\partial q_j} = \tau_{L_i} \quad (3-12)$$

L: EC-EP ( LAGRANGIEN ).

F: fonction de dissipation de RAYLEIGH.

$\tau_{L_i}$  : forces généralisées.

$q_j$  : coordonnées généralisées.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^k \left( \frac{\partial T_l^o}{\partial q_j} J_l \frac{\partial T_l^{t o}}{\partial q_k} q_j q_k \right) + \sum_{j=1}^6 m_j g^t T_j^o X_{j,j} \quad (3-14)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^6 D_{i,j} \dot{q}_j + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^j D_{i,j,k} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (3-15)$$

$$D_i = \sum_{p=1}^6 \left( -m_p g^t \frac{\partial T_p^o}{\partial q_i} X_{p,p} \right) \quad (3-16)$$

$$D_{i,j} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{tr} \left( \frac{\partial T_p^o}{\partial q_i} J_p \frac{\partial T_p^{t o}}{\partial q_j} \right) \quad (3-17)$$

$$D_{i,j,k} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{tr} \left( \frac{\partial T_p^o}{\partial q_i} \frac{\partial T_p^{t o}}{\partial q_j} J_p \frac{\partial T_p^{t o}}{\partial q_k} \right) \quad (3-18)$$

$D_i$  : Force gravitationnelle de la jonction (i)

- $D_{i,j}$  : Inertie de couplage entre la jonction i et j .  
 $D_{i,i}$  : Inertie effective de jonction (i).  
 $D_{i,j,k}$  : Force de CORIOLIS de jonction (i) due à la vitesse de jonction j et k.  
 $D_{i,j,j}$  : Force centripète de jonction (i) due à la vitesse de jonction (j).

3-4 MODELISATION DE L'ACTIONNEUR :

L'actionneur électrique adopté est un moteur à courant continu (DC). Le moteur DC produit un couple directement proportionnel au courant d'induit, ce qui facilite son contrôle, son schéma de base est donné par la figure (3-5):

$$\tau_i = \tau_{m1} + \tau_{Li}^* \quad (3-19)$$

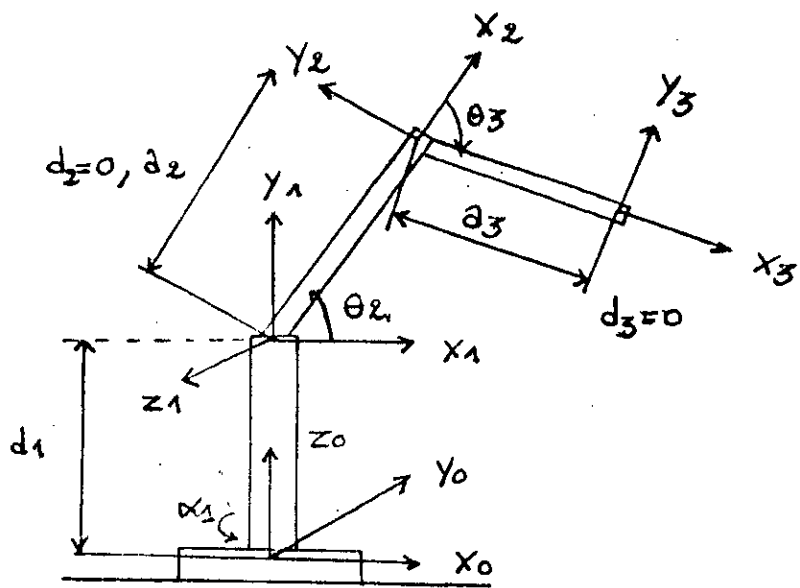
$$\tau_{m1} = J_{m1} \ddot{\theta}_{m1} + f_{m1} \dot{\theta}_{m1} \quad (3-20)$$

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + e_b \quad (3-21)$$

$$e_b = K_b \dot{\theta}_m \quad (3-22)$$

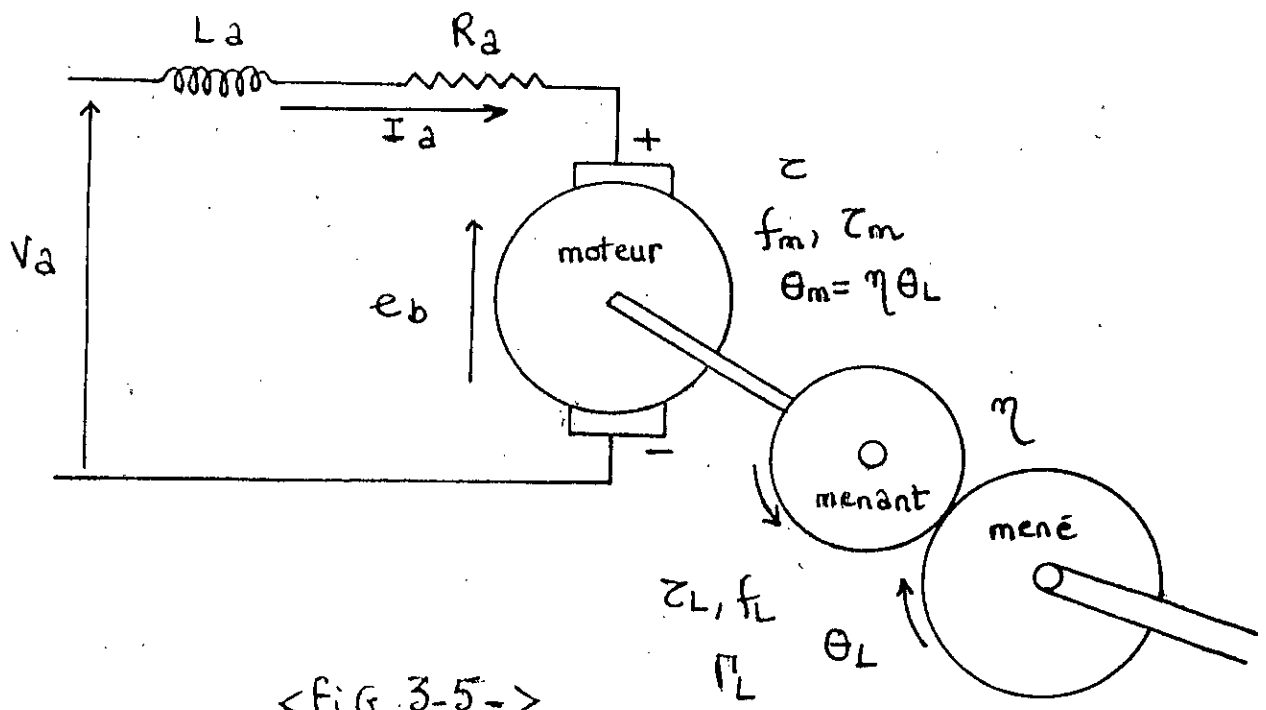
$$\tau_i = K_a I_a \quad (3-23)$$

- $V_a$  : tension d'induit (V).  
 $L_a$  : inductance d'induit (H).  
 $R_a$  : résistance d'induit ( $\Omega$ ).  
 $e_b$  : F.C.E.M (V).  
 $I_a$  : courant d'induit (A).  
 $\tau_i$  : couple électromagnétique (N.m).  
 $\theta_{m1}$  : position angulaire de l'arbre moteur (rd).  
 $J_{m1}$  : moment d'inertie du moteur / à l'arbre moteur ( $\text{Kg.m}^2$ ).  
 $K_a$  : constante du couple moteur (N.m/A).  
 $K_b$  : constante de F.C.E.M (N.s/rd).  
 $f_{m1}$  : coefficient de frottement visqueux de l'arbre moteur / à l'arbre moteur.  
 $\tau_{Li}^*$  : couple de charge / à l'arbre moteur.



<-fig 3-4->

représentation des axes de D-H sur la structure



<fig 3-5->

moteur à courant continu - réducteur

de l'équation (3-21) on a :

$$V_a I_a dt = R_a I_a^2 dt + L_a I_a dt + e_b I_a dt \quad (3-24)$$

$V_a I_a dt$  : énergie empruntée à la source.  
 $R_a I_a^2 dt$  : énergie perdue par effet de JOULE.  
 $L_a I_a dt$  : énergie stockée dans le circuit magnétique.  
 $e_b I_a dt$  : énergie mécanique, destinée pour la partie mécanique.

### 3-5 ÉQUATIONS DU MOUVEMENT:

#### 3-5-1 INTRODUCTION:

Les équations du mouvement totales d'un robot, sont basées sur les lois de la mécanique newtonienne et/ou les formules de LAGRANGE, ces équations sont fortement non linéaires, vu le couplage direct des liaisons qui créent des problèmes sur la stabilité du mécanisme. Dans notre travail on se limitera à l'étude de deux approches qui sont :

- Équation du mouvement en boucle fermée.
- Équation du mouvement en boucle ouverte.

#### 3-5-2 ÉQUATION DU MOUVEMENT EN B-F(LAGRANGE-EULER):

L'équation du mouvement est donnée par l'équation (3-12), et par ces équations :

$$N_{m_i} \theta_{m_i} = N_{L_i} \theta_{L_i} \quad (3-25)$$

de (3-25) on a :

$$\frac{\theta_{m_i}}{\theta_{L_i}} = \frac{r_{L_i}}{r_{m_i}} = \frac{N_{L_i}}{N_{m_i}} = \eta_i > 1 \quad (3-26)$$

de (3-26) on :

$$\dot{\theta}_{m_i} = \eta_i \dot{\theta}_{L_i} \quad (3-27)$$

de (3-27) on a :

$$\ddot{\theta}_{m_i} = \eta_i \ddot{\theta}_{L_i} \quad (3-28)$$

de (3-22), (3-23) on a :

$$\tau_i = \frac{K_a}{K_b} (V_a - K_b \theta_{m_i}) \quad (3-29)$$

de (3-19), (3-20), (3-29) on a :

$$\frac{K_a}{K_b} (V_a - K_b \theta_{m_i}) = J_{m_i} \ddot{\theta}_{m_i} + f_{m_i} \dot{\theta}_{m_i} + \tau_{L_i}^* \quad (3-30)$$

$$\tau_{L_i}^* = \frac{\tau_{L_i}}{\eta_i} \quad (3-31)$$

de (3-27), (3-28), (3-30) et (3-31) on a :

$$\tau_{L_i} = C_{m_i} V_a - b_{m_i} \dot{\theta}_{L_i} - \eta_i^2 J_{m_i} \ddot{\theta}_{L_i} \quad (3-32)$$

$$C_{m_i} = \frac{\eta_i K_a}{R_a}$$

$$b_{m_i} = \frac{\eta_i^2 - i}{R_a} (K_a K_b + R_a f_{m_i})$$

et de (3-12), (3-32) on tire:

$$AM(\underline{\theta}) \underline{\delta} = RM(\underline{\theta}) + CMV + GM + CCM(\underline{\theta}, \underline{\delta}) \quad (3-33)$$

$$AM(\underline{\theta}) = \begin{pmatrix} (D_{11} + \eta^2 J_{m_1}) & D_{12} \dots \dots \dots D_{1n} \\ D_{21} & (D_{22} + \eta^2 J_{m_2}) \dots \dots \dots D_{2n} \\ \dots & \dots \dots \dots \\ D_{n1} & \dots \dots \dots (D_{nn} + \eta^2 J_{m_n}) \end{pmatrix} \quad (3-34)$$

$$EM = \begin{pmatrix} b_{m1} & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & b_{m2} & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots b_{mn} \end{pmatrix} \quad (3-35)$$

$$V = (V_{x1} \dots \dots \dots V_{xn})^t \quad (3-36)$$

$$CM = \begin{pmatrix} c_{m1} & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & c_{m2} & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots c_{mn} \end{pmatrix} \quad (3-37)$$

$$GM(\theta) = -(D_1 \dots \dots \dots D_n)^t \tag{3-38}$$

$$CCM(\theta, \dot{\theta}) = -\frac{1}{2}(\dot{\theta}^t CCM_1(\theta)\dot{\theta}, \dots \dot{\theta}^t CCM_n(\theta)\dot{\theta})^t \tag{3-39}$$

$$CCM_i = \begin{pmatrix} 2 D_{i11} & D_{i12} \dots \dots \dots D_{i1n} \\ D_{i21} & 2 D_{i22} \dots \dots \dots D_{i2n} \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \\ D_{in1} & \dots \dots \dots 2 D_{inn} \end{pmatrix} \tag{3-40}$$

$$\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1 \dots \dots \dots \dot{\theta}_n)^t$$

- N<sub>ei</sub> : nombre de dents du pignon moteur.
- N<sub>li</sub> : nombre de dents du pignon mené.
- η<sub>i</sub> : rapport de réduction.
- θ<sub>li</sub> : position angulaire de l'arbre de la charge (rd).
- τ<sub>li</sub> : couple de charge / à l'arbre de la charge. (N.m).

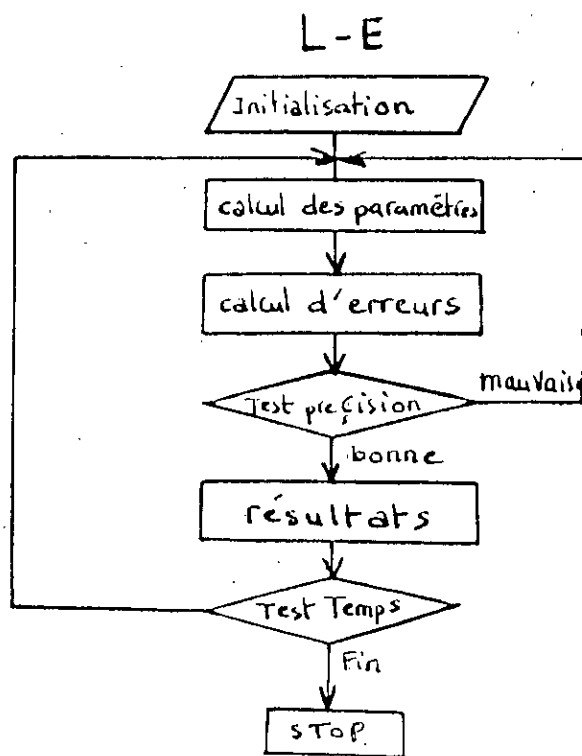
Et pour simuler l'équation (3-33), on à utilisés la méthode de RUNGE-KUTTA, d'ordre 4 suivant l'organigramme en figure (3-6)

3-5-3 EQUATIONS DU MOUVEMENT EN B-0 ( NEWTON- EULER ):

Vu les problèmes qui se posent au niveau de l'équation en B-F (LAGRANGE-EULER), beaucoup de chercheurs ont orientés leurs travaux sur la seconde loi de NEWTON (ARMSTRONG [1979], ORIN et AL [1979], LU et AL [1980], WALKER et ORIN [1982]) [9] et ils ont développés des formules connues sous le nom de " NEWTON-EULER" (N-E). Pour la simulation on a implémenté directement ces

équations suivant l'organigramme en figure (3-7).





< fig - 3-6 >

organigramme de simulation

Lagrange - Euler

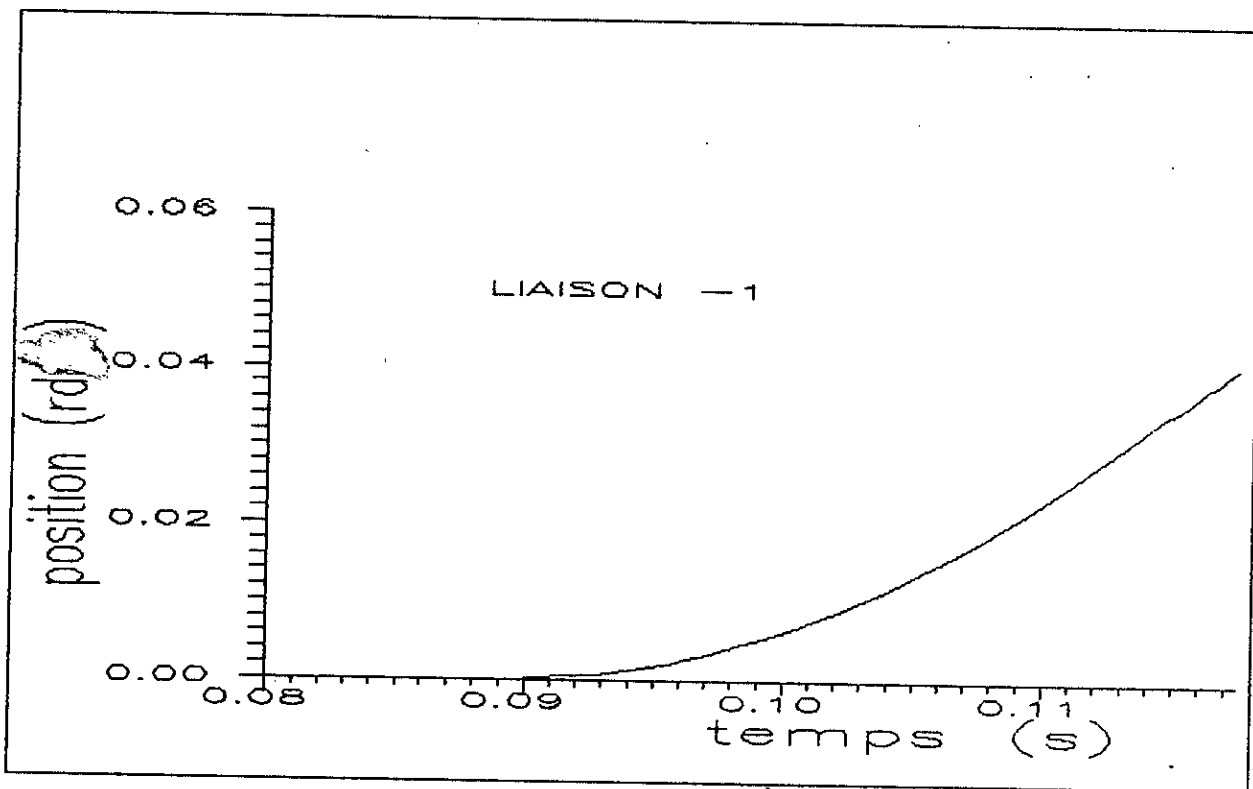
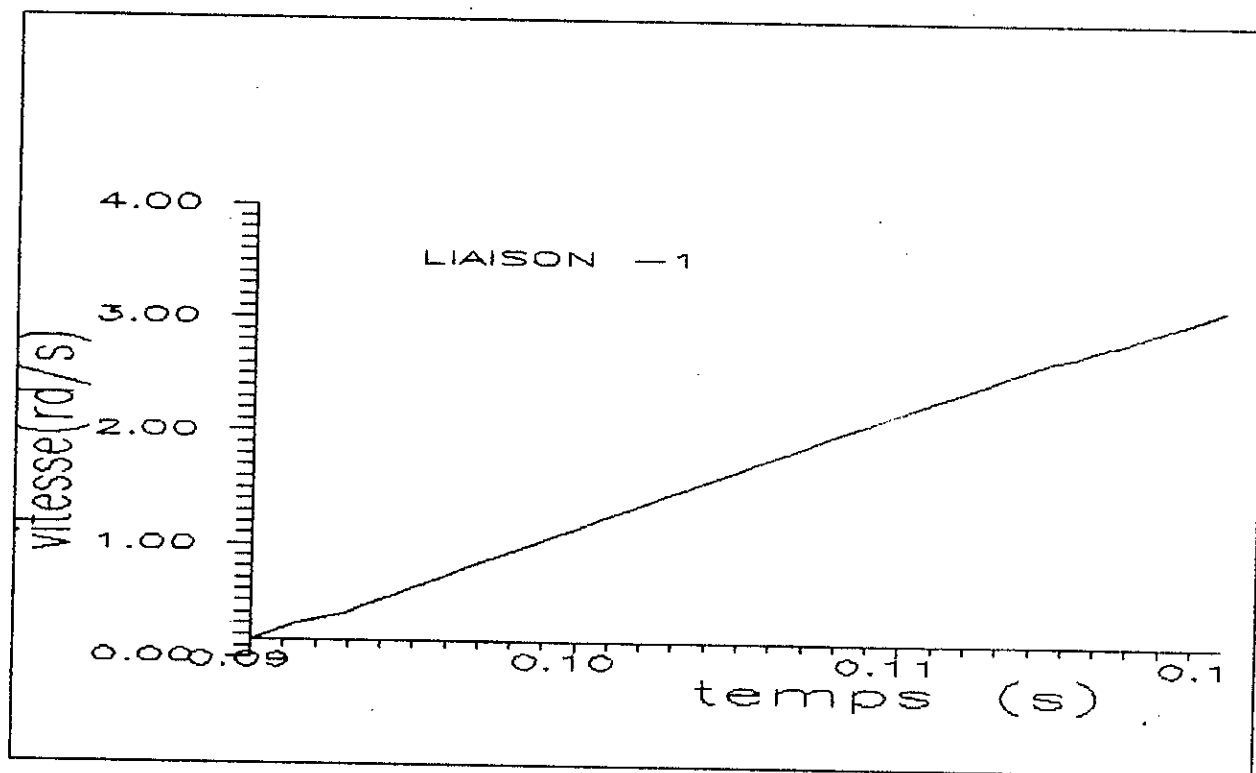
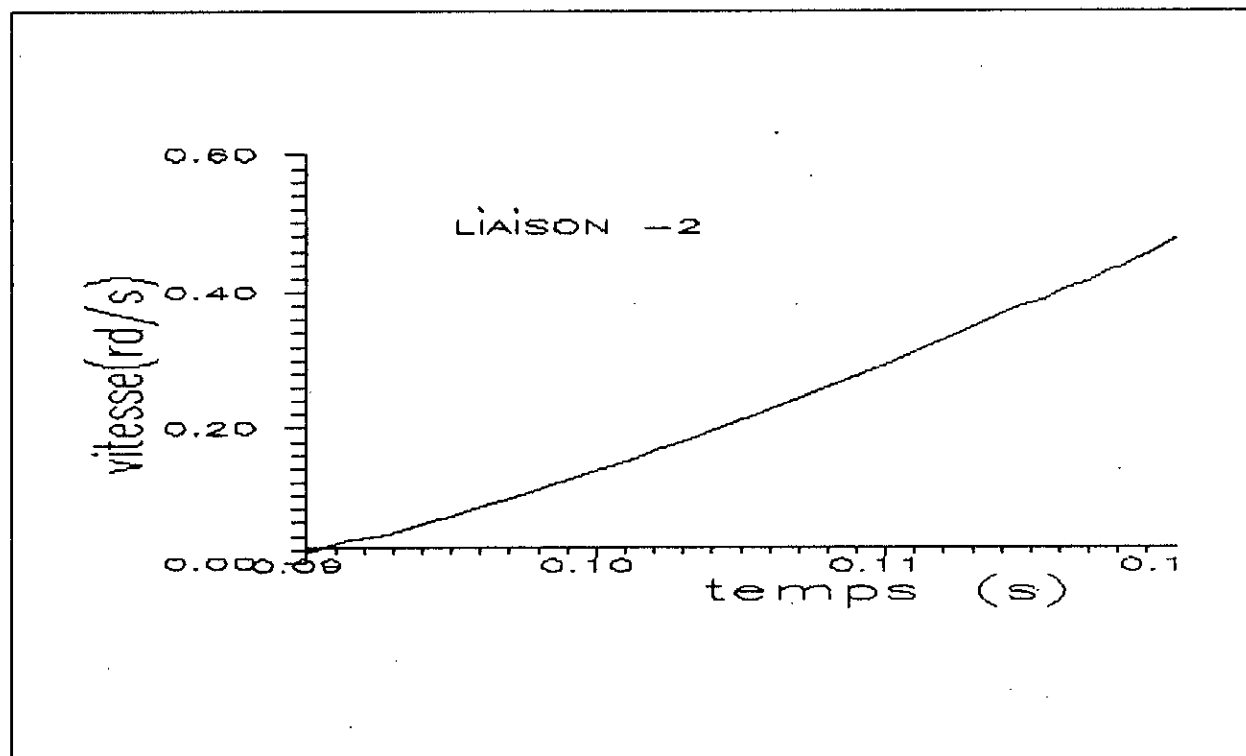
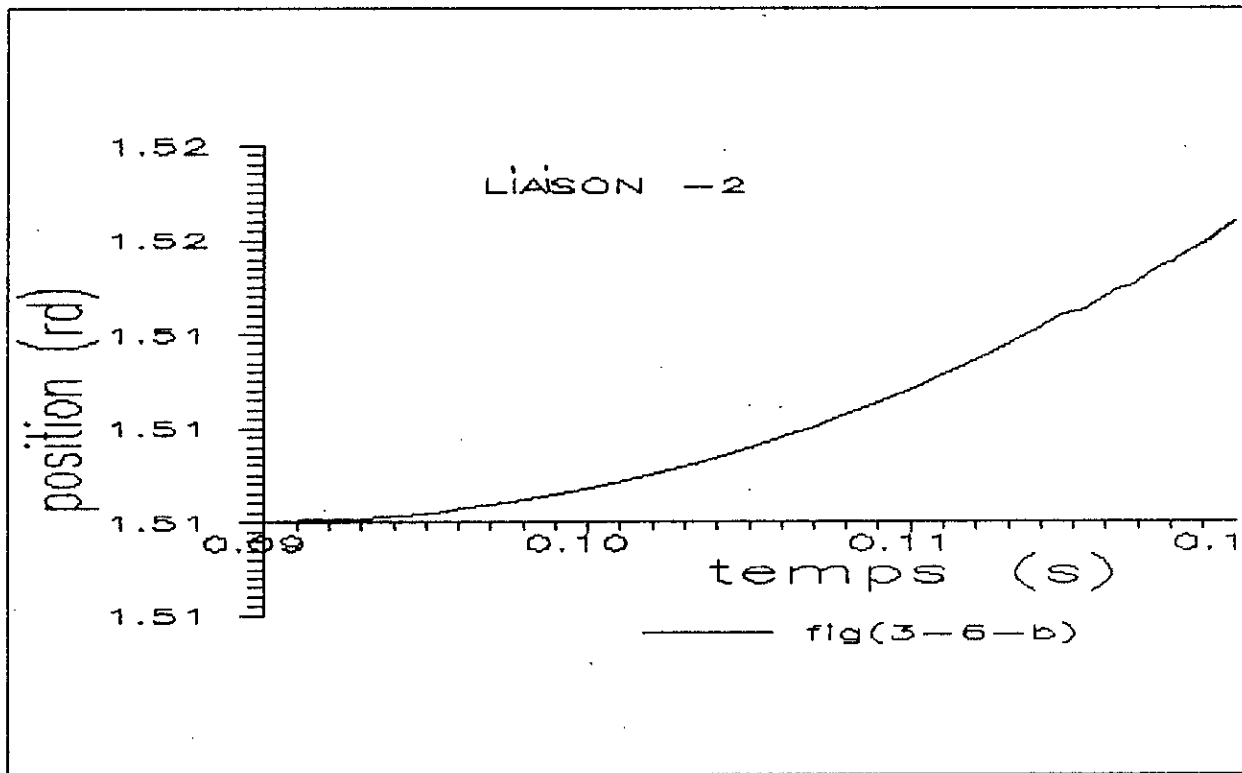
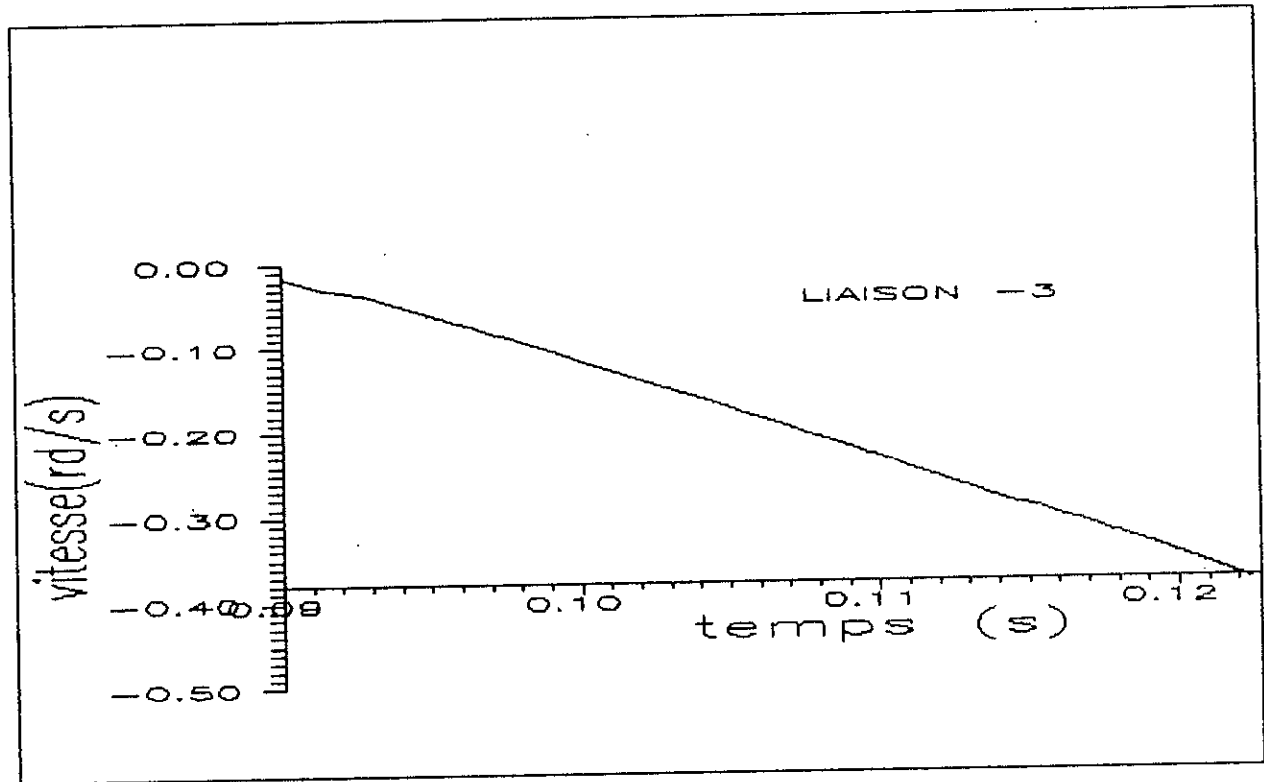
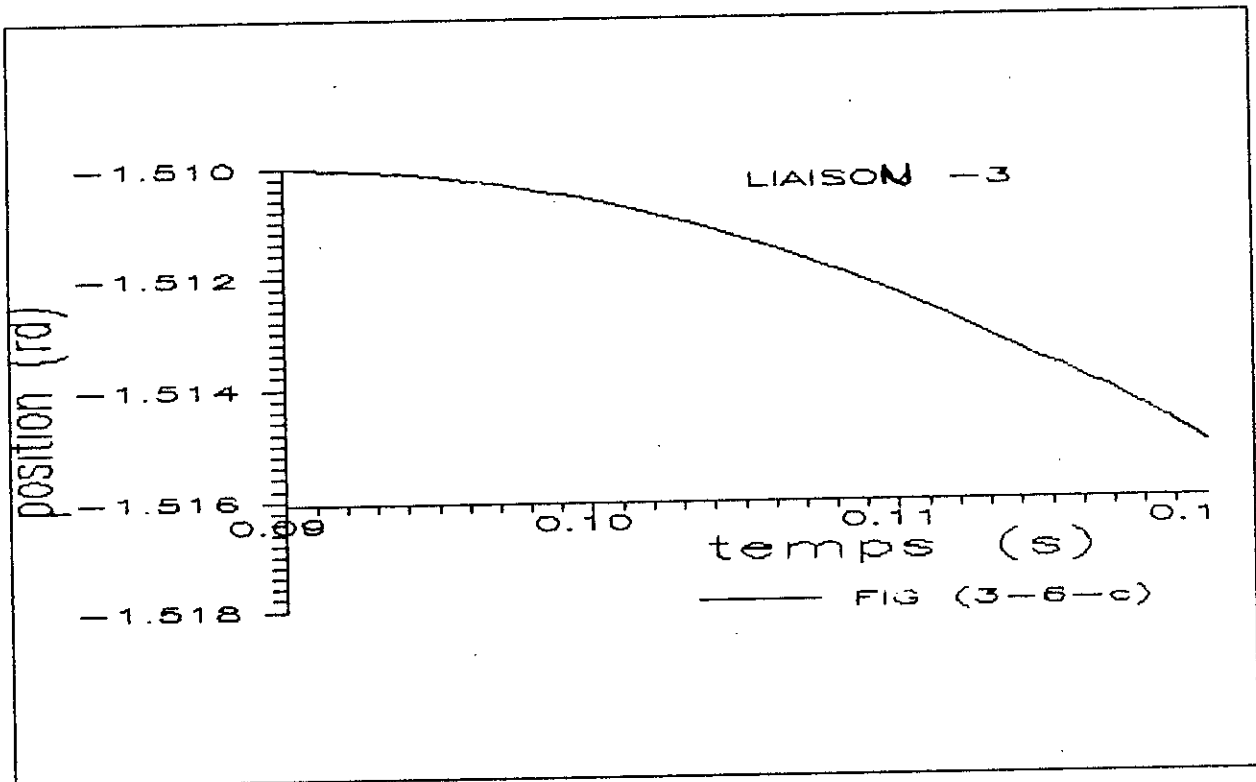
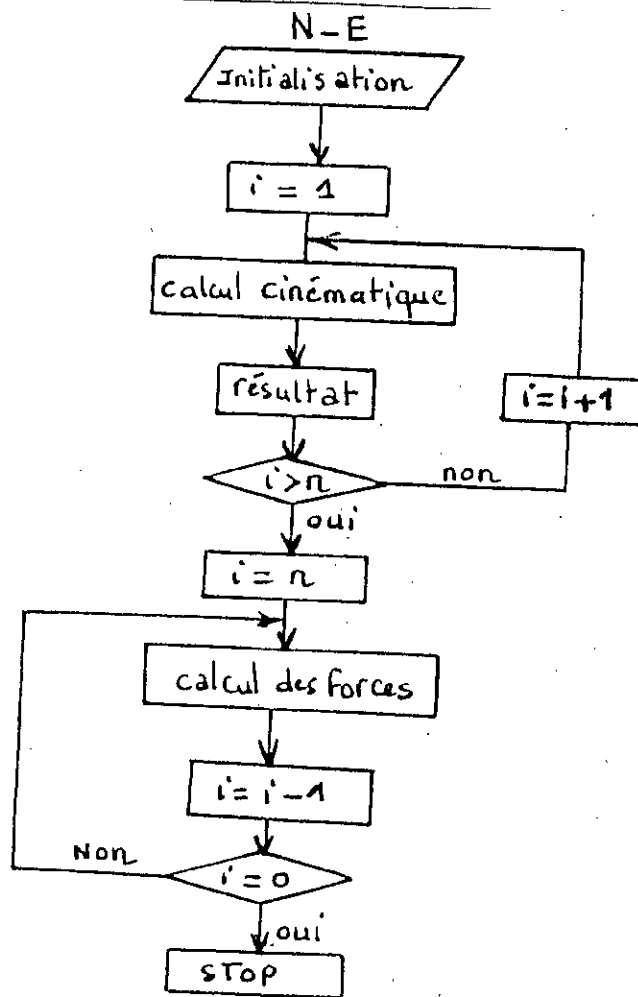


fig (3-6)-a)





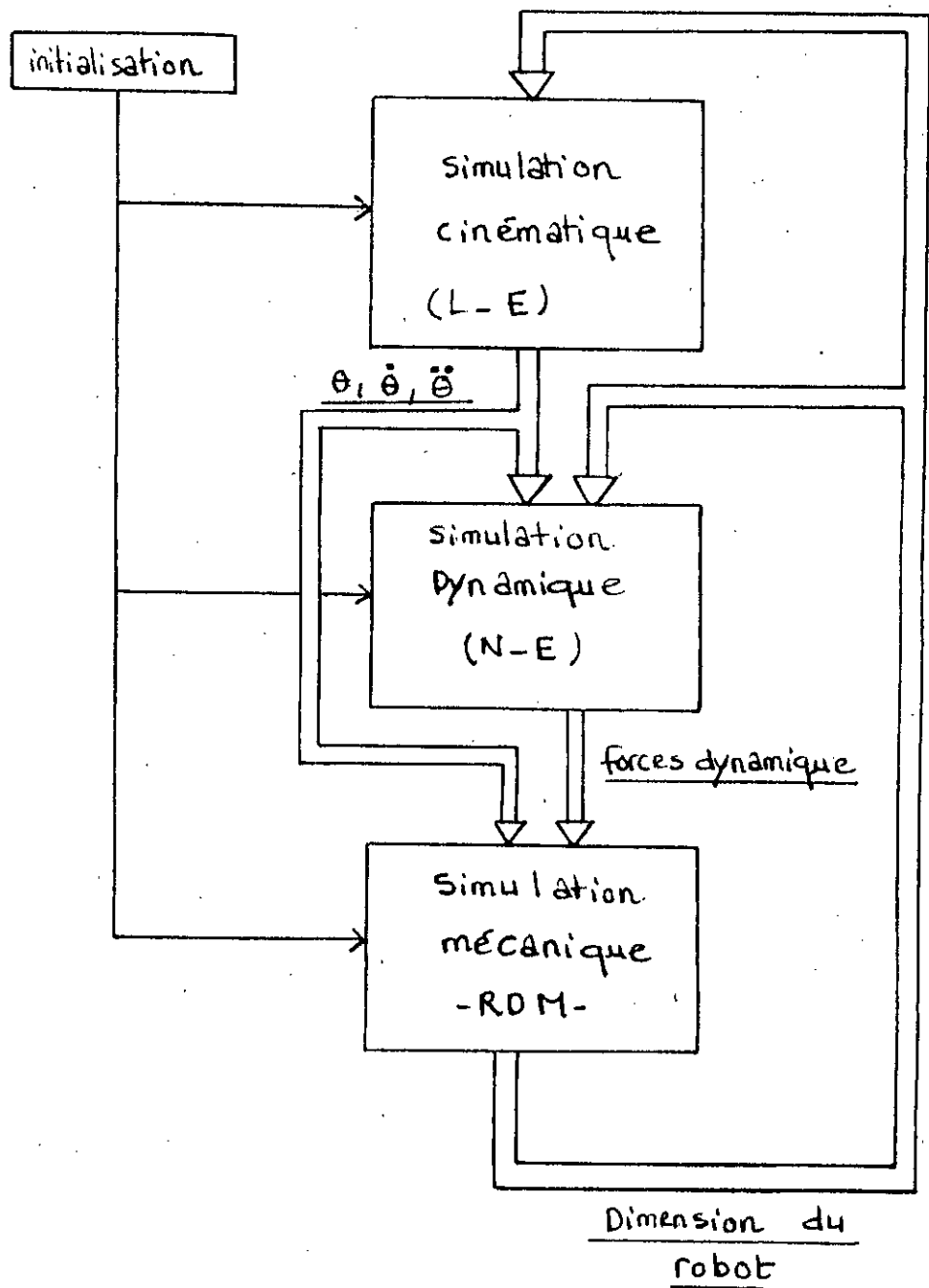




< FIG 3-7 >

organigramme de simulation

Newton - Euler



Logiciel de simulation

< FIG 3-8 >

CHAPITRE 4

ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT MECANIQUE

**4-1 INTRODUCTION:**

La conception de la structure d'un bras de robot est une partie délicate et importante, qui nécessite la connaissance de la distribution des efforts tout au long de la chaîne du manipulateur, ainsi que les caractéristiques exactes du matériau de construction, et la détermination précise de la tâche à exécuter par le bras. Parmi les résultats de cette conception, on obtient les paramètres du modèle, qui entrent dans la synthèse du circuit de commande, donc une structure pas bien conçue, peut apporter une complexité à ce niveau, malgré qu'elle assure à la fois, une bonne résistance mécanique et une rigidité suffisante.

**4-2 DESCRIPTION DU PROCESSUS DE DIMENSIONNEMENT MÉCANIQUE :**

Le processus de dimensionnement mécanique de la structure considérée, (fig 4-1) est décrit comme suite :

1-Isoler la liaison (i) de la chaîne du manipulateur.

2-Représenter sur la liaison (i), les forces d'interaction avec le reste des liaisons.

3-Déterminer la barre équivalente à la liaison (i), c'est à dire, ramener toutes les forces agissantes sur la liaison (i) à une extrémité de la barre en considérant l'autre extrémité comme encastree.

4-Appliquer les lois de la résistance des matériaux, afin de déterminer la section convenable.

5-Refaire toutes les étapes pour  $i=i+1$  ( $i=1,2,3$ ).



Le point de base du manipulateur est fixe, son mouvement est nul. Les axes de coordonnées sont les axes de référence du manipulateur.

Le point de base du manipulateur est fixe, son mouvement est nul. Les axes de coordonnées sont les axes de référence du manipulateur.

Le point de base du manipulateur est fixe, son mouvement est nul. Les axes de coordonnées sont les axes de référence du manipulateur.

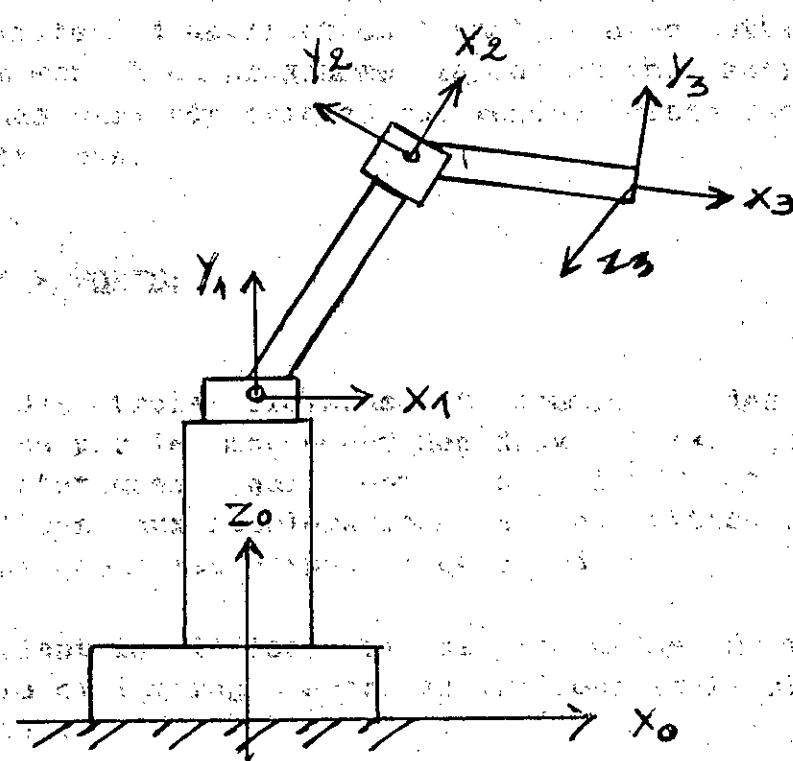


FIG. 4-1

structure du manipulateur

$n_i$  : moment exercée sur (i) par (i-1) à l'origine du repère  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ .

$n_{i+1}$  : moment exercée par (i) sur (i+1) à l'origine du repère  $(x_i, y_i, z_i)$ .

Ces forces qui s'appliquent, sur la liaison (i) sont écrit, dans le référentiel liée à la base. Afin de pouvoir dimensionner chaque liaison séparément, on doit travailler dans le repère propre à la liaison considérée. Pour cela on ramène :

-  $f_i, n_i$  par la matrice de rotation  ${}^i R_0$ , vers le repère  $(x_i, y_i, z_i)$ .

-  $f_{i+1}, n_{i+1}$  seront ramenés en premier, vers le repère  $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ , par la matrice  ${}^{i+1} R_0$ , puis vers le repère  $(x_i, y_i, z_i)$ , par la matrice  ${}^i R_{i+1}$ . Donc la matrice de transformation est :  ${}^i R_{i+1} \cdot {}^i R_0$ .

on a :

$${}^i R_0 = {}^i R_{i-1} \dots {}^1 R_0 \quad \text{et,}$$

$$R_{i-1}^i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{pmatrix}$$

-Les forces et moments obtenues :  ${}^i R_0 \times f_i, {}^i R_0 \times n_i, {}^i R_{i+1} \times {}^{i+1} R_0 \times f_{i+1}$  et  ${}^i R_{i+1} \times {}^{i+1} R_0 \times n_{i+1}$  sont donnés par les équations de N-E.

4-5 CALCUL DE LA BARRE ÉQUIVALENTE :

-Nous allons maintenant ramener la liaison (i) à une barre encastree à son extrémité  $o_{i-1}$ , origine du repère  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  et sur l'autre extrémité s'exerce une force et un moment résultants. Notons les composants des forces et moments dans le

repère (  $x_i, y_i, z_i$  ) comme suite :

$${}^i R_0 \times f_i ( f_x, f_y, f_z )$$

$${}^i R_{i+1} \times {}^{i+1} R_0 \times \eta_{i+1} ( n'_x, n'_y, n'_z )$$

$${}^i R_0 \times n_i ( n_x, n_y, n_z ), {}^i R_{i+1} \times {}^{i+1} R_0 \times f_{i+1} ( f'_x, f'_y, f'_z )$$

On note  $L_i$  : longueur de la liaison (i). On doit déterminer

les composantes du moment résultant sur une des extrémité de la liaison (i) :

-PLAN OXY: (fig 4-4)

En projetant les forces sur l'axe (  $o_i y_i$  ): à un point d'abscisse x, le moment est :

$$M(x) = n'_z + ( f_y + f'_y ) \cdot x$$

en  $x=L_i$ , on aura:

$$M(L_i) = n'_z + ( f_y + f'_y ) \cdot L_i$$

d'autre part :

$$M(L_i) = n_z + C_z$$

Donc en égalisant les deux termes, la composante suivant (  $oz$  ) du moment résultant est :

$$C_z = ( n'_z - n_z ) + ( f'_y + f_y ) \cdot L_i$$

-PLAN OXZ: (fig 4-5)

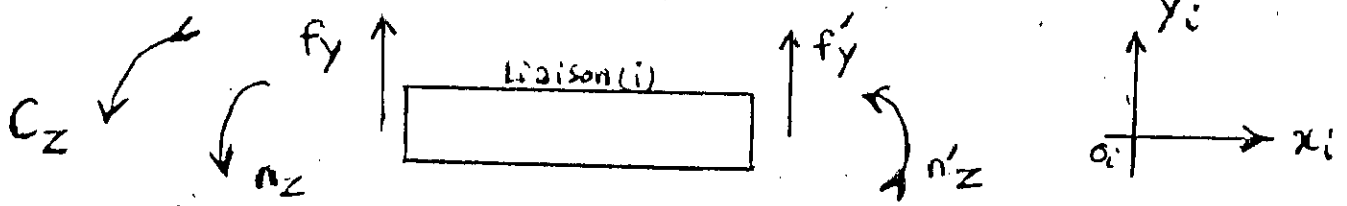
Par le même raisonnement :

$$C_y = ( n'_y - n_y ) - ( f'_z + f_z ) \cdot L_i$$

-PLAN OYZ:

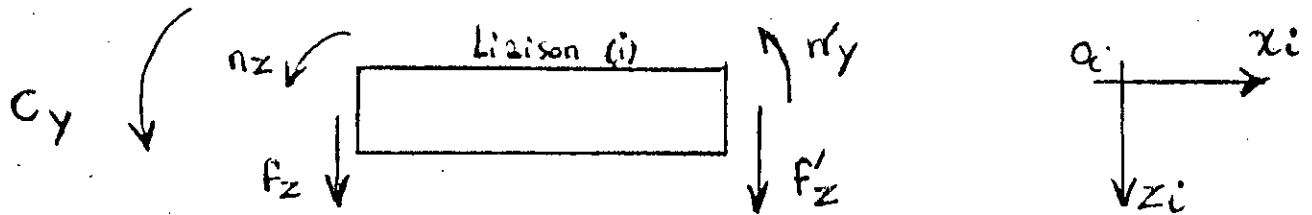
On à directement :

$$C_x = n'_x - n_x$$



< Fig 4-4 >

sollicitations dans le plan oxy



< Fig 4-5 >

sollicitations dans le plan oxz

Chaque liaison (i) est équivalente à une barre encastree au repere (  $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$  ), et sollicitée par un couple  $C( C_x, C_y, C_z )$  et une force  $F( F_x, F_y, F_z )$  à l'autre extrémité (cf fig 4-6).

Le repere (  $o, x, y, z$  ) est définie comme en fig 4-6 pour toutes les liaisons, indépendamment de la convention de D-H.

**REMARQUE:**

Le couple  $C( C_x, C_y, C_z )$  et la force  $F( F_x, F_y, F_z )$ , sont écrits dans le repere (  $o, x, y, z$  ), qui coïncide avec les repères (  $o_i, x_i, y_i, z_i$  ) (repere de D-H), pour  $i=2,3$ , sauf pour  $i=1$  (repere de la liaison 1) comme le montre la figure (4-7).

Les formules établies dans le paragraphe[4-5], s'applique pour  $i= 2,3$  comme suite:

$$C_x = n'_x - n_x .$$

$$C_y = n'_y - n_y - ( f'_z + f_z ) . L_i .$$

$$C_z = n'_z - n_z + ( f'_y + f_y ) . L_i .$$

$$F_x = f'_x - f_x \quad , \quad \text{car } f_x \text{ comprime}$$

contrairement à  $f'_x$  .

$$F_y = f'_y + f_y .$$

$$F_z = f'_z + f_z .$$

Pour  $i=1$ , en tenant compte de la remarque précédente, les formules de la barre s'écrivent comme suite:

$$C_x = n'_y - n_y .$$

$$C_y = n'_x - n_x + ( f'_z + f_z ) . L_i .$$

$$C_z = - ( n'_z - n_z - ( f'_x + f_x ) . L_i ) .$$

$$F_x = f'_y - f_y .$$

$$F_y = f'_x + f_x .$$

$$F_z = -( f'_z + f_z ) .$$

Donc à l'aide de ces formules, les forces et moments agissants sur chaque liaison, qui sont écrites dans le repère de D-H, spécifique pour chaque articulation, sont ramenées à une seule force et un seul couple écrits dans un repère (o, x, y, z), qui ne change pas d'une liaison à une autre, ce qui permet de dimensionner les trois liaisons indépendamment l'une de l'autre et ça en utilisant le même calcul.

#### 4-6 ÉTUDE MÉCANIQUE:

Dans cette partie on appliquera les lois de la résistance des matériaux, du point de vue conception à la barre équivalente de la figure (4-6).

##### 4-6-1 CALCUL A LA RÉSISTANCE : (fig 4-6)

Les moments des forces  $F_z$ ,  $F_y$  sont maximaux au niveau de l'encastrement, là où le bras de levier est maximum, donc la section d'encastrement est la section dangereuse. La composante  $F_x$ , génère une contrainte normale qui caractérise [1]:

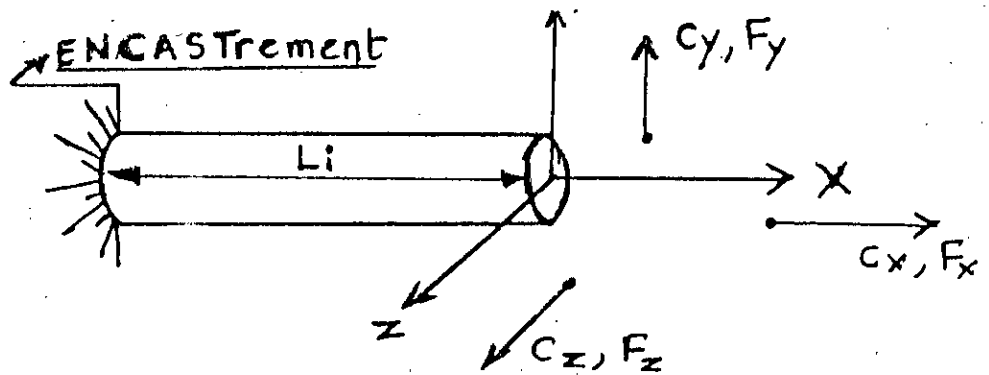
-La compression, si  $F_x < 0$ .

-La traction, si  $F_x > 0$ .

Notons par S la section à l'encastrement, alors :

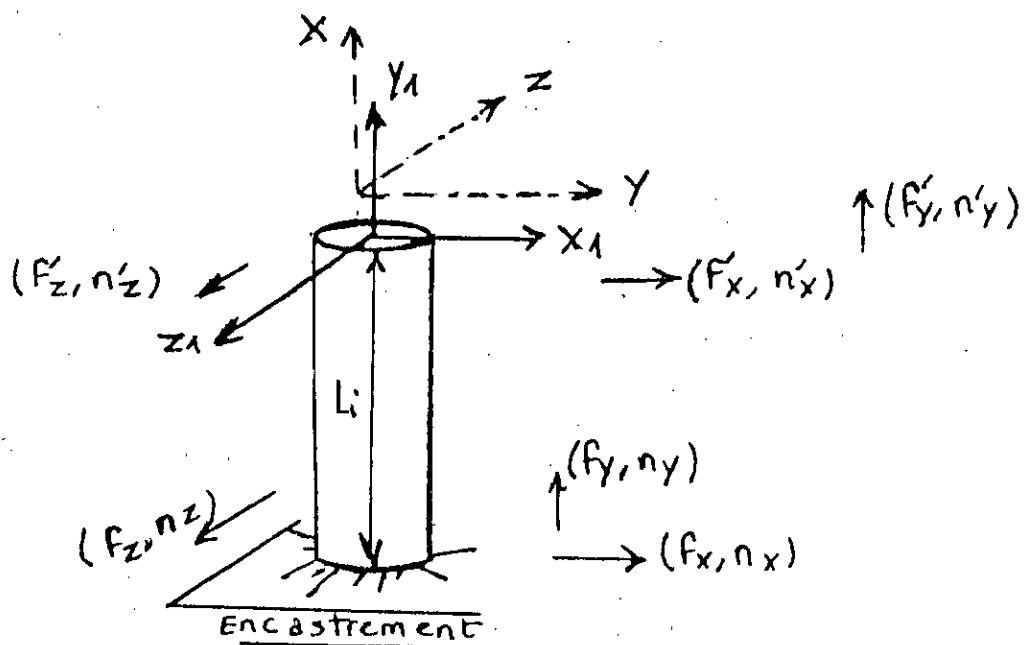
$$\sigma_1 = F_x / S \quad (4-1)$$

$C_y$ ,  $C_z$  : moments de flexion autour de (oy) et (oz) respectivement. Ces moments engendrent une contrainte normale  $\sigma_2$  [1].



< FIG 4-6 >

barre équivalente



< FIG 4-7 >

le repère (oxyz) ne coïncide pas avec le  
repère de D-H associé à la base

$$\sigma_2 = \frac{\sqrt{C_y^2 + C_z^2}}{\frac{I_{GZ}}{V}} \quad (4-2)$$

$I_{Gz}$  : moment d'inertie de la section par rapport à l'axe (oz).

$V$  : distance entre la fibre la plus tendue et la fibre neutre. La contrainte normale globale est :

$$\sigma_x = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4-3)$$

$F_y, F_z$  : efforts tranchants, générants une contrainte de cisaillement :  $\tau_1$ .

$$\tau_1 = \frac{K}{S} \cdot (F_y + F_z) \quad (4-4)$$

$K$  : constante liée à la forme de la section, pour une section circulaire  $K = 4/3$  [1].

$C_x$  : moment de torsion qui génère une contrainte tangentielle  $\tau_2$

$$\tau_2 = \frac{C_x}{\frac{I_0}{V}} \quad (4-5)$$

$I_0$  : moment d'inertie polaire,  $I_0 = 2 \cdot I_{Gz}$ . La contrainte tangentielle globale est :

$$\tau_x = \tau_1 + \tau_2 \quad (4-6)$$

La barre est soumise à des sollicitations composées, la condition de RÉSISTANCE est donnée par la formule de GUEST-TRESCA [1].

où:  $R_p$  [N/mm<sup>2</sup>]: RÉSISTANCE pratique du matériau.

$R_e$  [N/mm<sup>2</sup>]: limite élastique du matériau.

$R_p = R_e / \alpha$ .



$$\sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_x^2} \leq R_p \quad (4-7)$$

$\alpha$  : coefficient de sécurité. peut être choisi proche de 1.

Les équations (4-1) à (4-7), regroupent les contraintes dûs à la flexion, torsion, traction, et cisaillement. La contrainte due au flambage n'est pas pris en compte sous l'hypothèse que la longueur de chaque liaison doit être au maximum égale à cinq fois son diamètre [3].

#### 4-6-2 CALCUL DE LA RIGIDITE:

Par le calcul de rigidité, on essaye de limiter la flèche qui peut apparaître lorsque la liaison est soumise aux efforts. On ne considère que les déformations, engendrées par la flexion et l'effort normale comme suite :

sous l'effort normale  $F_x$  : la déformation  $u$  est donnée par la loi de HOOK :

$$u = \frac{F_x L}{E S} \quad (4-8)$$

E: module de rigidité , pour les aciers  $E = 200000 \text{ N/mm}^2$ .

sous flexion :

plan xoy :(fig 4-8)

Calculons la déformation maximale :  $W_{max}$  suivant (oy), l'équation de la flèche [1].

$$E \times I_{62} W'' = M_z \quad (4-9)$$

$M_z$  : moment par rapport à l'axe (oz).

les conditions aux limites ( à l'encastrement ):

$$W(x = L) = 0.$$

$$W'(x=L) = 0.$$

$$M_z = N_z + F_y \cdot x$$

$$E \times I_{Gz} \times W'' = N_z + F_y \cdot x$$

Par double intégration on obtient:

$$E \cdot I_{Gz} \cdot W(x) = N_z \cdot x^2 / 2 + F_y \cdot x^3 / 6 + C_1 \cdot x + C_2.$$

$C_1$ ,  $C_2$  sont déterminées par les conditions aux limites :

$$C_1 = -(N_z \cdot L + F_y \cdot L^2 / 2).$$

$$C_2 = F_y \cdot L^3 / 3 + N_z \cdot L^2 / 2.$$

$$W_{\max} = W(x=0),$$

Donc en substituant la valeur  $x=0$ , dans l'équation de  $W$  et en tenant compte que :

$$N_z = C_2 - F_y \cdot L$$

on aura :

$$W_{\max} = \frac{C_2 L^2}{2EI_{Gz}} - \frac{F_y L^3}{6EI_{Gz}} \quad (4-10)$$

plan  $xoz$  : (fig 4-9)

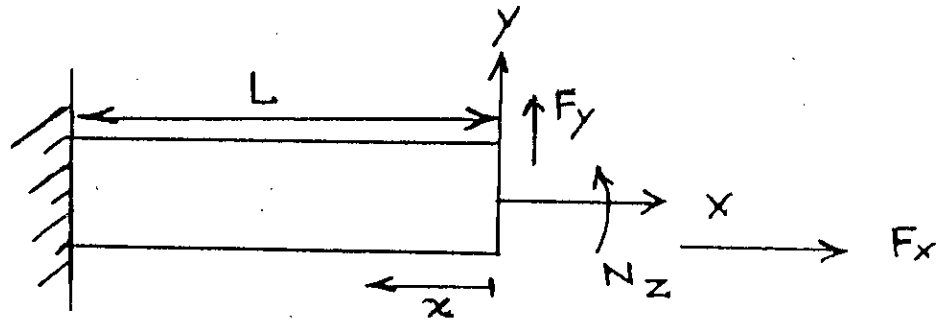
On calcul la déformation suivant l'axe ( $oz$ ), notée  $v$  l'équation de la flèche est :

$$E \cdot I_{Gy} \cdot v'' = -M_y$$

$M_y$  est le moment par rapport à la ( $oy$ ):

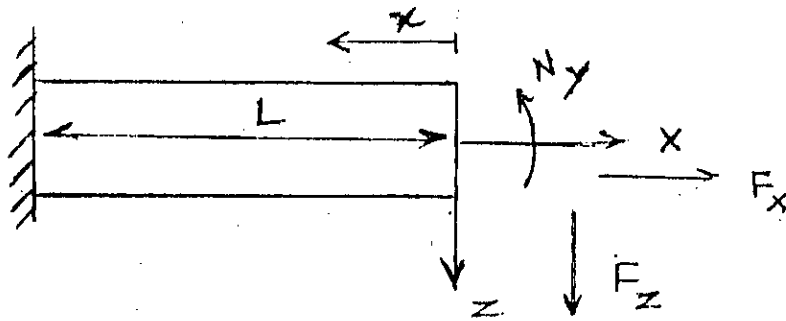
$$M_y = N_y - F_z \cdot x$$

par les même étapes précédentes on obtient:



< FIG 4-8 >

Flexion dans le plan (oxy)



< FIG 4-9 >

Flexion dans le plan (oxz)

$$v_{\max} = \frac{F_z L^3}{3EI_{Gy}} - \frac{N_y L^2}{2EI_{Gy}}$$

or :  $N_y = C_y + F_z \cdot L$  , donc :

$$v_{\max} = - C_y \frac{L^2}{2EI_{Gy}} - F_z \frac{L^3}{6EI_{Gy}} \quad (4-11)$$

La condition de rigidité [1], consiste en une limitation du module de la flèche résultante qui s'exprime par :

$$\sqrt{u_{\max}^2 + w_{\max}^2 + v_{\max}^2} \leq [f] \quad (4-12)$$

[f]: flèche maximale admissible.

#### 4-7 APPLICATION AU BRAS DE ROBOT DIDACTIQUE :

Dans le cas considéré dans cette étude le profilé à utiliser est de section circulaire creuse, pour toute les liaisons.

Si on note :

D: diamètre externe

d: diamètre interne

L: longueur de la liaison. alors :

$$I_{Sx} = I_{Sy} = \pi ( D^4 - d^4 ) / 64$$

$$I_o = 2 \cdot I_{Sy}$$

$$S = \pi ( D^2 - d^2 ) / 4$$

## chapitre 4                      Analyse et dimensionnement mécanique

La hauteur de la fibre  $V = D / 2$

$$K = 4 / 3$$

si on utilise de l'acier XC 40 : alors

$$R_e = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 7.85 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/mm}^3 \quad \text{masse volumique}$$

$$E = 2.10^5 \text{ N/mm}^2$$

Connaissant les paramètres géométrique :

- On détermine les sollicitations agissants sur la liaison à concevoir
- On fixe la longueur et le diamètre  $L$  et  $d$
- On utilise l'équation (4-7) et (4-12) pour tirer le diamètre  $D$

Dés lors, on peut terminer en calculant la masse de la liaison . Ces étapes sont exécutées par un programme d'aide à la conception, dont l'organigramme est donné (fig 4-10)

### 4-8 EXEMPLE DE RÉSULTATS :

Nous avons appliqués l'étude précédente sur une structure d'un robot à trois liaisons, dont les forces et moments sont :

$$f_1 ( 50, 50, -50 ) , \quad n_1 ( 10, 10, -10 )$$

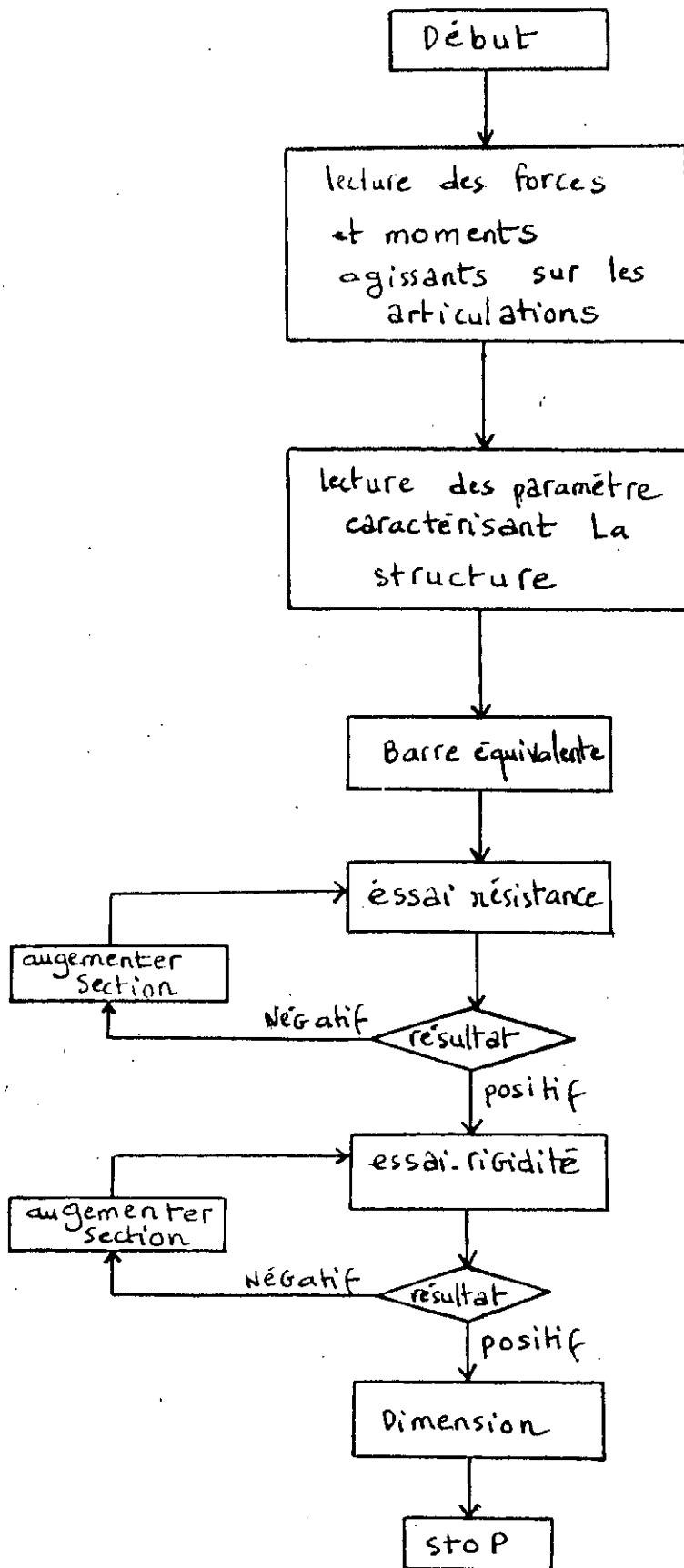
$$f_2 ( 20, 30, 10 ) , \quad n_2 ( 4, 6, 2 )$$

$$f_3 ( 20, 30, 10 ) , \quad n_3 ( 4, 6, 2 )$$

$$f_c ( 0, 50, 0 ) , \quad n_c ( 0, 10, 0 )$$

$$L_1 = 0.195 \text{ m} , \quad L_2 = 0.177 \text{ m} , \quad L_3 = 0.085 \text{ mm}$$

$$d_1 = 50 \text{ mm} , \quad d_2 = 40 \text{ mm} , \quad d_3 = 40 \text{ mm}$$



< FIG 4-10 >

simulation mécanique.

En utilisant le XC 40 avec un coefficient de sécurité  $\alpha = 2$  [ $f$ ] = 0.05mm, par le programme de la (fig 4-10), on trouve :

$$D_1 = 52 \text{ mm} , D_2 = 42 \text{ mm} , D_3 = 42 \text{ mm}$$

$$m_1 = 0.245 \text{ Kg} , m_2 = 0.179 \text{ Kg} , m_3 = 0.086 \text{ Kg}.$$

#### 4-9 CONCLUSION :

Le processus de calcul a permis d'obtenir de bon résultats avec l'exemple proposé, ce qui prouve que la technique utilisée s'applique parfaitement au bras de robot. Le programme d'aide à la conception sera intégré avec les programmes de simulation cinématique qui calculent les forces et moments, par les équations de Newton - Euler .

CHAPITRE 5

ORGANE DE COMMANDE ET INTERFACAGE



## I-ORGANES DE COMMANDE

### 5-1 INTRODUCTION :

Les performances du bras de robot, dépendent essentiellement des organes de commande utilisés : Capteurs, actionneurs et cartes d'interfaces au calculateur.

Dans cette partie, un choix des organes de commandes sera élaboré et l'étude des circuits de base, constituant les cartes d'interfaces est abordée.

#### 5-2-1 CAPTEUR DE POSITION ANGULAIRE:

La mesure des positions angulaires doit être effectuée pour toutes les articulations, même celles qui ne sont pas concernées par la commande, car sous l'effet du couplage, leurs valeurs figurent dans le modèle des articulations commandées [4].

Les capteurs utilisés sont des potentiomètres rotatifs, à piste conductrice, ils sont placés au niveau de chaque articulation.

#### 5-2-2 CARACTÉRISTIQUE ET CHOIX DU CAPTEUR :

Le potentiomètre est un capteur passif, il délivre un signal électrique ( tension ), qui par traitement adéquat, est proportionnel à la position angulaire de l'articulation.

$$V = K_{cap} \times \theta \quad (5.1) \quad \text{où}$$

V : tension de sortie [volt].

$K_{cap}$  : sensibilité statique [volt/degré].

$\theta$  : position angulaire de l'articulation [degré].

Le choix des trois capteurs de position est élaboré sur le fichier produit des constructeurs de capteurs industriels en FRANCE [7]. Ces capteurs sont des ensembles compacts qui renferment le capteur proprement dit et les circuits électroniques nécessaires pour l'alimentation, le traitement et la transmission du signal.

**-PERFORMANCES :**

-Constructeur (nationalité) : MIDORI (JN).

-Distributeur en FRANCE T.M.E : ( Techno-mod-d'ext ).

-Références de la série : CP 2U.

-Technologie : Piste plastique.

-Étendue de mesure (EM) :  $-10^{\circ}$  à  $300^{\circ}$ .

-Alimentation :  $10 V_{cc}$ .

-Signal de sortie :  $0.2 V/10^{\circ}$ .

-Type de liaison : nombre de fil : 03.

-Ecart de linéarité :  $0.4 \%$  de EM.

C'est l'écart maximum entre la courbe d'étalonnage et la droite des moindres carrés passant par les points de mesure.

-Précision global :  $0.5 \%$  de EM.

C'est la somme quadratique des erreurs indépendantes : écart de linéarité, erreur d'hystérésis, l'erreur due aux grandeurs d'influences : température, humidité, ...etc.

-Erreur dû à la température :

a) Sur le zéro : 0.04 % de EM/c°.

C'est l'écart extrême constaté sur la grandeur, mesurée pour la valeur origine.

b) Sur la sensibilité : 0.04 % de EM/c°.

C'est l'écart extrême entre la sensibilité mesurée et la sensibilité nominale.

-Température ambiante admissible : -20°C à 80°C .

-Diamètre maximale de la série : 52 mm.

-Hauteur maximale de la série : 27 mm.

-Masse maximale de la série : 90 g.

-Signal de sortie : 0 - 5 (V) ou 4 - 20 A.

-Prix : de 500 à 1000 FF HT.

### 5-3 CHOIX DES ACTIONNEURS : .[12]

L'actionneur utilisé est le moteur à courant continu, le choix des moteurs doit résulter de l'étude complète des conditions de leurs utilisation, et plusieurs solutions en réalité doivent être examinées ainsi que leurs positionnement sur la structure et leurs circuits de commande associés. Notre choix repose sur le critère d'encombrement et de poids : Plus le moteur est éloigné de la base, et plus sa masse doit être réduite. Aussi les moteurs doivent avoir un rapport couple / masse élevé.

-PERFORMANCES :

En s'aidant du fichier produits des constructeurs des machines électrique en FRANCE [8]. Nous avons élaboré un classement suivant le couple massique et la masse, nous avons optée pour le choix suivant :

**MOTEUR 1** :( base )

- Constructeur ENGEL ( R.F.A ).
- Référence de la série GNH 26.
- Technologie : aimants permanents.
- Puissance nominale : 0.04 kW.
- Condition d'alimentation : 24 V<sub>cc</sub>.
- Vitesse de rotation nominale : 3500 tr/mn.
- Couple nominal : 0.12 N.m.
- Couple de démarrage : 0.84 N.m.
- Rendement à vitesse nominale : 0.57.
- Inertie rotor : 0.23 Kg.cm<sup>2</sup>.
- Masse : 0.3 Kg.
- Diamètre : 45 mm.
- Constante de temps mécanique : 0.161 s.
- Constante de temps électrique : 0.5ms.
- Résistance d'induit : 6.3 ohm.
- Inductance : 3.15 mH.

- Constante de couple : 0.03 N.m/A.

**MOTEUR 2 : (coude)**

-Constructeur : CEM PARVEX ( FRANCE ).

-Référence de la série : RS.

-Technologie : aimants permanent (smc 05).

-Puissance nominale : 0.016 kW.

-Condition d'alimentation : 0 à 90 V.

-Vitesse de rotation nominale : 3000 tr/min.

-Couple nominal : 0.05 N.m.

-Inertie rotor: 0.022 Kg.m<sup>2</sup>.

-Masse : 0.27 Kg.

-Diamètre : 37 mm.

-Constante de temps mécanique : 7.9 ms.

-Constante de temps électrique : 0.4 ms.

-Résistance d'induit : 603.63 ohm.

-Inductance : 0.241 H.

-Constante de couple : 0.41 N.m/A.

**MOTEUR 3:**

-Constructeur : SFENA : NAVIG-INSTRUMENTS (FRANCE).

## chapitre 5                      Organe de commande et Interfacage

- Référence de la série : U369.
- Technologie : aimant permanent.
- Puissance nominale : 0.02 kW.
- Condition d'alimentation : 12 Vcc.
- Vitesse nominale : 7000 tr/min .
- Couple nominal : 0.0275 N.m.
- Inertie : 0.015 Kg.m<sup>2</sup>.
- Masse : 0.09 Kg.
- Diamètre : 27 mm.
  
- Constante de temps mécanique : 2.7 ms.
- Constante de temps électrique : 0.1 ms.
- Résistance d'induit : 72 ohm.
- Inductance : 7.2 mH.
- Constante de couple : 0.2 N.m/A.

## II- INTERFACAGE AU CALCULATEUR

### 5-2-1 INTRODUCTION

Pour que les ordinateurs puissent communiquer avec des dispositifs analogiques, les signaux d'entrée analogiques doivent être convertis en une représentation numérique, et les signaux de sortie convertis en analogique [13]. La première opération est appelée : **conversion analogique-digitale** ou ADC par abréviation, l'opération inverse est dite : **conversion numérique-analogique** ou DAC par abréviation.

### 5-2-2- TYPES D'INTERFACES :

Principalement il existe trois types d'interface :

- Parallèle
- Série
- Analogique

#### **a- INTERFACES ANALOGIQUES:**

Les interfaces analogiques convertissent les signaux numériques du CPU en signaux à variation continue et vice-versa.

#### **1- conversion numérique-analogique (DAC):**

En pratique des convertisseurs parallèles (les entrées du DAC sont appliquées en parallèle) sont utilisés, parmi ceux-ci, on trouve les convertisseurs  $\hat{a}$  :

- amplificateur sommateur (à résistances pondérées)

- réseau R-2R

### 1-a- DAC à résistances pondérées :

Un DAC typique à N bits de cette classe est indiqué en fig(5-1), sa tension de sortie est donnée par :

$$V_{out} = R_{out} \left( \frac{A_{n-1}}{R} + \frac{A_{n-2}}{2R} + \dots + \frac{A_0}{2^{n-1}R} \right) V_{ref} = -R_{out} \cdot I_{out}$$

où :

$$I_{out} = A_{n-1} I_0 + A_{n-2} I_0 + \dots + A_0 I_{n-1}$$

$$I_{out} = \left( A_{n-1} + \frac{A_{n-2}}{2} + \dots + \frac{A_0}{2^{n-1}} \right) I_0$$

car le courant qui parcourt la résistance 2R est deux fois supérieurs à celui qui traverse 4R , et ainsi de suite .

Ce type de convertisseur est simple avec une vitesse élevée , la difficulté majeure , dans sa réalisation , nécessité des résistances de valeurs largement différents qui rendent le circuit plus susceptible aux bruits .[16]

### 1-b- DAC à réseau R-2R

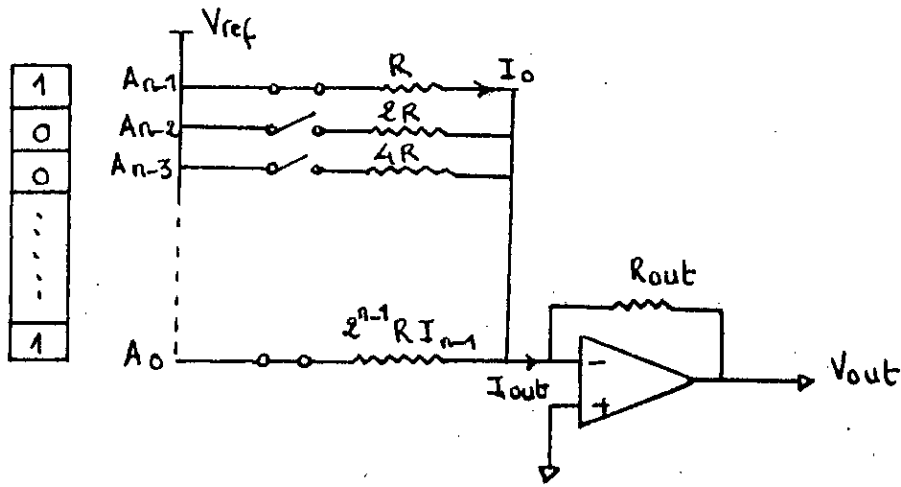
Un DAC typique à N bits de cette classe est indiqué à la FIG 5-2 , tel que la tension recueillie est donnée par:

$$V_{out} = \left( \frac{A_{n-1}}{2} + \frac{A_{n-2}}{2^2} + \dots + \frac{A_0}{2^n} \right) V_{ref}$$

A<sub>i</sub> = 0,1 selon l'état du commutateur.

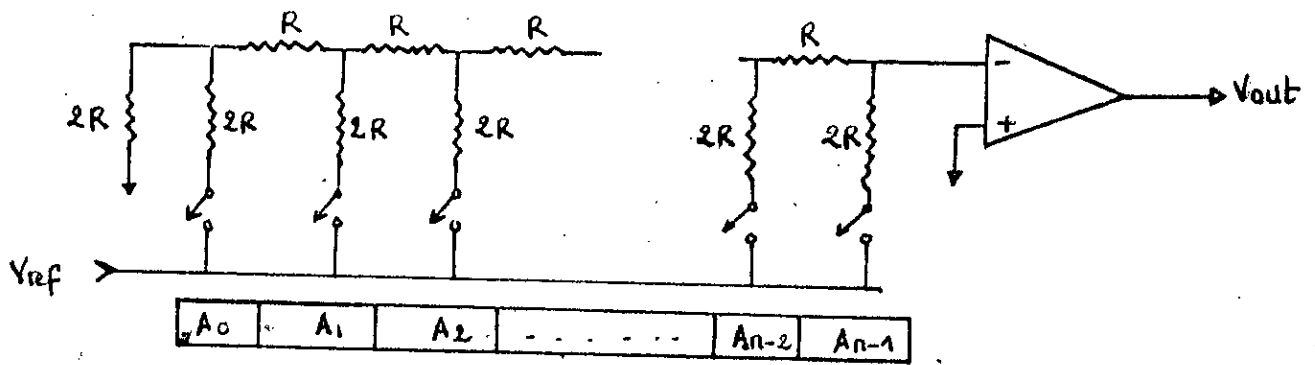
**REMARQUE:** Les interrupteurs des DAC sont réalisés à l'aide des transistors pour pouvoir être commandés par un CPU.





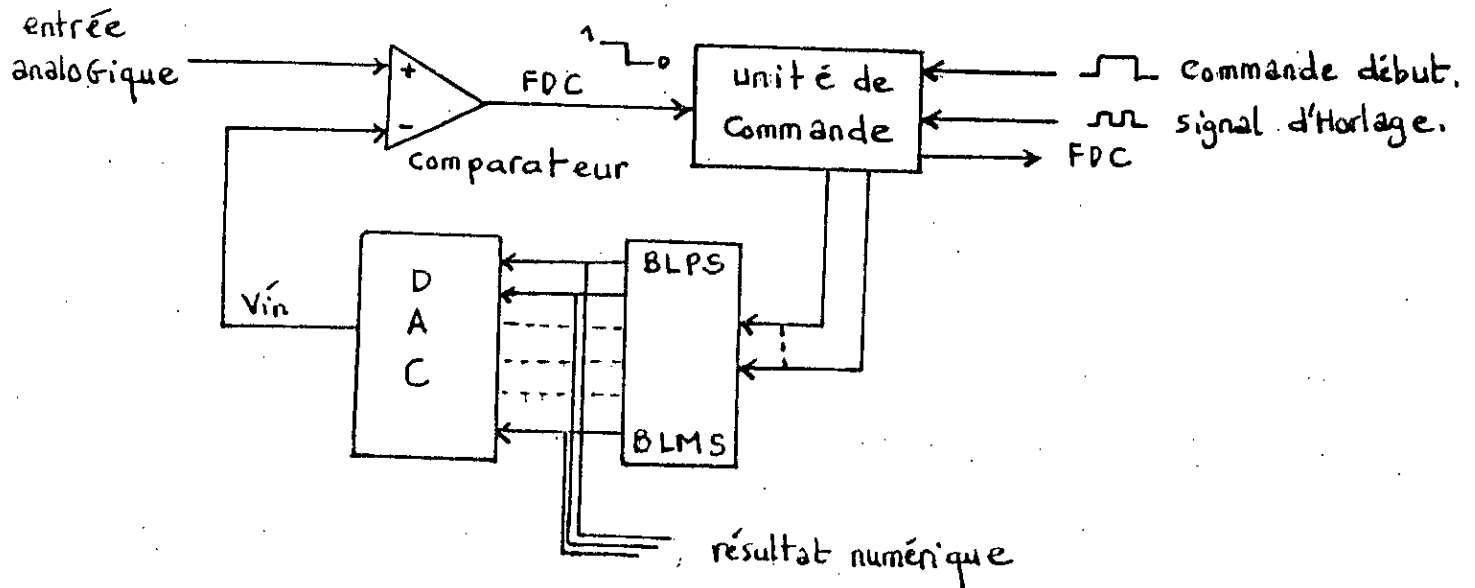
< FIG-5-1 >

représentation d'un DAC



< FIG-5-2 >

DAC à réseau R-2R



< FIG 5-3 >

représentation d'un ADC à base d'un DAC.

## 2-CONVERSION ANALOGIQUE-NUMERIQUE (ADC)

En pratique beaucoup de convertisseurs (ADC) parallèles sont utilisés , parmi ceux-ci on cite:

- ADC éclair (Parallèle ou Flash)
- ADC à intégration
- ADC à dent de scie
- ADC à double dent de scie
- ADC à rampe numérique
- ADC par approximations successives

On se contente d'illustrer que le Flash & celui par approximations successives qui sont les plus utilisés.

### 2-a DIFFÉRENTS TYPES DE ADC

#### 1-a- ADC d'une façon générale

Le schéma synoptique de la FIG 5-3 nous illustre un ADC d'une façon générale , ainsi la synchronisation de la conversion est assurée par un signal d'horloge d'entrée , l'unité de commande renferme les circuits logiques qui génèrent la séquence appropriée d'opérations par l'arrivée de la commande début qui lance le processus de conversion .[manuel][13]

FDC: Fin de conversion

BLPS: Bit le plus significatif

BLMS: Bit le moins significatif

#### 1-b- ADC par approximations successives (CAS)

Le montage de base de ce convertisseur est semblable à celui

de la FIG 5-3 . La logique de commande modifie le contenu du registre bit par bit jusqu'à ce que la donnée qui s'y trouve soit l'équivalent numérique du signal analogique  $V_{in}$ .

### 1-c- ADC éclair (Parallèle , Flash)

Il s'agit ici de l'ADC le plus rapide (temps de conversion ne demande que quelques dizaines de nano secondes), le schéma fonctionnel est illustré par la FIG 5-4

Dès que  $V_{in}$  est appliquée , les comparateurs comparent simultanément et en parallèle cette tension à des tensions successives de références , le nombre de comparateurs et de résistances utilisées est égal à  $2^{n-1}$  pour un ADC à N bits .

### -3 SPÉCIFICATIONS DES INTERFACES ANALOGIQUES

Parmi les spécifications que nous devons connaître sont:

\* **RÉSOLUTION (q)** : est défini comme étant le pas de progression du ADC.  $q = V_{réf} / 2^n$

ou n : nombre de bits de l'AD.

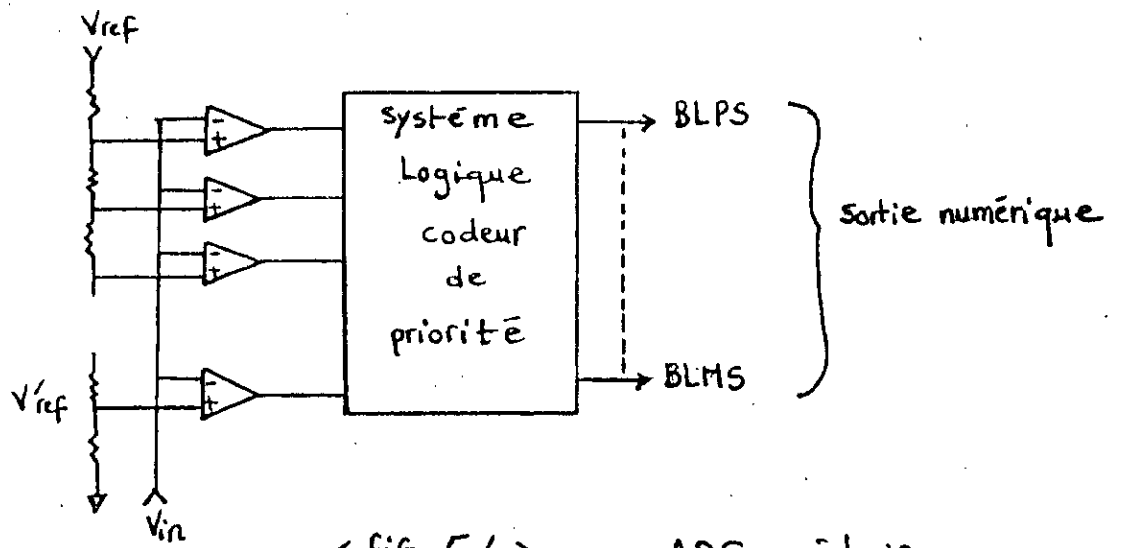
\* **PRÉCISION** : c'est la différence maximale entre la valeur lue et la valeur réelle.

\* **TENSION DE DÉCALAGE** : c'est la différence entre la tension nulle correspondante au code 00...0 est la tension de sortie réelle.

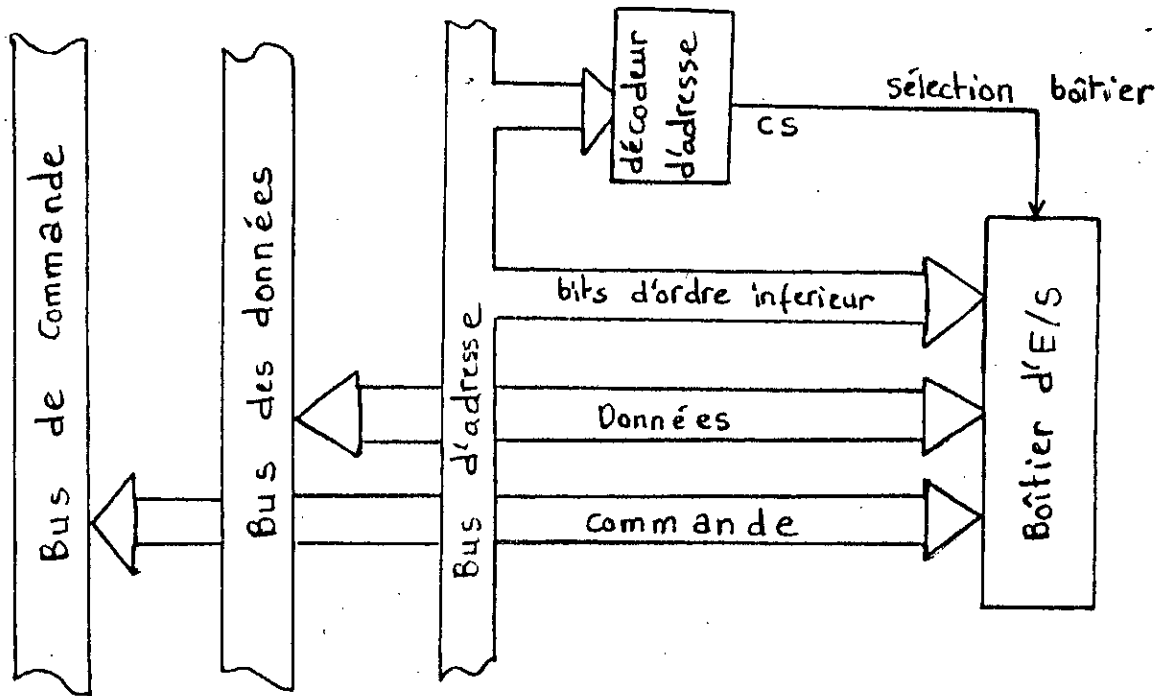
\* **LE TEMPS D'ÉTABLISSEMENT** : c'est le temps nécessaire à la sortie pour passer de la tension nulle à la tension pleine charge.

\* **L'ERREUR DE QUANTIFICATION** :  $e = q/2$

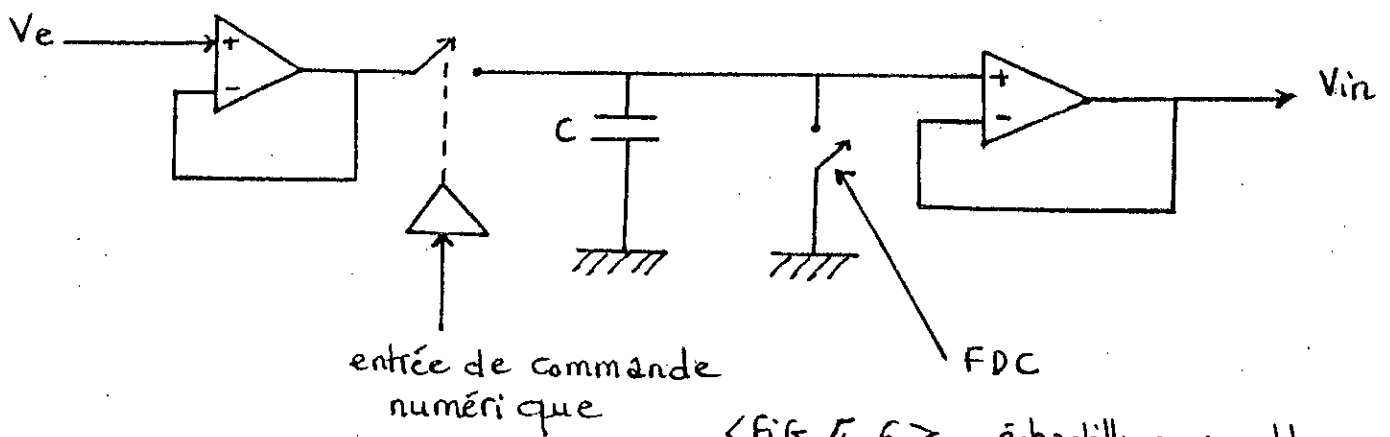
### -b INTERFACE SÉRIE :



< fig 5-4 > ADC éclair



< fig 5-5 > connexion microprocesseur - carte d'E/S



< fig 5-6 > échantillonneur - bloqueur

L'interface Série n'utilise qu'une seule ligne pour transmettre l'information , il existe deux espèces d'interface Série

- Asynchrone
- Synchrone

### -C INTERFACE PARLLÉLE

Ils sont très semblables au bus du microprocesseur. Les données sont transmises sur les lignes de données , et d'une façon générale une connexion d'E/S (entrée/sortie) à un microprocesseur est représenté parla FIG 5-5.

On cite comme exemple de dispositif d'E/S le PPI 8255 (Programmable Périphérique Interface).

#### 5-2-3 ÉCHANTILLONNAGE/BLOCAGE [6][16]

L'introduction d'un échantillonneur-bloqueur est indispensable dans un système où la commande est assurée par un CPU ,son schéma de base est illustré par la FIG 5-6.

Quand la commande numérique est activée elle permet la charge rapide du condensateur (C) , cette valeur est gardée pendant un certain temps , pour avoir un deuxième échantillon on décharge (C) par un court-circuit avec un commutateur électronique qui pourrait être commande par un signal numérique délivré par l'ordinateur.

#### 5-2-4 AMPLIFICATION DE PUISSANCE

Le signal délivré par le calculateur numérique est digital , sans puissance et pour attaquer l'organe de commande (moteur) la phase d'amplification est inévitable.

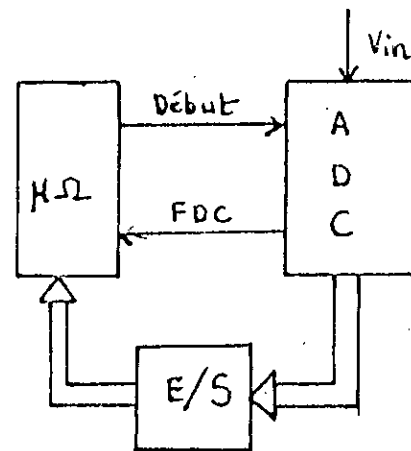
Généralement on utilise les convertisseurs d'amplification de courant.[5]

#### 5-2-5 ACQUISITION DES DONNÉES

La FIG 5-7 nous montre un microprocesseur relié à un ADC en

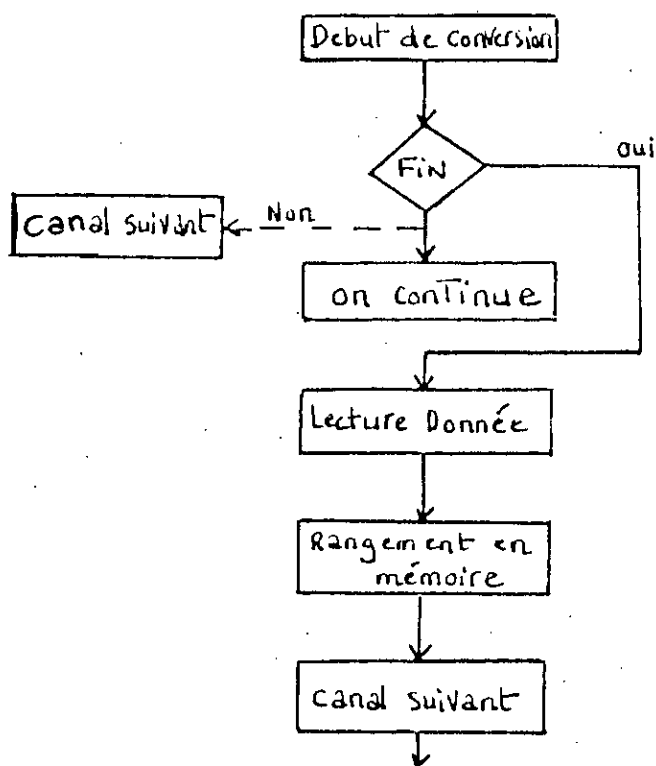
vue d'acquérir des données.

Ces connexion peuvent-être illustrées par l'organogramme suivant,  
représenté en figure (5-8) .

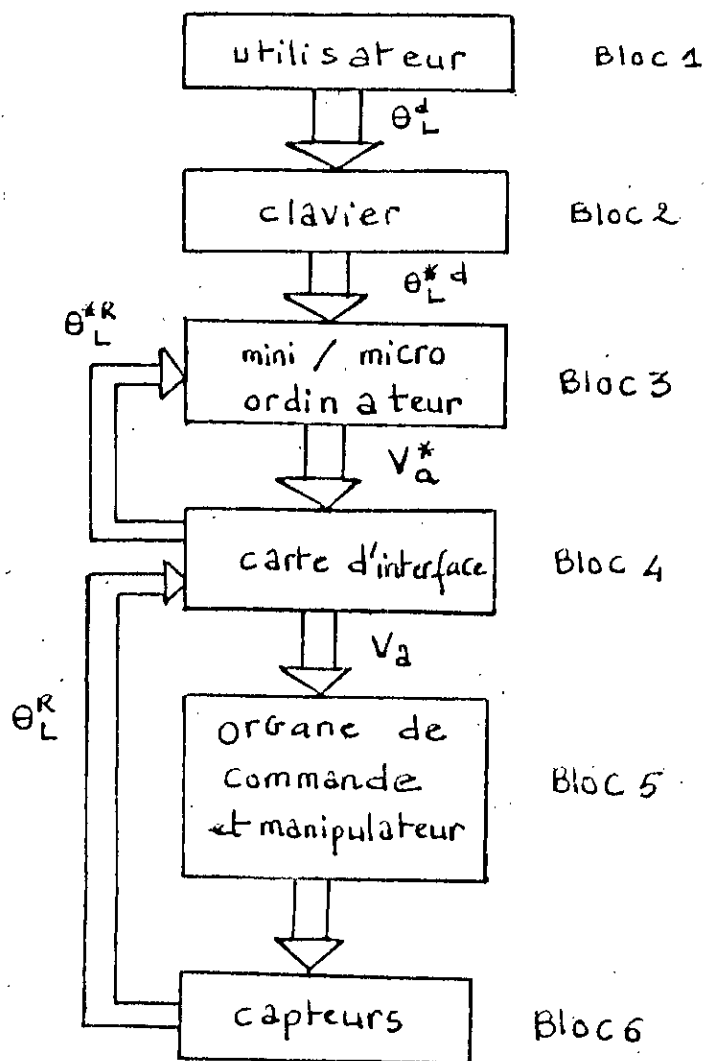


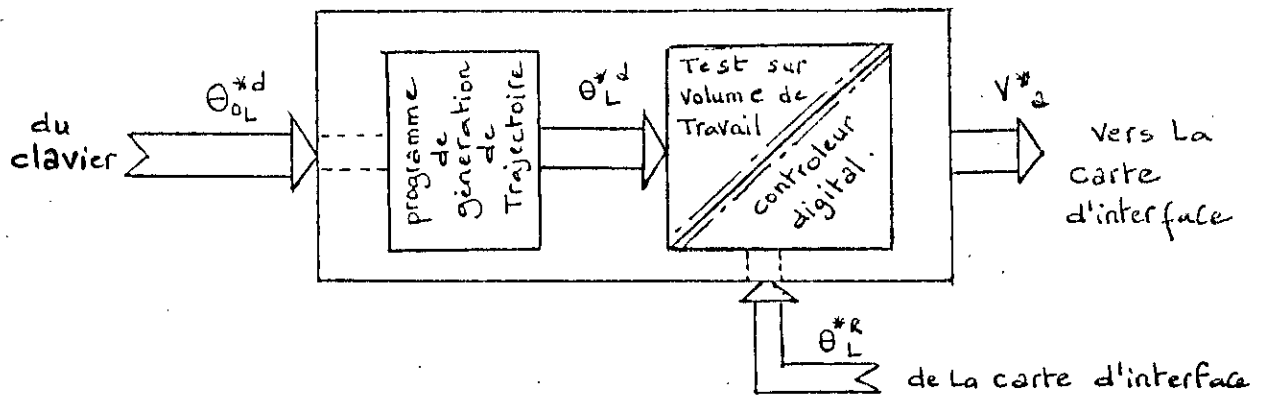
< FIG 5-7 >

connexion micro ordinateur - ADC.

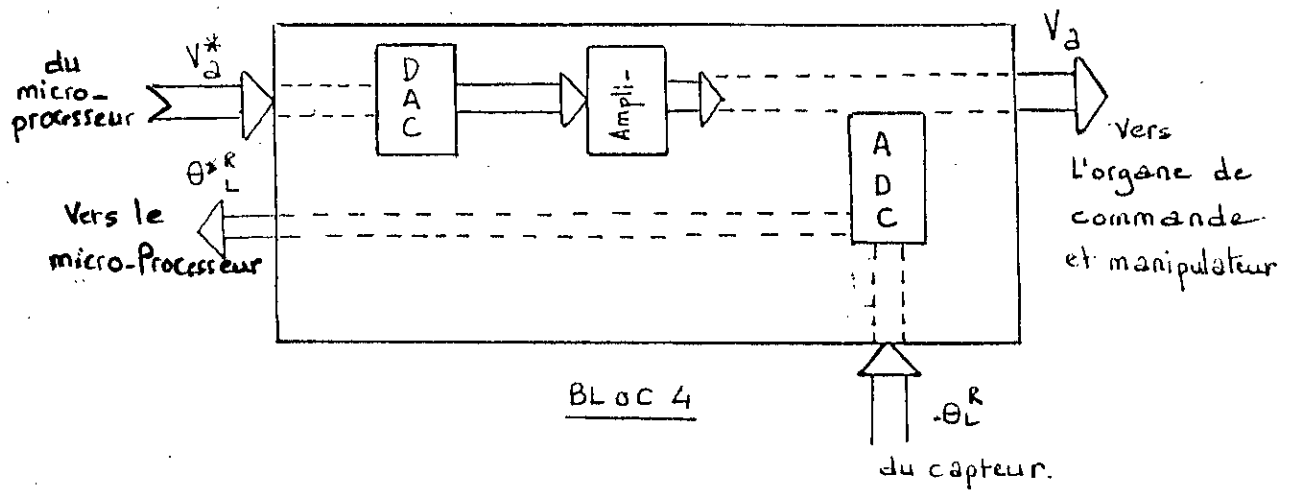


< FIG. 5-8 >

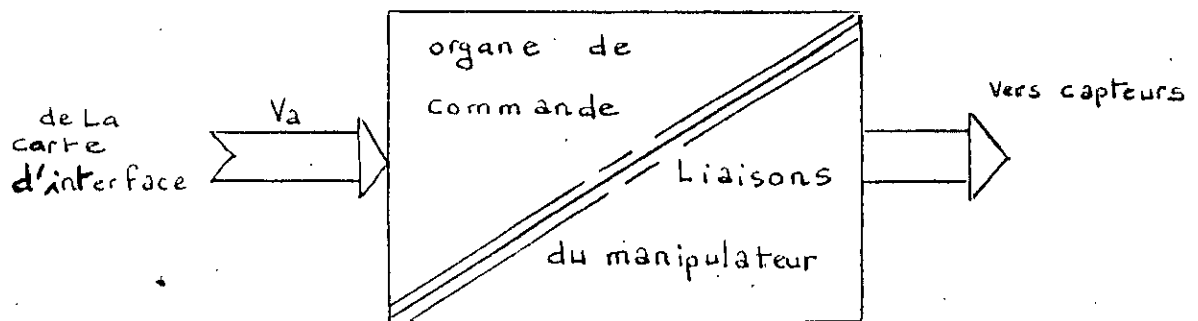




Bloc 3



BLOC 4



Bloc 5



CHAPITRE 6

COMMANDE DU BRAS DE ROBOT

## 6-1 PLANIFICATEUR DE TRAJECTOIRES

### 6-1-1 INTRODUCTION:

Le PLANIFICATEUR de trajectoire sert à déterminer, les séquences (position, vitesse, accélération) pour chaque articulation, compte tenu d'un certain nombre de contraintes sur le chemin, qui peuvent être des contraintes géométrique, dynamiques, ou d'environnement.

Il fournit au contrôleur les consignes (P.V.A) à suivre par le bras pendant la phase de commande.

La génération de trajectoire peut se faire comme suit:[17]

-Étude des trajectoires par simulation en tenant compte d'obstacle éventuels.

-Optimisation de ces trajectoire a l'aide de critère particulier lorsque la trajectoire est jugée satisfaisante, on réalise un maillage de données (P.V.A) en des points particuliers par des fonctions descriptives afin de compresser ces informations et réduire la place nécessaire pour le stockage. Ainsi la fonction obtenue est utilisée, pendant chaque intervalle de contrôle pour déterminer les consignes (P.V.A) des articulations commandés.

### - TYPES DE CONTRAINTES:[9](pp150)

Avant d'amorcer une séquence de mouvement, il est nécessaire de savoir, l'existence ou pas d'obstacles sur le chemin (contraints d'obstacles), ou aussi, l'organe préhenseur doit

évoluer à travers un chemin bien spécifié (contraintes de chemin) ces deux types de contraintes, mènent par combinaison à quatre modes de contrôle possibles comme ils sont indiqués au tableau ci-dessous.

-Le mode le plus simple est le cas où il n'y a pas de contraintes d'obstacle, ni de contraintes sur le chemin à suivre, dans ce cas le contrôle est un réglage de position simple.

-Le mode le plus compliqué est le cas qui regroupe les deux contraintes, pour ce cas le contrôle se fait par deux phases:

-Une phase de planification du chemin, qui répond aux contraintes d'obstacles (collision, libre).

-Une phase de contrôle, réalisée par le contrôleur, qui reçoit les consignes du PLANIFICATEUR établit en phase 1 et les comparées avec les informations issues des capteurs pour élaborer la commande qui assurera une poursuite ferme du chemin spécifié.

		CONTRAINTE D'OBSTACLE	
		OUI	NON
Contrainte du chemin	Oui	OFF-LINE : -collision, -libre, -planification de chemin ON-LINE : poursuite de chemin	OFF-LINE: planification du chemin. ON-LINE: poursuite de chemin
	Non	contrôle de position ON-LINE détection et évitement d'obstacle	contrôle de position

-Dans notre cas les contraintes d'obstacles qui rentrent dans les limitations imposées par l'environnement du robot ne seront pas pris en considération. On tient compte seulement des contraintes imposées sur les variables articulaires, qui sont en générale:

-Des spécifications de configurations (par exemple : configuration finale).

-Des spécifications de profils de vitesse, accélération pour chaque articulation.

-On peut ajouter des contraintes qui tiennent compte des caractéristiques des moteurs, par exemple: Les couples limites à ne pas dépasser sur chaque trajectoire, et les temps s'écoulant entre chaque configuration (temps d'approche, ou de dégagement).

-Pour asservir le manipulateur, il est acquis que sa configuration aux positions initiale et finale, doit être spécifiée dans le cas de saisie d'objet, PAUL a montré [9] (pp154) que les considérations suivantes sont intéressantes:

1) Le mouvement du préhenseur doit être dirigé selon le vecteur normal sortant de la surface de l'objet.

2) Si la position de dégagement (lift\_off point) se trouve le long du vecteur passant par la position initiale et qui est normale à la surface de l'objet, et si on fait de sorte que l'origine du préhenseur passe par cette position, alors on aura un départ de mouvement admissible. On peut contrôler la vitesse du dégagement en spécifiant le temps entre position initiale

et lift off.

3) Pour le point d'approche (set-down point), il doit être sur la normale sortante de la surface, de la même façon le préhenseur doit passer par ce point pour descendre vers la position finale.

4) Donc pour la trajectoire de chaque articulation on a quatre points spécifiés:

- Point initiale.

- Point lift-off.
- Point set-down.
- Point finale.

Une fois que ses quatre points sont fixés pour chaque trajectoire (chaque articulation possède sa trajectoire). On doit trouver la fonction qui interpole ces quatres points : cette fonction descriptive:

-Doit être calculable d'une façon itératives (pour éviter un temps de calcul long).

-Elle doit assurer la continuité des positions, vitesse, et accélération.

Le plus souvent des polynômes de degré 3 où 4 sont utilisés pour décrire chaque segment de trajectoire.

#### 6-1-2 METHODE 4-3-4:

Chaque articulation possède les trois segments de trajectoire suivant:

-1) Le premier segment est décrit par un polynôme de degré 4 qui spécifie le mouvement du point initiale jusqu'au lift-off.

-2) Le second est décrit par un polynôme de degré 3 qui spécifie le mouvement entre le lift-off et le set-down.

-3) Et enfin un de degré 4 pour le set-down et le point finale.

Donc:

$t$  : temps normalisé,  $t=[0,1]$ .

$\tau$  : temps réel en second.

$\tau_i$  : temps réel à la fin du  $i^{ème}$  segment.

$t_i = \tau - \tau_{i-1}$  : temps réel nécessaire pour la traversé du  $i^{ème}$  segment, on a:

Les conditions aux limites à satisfaire sont:

-Position initiale :  $\theta_0 = \theta(\tau_i)$ .

-Vitesse initiale :  $v_0$  : normalement nulle.

$$h_1(t) = a_{14}t^4 + a_{13}t^3 + a_{12}t^2 + a_{11}t + a_{10} \quad \text{pour le 1<sup>er</sup> segment}$$

$$h_2(t) = a_{23}t^3 + a_{22}t^2 + a_{21}t + a_{20} \quad \text{pour le 2<sup>ème</sup> segment}$$

$$h_n(t) = a_{n4}t^4 + a_{n3}t^3 + a_{n2}t^2 + a_{n1}t + a_{n0} \quad \text{pour le 3<sup>ème</sup> segment}$$

- Accélération initiale :  $a_0$  : normalement nulle.
- Position lift-off :  $\theta_1 = \theta(t_1^-)$ .
- Continuité en position à  $t_1$  :  $\theta(t_1^-) = \theta(t_1^+)$
- Continuité en vitesse à  $t_1$  :  $V(t_1^-) = V(t_1^+)$
- Continuité en accélération à  $t_1$  :  $a(t_1^-) = a(t_1^+)$
- Position set-down :  $\theta_2 = \theta(t_2^-)$ .
- Continuité en position, vitesse, accélération à  $t_2$  :
  - $\theta(t_2^-) = \theta(t_2^+)$
  - $V(t_2^-) = V(t_2^+)$
  - $a(t_2^-) = a(t_2^+)$
- Position finale :  $\theta_f = \theta(t_f)$ .
- Vitesse finale :  $v_f$  normalement nulle.
- Accélération finale :  $a_f$  normalement nulle.

-On résolvant avec ces conditions, on arrive à extraire l'expression des trois polynômes:

$$h_1(t) = \left( \delta_1 - v_0 t_1 - \frac{a_0 t_1^2}{2} - \sigma \right) t^4 + \sigma t^3 + \left( \frac{a_0 t_1^2}{2} \right) t^2 + (v_0 t_1) t + \theta_0.$$

$$v_1(t) = \frac{\dot{h}_1(t)}{t_1} = \frac{4\delta_1}{t_1} - 3v_0 - a_0 t_1 - \frac{\sigma}{t_1}.$$

$$a_1 = \frac{\ddot{h}_1(t)}{t_1^2} = \frac{12\delta_1}{t_1^2} - \frac{12v_0}{t_1} - 5a_0 - \frac{6\sigma}{t_1^2}.$$

$$h_2(t) = \left( \delta_2 - V_1 t_2 - \frac{a_1 t_2^2}{2} \right) t_1^3 + \left( \frac{a_1 t_2^2}{2} \right) t^2 + (V_1 t_2) t + \theta_1.$$

$$v_2(t) = \frac{\dot{h}_2(1)}{t_2} = \frac{3\delta_2}{t_2} - 2V_1 - \frac{a_1 t_2}{2}.$$

$$a_2 = \frac{\ddot{h}_2(1)}{t_2^2} = \frac{6\delta_2}{t_2^2} - \frac{6V_1}{t_2} - 2a_1 t_2.$$

$$h_n(t) = \left( 9\delta_n - 4V_2 t_n - \frac{a_2 t_n^2}{2} - 5V_f t_n + \frac{a_f t_n^2}{2} \right) t^4$$

$$+ \left( -8\delta_n + 5V_f t_n - \frac{a_f t_n^2}{2} + 3V_2 t_n \right) t^3$$

$$+ \left( \frac{a_2 t_n^2}{2} \right) t^2 + (V_2 t_n) t + \theta_2.$$

$$\delta_1 = \theta_1 - \theta_0, \quad \delta_2 = \theta_2 - \theta_1, \quad \delta_n = \theta_f - \theta_2$$

$$\sigma = \frac{f}{g} \quad \text{telque :}$$

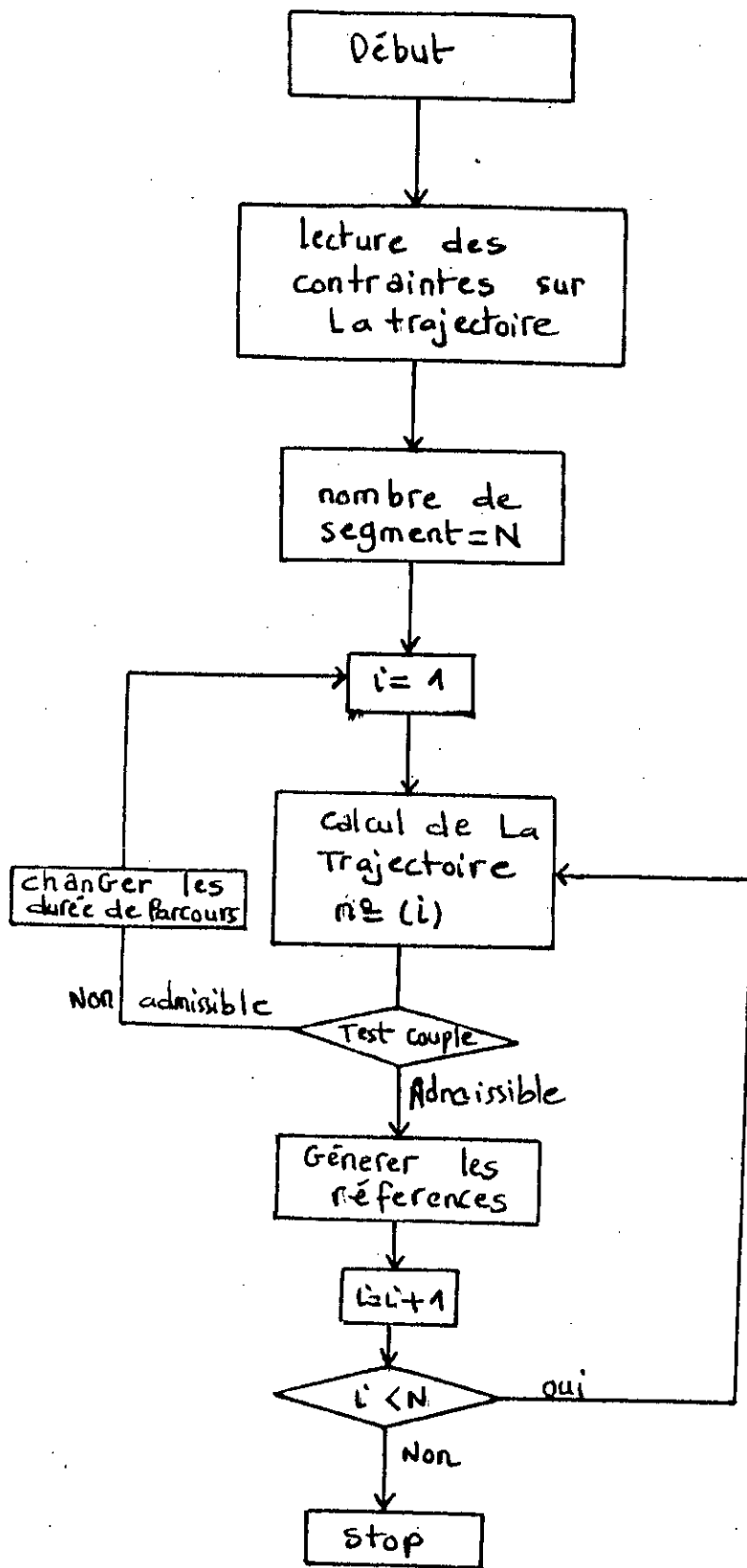
$$f = 2\delta_1 \left( 4 + \frac{2t_n}{t_2} + \frac{2t_n}{t_1} + \frac{3t_2}{t_1} \right) - \frac{\delta_2 t_1}{t_2} \left( 3 + \frac{t_n}{t_2} \right)$$

$$+ \frac{2\delta_n t_1}{t_n} - v_0 t_1 \left( 6 + \frac{6t_2}{t_1} + \frac{4t_n}{t_1} + \frac{3t_n}{t_2} \right)$$

$$- v_f t_1 - a_0 t_1 t_n \left( \frac{5}{3} + \frac{t_1}{t_2} + \frac{2t_1}{t_n} + \frac{5t_2}{2t_n} \right) + a_f t_1 t_n.$$

$$g = \frac{t_n}{t_2} + \frac{2t_n}{t_1} + 2 + \frac{3t_2}{t_1}.$$

Donc à partir de ces relations, on construit un programme FIG (6-1-1) de planification de trajectoire, qui génère à une période  $\Delta t$  supérieur à la fois à la constante de temps du système et à la fréquence d'échantillonnage au niveau des ADC, les positions, vitesses, et accélérations désirées des trois articulations. On a par la même occasion, vérifiée les contraintes de couple sur les moteurs, en injectant les coordonnées généralisés ainsi que leurs premières et secondes dérivées dans les



< fig 6-1-1 >

planificateur de trajectoire



équations d'EULER-LARANGE pour comparer le couple obtenue avec le couple maximale, si la contrainte n'est pas vérifié, on diminue la vitesse et l'accélération du mouvement par élongation de  $t_i$ .

D'autres approches prennent la considération sur le temps globale de parcours  $T = \sum t_i$  en ajoutant une contrainte de minimisation de temps [49].

### 6-2-1 INTRODUCTION :

La partie la plus intéressante dans la conception d'un bras de robot, est sa commande, il existe plusieurs méthodes d'asservir un manipulateur. Vu sa non linéarité, on s'est intéressé à deux méthodes qui sont :

1- Découplage du système en utilisant un PD à haute fréquence.

2- Prendre le système réel en utilisant un modèle de référence (MRAC) (Modèle Référence Adaptative Contrôle).

### 6-2-2 PD A HAUTE FRÉQUENCE :

a-Mise sous forme de schéma bloc:

Le couple de la charge est :  
et de (3-31), (3-20) on a :

$$\tau_{L_i} = f_{L_i} \dot{\theta}_{L_i} + J_{L_i} \ddot{\theta}_{L_i} + \Gamma_{L_i} \quad (6-1)$$

$$\tau_{L_i}^* = \frac{1}{\eta_i} ( f_{L_i} \dot{\theta}_{L_i} + J_{L_i} \ddot{\theta}_{L_i} + \Gamma_{L_i} ) \quad (6-2)$$

$\tau_{L_i}$  : couple de charge / à l'arbre de la charge

$\Gamma_{L_i}$  : (couple de coriolis + couple centrifuge + couple gravitationnel) / à l'arbre de la charge.

De (3-19), (3-20), (6-2-2) on a :

$$\tau_i = \frac{1}{\eta_i} ( f_{\theta q_i} \dot{\theta}_{L_i} + J_{\theta q_i} \ddot{\theta}_{L_i} + \Gamma_{L_i} )$$

$$J_{\theta q_i} = J_{L_i} + \eta^2 \cdot J_{m_i} \quad (6-3)$$

$$f_{\theta q_i} = f_{L_i} + \eta^2 f_{m_i}$$

$f_{L_i}$  : coefficient de frottement visqueux de la charge / à l'arbre de la charge.

On applique la transformée de Laplace l'équation (6-2-3) devient

$$\tau_i(s) = \frac{1}{\eta_i} ( f_{\theta q_i} s \theta_{L_i}(s) + J_{\theta q_i} s^2 \theta_{L_i}(s) + \Gamma_{L_i}(s) ) \quad (6-4)$$

L'équation (3-23) devient :

$$\tau_i(s) = K_{a_i} \cdot I_{a_i}(s) \quad (6-5)$$

L'équation (3-21) devient :

$$V_{a_i}(s) = K_{a_i} \cdot I_{a_i}(s) + L_{a_i} s I_{a_i}(s) + e_{b_i}(s) \quad (6-6)$$

L'équation (3-22) devient :

$$e_{b_i}(s) = K_{b_i} \eta_i \theta_{L_i}(s) \quad (6-7)$$

De (6-2-4), (6-2-5), (6-2-6) et (6-2-7) on a le schéma (fig 6-2-1). La fonction de transfert du système par rapport à la tension  $V_{a_i}$  est :

$$G_{V_{a_i}}(s) = \frac{\eta_i K_{a_i}}{s [ (R_{a_i} + L_{a_i} s) (f_{eq_i} + J_{eq_i} s) + \eta_i^2 K_{a_i} K_{b_i} ]} \quad (6-8)$$

La réponse du système à la figure (6-2-5). La fonction de transfert du système par rapport au couple résistant  $\Gamma_{L_i}$  est :

$$G_{\Gamma_i}(s) = \frac{R_{a_i} + L_{a_i} s}{s [ (R_{a_i} + L_{a_i} s) (f_{eq_i} + J_{eq_i} s) + \eta_i^2 K_{a_i} K_{b_i} ]} \quad (6-9)$$

La réponse du système est donnée à la figure (6-2-6). Vu qu'on a affaire à un système fortement non linéaire et couplé, alors les informations doivent se traiter en même temps et par le même calculateur si on a affaire à un système centralisé, ou par différents calculateurs si on a affaire à un système décentralisé.

D'une façon générale, pour asservir un tel système on est amené à la représentation fig (6-2-3). Vu le choix du régulateur standard PD (R=PD), la fonction de transfert du régulateur:

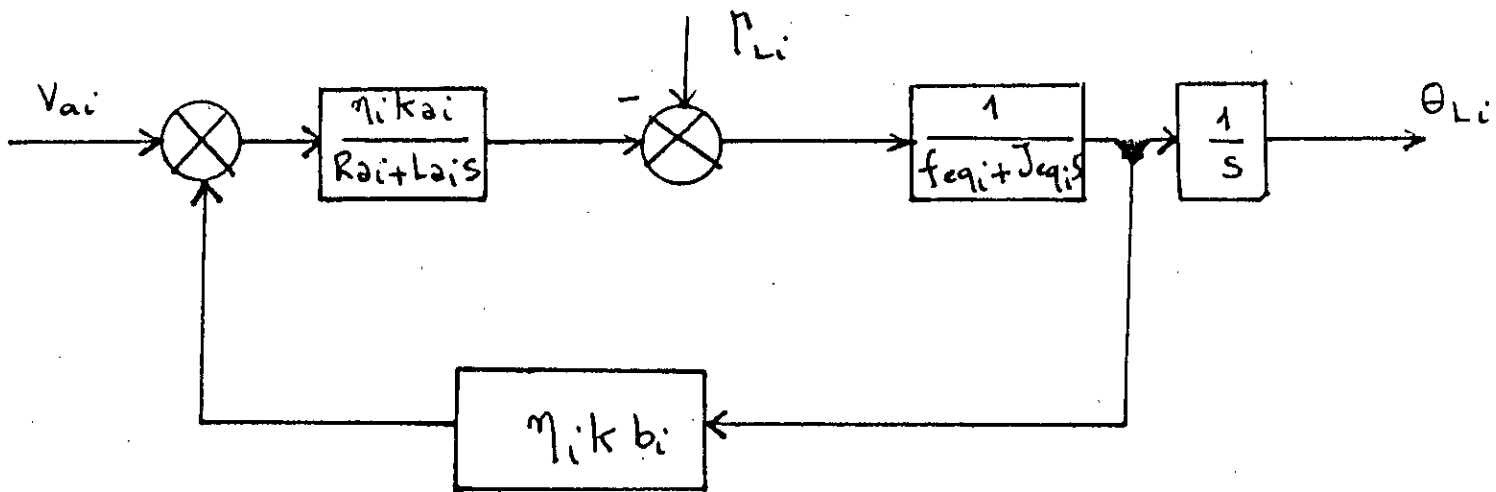
$$D(s) = K_p + K_v s$$

et pour discrétiser le système on a la représentation fig( 6-2-4):

où (\*) désigne les valeurs discrètes.

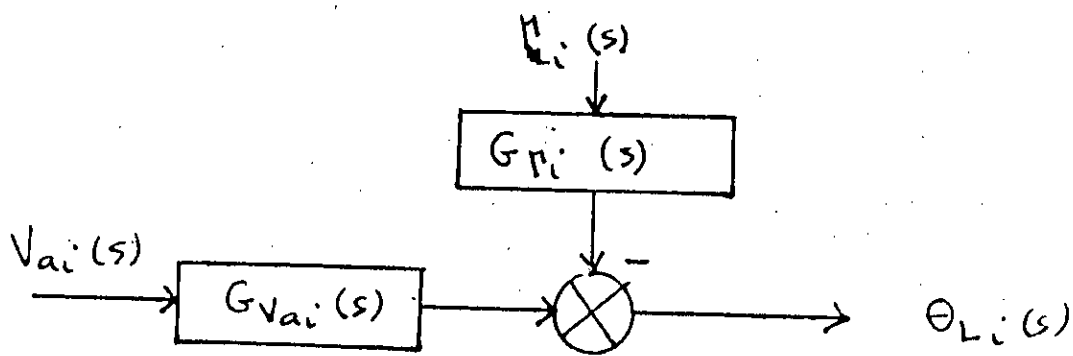
$$D(s) = \frac{V_a(s)}{e(s)} = K_p + K_d s \quad (6-2-10)$$

$$V_{a_i}^*(k) = K_p e^*(k) + \frac{K_d}{T_e} [ e^*(k) - e^*(k-1) ]$$



< FIG 6-2-1 >

Diagramme fonctionnel du système = moteur - Articulation.



< FIG 6-2-2 >

Fonctions de transfert = tension / position  
couple de perturbation / position.

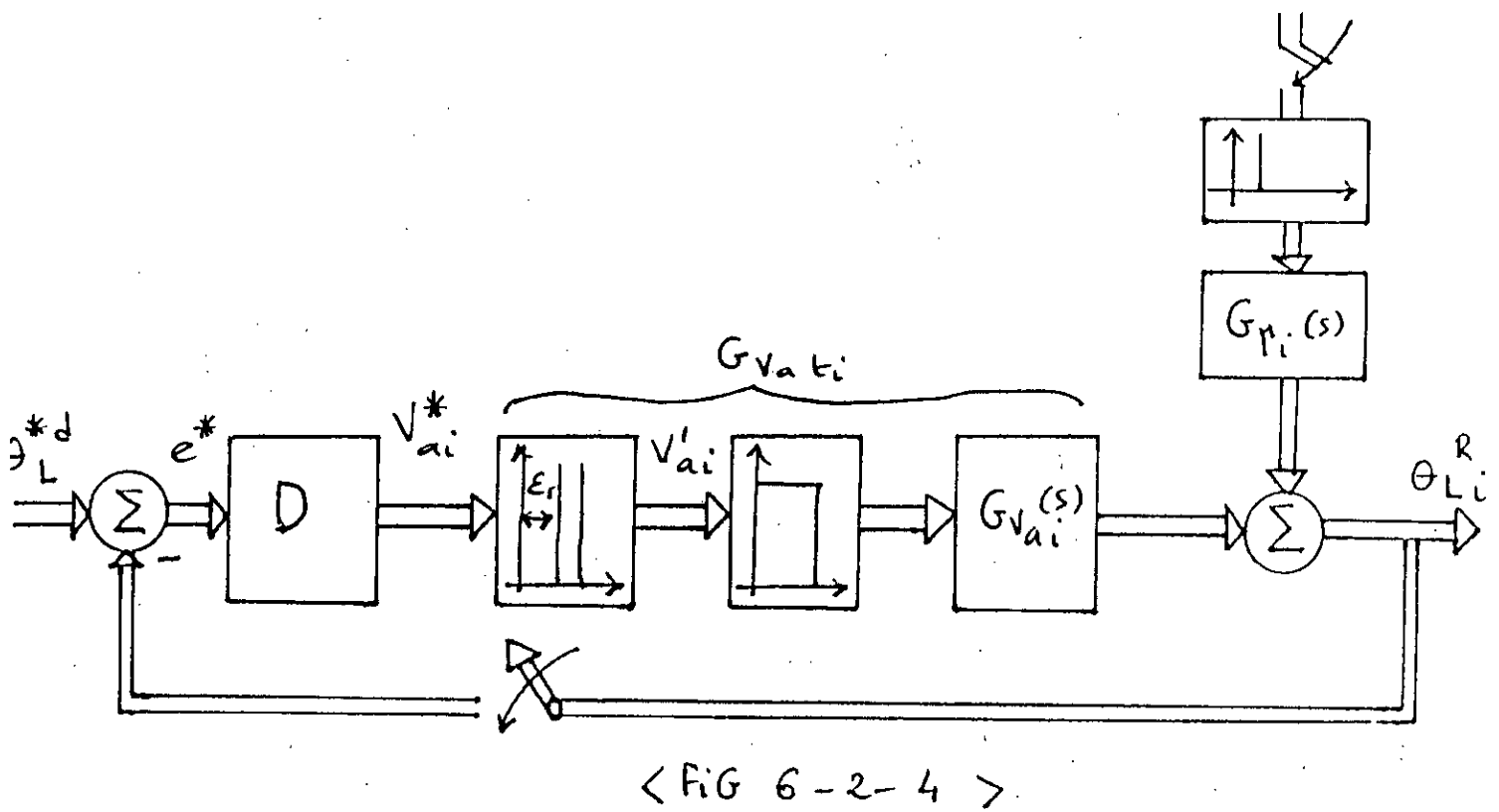
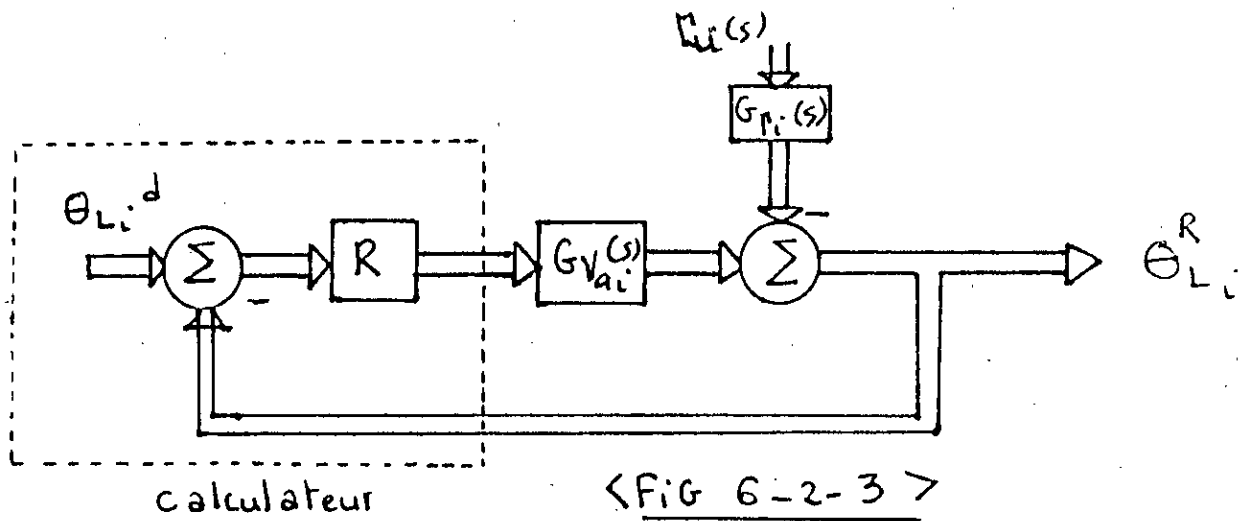


schéma de réglage par calculateur

en appliquant la transformée en z on aura :

$$V_{a_i}(z) = \left( K_p + \frac{K_d}{T_e} \left( \frac{z-1}{z} \right) \right) e(z) \quad (6-2-11)$$

b- ALGORITHME DE RÉGLAGE:

$$K_{PD} = K_p + \frac{K_d}{T_e} ;$$

$$e(-1) = 0 ;$$

$$V_{a_i} = K_{PD} - \frac{K_d}{T_e} e(-1) ;$$

$$e = \theta_L^{*d} - \theta_L^{*R} ;$$

$$e(-1) = e ;$$

sortie  $V_{a_i}$  ;

$$D(z) = b_1 - b_0 z^{-1} ;$$

$$b_1 = K_p + \frac{K_d}{T_e} ;$$

$$b_0 = \frac{K_d}{T_e} ;$$

et on a :

$$\frac{t}{T_e} = k+e$$

c- CAHIER DE CHARGES :

La fonction de transfert de chaque liaison doit être de la forme :

$$H_d(s) = \frac{K}{1 + ts} \quad (6-2-16)$$

$$H_d(z, e) = \left(\frac{K}{T}\right) \cdot \frac{e^{-\frac{T_0}{T}t} \cdot z}{z - e^{-\frac{T_0}{T}}} \quad (6-2-17)$$

$$H_d(z, 0) = \left(\frac{K}{T}\right) \cdot \frac{z}{z - e^{-\frac{T_0}{T}}} \quad (6-2-18)$$

$$H_R(z, 0) = \frac{G_{V_{act}}(z, 0) \cdot D(z)}{1 + G_{V_{act}}(z, 0) \cdot D(z)} \quad (6-2-19)$$

$H_R(z, 0)$  : La transformation en  $z$  de la fonction de transfert du système en boucle fermée. Notre but est d'égaliser  $H_d$  à  $H_R$ .

d- CHOIX DE LA PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE :

Des réflexions à faire pour trouver une valeur adéquate de la période d'échantillonnage, son choix est basé sur :

- Le comportement dynamique du système .
- Le comportement dynamique du circuit de réglage.

D'après le théorème de SHANNON la pulsation d'échantillonnage doit être tel que :

$\omega_e \geq 2\omega_0$  où  $\omega_0$  est la plus grande pulsation du système échantillonné. Et après avoir déterminé une période d'échantillonnage on évalue la qualité du réglage, si elle répond aux performances demandées, sinon on recalcule cette dernière.

f-DIMENSIONNEMENT DU RÉGULATEUR:

$$G_0(z, 0) = G_{var}(z, 0)D(z) \quad (6-2-20)$$

$G_0(z, 0)$  : Fonction de transfert en boucle ouverte du système corrigé.

$$G_{var}(z, 0) = \frac{Q(z, 0)}{(z-1)P(z)}$$

$$D(z) = \frac{S(z)}{R(z)}$$

Le choix du régulateur a été fait de telle façon à avoir une réponse semblable à celle d'un système du premier ordre d'où on a:

Après un choix adéquat de constante du régulateur, la réponse à un échelon, l'erreur par rapport à la consigne, et l'erreur par rapport au couple sont données respectivement par les figures (6-2-7), (6-2-8), (6-2-9).

Les coefficients du régulateur sont donnés par les relations suivantes:

$$K_d = \hat{K}T_e \quad (6-2-21)$$

$$K_p = K - \frac{K_d}{T_e} \quad (6-2-22)$$

$$b_1 = K \quad (6-2-23)$$

$$b_0 = \hat{K} \quad (6-2-24)$$

$$\hat{K} = z_p K \quad (6-2-25)$$

$z_p$  : est le pôle dominant.



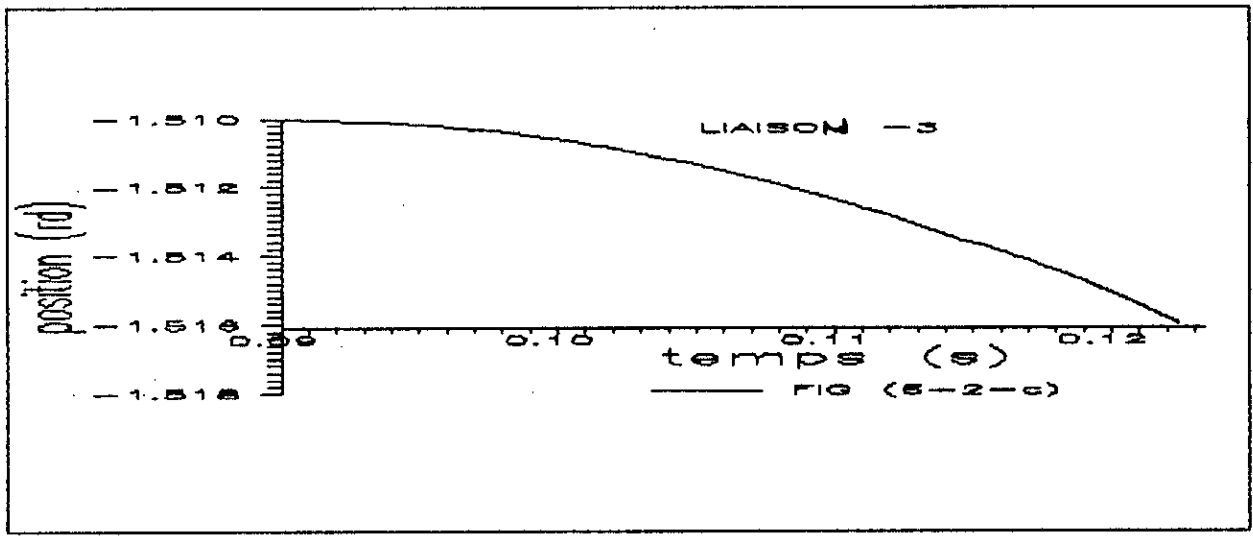
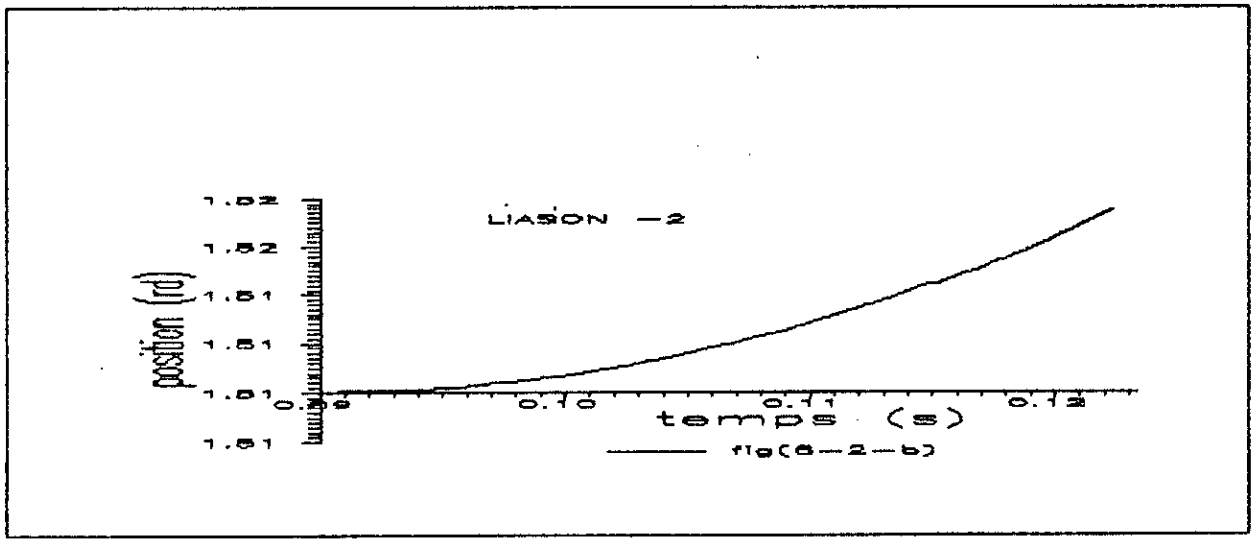
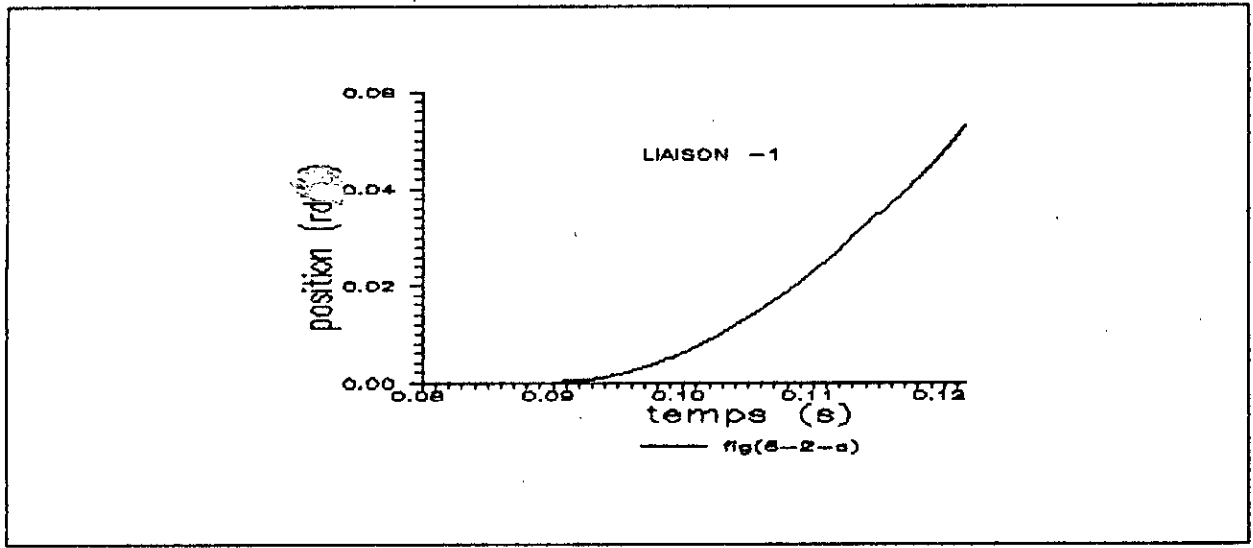
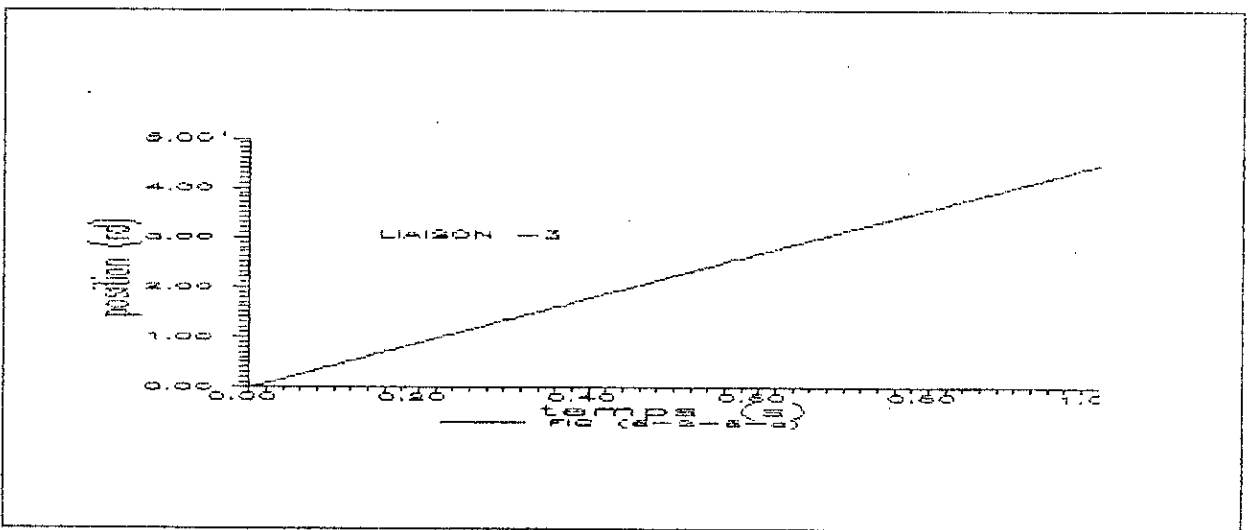
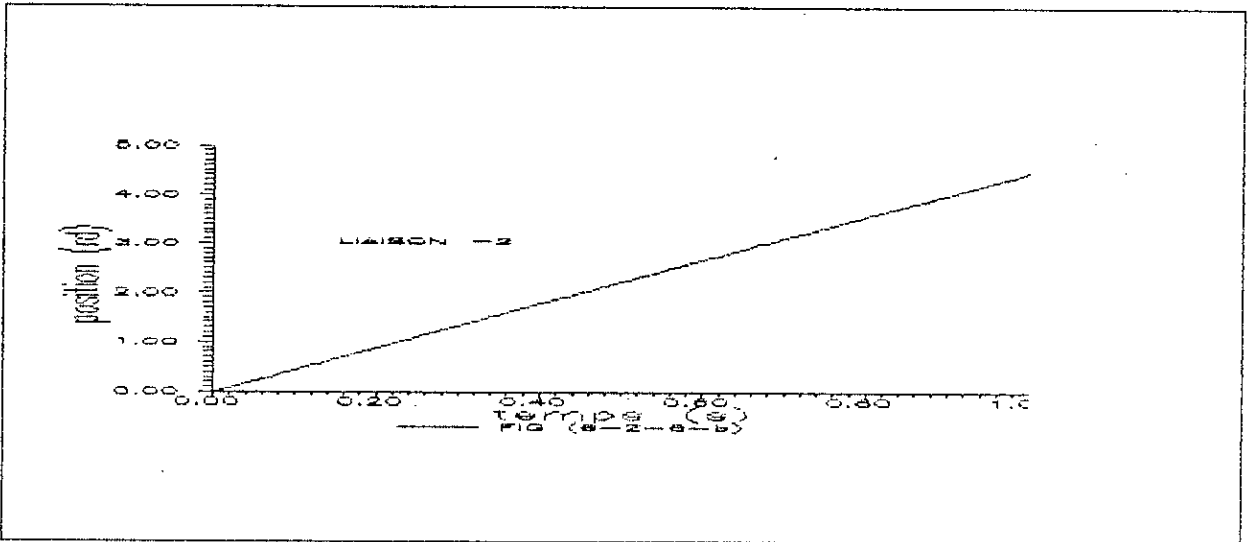
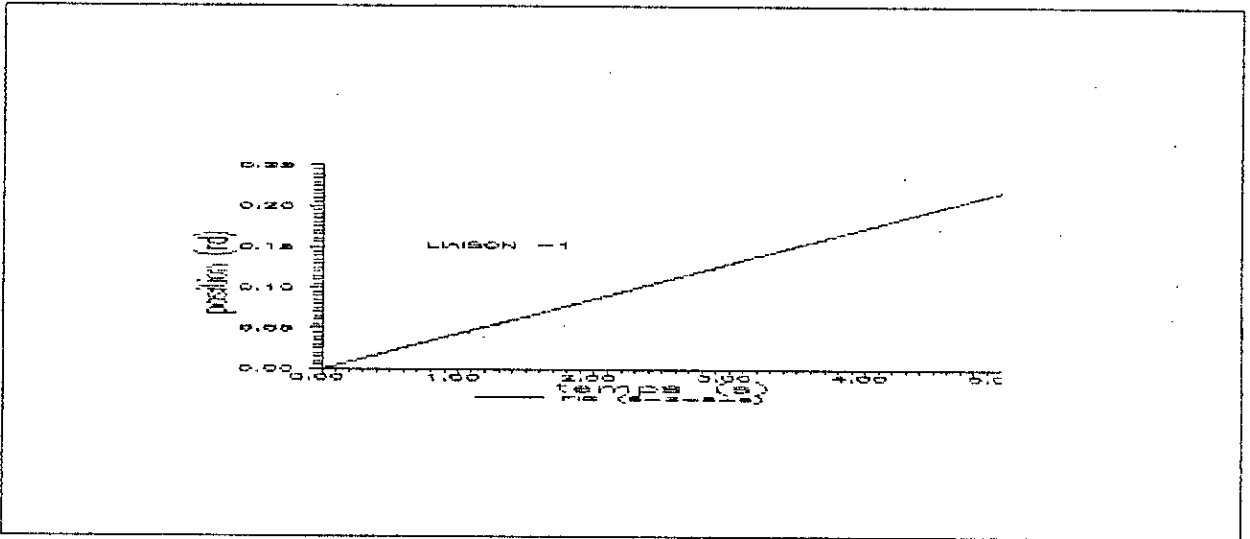
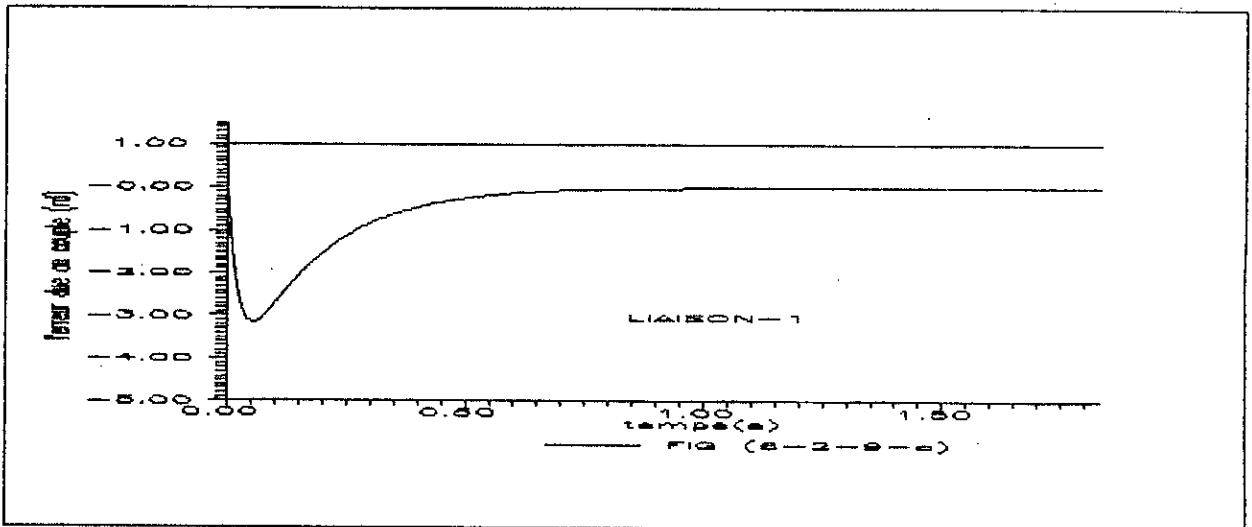
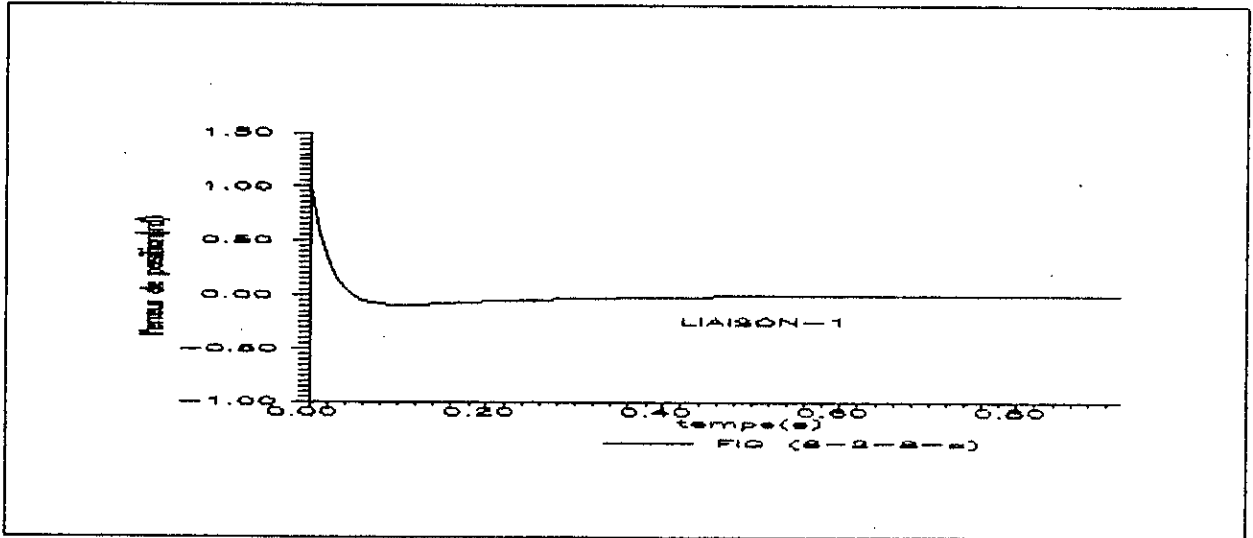
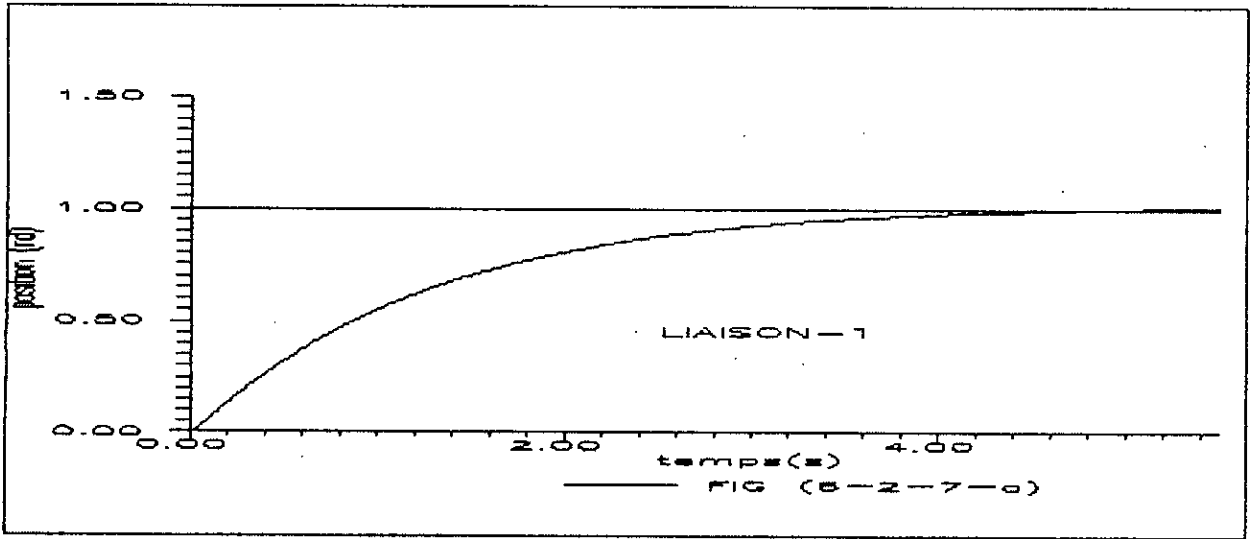
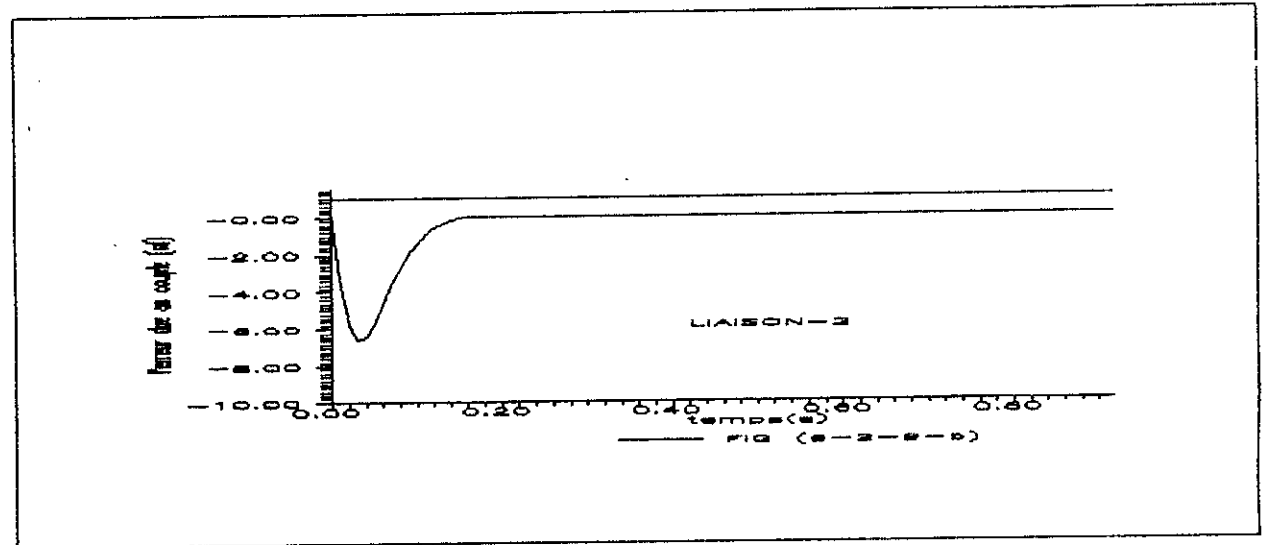
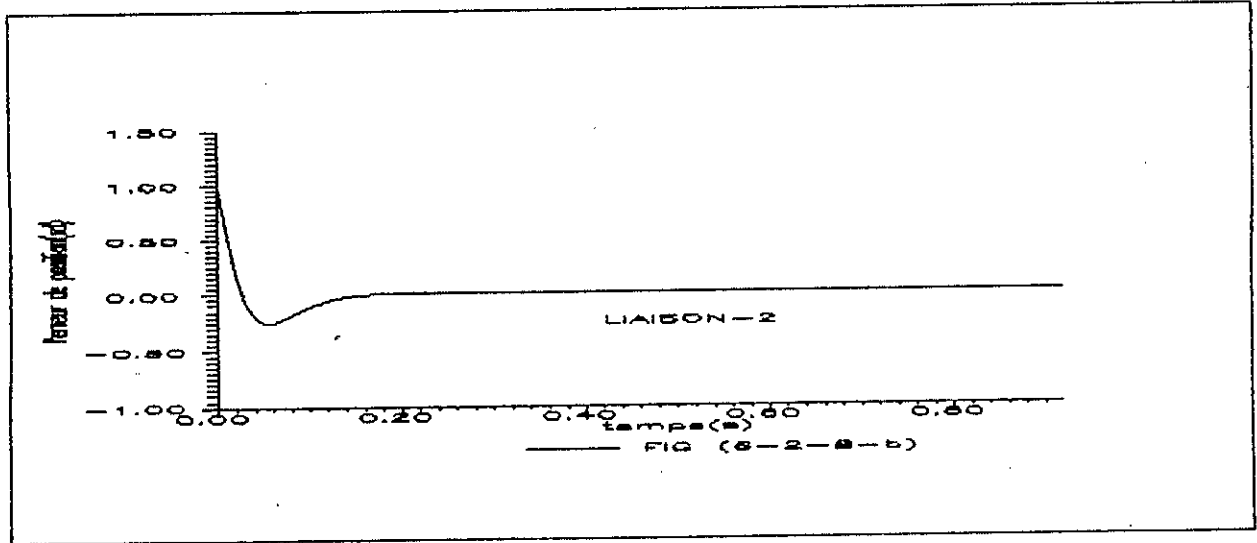
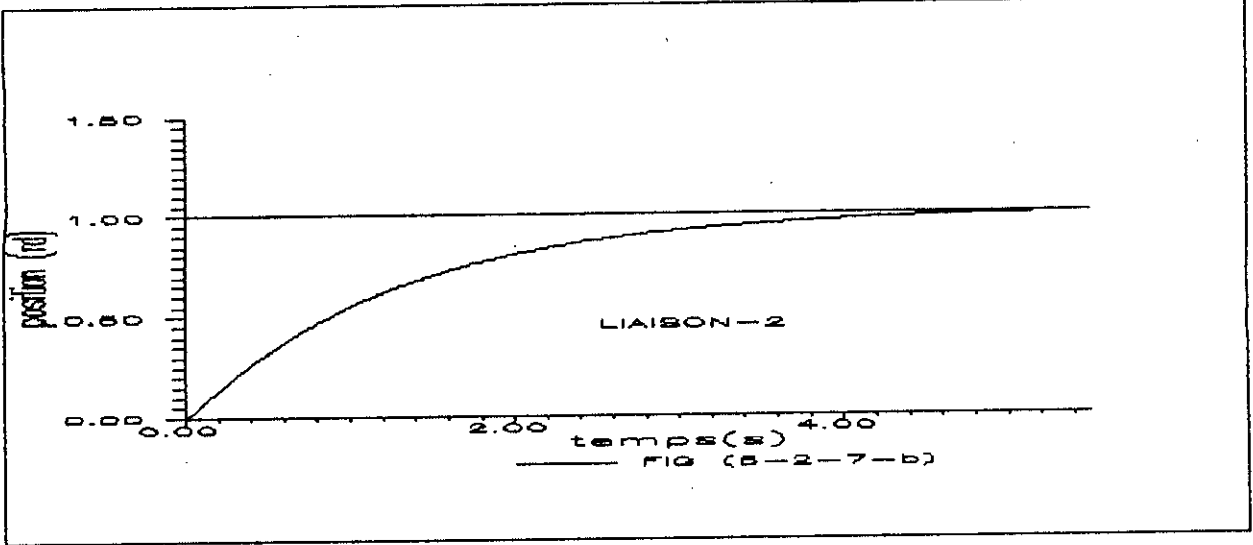
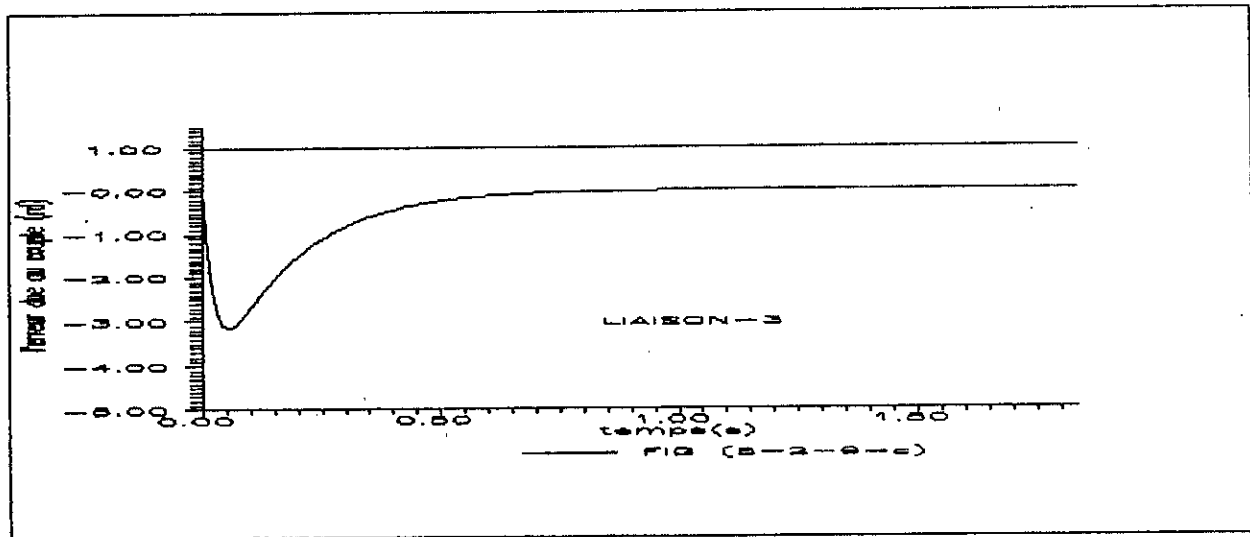
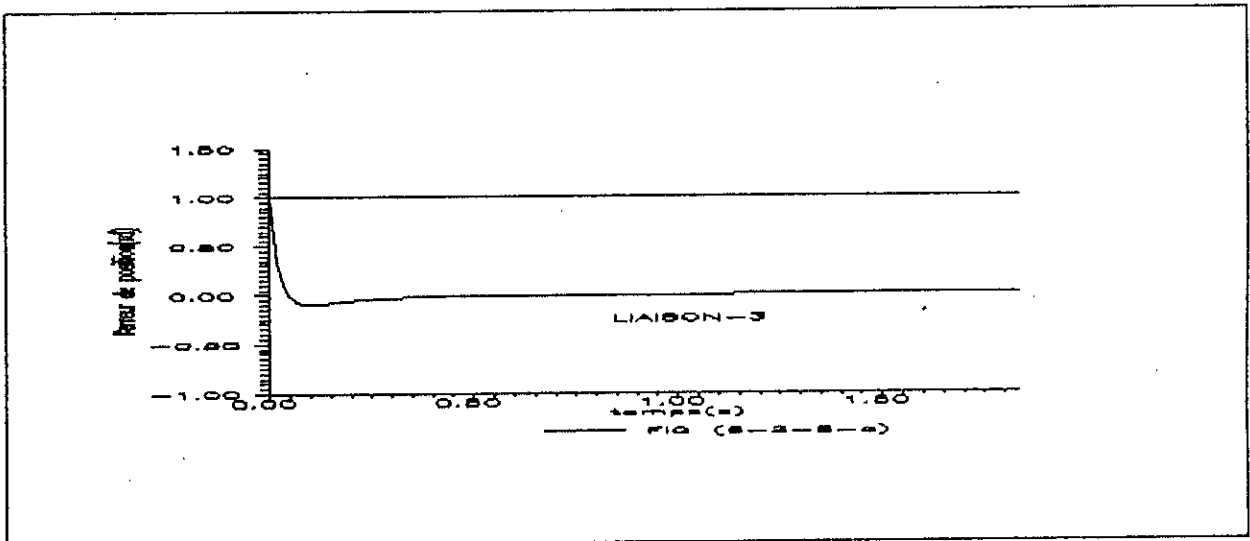
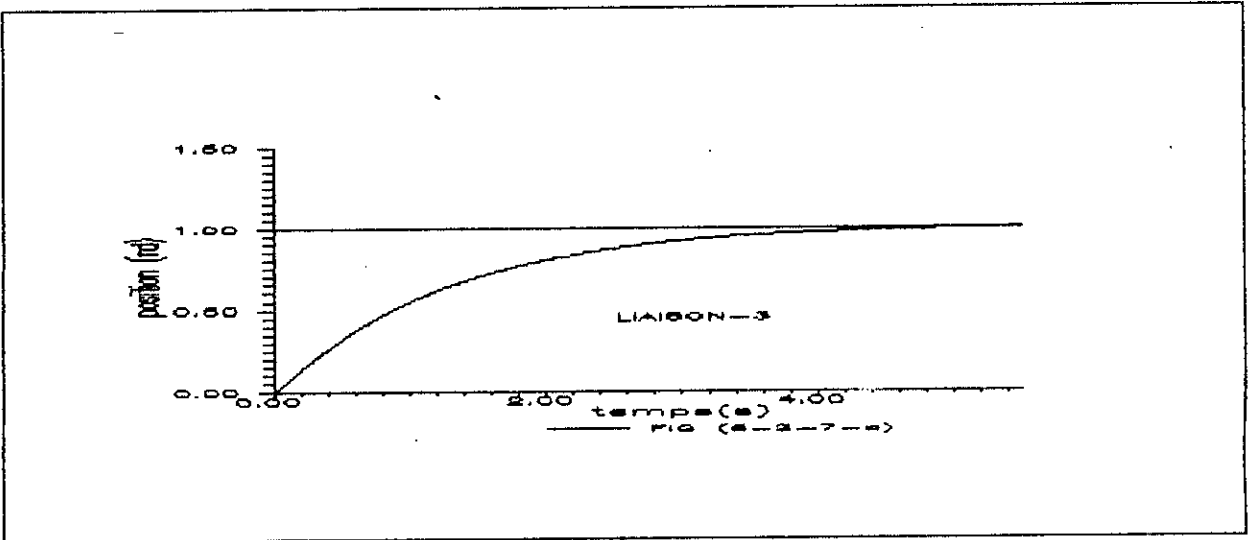


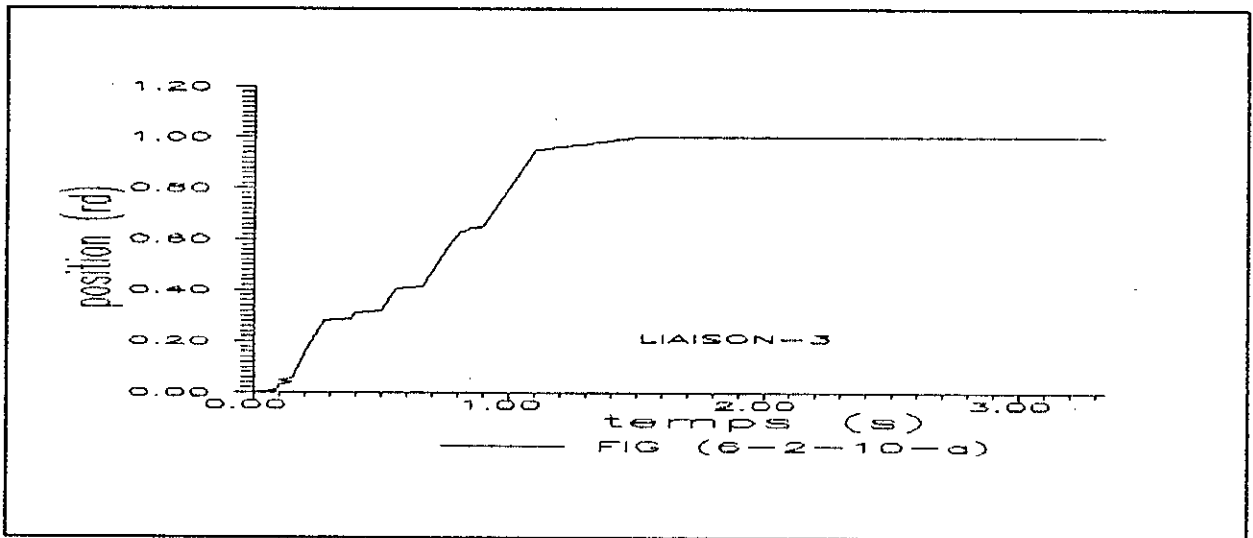
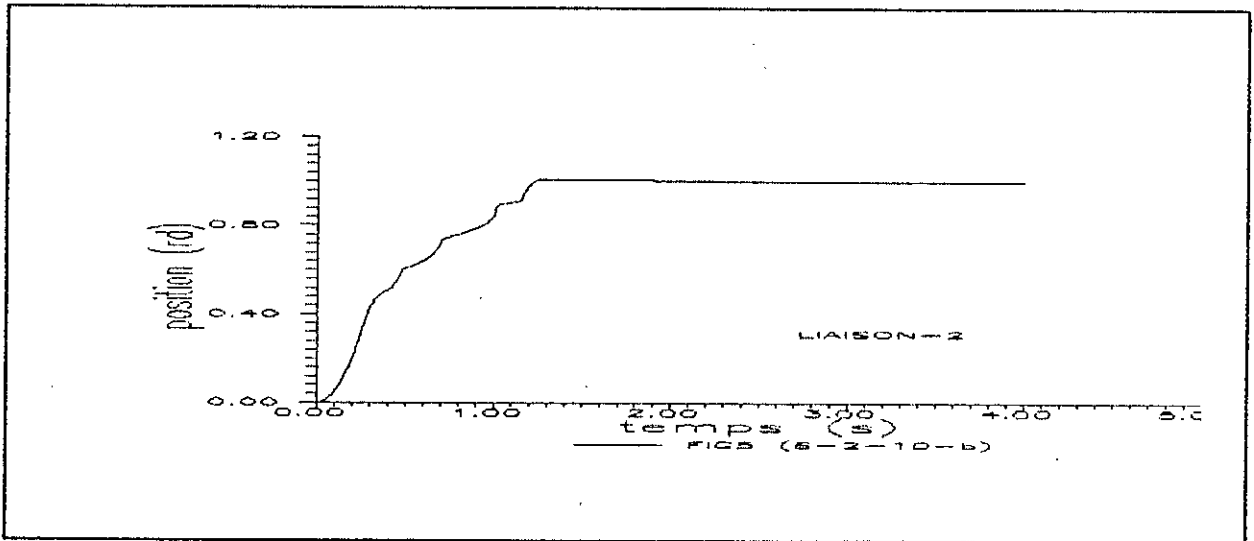
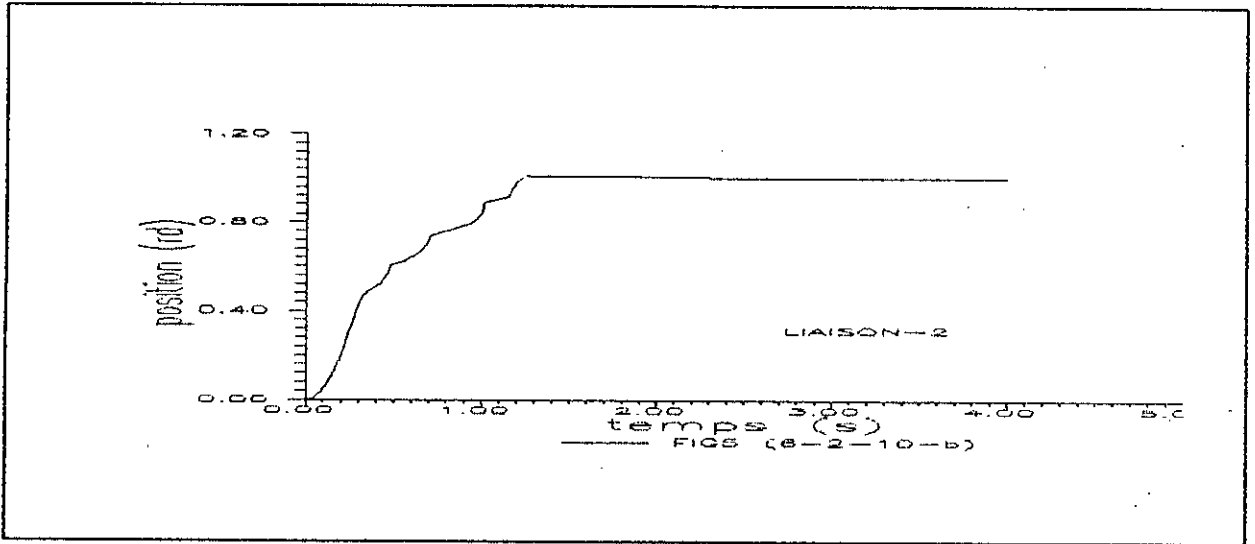
FIG 6-2-5











### 6-3 COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODÈLE DE RÉFÉRENCE

#### 6-3-1 INTRODUCTION :

Un contrôle indépendant des articulations du robot, convient seulement pour des tâches simples, basées essentiellement sur de simples boucles de réglage de positions, à paramètres fixes. La poursuite des trajectoires rapides, exige une adaptation de ces régulateurs aux variations d'inerties ainsi qu'aux non linéarités (effet de coriolis, centrifuge...), de telle sorte que les performances de la réponse coïncident avec celle du modèle définie par le concepteur. Ceci est obtenu par l'application de la commande adaptative.

#### 6-3-2 FORMULATION DU PROBLEME :

L'équation décrivant la dynamique d'un bras de robot à n degrés de liberté est : [20]

$$M(\theta) \cdot \ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) = \tau(t). \quad (6-1)$$

où :

$M$  = Matrice  $[n \times n]$  d'inertie. Cette matrice est toujours symétrique et définie positive.

$N$  = Vecteur  $[n \times 1]$ , regroupant les couples centrifuges et de Coriolis.

$G$  = Vecteur  $[n \times 1]$ , regroupant les couples de pesanteur.

$H$  = Vecteur  $[n \times 1]$ , regroupant les couples de frottements visqueux.

$\Theta, \dot{\Theta}$  = Vecteurs  $[n \times 1]$ , des positions et vitesses angulaires.

$\tau(t)$  = Vecteur  $[n \times 1]$ , des couples moteurs.

Le PROBLEME, consiste à développer une structure de commande qui permet au vecteur  $\Theta(t)$  de suivre tout vecteur  $\Theta_r(t)$  généré par le planificateur de trajectoire.

### 6-3-3 STRUCTURE DU SYSTEME DE COMMANDE :

La structure de commande proposée par SERAJI [20], est constituée par :

- Un contrôleur en cascade  $Q$ , qui délivre un signal  $u_{ff}(t)$ , assurant une poursuite exacte de la trajectoire  $\Theta_r(t)$ .  $Q$  doit se comporter à chaque instant comme l'inverse du modèle du manipulateur, pour que  $\Theta_r(t)$  soit reproduite en sortie.
- Un contrôleur en boucle de retour  $K$ , délivrant le signal  $u_{fb}(t)$ , pour assurer une stabilité des performances.
- Un signal  $u_{ax}(t)$  est généré pour tenir compte des variations du point de fonctionnement.



La commande résultante est :

$$u(t) = u_{ff}(t) + u_{fb}(t) + u_{sk}(t) . \quad (6-2)$$

L'adaptation des paramètres est basée sur le signal d'erreur

$$E(t) = \Theta_r(t) - \Theta(t) .$$

6-3-4 ANALYSE AUTOUR D'UN POINT DE FONCTIONNEMENT :

Considérons un point P défini par les valeurs nominales :

$$t_i \leq t < t_i + dt$$

$$P = \{ \tau(t_i), \Theta(t_i), \dot{\Theta}(t_i) \}$$

l'équation (6-1) est approximé par l'équation linéaire invariante:

$$A \ddot{\alpha}(t) + B \dot{\alpha}(t) + C \alpha(t) = T(t) \quad (6-3)$$

$$\alpha(t) = \Theta(t) - \Theta(t_i) .$$

$$T(t) = \tau(t) - \tau(t_i) .$$

$$A = (M)_P , B = \left( \frac{\partial(N+H)}{\partial \dot{\theta}} \right)_P , C = \left( \frac{\partial(N+G)}{\partial \theta} \right)_P$$

la fonction de transfert correspondante est:

$$\alpha (s) = (C + BS + AS^2)^{-1} T (s). \quad (6-4)$$

on à l'expression directe de Q :

$$Q (s) = C + BS + AS^2 \quad (6-5)$$

d'autre part :

$$\alpha_r (t) = \varphi (t) - \Theta_r (t) \quad , \text{ est le vecteur d'incrémentations}$$

d'angles désirés, donc le signal  $u_f (t)$  est :

$$T_{rf}(s) = Q(s) \cdot \alpha_r(t)$$

où bien :

$$T_{rf}(t) = C \cdot \alpha_r(t) + B \cdot \dot{\alpha}_r(t) + A \cdot \ddot{\alpha}_r(t). \quad (6-6)$$

pour le signal  $u_b(t)$ , en prenant l'expression du contrôleur K de la forme :

$$K(s) = K_p + K_v \cdot s \quad (6-7)$$

où :

$K_p$  = Matrice  $[n \times n]$ , regroupant les gains de positions .

$K_v$  = Matrice  $[n \times n]$ , regroupant les gains de vitesses.

D'autre part :

$e(t) = \alpha_r(t) - \alpha(t)$ , est le vecteur des erreurs de

poursuite sur les incréments de positions, le signal  $u_{fb}(t)$  est:

$$T_{fb}(t) = K(s).e(s).$$

où bien :

$$T_{fb}(t) = K_p e(t) + K_v \dot{e}(t) \quad (6-8)$$

Donc le couple globale autour du point P est :

$$T(t) = T_{fb}(t) + T_{ff}(t) \quad (6-9)$$

$\tau(t) = \tau(t_1) + T(t)$ , des équations (6-6), (6-8) et (6-9):  
on aura L'équation (6-10):

$$\tau(t) = \tau(t_1) + K_p e(t) + K_v \dot{e}(t) + B\dot{\alpha}_r(t) + A\ddot{\alpha}_r(t) \quad (6-10)$$

en notant par  $E(t)$  le vecteur d'erreur de poursuite :

on a :  $E(t) = \alpha_r(t) - \alpha(t)$ .

$$\alpha_r(t) = \alpha(t) - E(t).$$

$$\alpha(t) = \alpha(t_1) - E(t). \quad \text{en injectant ces expression}$$

dans L'équation (6-10) ; on obtient L'expression du couple :

$$\tau(t) = \tau^*(t_f) + K_p E(t) + K_v \dot{E}(t) + C \theta_r(t) + B \dot{\theta}_r(t) + A \ddot{\theta}_r(t) \quad (6-11)$$

$$\tau^*(t_f) = \tau(t_f) - C\theta(t_f) - B\dot{\theta}(t_f) - A\ddot{\theta}(t_f) \quad (6-12)$$

Le couple dans L'équation (6-11) englobe, la contribution des contrôleurs Q(s) et K(s) ainsi que le signal  $\tau^*(t_f)$  reflétant le point de fonctionnement (equ 6-12).

6-3-5 GENERALISATION POUR UNE TRAJECTOIRE DE FONCTIONNEMENT :

Dans le cas de la poursuite d'une trajectoire, le point P définie précédemment, varie avec le temps, par conséquence le modèle linéaire donné par L'équation (6-3) doit suivre ces variations, afin de garder la même structure de réglage (equ 6-11) considérons le modèle non linéaire :

$$A^*(\theta, \dot{\theta}) \ddot{\theta}(t) + B^*(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta}(t) + C^*(\theta, \dot{\theta}) \theta(t) = \tau(t) \quad (6-13)$$

en gardant la même forme de  $\tau(t)$  (equ 6-11), avec des paramètres variables avec le temps on aura :

$$\tau(t) = F(t) + (K_p(t)E(t) + K_v(t)\dot{E}(t)) + (C(t)\theta_r(t) + B(t)\dot{\theta}_r(t) + A(t)\ddot{\theta}_r(t)) \quad (6-14)$$

Avec :

F(t): Signal correspondant aux variations du point de fonctionnement.

Injectons L'équation (6-14) dans (6-13), on obtient :

$$A^* \ddot{E}(t) + (B^* + K_v) \dot{E}(t) + (C^* + K_p) E(t) = -F(t) \\ + (A^* - A) \dot{\theta}_r(t) + (B^* - B) \theta_r(t) + (C^* - C) \theta_r(t)$$

(6-15)

L'équation (6-15), montre que la dynamique du vecteur d'erreur contient un terme transitoire, et un autre permanent, due aux variations du point de fonctionnement.

Définissant le modèle de RÉFÉRENCE, qui englobe les performances désirées en terme d'erreur de poursuite  $E(t)$  :

Les erreurs doivent être découplées, satisfaisants chacune  
L'équation :

$$\ddot{E}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{E}_i(t) + \omega_i^2 E_i(t) = 0 \quad i=1, \dots, n \quad (6-16)$$

où  $\xi_i$  : Rapport d'amortissement, choisi pour l'erreur (i).

$\omega_i$  : Pulsation non amortie de l'erreur (i).

Notons par :

$$D_1 = \text{diag}(\omega_i^2), \quad D_2 = \text{diag}(2\xi_i \omega_i), \quad \text{matrices } [n \times n]$$

regroupants ces performances, les lois d'adaptation sont :

$$W_p = \text{diag}[W_{pi}] \quad , \quad W_v = \text{diag}[W_{vi}] \quad \text{matrices } [n \times n], \text{ de}$$

pondérations.

Avec :

les constantes d'indice 2 : Positives ou nulles.

$$R(t) = W_p D_1 D_2 E(t) + W_v D_1 \dot{E}(t)$$

$$F(t) = F(0) + \delta_2 R(t) + \delta_1 \int_0^t R(t) dt$$

$$K_p(t) = K_p(0) + \alpha_2 R(t) E^c(t) + \alpha_1 \int_0^t R(t) E^c(t) dt$$

$$K_v(t) = K_v(0) + \beta_2 R(t) \dot{E}^c(t) + \beta_1 \int_0^t R(t) \dot{E}^c(t) dt$$

$$C(t) = C(0) + v_2 R(t) \theta^c_r(t) + v_1 \int_0^t R(t) \theta^c_r(t) dt$$

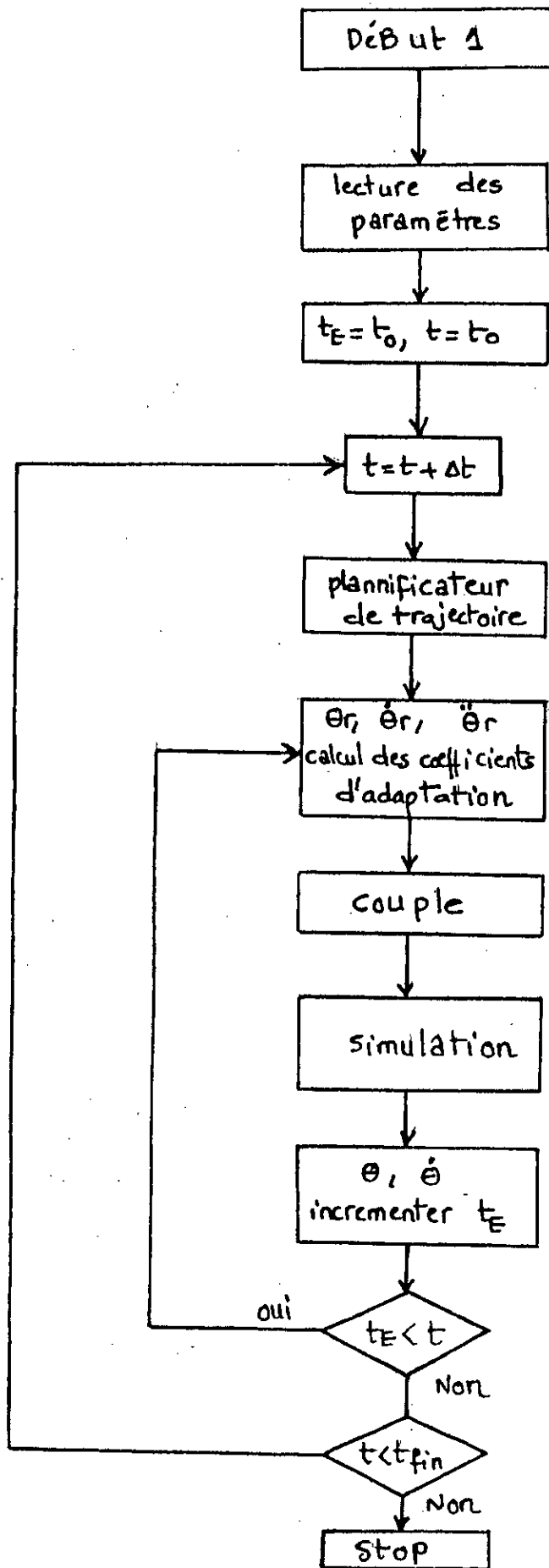
$$B(t) = B(0) + \gamma_2 R(t) \theta^c_r(t) + \gamma_1 \int_0^t R(t) \theta^c_r(t) dt$$

$$A(t) = A(0) + \lambda_2 R(t) \theta^c_r(t) + \lambda_1 \int_0^t R(t) \theta^c_r(t) dt$$

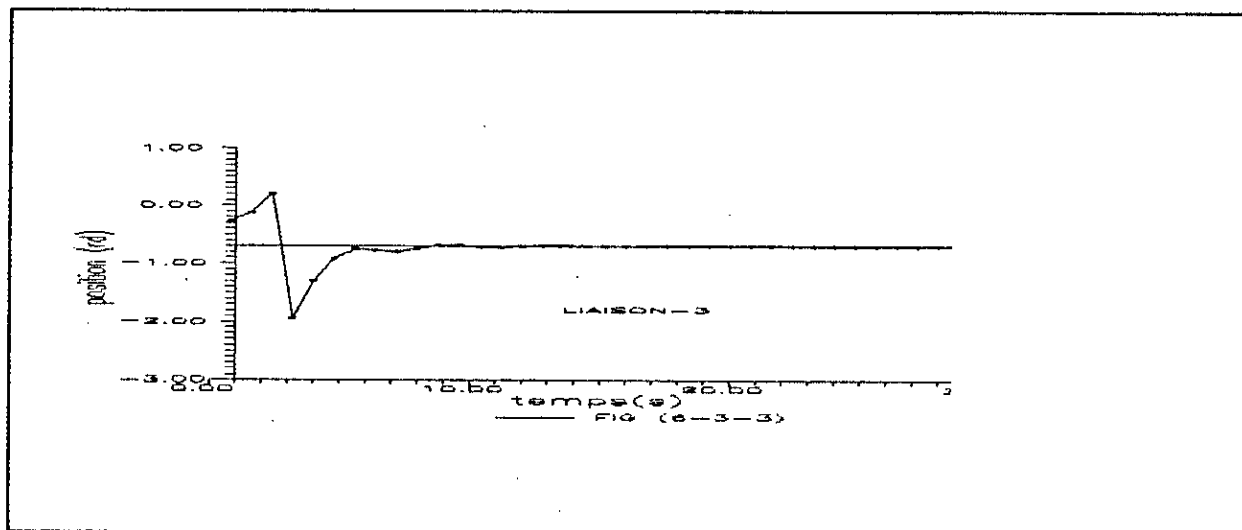
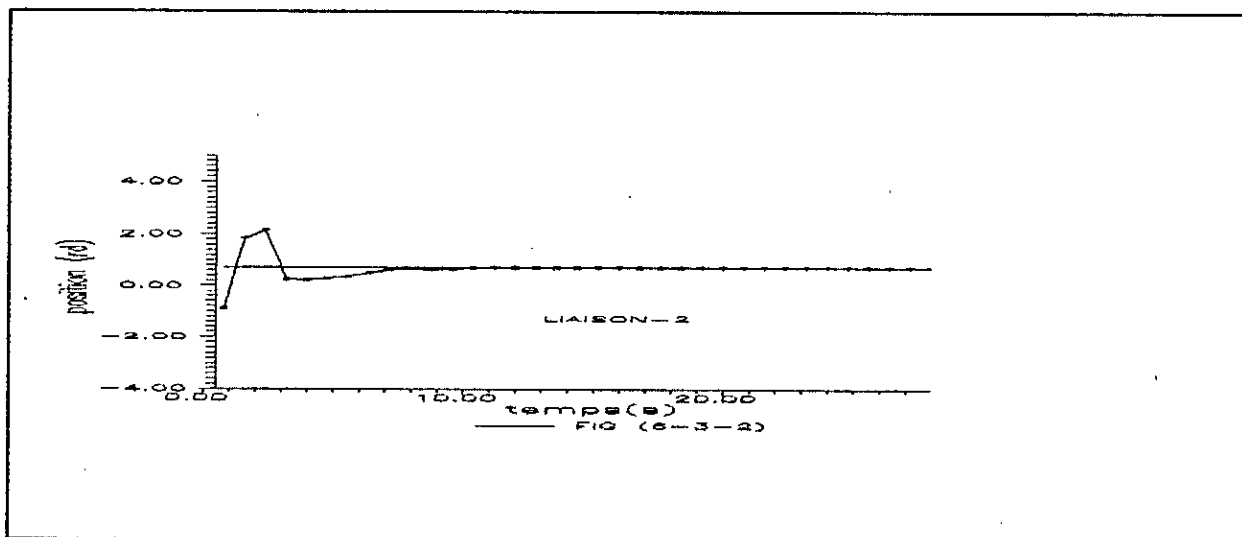
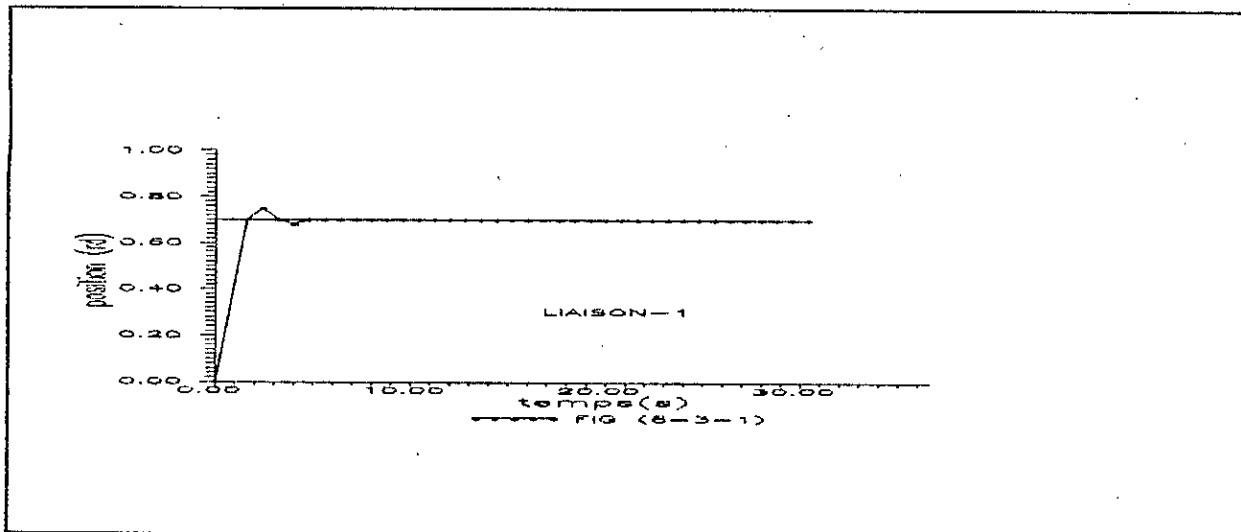
les constantes d'indice 1 : strictement positives.

### 6-3-6 APPLICATION:

Nous avons appliqué pour le bras de robot (n=3), le schéma de contrôle présente suivant l'organigramme de la figure (6-2-1) les courbes de simulations sont présentées en (fig 6-3-1), (6-3-2) et (6-3-3).



< fig 6-2-1 >





6-4 Comparaison & conclusion:

Dans la partie 6-2 on a remarqué que :

-La période d'échantillonnage joue un rôle très sensible vis-à-vis de la qualité du réglage .

-Vu la technique utilisée qu'est une technique astucieuses (On dimensionne le régulateur pour le système découplé, puis on l'applique au système réel), à des hautes fréquences le système réglé répond un peu bien pour notre cas comme il est indiqué à la figure (6-2-10) pour chaque liaison.

-l'avantage de cette méthode est:

-Nécessité que des coefficients figés .

-Simplicité d'implémentation.

-L'inconvénient de cette dernière est quelle n'assure pas exactement les performances imposés à elle.

L'application de la technique de MRAC présentée, permet une commande directe et simultanée des trois articulations, on considérons leurs modèles non linéaires. Cette méthode mène aux résultats illustrés aux figures (6-3-1), (6-3-2), (6-3-3), vu le résultat obtenu on remarque que la poursuite des trajectoires est satisfaite pour les trois articulation. Le dépassement remarqué sur les réponses:  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  est dû au choix des coefficients de pondérations choisis, un mauvais choix de ces dernier peut mener à une réponse instable malgré les performances imposés.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

- La conception d'un bras de robot nécessite la maîtrise de plusieurs techniques, entre autres la mécanique et l'électronique, comme première phase de la conception, l'analyse de plusieurs solutions du point de vue chaînes de transmission de mouvement, construction mécanique et motorisation doit être effectuées.

-La seconde étape, est la simulation dynamique: Dans cette partie de conception, le modèle du robot doit être établi et programmé, afin d'analyser ses performances dynamiques. Si ces performances, ne sont pas satisfaisantes, une reformulation de la chaîne cinématique et de la motorisation où même un nouveau choix de structure peut être adopté. Donc le passage fréquent, entre la première et la seconde phase détermine l'étape des essais qui exige la construction d'un logiciel d'aide à la conception. Ce logiciel se compose principalement d'un module de programme cinématique et d'un module de programme mécanique. Le premier module permet de simuler les équations du robot, en position, vitesse, accélération et forces, ces informations seront utilisées par le second module qui testera l'adaptation du mécanisme, des dimensions des liaisons et la motorisation. Après ce test un changement de dimension peut être effectué, et sera communiqué à la partie cinématique.

Lorsque la structure satisfaisante est atteinte, l'étape suivante devra être une réalisation d'un prototype, basée sur les résultats des étapes précédentes, ainsi que le choix et la réalisation des cartes d'interfaçages au système de commande.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour la commande d'un bras de robot: le choix de la technique repose sur le type

de la tâche à laquelle le robot est destiné: en général, les techniques classiques, basées sur des régulateurs, à paramètres figés, sont utilisées dans des tâches simples. Par contre la technique basée sur des régulateurs, adaptables, est plus délicate à réaliser et mènent à un bon contrôle du mouvement.

## Bibliographie

---

- [1] ANNISSIMOV : Calcul des barres dans le cas des sollicitations composées  
USTHB 1982
- [2] ASCH GEORGE : Capteur et instrumentation industrielle  
édition: DUNOD
- [3] BASQUIN RENE : Résistance des matériaux  
édition: DELAGRAVE 1977
- [4] BOUDOUANE ISMA : Modélisation et commande par microprocesseur d'un robot manipulateur  
thèse magister USTHB 1985
- [5] H.BÜHLER : Electronique de réglage et de commande  
édition: DUNOD
- [6] M.C.CHAHER  
S.HABITA : Conception et réalisation d'une carte d'interface pour IBM-PC  
PFE: ENP 1993
- [7] CENLIS : Capteurs industriels et compteurs d'énergie  
CENLIS 1987
- [8] CENLIS : Actionneurs industriels  
tome 2 : Actionneurs électriques  
CENLIS 1987
- [9] K.S.FU  
R.C.GONZALEZ  
C.S.G.LEE : Robotics : control, sensing, vision and intelligence  
Mc Graw-Hill 1987
- [10] GORLA : Modélisation et commande des robots manipulateurs

## Bibliographie

- [11] G.LENORMAND  
R.MIGNEE  
J.TINEL : Construction mécanique  
tome 2 édition: FOUCHER
- [12] LACROUX : Actionneurs électrique pour la robotique et les  
asservissement 1985
- [13] S.LEIBSON : Manuel des interfaces  
Mc Graw-Hill 1987
- [14] P.MARCH : Temps des robots : de la fiction aux industries de  
pointe  
édition: BORDAS
- [15] NABIL A.RAHIM : Adaptive control of robot manipulators  
university of Leeds -Département  
of mechanical engineering :August 1987
- [16] RONALD TOCCI : Circuits numériques  
édition: DUNOD
- [17] YORAM KOREN : Robotics for engineers  
Mc Graw-Hill
- [18] VIBET CLAUDE : Robots: principes et contrôle  
édition: ELLIPSES 1987
- [19] FRIEDRICH PFEIFFER  
RAINER JOHANNI : A concept for manipulator trajectory  
planning  
journal of robotics and automation IEEE  
April 1987
- [20] H.SERAJI : A new approach to adaptive control of  
manipulators  
journal of dynamic systems, measurement and control  
September 1987