

5/95

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *Electronique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Commande d'un bras
manipulateur par un PC*

Proposé par :
M.S. AITCHEIKH
C. LARBES

Etudié par :
H. BOULAHBEL
R. MESSAOUDI

Dirigé par :
M.S. AITCHEIKH
C. LARBES

PROMOTION

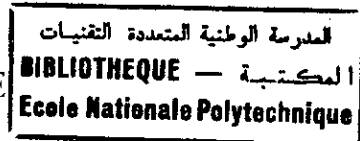
juin 1995

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat
en électronique.

SUJET

**COMMANDE D'UN BRAS MANIPULATEUR
PAR UN PC**

PROPOSE PAR

ETUDIE PAR

DIRIGE PAR

M.S. AIT CHEIKH

H. BOULAHBEL

M.S. AIT CHEIKH

&

&

&

C. LARBES

R. MESSAOUDI

C. LARBES

PROMOTION Juin 1995

ENP 10, Avenue Nacère Badi - El Harrach - ALGER

REMERCIEMENTS

Nos remerciements et notre gratitude vont en premiers lieux à nos promoteurs Messieurs **M.S. AIT CHEIKH ET C. LARBES** qui ont suivi notre travail avec attention et qui nous ont prodigué de précieux conseils.

Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants du Département Electronique pour leur contribution à notre formation.

Que Monsieur **BOUZIT** chercheur au C.D.T.A soit également remercié pour son aimable aide et pour le temps qu'il nous a consacré.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail:

à ma douce mère et à mon père pour leur soutien moral,

à mes frères et soeurs **DJIHAD, SAMAH, CHIRAZ,**

à mon petit frère « **FNINI** »,

à mes amis **ABDELALI, ZOHEIR, MOHAMED,**

RACHID, RABAH et **MOURAD.**

HICHEM.

DEDICACE

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail

à mes parents bien aimés pour leur soutien moral,

à mes grands parents,

à mon frère **MOURAD** bien que loin d'ici mais toujours
present dans nos cœurs ,

à ma soeur **DJOU DJOU** pour sa tendresse,

à mon cousin **BOUALEM** toujours là pour me soutenir

et à la nouvelle venue dans la famille, **NACIBA**.

RABAH.

بسم الله الرحمن الرحيم

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
دائرة الإلكترونيك
أطروحة مهندس نولة في الإلكترونيك

الموضوع : التحكم في نراع متحركة عن طريق نظام ميكروكمبيوتر.

يتمثل موضوع أطروحتنا في تصميم نظام تحكم و توجيه، لنراع آليه متحركة ذات ستة دراجات حرية، و هذا عن طريق جهاز الميكروكمبيوتر.

التحكم في هذا النراع يتم عن طريق برنامج مكتوب بلغة "C" و هذا للسماح للوضع النهائي بالتحرك نحو الصدف المعين.

هذا النظام يتكون من جهاز ميكروكمبيوتر بطاقة إكتساب معلومات، و بطاقة إلكترونية بينية للتكيف.

ABSTRACT

The aim of this project is to design and build a command system for a robot's arm of six degree of freedom.

This command system is based on a micro-computer, a data card, an interface card and a power card for driving the stepper motors.

A purpose built program in C language allows the displacement of arm's terminal toward a defined target.



RESUME

Ce projet a pour objectif, la conception d'un système de commande d'un bras manipulateur à six degrés de liberté.

Ce système de commande est constitué d'un micro-ordinateur, une carte d'acquisition de données, une carte d'interface et une carte de puissance pour piloter les moteurs pas à pas.

Un logiciel écrit en langage C permet le déplacement de l'outil terminal du bras manipulateur vers un objectif désigné.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE	5
2.1 DEFINITION	6
2.2 HISTORIQUE	6
2.3 CONSTITUTION MATERIELLE D'UN ROBOT	7
2.3.1 STRUCTURE FONCTIONNELLE DES ROBOTS MANIPULATEURS	7
2.3.2 STRUCTURE MATERIELLE	9
2.3.3 MYTHES ET REALITES INDUSTRIELLES	12
2.3.4 CONCLUSION	14
3. MORPHOLOGIE DES PORTEURS	15
3.1 DEFINITIONS	16
3.1.1 SEGMENTS ET ARTICULATION	16
3.1.2 DEGRES DE LIBERTE	16
3.2 TYPOLOGIE DES ARTICULATIONS	17
3.2.1 ARTICULATIONS SIMPLES	17
3.2.2 ARTICULATIONS COMPLEXES	18
3.3 DEGRES DE LIBERTE D'UN PORTEUR	19
3.4 ETUDE DE QUELQUES STRUCTURES DE BASE	19
3.4.1 STRUCTURE P P P(cartésienne fig 3.5)	20
3.4.2 STRUCTURE R P P(cylindrique fig 3.6)	20
3.4.3 STRUCTURE R R P(sphérique ou polaire fig 3.7)	21
3.4.4 STRUCTURE R R R(angulaire fig 3.8)	21
3.5 PROBLEMES TECHNOLOGIQUES	21
3.6 ETUDE MORPHOLOGIQUE DU MINI-ROBOT UTILISE	22
3.6.1 STRUCTURE MECANIQUE DU MINI-ROBOT	22
3.6.2 CALCUL DES ACCROISSEMENTS ANGULAIRES	24
4. MODELISATION ET ETUDE CINEMATIQUE	25
4.1 INTRODUCTION	26
4.2 MODELISATION GEOMETRIQUE	26
4.2.1 LES VARIABLES ARTICULAIRES	27
4.2.2 LES VARIABLES GEOMETRIQUES	27
4.3 DEFINITION DE LA CHAINE CINEMATIQUE D'UN ROBOT MANIPULATEUR	28
4.4 MATRICE DE TRANSFORMATION HOMOGENE DH	28
4.5 VOLUME DE TRAVAIL	29

4.6 MODELISATION GEOMETRIQUE INVERSE	30
4.6.1 CALCUL DU MODEL INVERSE	30
4.7 LA MODELISATION DU BRAS MANIPULATEUR UTILISE	31
4.7.1 SCHEMA DES REPERES ASSOCIES AU ROBOT	31
4.7.2 TABLEAU DES PARAMETRES DH	31
4.7.3 MATRICES DH	32
4.7.4 VOLUME DE TRAVAIL	33
4.7.5 CALCUL DES VARIABLES ARTICULAIRES	34
4.7.6 FORMULATION DE LA METHODE	34
4.7.7 ORGANIGRAMME DE LA METHODE DE NEWTON RAPHSON	35
4.7.8 DISCUSSION DE LA CONVERGENCE	39
5. LE MOTEUR PAS A PAS	43
5.1 INTRODUCTION	44
5.2 PRINCIPLE DU MOTEUR PAS A PAS	44
5.3 LES PRINCIPAUX TYPES DE MOTEURS PAS A PAS	46
5.3.1 LE MOTEUR PAS A PAS A RELUCTANCE VARIABLE	46
5.3.2 LE MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT	48
5.3.3 LE MOTEUR PAS A PAS HYBRIDE	50
5.4 LES CARACTERISTIQUES DES MOTEURS PAS A PAS	53
5.4.1 CARACTERISTIQUES STATIQUES	53
5.4.2 CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES	54
5.5 LES DIFFERENTS MODES D'EXCITATIONS	56
5.5.1 MODE D'EXCITATION MONOPHASE	56
5.5.2 MODE D'EXCITATION DOUBLE PHASE	57
5.5.3 MODE D'EXCITATION A DEMI PAS	57
5.5.4 SYSTEME DE COMMANDE DES MOTEURS PAS A PAS EN BOUCLE OUVERTE	58
5.6 OBSERVATION	65
6. CARTE D'ACQUISITION ET CONTROLE DE PERIPHERIQUES:	66
6.1 INTRODUCTION	67
6.2 LA CARTE D'ACQUISITION	67
6.2.1 INSTALLATION LOGICIEL	68
6.2.2 FONCTION TEMPORISATION	68
6.2.3 FONCTION CONVERSION ANALOGIQUE NUMERIQUE	73
6.2.4 UTILISATION DES CANAUX ANALOGIQUES	74
6.2.5 FONCTION EMISSION RECEPTION DES DONNEES BINAIRES	75
7. CONCEPTION ET REALISATION DU SYSTEME DE COMMANDE	76
7.1 PRESENTATION DU SYSTEME DE COMMANDE	77
7.2 DEFINITION DES DIFFERENTS SIGNAUX DE COMMANDE UTILISES	77
7.3 PROGRAMMATION ET UTILISATION DE LA CARTE D'ACQUISITION	78
7.3.1 FONCTION TEMPORISATION	79
7.3.2 LA FONCTION EMISSION DE DONNEES DIGITALES	82
7.4 LA CARTE D'INTERFACE	83

7.4.1 CIRCUIT DE DEMULTIPLEXAGE	83
7.5 LA CARTE DE COMMANDE PRINCIPALE	84
7.5.1 ETAGE LOGIQUE	84
7.5.2 ETAGE DE PUISSANCE	87
8. DESCRIPTION DU LOGICIEL	89
8.1 INTRODUCTION	90
8.2 INTRODUCTION AU LANGAGE C	90
8.3 DESCRIPTION DU LOGICIEL MOUVROB	91
8.3.1 COMMANDE DIRECTE	92
8.3.2 SEQUENCE AUTOMATIQUE	92
8.3.3 COMMANDE INVERSE	92
8.4 DESCRIPTION DE L'INTERFACE UTILISATEUR	92
8.5 COMPOSITION DU LOGICIEL	93
8.5.1 LES DIFFERENTS MODULES DU LOGICIEL	93
8.6 LES ORGANIGRAMMES DES PROGRAMMES	94
9. CONCLUSION	100
BIBLIOGRAPHIE	102
ANNEXES	105

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Le développement de la robotique n'a été possible que grâce aux avancées technologiques réalisées dans de nombreux domaines. L'un des domaines où les progrès ont été les plus tangibles est, sans conteste, la commande des robots. En effet, on est passé d'une commande en boucle ouverte (télémanipulateurs) à une commande en boucle fermée avec capteurs d'environnement (caméra, détecteurs d'obstacles,...); aujourd'hui on envisage même d'utiliser la réalité virtuelle pour la commande à distance des robots mobiles.

L'objet de notre travail est l'élaboration d'un système de commande, à base d'un micro ordinateur, pour commander un bras manipulateur à six degrés de libertés. Le type de commande étudié est une commande cinématique en boucle ouverte.

Une carte d'interface a été réalisée pour faciliter la transmission des signaux de commande provenant d'une carte d'acquisition incorporée dans le micro ordinateur.

Notre thèse s'articulera autour des chapitres suivants:

- Chapitre 2 - Généralités sur la robotique: présentation des notions de base en robotique;
- Chapitre 3 - Morphologie des porteurs: ce chapitre décrit les différentes structures des robots et en particulier celle du bras manipulateur dont il nous est demandé de réaliser la commande;
- Chapitre 4 - Modélisation et étude cinématique: étude cinématique du bras manipulateur utilisé;
- Chapitre 5 - Moteurs pas à pas: est consacré à l'étude des moteurs pas à pas dont est équipé notre robot;
- Chapitre 6 - Carte d'acquisition: qui traite de la carte d'acquisition utilisée;
- Chapitre 7 - Application: donne une description détaillée de notre système de commande;
- Chapitre 8 - Description du logiciel: présente le programme MouvRob qui permet de faire fonctionner le robot.

GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE

2.1 DEFINITION

De nombreuses définitions ont été proposées pour qualifier un robot, Celle qui nous a semblé la plus proche de la réalité est la définition donnée par le Robot Institute of America, qui définit un robot comme suit:

« Un robot est un manipulateur à fonctions multiples pouvant être programmé pour réaliser automatiquement des tâches variées éventuellement répétitives »[7].

2.2 HISTORIQUE

Le mot « robot » a été créé en 1920 par l'écrivain tchèque Karel Capek qui décrivait dans l'une de ses pièces une machine intelligente qui faisait le travail de l'homme et qu'il appela « robot ». C'est en fait le cinéma qui popularisa ce mot grâce à de nombreux films de science fiction qui, déjà, donnaient une idée, quoi qu'exagérée, des robots qui seront construits plus tard.

Bien avant l'avènement des robots, l'homme essaya de fabriquer des machines qui imitent ces mouvements et à qui il donnait le nom d'automate; l'un des plus célèbres est le joueur de flûte construit par le français Vaucanson en 1738.

Ce sont les besoins de l'industrie en machines de plus en plus autonomes de l'homme qui a fait avancer les recherches en automatique puis en robotique. On a commencé avec les machines mécanisées à cycle linéaire fixe qui exécutaient un certain nombre d'opérations fixes, puis ce fut l'arrivée des machines télécommandées dont l'exemple type est le bras télémanipulateur; puis vinrent les machines à commande numérique qui permettaient de programmer les tâches à exécuter. Mais toutes ces machines nécessitaient la présence de l'homme pour les faire fonctionner. En fait la véritable robotique commença avec les machines à apprentissage tel les robots de peinture utilisés notamment dans la construction automobile et plus récemment avec les robots dits intelligents qui disposent de capteurs leur permettant d'interagir avec leur environnement.

Dans le domaine industriel, les robots ont fait leur apparition dès 1960 et de nos jours on assiste à leur généralisation dans les usines. Les robots les plus répandus en industrie sont les robots à apprentissage tandis que les robots, dits, intelligents jugés souvent trop sophistiqués restent au stade de prototype sans trouver d'applications dans le domaine industriel.

Actuellement, les robots ont remplacé l'homme dans de nombreux domaines et accèdent à des endroits hors de portée de l'homme (centrale nucléaire, fonds marins,...). « Ils » savent rouler, marcher, nager, voler, déplacer des charges de plusieurs centaines de kilogrammes avec une précision millimétrique, ils vont même dans l'espace; il ne leur manque qu'une chose

pour devenir réellement autonomes: l'intelligence. Ce sera peut être pour demain... [1], [2].

2.3 CONSTITUTION MATERIELLE D'UN ROBOT [3]

2.3.1 STRUCTURE FONCTIONNELLE DES ROBOTS MANIPULATEURS

Un robot manipulateur peut être défini comme un système technologique capable de remplacer ou assister un travailleur humain dans l'exécution de différentes tâches matérielles; d'une manière générale, un robot doit être situé par rapport à trois entités (fig 2.1) :

a - un environnement de travail;

b - une source d'énergie, dont la mise en oeuvre est nécessaire à la réalisation des travaux demandés;

c - une source d'information définissant la tâche à accomplir et émanant d'un opérateur humain, en temps différé ou en temps réel selon que le robot fonctionne en mode autonome ou en mode coopératif (apprentissage, téléopération, assistance).

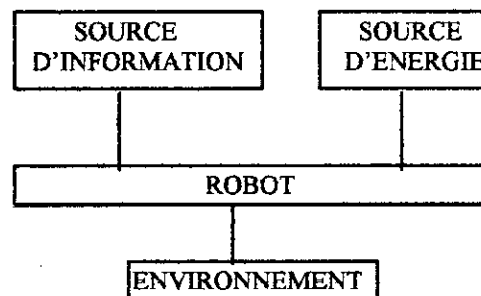


Fig 2.1: situation d'un robot dans son contexte.

Concrètement on est amené à distinguer dans un robot deux rôles qui sont généralement dévolus à deux unités distinctes(fig 2.2).

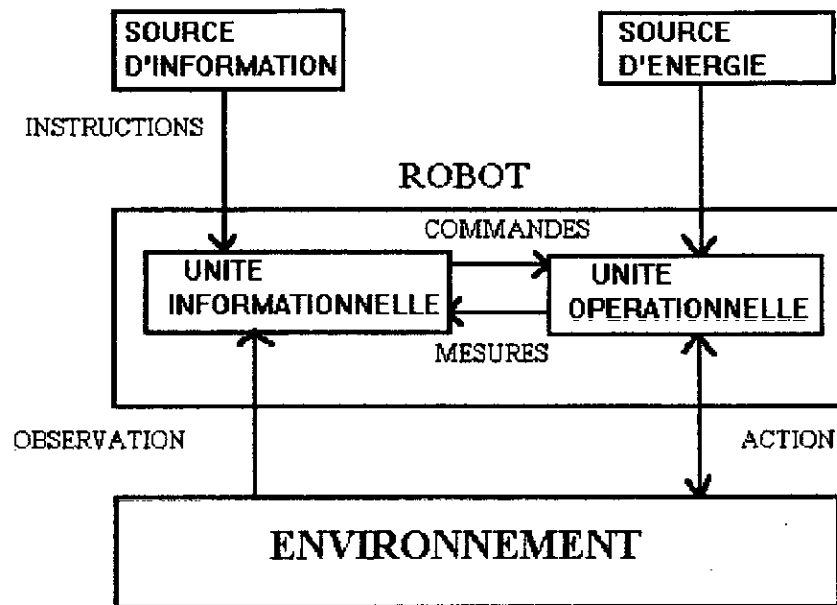


Fig 2.2: décomposition en fonctions de décision et action.

2.3.1.1 L'UNITE INFORMATIONNELLE

Elle élabore des informations de sorties: les commandes, à partir de l'acquisition et du traitement d'informations d'entrée sont de trois types :

- les instructions définissant la tâche à accomplir (consigne, objectifs);
- les mesures relatives à l'état interne de l'unité opérationnelle;
- les observations concernant l'environnement de travail immédiat ou distant;

2.3.1.2 L'UNITE OPERATIONNELLE

Celle-ci a comme objet d'exercer des actions matérielles sur l'environnement en modulant et en transformant l'énergie empruntée à l'extérieur conformément aux signaux de commande fournis par l'unité informationnelle; elle intègre à cette fin des constituants de divers types, dont nous analyserons quelques-uns dans cette thèse.

On peut citer plusieurs organes tels que :

- organes d'interaction avec l'environnement (effecteurs)
- organes de structure (segments, articulations)
- modulateurs d'énergie (amplificateurs, distributeurs, ...)

- convertisseurs d'énergie(moteurs,vérins,...)
- transmetteurs d'énergie mécanique
- capteurs internes.

2.3.2 STRUCTURE MATERIELLE [3], [7]

La structure matérielle d'un robot se distingue par trois ensembles: l'effecteur, le porteur et le véhicule(fig 2.3). Les actionneurs ne font pas vraiment partie de la structure d'un robot, mais ont une grande importance dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

2.3.2.1 LES EFFECTEURS

Leur rôle est capital, car ce sont eux qui agissent directement sur les objets extérieurs et qui imposent leurs exigences au reste de la structure mécanique.

Les termes génériques employés pour les désigner sont souvent mains ou têtes selon les cas.

Chaque effecteur est issu d'une analyse fine de l'opération à accomplir; nous devons indiquer que:

- un effecteur est en soi un véritable système, souvent complexe rarement assimilable à un corps unique, solide et indéformable;
- un effecteur n'est pas un dispositif passif, mais comporte en général un ou plusieurs actionneurs spécifiques.
- un effecteur comporte fréquemment des capteurs spécifiques, permettant son adaptation fine aux conditions locales de la tâche.

2.3.2.2 LES PORTEURS

La mise en oeuvre d'un effecteur pour l'exécution d'une tâche donnée nécessite presque toujours la réalisation de mouvements bien déterminés.

Nous appelons porteur un système mécanique à géométrie variable lié à un corps de référence et permettant par des mouvements d'amplitude limitée, de déplacer et d'orienter un effecteur, le corps de référence lié au porteur constituant la base de celui-ci.

2.3.2.3 LE VEHICULE

Nous appelons véhicule un système mécanique libre capable de mouvements d'amplitude non limitée à priori (chariot automoteur, engin sous-marin).

Il assure le transport de toute la structure mécanique vers la zone d'action, il est inexistant sur le robot industriel à poste fixe, ce qui est le cas de notre bras.

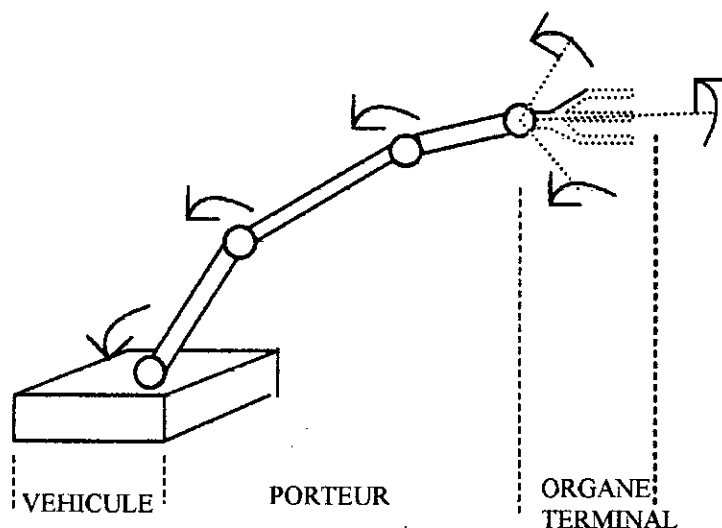


Fig 2.3: structure matérielle d'un robot.

2.3.2.4 LES OPERATEURS

Nous désignons par le terme « opérateur » le système constitué par un effecteur et un porteur: opérateur de manutention, opérateur de soudage, opérateur de polissage, etc...

L'unité opérationnelle d'un robot est ainsi constituée d'un ensemble d'opérateurs ayant une base commune et commandés par une même unité informationnelle (fig 2.6).

Nous avons à faire à un robot à poste fixe lorsque la base est fixe (fig 2.4) et à un robot mobile lorsque la base repose sur un véhicule (fig 2.5);

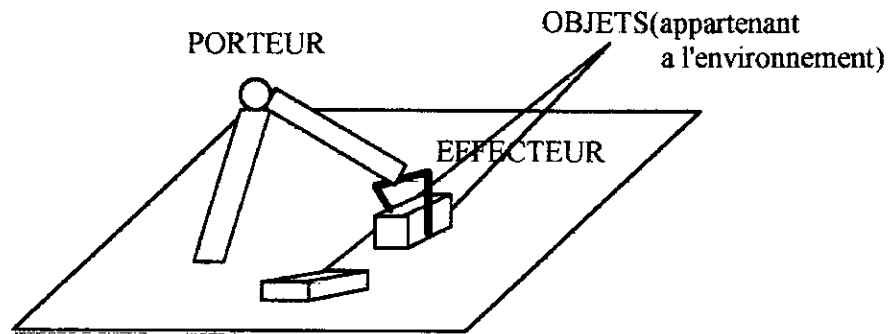


Fig 2.4: schéma d'un robot à poste fixe(robot mono-opérateur).

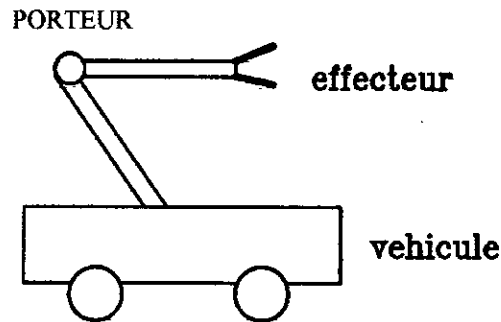


Fig 2.5: schéma d'un robot mobile(mono-opérateur).

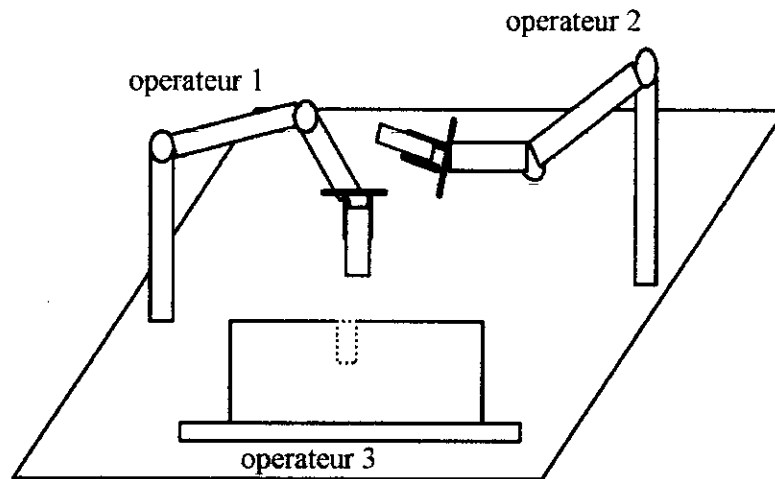


Fig 2.6: schéma d'un robot tri-opérateur(à poste fixe).

2.3.2.5 ACTIONNEURS DE ROBOTS

Les robots utilisent trois types d'actionneurs pour commander le mouvement des divers maillons d'une chaîne articulée.

Il s'agit des actionneurs: électrique, pneumatique et hydraulique.

2.3.2.5.1 ACTIONNEURS ELECTRIQUE

Leur utilisation se généralise du fait de leur maintenance aisée. Pour ces actionneurs, ce sont des moteur à courant continu ou des moteurs pas à pas qui sont utilisés jusqu'à des puissances de 2 à 3 Kw. Au delà, les axes des robots sont mis en mouvement par l'intermédiaire de moteur fonctionnant en courant alternatif triphasé.

Les moteurs pas à pas seront détaillés plus loin car c'est ce type de moteur qu'utilise notre mini-robot.

2.3.2.5.2 ACTIONNEURS PNEUMATIQUES

Peu de robots utilisent ce type d'actionneurs. Ces moteurs présentent cependant l'avantage de développer des couples massiques assez importants. Cependant de tels moteurs réclament des compresseurs ainsi que des circuits et systèmes de distribution et de filtrage du fluide qui apporte l'énergie pneumatique.

2.3.2.5.3 ACTIONNEURS HYDRAULIQUES

Ce sont les motorisations des robots lourds qui font appel aux techniques hydrauliques. En général, le compresseur d'huile accompagne le robot et il s'agit très souvent d'un appareil autonome dont la puissance peut être comprise entre 5 et 15 Kw. L'avantage principal des moteurs hydrauliques réside dans le fait qu'ils délivrent des couples massiques très importants.

2.3.3 MYTHES ET REALITES INDUSTRIELLES

Dans de nombreux discours de robotique on rencontre, plus ou moins implicitement l'idée du robot universel, travailleur artificiel apte à accomplir n'importe quelle tâche humaine. En réalité un robot doit être conçu pour effectuer un certain métier, c'est à dire: une famille déterminée de tâches dans un type défini d'environnement.

2.3.3.1 LES TACHES

En ce qui concerne les tâches à poste fixe, on peut définir ainsi les principales fonctions rencontrées:

- manutention:
déplacement d'objets(chargement - déchargement de machines; rangement;...).

- transformation:

- apport de matière sur un objet (peinture, revêtement, ...).
- enlèvement de matière à un objet (usinage, perçage, ...).
- modification de la forme d'un objet (pliage, emboutissage ...).
- montage:
assemblage réversible d'objets pour réaliser un objet composé (sans modification permanente des pièces).
- démontage:
fonction inverse de la précédente, décomposant un objet en ses pièces détachées.
- fixation:
assemblage permanent d'objets avec mise en oeuvre d'un procédé de jonction définitive: collage, soudage, ...
- mesure:
prise d'information quantitatives sur certaines caractéristiques physiques d'un objet.

Certaines tâches industrielles, comme le conditionnement ou l'assemblage, combinent plusieurs des fonctions précédentes.

D'autres tâches supposent la mobilité du robot, c'est à dire son aptitude à opérer dans un espace excédant largement ses dimensions propres:

- convoyage:
transport d'objets entre postes de stockage ou de travail éloignés.
- exploration:
déplacement d'organes de perception permettant de transmettre à distance des informations relatives à l'environnement local du robot.
- récolte:
localisation et saisie d'objets disséminés.
- intervention:
réalisation d'opération sur des objets distants (par exemple pour leur maintenance).

2.3.3.2 L'ENVIRONNEMENT

Le métier d'un robot ne se définit pas seulement par la nature des opérations à accomplir, mais aussi par celle de son environnement:

- contraintes particulières du milieu ambiant.
- caractéristiques particulières des objets sur lesquels porte le travail.

Il faut tout d'abord préciser le domaine général d'activité dans lequel se situent les fonctions à remplir:

- atelier de production d'objets manufacturés(industries mécaniques, automobiles, textiles, agro-alimentaires, etc.);
- chantier(bâtiment, travaux publics, construction navale);
- site d'extraction et de traitement de matières premières(mines, carrières,...);
- exploitation agricole ou forestière;
- milieu hostile(fonds marins, espace, milieux terrestres exposés à des pollutions ou risques divers);
- ambiances sanitaires(hôpitaux, laboratoires biomédicaux).

Il faut ensuite caractériser les objets sur lesquels porte l'action du robot par:

- la forme;
- le volume;
- la masse;
- la température;
- les dimensions;
- l'état de surface;
- la composition interne;
- la déformabilité;
- la variabilité dimensionnelle;
- les contraintes de manipulation liées aux risques d'endommagement;

2.3.4 CONCLUSION

La robotique reste une discipline trop jeune pour que l'on puisse déjà formaliser, ce qui relève encore d'un art, et l'évolution des robots se poursuit dans des voies parfois divergentes.

MORPHOLOGIE DES PORTEURS

3.1 DEFINITIONS [4]

3.1.1 SEGMENTS ET ARTICULATION

Un porteur est un mécanisme polyarticulé (fig 3.1) constitué:

- de segments S_i , corps solides et rigides susceptibles de mouvements par rapport à la base du porteur;
- d'articulations A_i , systèmes de liaison bilatérale limitant les possibilités de mouvement relatif entre segments adjacents.

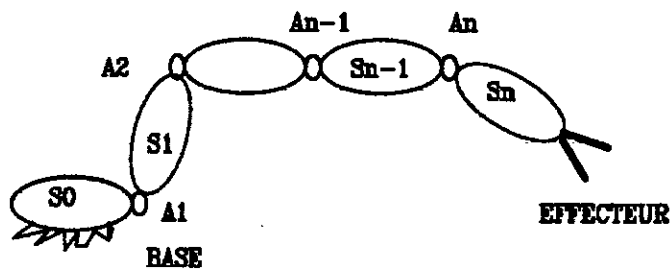


Fig 3.1: Schéma d'un opérateur.

L'un des segments au moins est articulé sur le corps de base, lequel est aussi appelé (par abus de langage) segment initial: S_0 ; celui qui porte l'effecteur est le segment terminal S_n .

3.1.2 DEGRES DE LIBERTE

Le rôle du porteur est de mouvoir l'effecteur, il doit donc assurer au segment terminal les possibilités de déplacement et d'orientation exigé. Pour préciser ce point, il convient de définir la notion de degrés de liberté d'un solide.

Un solide libre S possède 6 degrés de liberté car sa position à un instant déterminé peut être fixée par la donnée de 6 paramètres indépendants (fig 3.2); elle peut être décrite par exemple par le vecteur \underline{X} de composantes $\lambda, \theta, \rho, x, y, z$ où λ, θ, ρ sont les angles nautiques (lacet, tangage, roulis) définissant l'orientation par rapport à un trièdre fixe R_0 , d'un repère mobile R_3 .

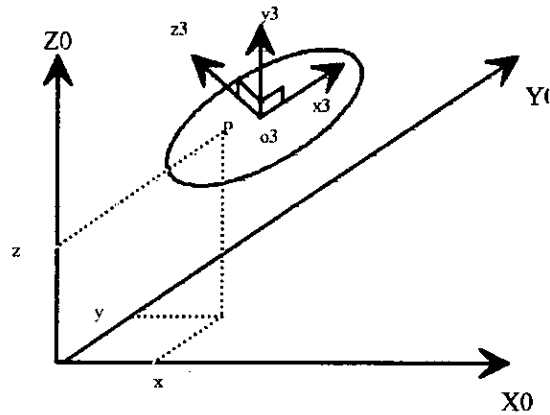


Fig 3.2: Degrés de liberté d'un solide.

3.2 TYPOLOGIE DES ARTICULATIONS

Une articulation A_i lie deux segments successifs S_{i-1} et S_i , c'est à dire limite le nombre de degrés de liberté de S_i par rapport à S_{i-1} à une valeur m_i , qu'on appelle mobilité de la liaison avec $0 < m_i < 6$ [4], [5].

3.2.1 ARTICULATIONS SIMPLES

Les articulations limitent les mouvements relatifs entre segments adjacents à un ensemble de dimension 1, c'est à dire descriptible au moyen d'un paramètre scalaire unique. Nous distinguerons entre articulations « normales » et articulations « spéciales ».

3.2.1.1 ARTICULATIONS NORMALES

3.2.1.1.1 ARTICULATION ROTOIDE (SYMBOLE R)

Il s'agit d'une liaison de type « charnière » autorisant exclusivement la rotation de S_i autour d'un axe Δ_i commun à S_{i-1} et S_i .

Un solide lié de manière bilatérale à d'autres présente évidemment un nombre de degrés de liberté « d » pouvant être inférieur ou égal à 6.

Le nombre de degrés de liberté d'un porteur est par définition, celui du segment terminal; il est fonction du nombre de segments, ainsi que du nombre, de la nature et de la disposition des liaisons entre ceux-ci.

3.2.1.1.2 ARTICULATION PRISMATIQUE (SYMBOLE P)

Il s'agit d'une liaison de type « glissière » autorisant exclusivement la translation de S_i le long d'un axe Δ_i commun à S_{i-1} et à S_i .

Nous adoptons les représentations schématisées de la fig 3.3.

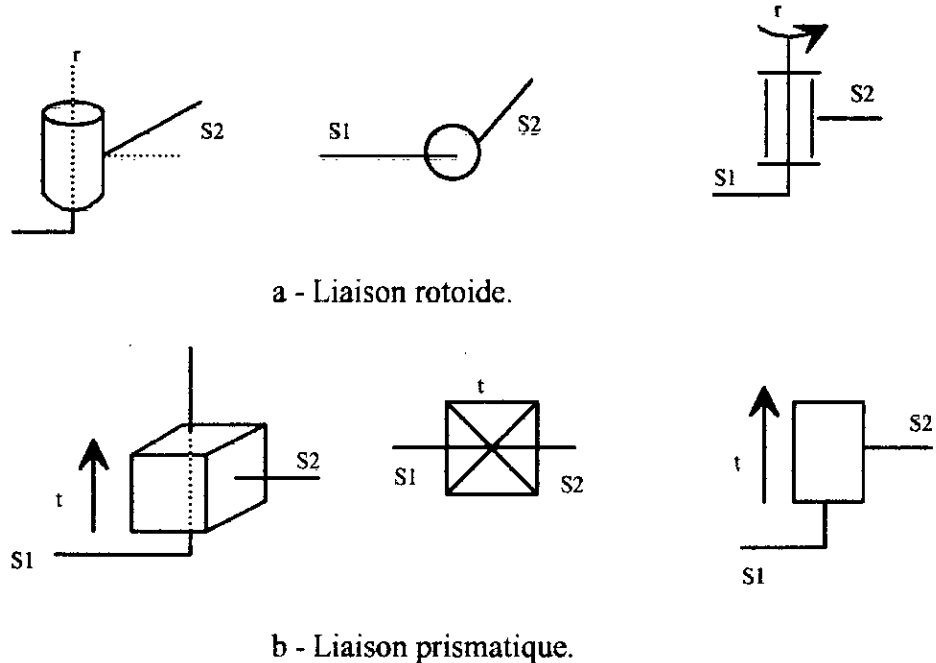


Fig 3.3: Schématisation des articulations simples normales.

3.2.1.2 ARTICULATIONS SPECIALES

Si on adopte un mouvement lié à Δ_i , entre S_i et S_{i-1} on peut dire qu'une articulation « spéciale » réalise une trajectoire qui n'est ni un cercle d'axe Δ_i , ni une droite parallèle à Δ_i .

Ainsi un système vis-ecrou combine un mouvement hélicoïdal unique, une translation et une rotation proportionnelle de même axe Δ_i .

3.2.2 ARTICULATIONS COMPLEXES

On rencontre des dispositifs combinant des mobilités élémentaires de type R ou P:

- liaison verrou (R P);
- liaison rotule (R R R);
- liaison d'appui sur un plan (P P R);

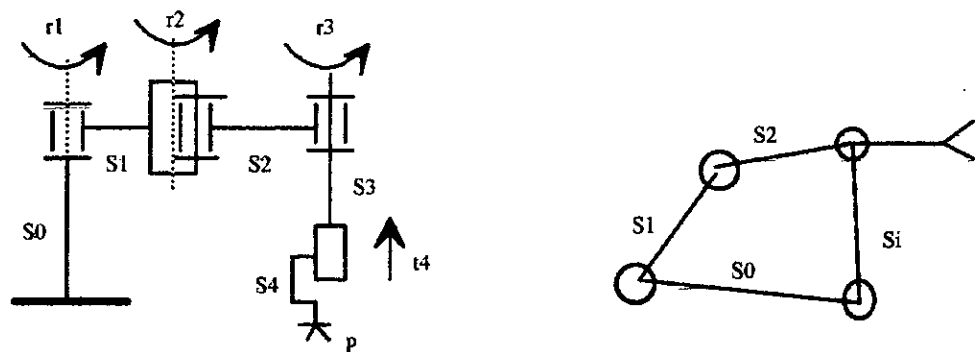
- etc...

Dans la plupart des cas, notamment lorsqu'elles sont motorisées, ces liaisons sont effectivement réalisées par une combinaison d'articulations normales et de segments intermédiaires.

3.3 DEGRES DE LIBERTE D'UN PORTEUR

L'animation d'un porteur se fait par le moyen d'actionneurs qui convertissent une énergie primaire en énergie mécanique et produisent un mouvement de rotation ou de translation utilisable (directement ou indirectement) pour mouvoir une articulation rotoïde ou prismatique [4].

Les différentes articulations ne sont pas toutes actionnables ou actionnées de manière indépendante; différents cas sont à considérer, notamment selon que le porteur est un mécanisme articulé en chaîne ouverte ou en chaîne fermée (les articulations impliquées sont structurellement dépendantes) fig 3.4.



Porteur en chaîne ouverte
à 4 variables articulaires.

mécanisme en
chaîne fermée.

Fig 3.4: Porteur en chaîne ouverte et en chaîne fermée.

3.4 ETUDE DE QUELQUES STRUCTURES DE BASE

Elles sont dérivées des différents systèmes de repère d'un point dans l'espace [4], [5].

3.4.1 STRUCTURE P P P(cartésienne fig 3.5)

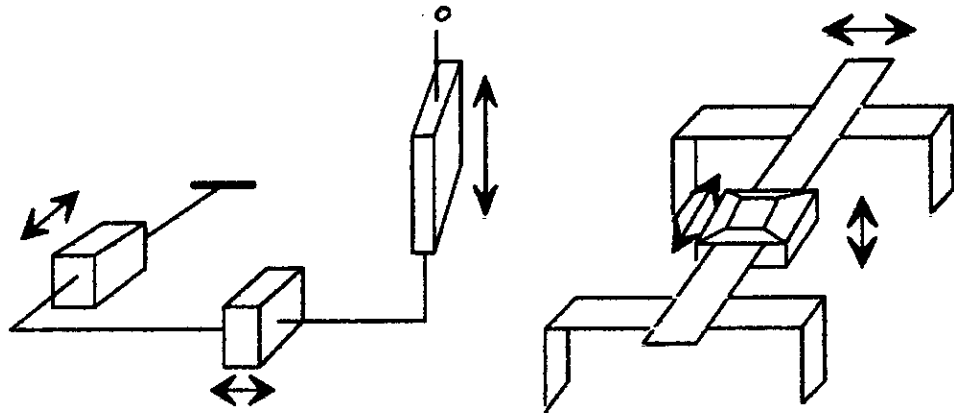


Fig 3.5: La structure cartésienne.

Ce type de structure, concernant 14% des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de « o » en coordonnées cartésiennes.

3.4.2 STRUCTURE R P P(cylindrique fig 3.6)

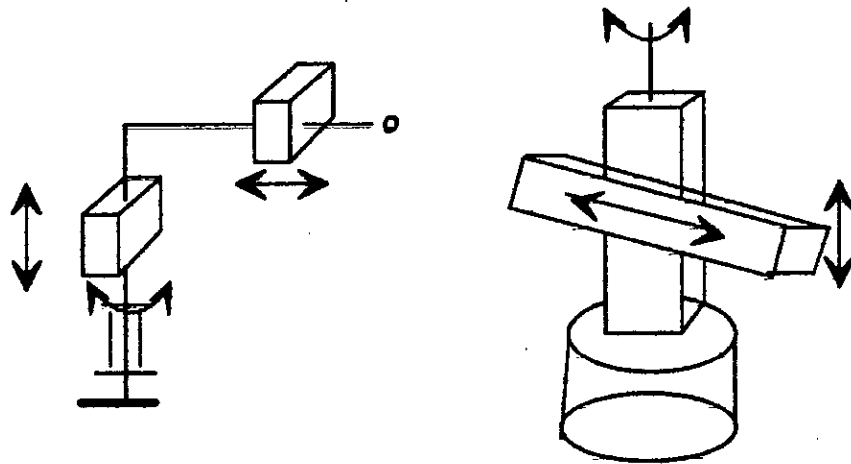


Fig 3.6: la structure cylindrique.

Ce type de structures, concernant 47% des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de « o » en coordonnées cylindriques.

3.4.3 STRUCTURE R R P(sphérique ou polaire fig 3.7)

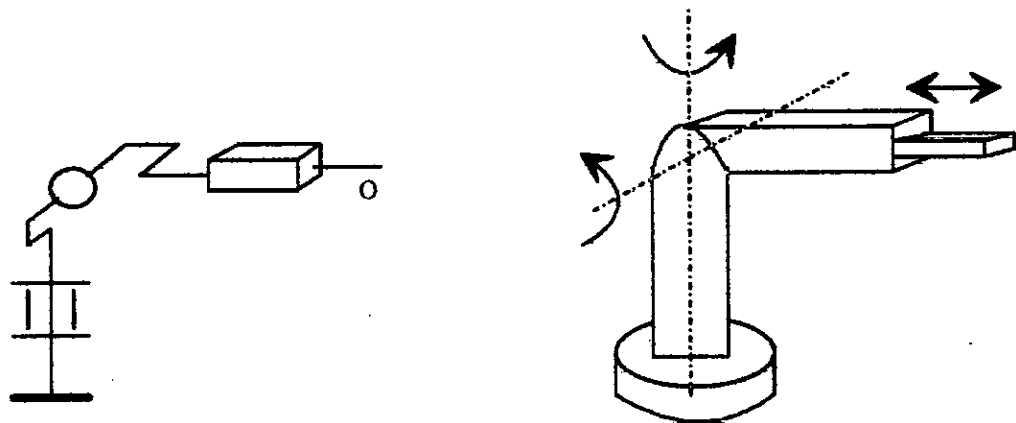


Fig 3.7: la structure sphérique.

Ce type de structure, concernant 13% des robots manipulateurs industriels est bien adapté à un repérage de « o » en coordonnées sphériques.

3.4.4 STRUCTURE R R R(angulaire fig 3.8)

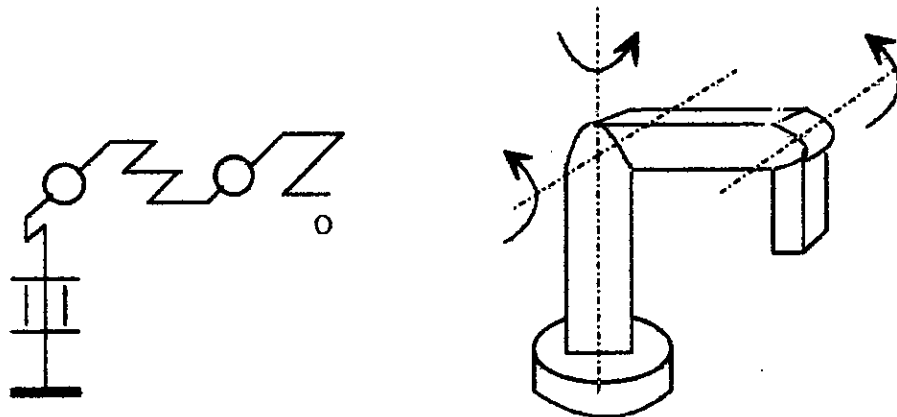


Fig 3.8: la structure angulaire.

Ce type de structure, concernant 25% des robots manipulateurs industriels est bien adapté à un repérage de « o » dans un système de coordonnées qualifiées d'anthropomorphe par analogie avec le bras humain.

3.5 PROBLEMES TECHNOLOGIQUES

Le choix des segments et de leurs liaisons (classe, architecture, dimensions, matériaux, ...) est réalisé sur la base d'un grand nombre de critères, dont les plus fréquents sont la résistance mécanique, la rigidité, la répartition des masses, le jeu d'assemblage, les phénomènes de frottements, les

coût de fabrication et de maintenance, ..., critères pondérés en fonctions des tâches dévolues au robot[3].

Nous définirons pour la suite :

- Les liaisons glissantes : c'est le cas où le contact inter-solides(en mouvement ou non) apparait une surface importante, sensiblement invariante dans le mouvement.

- Les liaisons roulantes : c'est lorsque les contacts inter-solides se réalisent en des « lignes » ou « points » de surfaces très limitées évoluant en position.

Ces systemes mécaniques entrent dans la conception des porteurs, ces derniers doivent subir des vérifications au niveau des performances mécaniques telles que:

- Les sollicitations dans les matériaux intervenant dans les liaisons et segments;

- l'aptitude à supporter les sollicitations « statiques »;

- l'endurance, c'est à dire la capacité de transmettre des sollicitations à évolution cyclique;

- rigidité au niveau des solides.

3.6 ETUDE MORPHOLOGIQUE DU MINI-ROBOT UTILISE

Le mini-robot utilisé est développé et conçu par la société italienne « ELECTRONICA VENETA », il est conçu à une échelle réduite pour être un bras articulé typique de robots industriels[6].

Ce robot peut servir comme milieu piloté pour l'évaluation, l'analyse économique et l'installation des robots industriels dans les entreprises.

3.6.1 STRUCTURE MECANIQUE DU MINI-ROBOT

La figure 3.9 représente le bras manipulateur étudié, sa géométrie et ses six degrés de liberté lui donnent une souplesse maximale à l'exécution pratique des différents programmes.

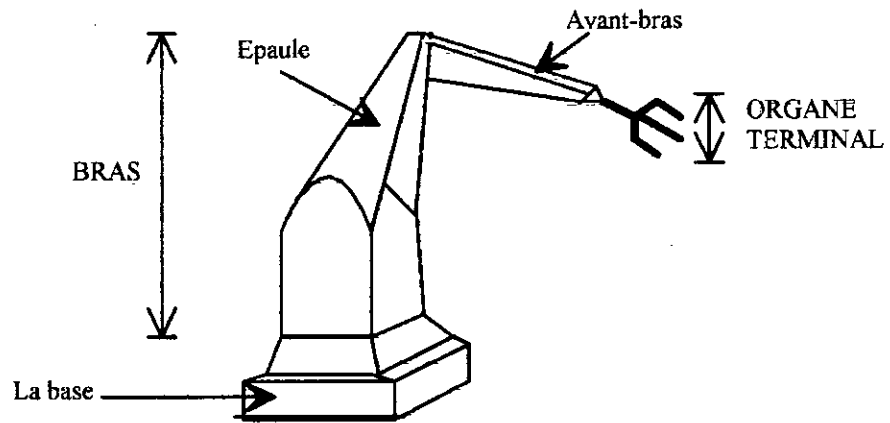


Fig 3.9: le mini-robot utilisé.

Une des particularités du mini-robot est le fonctionnement en « parallélogramme ». Avec le bras vertical, l'avant bras horizontal et la main qui pointe vers le bas, l'épaule peut se déplacer dans toutes les directions sans que l'avant bras et la main ne perdent leur orientation. De la même manière, l'avant bras peut être soulevé et abaissé sans que la direction de la main change.

Cette caractéristique a une importance vitale pour simplifier le déplacement d'objets (fig 3.10).

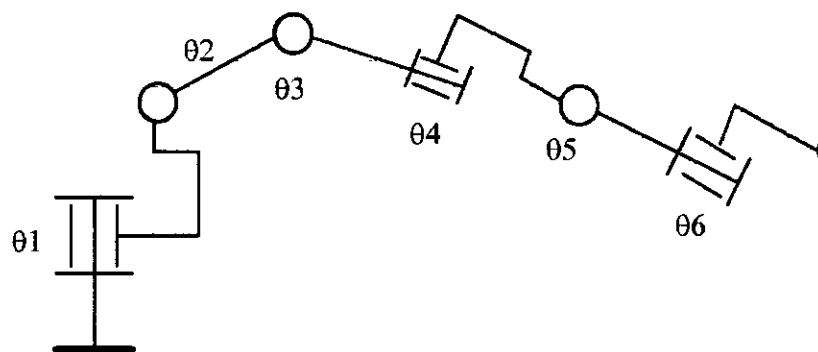


Fig 3.10: représentation graphique du mini-robot utilisé.

Le mini-robot est composé de 5 parties fondamentales à savoir:

- La base: la base a pour fonction de soutenir le reste du bras; elle sert aussi de boîtier pour les circuits d'interfaces et le moteur qui commande la rotation.

- Le bras: qui tourne sur la base au moyen de l'engrenage principal; il porte cinq moteurs, les engrenages de l'avant bras, de l'épaule et du poignet.

- L'épaule: tourne autour d'un axe horizontal fixé au bras; la partie inférieure porte les engrenages et les câbles qui permettent de mouvoir l'avant-bras, le poignet et la main.

- L'avant-bras: celui-ci tourne autour d'un axe placé sur l'épaule et porte les engrenages conique du poignet.

- L'organe terminal: est constitué par:

-- le poignet: celui-ci a deux mouvements de rotations; la première rotation est autour de l'axe de la main et la deuxième consiste en une rotation autour d'un axe horizontal.

-- la main: elle est dotée de trois doigts ayant ses extrémités en caoutchouc et peut soit se fermer ou s'ouvrir.

3.6.2 CALCUL DES ACCROISSEMENTS ANGULAIRES

Les calculs indiqués ci dessous permettent de connaître la relation entre chaque pas du moteur et l'accroissement angulaire de chaque articulation. Ces constantes sont nécessaires pour connaître la position de l'organe terminal en fonction des variables articulaires et vice versa.

3.6.2.1 ACCROISSEMENT ANGULAIRE DU BRAS(AAB)

$$\begin{aligned} \text{AAB} &= \text{angle de pas} * \text{rapport1} * \text{rapport2} \\ &= 7.3 * (20/72) * (12/108) \\ &= 0.2253 \text{ degrés par pas} \\ &= 4.4384 \text{ pas par degrés.} \end{aligned}$$

3.6.2.2 ACCROISSEMENT ANGULAIRE DE L'EPAULE (AAE)

$$\begin{aligned} \text{AAE} &= \text{angle de pas} * \text{rapport1} * \text{rapport2} \\ &= 7.3 * (14/72) * (12/108) \\ &= 0.1577 \text{ degrés par pas} \\ &= 6.3405 \text{ pas par degrés.} \end{aligned}$$

3.6.2.3 ACCROISSEMENT ANGULAIRE DE L'AVANT-BRAS(AAC)

$$\begin{aligned} \text{AAC} &= \text{AAE} \\ &= 0.1577 \text{ degrés par pas} \\ &= 6.3405 \text{ pas par degrés.} \end{aligned}$$

3.6.2.4 ACCROISSEMENT ANGULAIRE DU POIGNET (AAP)

$$\begin{aligned} \text{AAP} &= \text{AAB} \\ &= 0.2253 \text{ degrés par pas} \\ &= 4.4384 \text{ pas par degrés.} \end{aligned}$$

3.6.2.5 ACCROISSEMENT ANGULAIRE DE LA MAIN (AAM)

$$\begin{aligned} \text{AAM} &= 7.3 * (20/72) * (12/108) \\ &= 0.2253 \text{ degrés par pas.} \end{aligned}$$

MODELISATION ET ETUDE CINEMATIQUE

4.1 INTRODUCTION

Un robot ou manipulateur est caractérisé par une structure arborescente articulée, simple ou multiple, dont les segments sont mobiles les uns par rapport aux autres. Cet ensemble a pour but de mener l'organe terminal vers un lieu géométrique imposé par la tâche à réaliser et définie dans un espace opérationnel (fig 4.1).

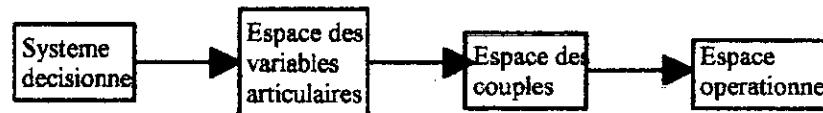


Fig 4.1: système de fonctionnement d'un robot.

4.2 MODELISATION GEOMETRIQUE

Le modèle géométrique d'un robot constitue une représentation mathématique qui l'identifie à une structure arborescente comportant n corps rigides, sans masse, articulés entre eux (fig 4.2).

Chaque corps est réduit à sa plus simple expression, c'est à dire à son orientation et à sa position par rapport au corps précédent [4].

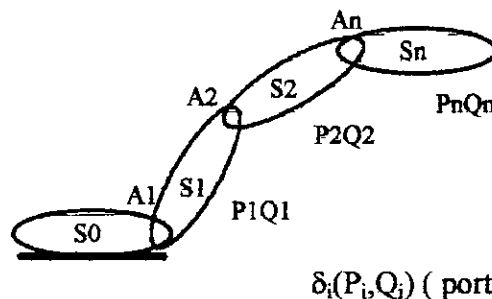


Fig 4.2: la structure arborescente.

Chaque configuration géométrique possible est définie par un ensemble de variables articulaires qui traduisent les déplacements relatifs d'un corps par rapport au précédent. Les variables articulaires font le lien entre la position et l'orientation de l'organe terminal et les consignes définies dans un repère de base:

$$\begin{array}{l} X_i/R_0 \\ \text{(variables géométriques)} \end{array} = \begin{array}{l} f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ \text{(variables articulaires)} \end{array}$$

4.2.1 LES VARIABLES ARTICULAIRES

Les variables articulaires expriment l'ensemble des possibilités de mouvements entre deux articulations, soit une rotation ou une translation.

4.2.2 LES VARIABLES GEOMETRIQUES

Les variables géométriques ou opérationnelles définissent la situation de l'extrémité de l'arborescence par deux caractéristiques: la position et l'orientation:

- un repère de base ou de référence R_0 ;
- un repère lié à la tache R_t (fig 4.3).

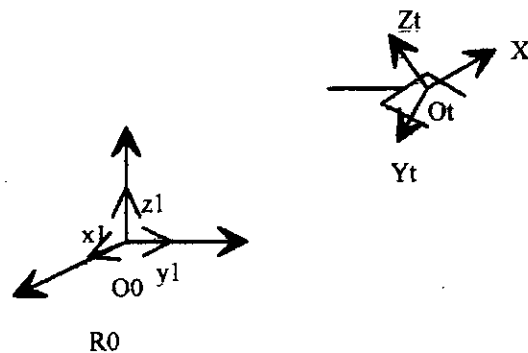


Fig 4.3: Repère affine lié au bâti du robot manipulateur et à son organe terminal.

4.2.2.1 POSITION

La position du repère R_t par rapport au repère R_0 est défini par les trois coordonnées du point O_t dans le repère R_0 .

De nombreux choix sont possibles parmi lesquels nous mentionnerons les coordonnées:

- cartésiennes;
- cylindriques;
- sphériques.

4.2.2.2 ORIENTATION

L'orientation du repère R_i , par rapport au repère R_0 , peut être définie de divers manières, tel que:

- paramètres λ, θ, ρ (vues précédemment);
- angles de Bryant;
- angles d'Euler.

4.3 DEFINITION DE LA CHAINE CINEMATIQUE D'UN ROBOT MANIPULATEUR

Le robot manipulateur est constitué de n corps solides articulés entre eux, suivant une structure de chaîne, par des liaisons de rotation et/ou translation (fig 4.4).

Le premier corps de la chaîne est articulé sur un bâti fixe et le dernier corps supporte l'organe terminal[4].

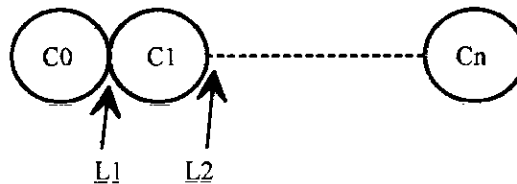


Fig 4.4: Numérotation des corps et des liaisons de la chaîne cinématique du robot manipulateur.

4.4 MATRICE DE TRANSFORMATION HOMOGÈNE DH

La matrice de transformation définit les relations géométriques qui existent entre deux repères consécutifs R_i et R_{i-1} en fonction de la variable d'articulation θ_i , s'il s'agit d'un axe de rotation, ou d_i s'il s'agit d'un axe de translation[6].

La position et l'orientation du repère R_i par rapport à R_{i-1} , sont définies par les quatre paramètres dits de « DENAVIT HARTINBERG » (DH) (fig 4.5):

- a_i : représente la longueur de la perpendiculaire commune aux axes Z_{i-1} et Z_i ;
- d_i : représente la valeur de la coordonnée de l'origine du système d'axes O_i sur l'axe Z_{i-1} ;

- α_i : c'est l'angle entre l'axe Z_{i-1} et l'axe Z_i obtenus en tournant Z_{i-1} vers Z_i autour de l'axe X_i ;

- θ_i : c'est l'angle entre X_i et X_{i-1} mesuré autour de Z_i .

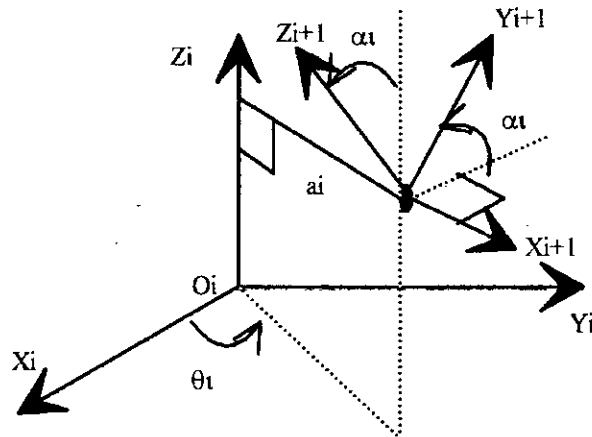


Fig 4.5: Définition des paramètres de DENAVIT-HARTENBERG.

Ces paramètres permettent le passage mathématique d'un référentiel $i-1$ à un autre i en utilisant une matrice $T_{i-1,i}$, homogène et carrée, et donnée par:

$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i * \cos \alpha_i & \sin \theta_i * \sin \alpha_i & a_i * \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i * \cos \alpha_i & -\cos \theta_i * \sin \alpha_i & a_i * \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le produit de ces matrices élémentaires donne la matrice de passage homogène du repère R_0 lié au bâti au repère R_i lié à l'organe terminal:

$$T_{R0/Rn} = T_{R0/R1} * T_{R1/R2} \cdots * T_{Rn-1/Rn} = \prod_{i=0}^{n-1} T_{Rii/Ri+1}$$

4.5 VOLUME DE TRAVAIL

Le volume de travail d'un robot manipulateur est défini comme étant l'espace physique engendré par un point de l'organe terminal lorsque la configuration du robot évolue[6].

Pour réaliser une telle tâche, on est amené à choisir un point qui appartient à ce volume.

4.6 MODELISATION GEOMETRIQUE INVERSE

La synthèse de la commande d'un robot manipulateur, nécessite la détermination des variables articulaires qui sont liées par une fonction géométrique f avec les coordonnées opérationnelles correspondantes[6].

Donc on est amené à calculer une fonction réciproque $\theta_i = f^{-1}(x_i)$ qui constitue un modèle géométrique inverse du robot manipulateur.

La difficulté de cette résolution réside dans le fait que la fonction f est non linéaire.

4.6.1 CALCUL DU MODEL INVERSE

La détermination du modèle inverse de f s'effectue selon deux méthodes:

- La méthode analytique;
- La méthode itérative.

4.6.1.1 METHODE ANALYTIQUE

La méthode analytique consiste à établir toutes les fonctions f^i reliant chaque variable articulaire à toutes les variables opérationnelles et ceci quelle que soit la configuration du robot. Cette méthode assure la détermination de toutes les solutions possibles.

Plusieurs méthodes analytiques sont disponibles telle que la méthode de quaternion.

4.6.1.2 METHODE ITERATIVE

La méthode itérative permet d'extraire le modèle inverse de manière générale mais a l'inconvénient de nécessiter un grand nombre de calculs et peut poser des problèmes de convergence pour la détermination numérique des θ_i , on peut utiliser plusieurs méthodes numériques à savoir:

- 1 - la méthode de NEWTON-RAPHSON de linéarisation de la matrice[8];
- 2 - la méthode utilisant la matrice JACOBIENNE[8];
- 3 - la méthode d'optimisation[8].

4.7 LA MODELISATION DU BRAS MANIPULATEUR UTILISE

Dans cette section nous allons modéliser notre bras manipulateur grâce à la méthode DH examinée plus haut[6].

Le bras manipulateur est constitué d'un porteur et d'un effecteur. L'effecteur est dans notre cas un poignet terminé par trois doigts et le porteur se compose de trois segments: bras, avant-bras et épaule.

L'appellation poignet recouvre les autres articulations qui existent à l'extrémité du bras.

4.7.1 SCHEMA DES REPERES ASSOCIES AU ROBOT

Le schéma de la figure 4.6 correspond à la position du bras en prenant les $\theta_i = 0$ ($i=1..5$).

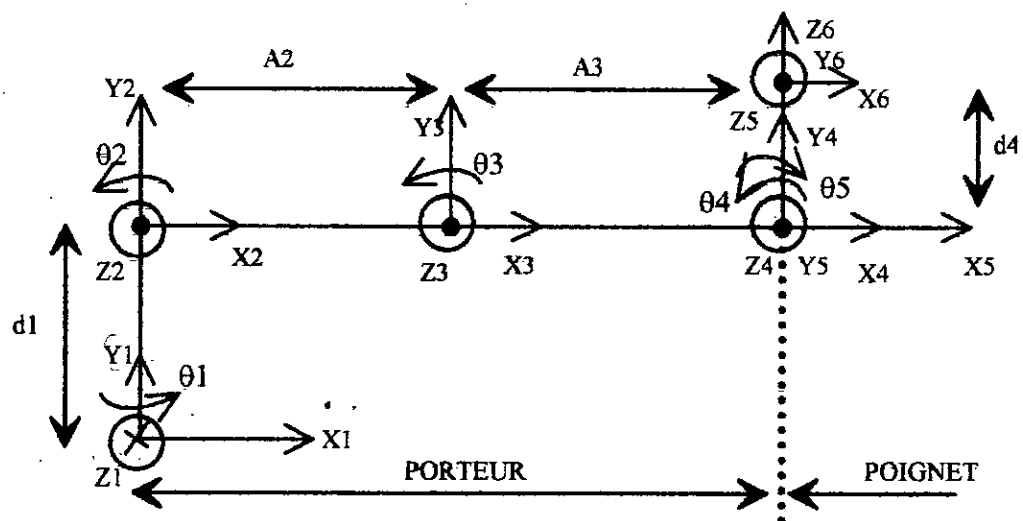


Fig 4.6: schéma des repères associés au bras manipulateur.

4.7.2 TABLEAU DES PARAMETRES DH

Articulation	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1	90°	0	0
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0
4	θ_4	90°	0	0
5	θ_5	0	0	d_4

La sixième variable articulaire θ_6 définit l'ouverture des doigts de la pince.

4.7.3 MATRICES DH

Les matrices de transformation sont alors obtenues en portant les paramètres du tableau ci dessus dans la matrice élémentaire $T_{i-1,i}$:

$$T_{1,2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{2,3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 * \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 * \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{3,4} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_3 * \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & a_3 * \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{4,5} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{5,6} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de passage du référentiel R_1 au référentiel R_6 est obtenue en effectuant le produit de ces matrices:

$$T_{16} = T_{12} * T_{23} \dots * T_{56} = \prod_{i=1}^5 T_{i,i+1}$$

$$T_{5,6} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & x_p \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & y_p \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec:

$$t_{11} = c_1 c_4 c_5 c_{2+3} - c_1 s_{2+3} s_4 c_5 - s_1 s_5$$

$$t_{21} = s_1 c_4 c_5 c_{2+3} - s_1 s_{2+3} s_4 c_5 + c_1 s_5$$

$$t_{31} = s_{2+3} c_4 c_5 + s_4 c_5 c_{2+3}$$

$$t_{12} = -c_1 c_{2+3} c_4 s_5 + c_1 s_{2+3} s_4 s_5 - s_1 c_5$$

$$t_{22} = -s_1 c_{2+3} c_4 s_5 + s_1 s_{2+3} s_4 s_5 + c_1 c_5$$

$$t_{32} = -c_4 s_5 s_{2+3} - s_4 s_5 c_{2+3}$$

$$t_{23} = -s_1 s_4 c_{2+3} - s_1 c_4 s_{2+3}$$

$$t_{33} = -s_4 s_{2+3} + c_4 c_{2+3}$$

$$x_p = (a_3 - d_4 s_4) c_1 c_{2+3} - d_4 c_1 c_4 s_{2+3} + a_2 c_1 c_2$$

$$y_p = (a_3 - d_4 s_4) s_1 c_{2+3} - d_4 s_1 c_4 s_{2+3} + a_2 s_1 c_2$$

$$z_p = (a_3 - d_4 s_4) s_{2+3} + d_4 c_4 c_{2+3} + a_2 s_2 + d_1$$

avec:

$$c_i = \cos \theta_i$$

$$s_i = \sin \theta_i$$

$$s_{i+j} = \sin (\theta_i + \theta_j)$$

$$c_{i+j} = \cos (\theta_i + \theta_j)$$

4.7.4 VOLUME DE TRAVAIL

Le volume de travail est déterminé en tenant compte de deux limitations:

1 - la plage de variation d'une coordonnée généralisée est bornée $\theta_i \in [\theta_{i\min}, \theta_{i\max}]$;

2 - les dimensions principales des corps constituant le robot manipulateur sont fixées.

Dans notre cas les plages de variation des θ_i sont indiquées dans le tableau suivant:

$\theta_i \setminus i$	1	2	3	4	5	6
$\theta_{i\min}$	0°	-25°	-90°	-90°	-90°	0
$\theta_{i\max}$	360°	120	50°	90°	90°	50°

Les dimensions du bras manipulateur sont définies par les valeurs numériques suivantes:

$$d_1 = 24 \text{ cm}$$

$$a_2 = a_3 = 19 \text{ cm}$$

$$d_4 = 4 \text{ cm}$$

4.7.5 CALCUL DES VARIABLES ARTICULAIRES

La méthode DH permet d'extraire le système non linéaire suivant reliant la position à atteindre par l'organe terminal (x_p, y_p, z_p) et les variables articulaires $\theta_i (i=1..5)$:

$$x_p = (a_3 - d_4 s_4) c_1 c_{2+3} - d_4 c_1 c_4 s_{2+3} + a_2 c_1 c_2$$

$$y_p = (a_3 - d_4 s_4) s_1 c_{2+3} - d_4 s_1 c_4 s_{2+3} + a_2 s_1 c_2$$

$$z_p = (a_3 - d_4 s_4) s_{2+3} + d_4 c_4 c_{2+3} + a_2 s_2 + d_1$$

C'est un système de trois équations et quatre inconnues, dont θ_1 peut être déduite à partir du schéma des repères associés au bras manipulateur:

$$\theta_1 = \text{Arctg}(y_p/x_p)$$

On résoud le système par la méthode de NEWTON RAPHSON qui consiste à:

- linéariser le système;
- résoudre le nouveau système par la méthode de GAUSS.

On remarque que la cinquième variable articulaire (θ_5) ne figure pas dans ce système à cause du mouvement de l'organe terminal. D'après ce mouvement, on voit bien que $|\theta_5| = |\theta_6|$; il reste pour l'utilisateur à choisir le sens de rotation de θ_5 , suivant le travail à effectuer.

4.7.6 FORMULATION DE LA METHODE

Nous avons le système suivant[8]:

$$f_1(\theta) = x_p - (a_3 - d_4 s_4) c_1 c_{2+3} + d_4 c_1 c_4 s_{2+3} - a_2 c_1 c_2 = 0$$

$$f_2(\theta) = y_p - (a_3 - d_4 s_4) s_1 c_{2+3} + d_4 s_1 c_4 s_{2+3} - a_2 s_1 c_2 = 0$$

$$f_3(\theta) = z_p - (a_3 - d_4 s_4) s_{2+3} - d_4 c_4 c_{2+3} - a_2 s_2 - d_1 = 0$$

où $\theta^{(0)} = (\theta_2^{(0)}, \theta_3^{(0)}, \theta_4^{(0)})$ est un point initial donné et qui est considéré comme une approximation de la solution.

Le développement en série de Taylor de ces fonctions nous donne le système linéaire suivant:

$$f_i(\theta^{(n)}) + \sum_{j=2}^4 \Delta \theta_j^{(n)} \cdot \frac{\partial f_i^{(n)}}{\partial \theta_j} = 0 \quad (i=1..3)$$

$$\theta^{(n+1)} = \theta^{(n)} + \Delta \theta^{(n)}$$

4.7.7 ORGANIGRAMME DE LA METHODE DE NEWTON RAPHSON

Les paramètres qui sont utilisés dans l'organigramme sont[8]:

N: nombre d'itérations;

Nmax: nombre maximal d'itérations;

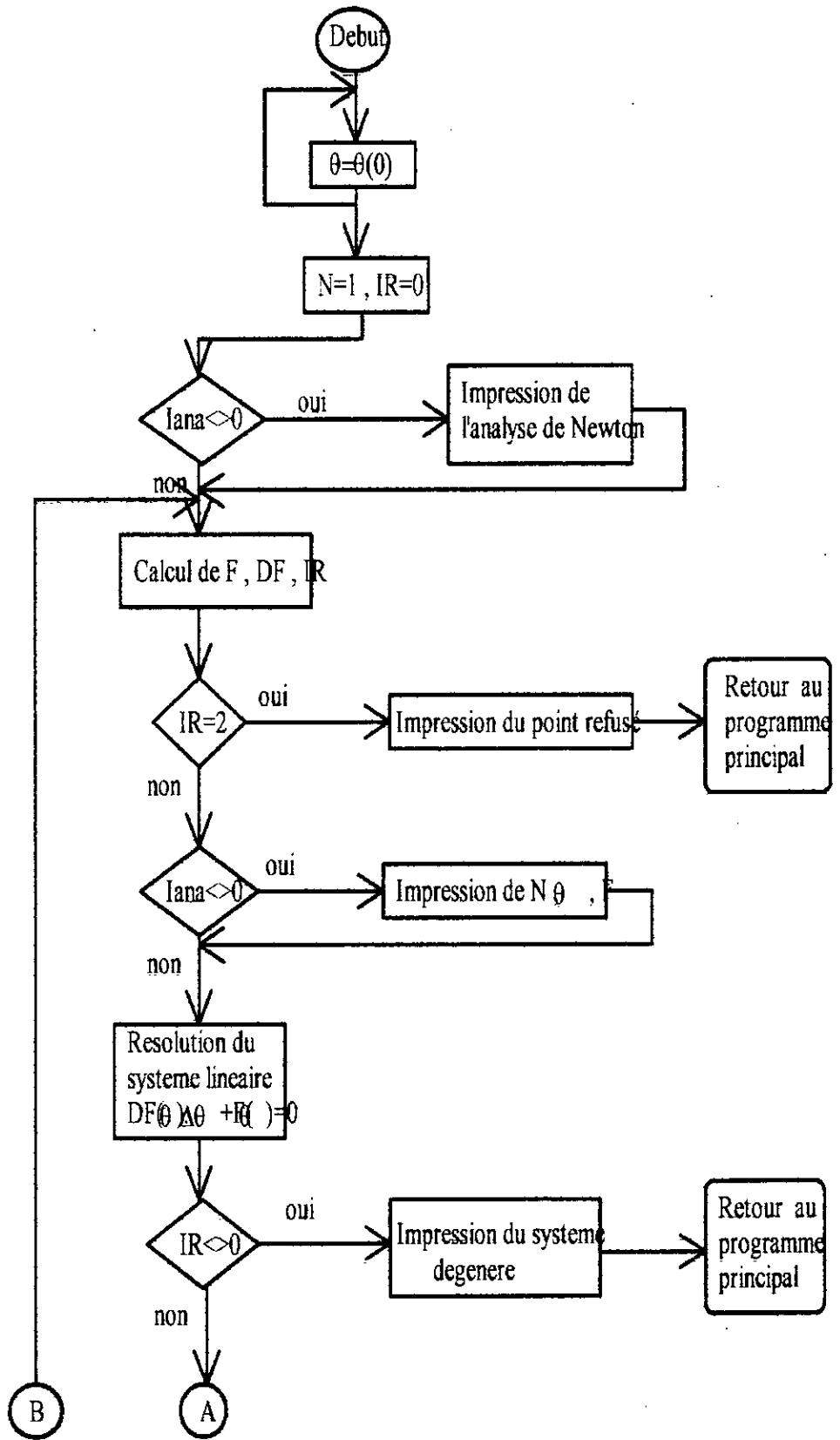
ε : représente la précision choisie;

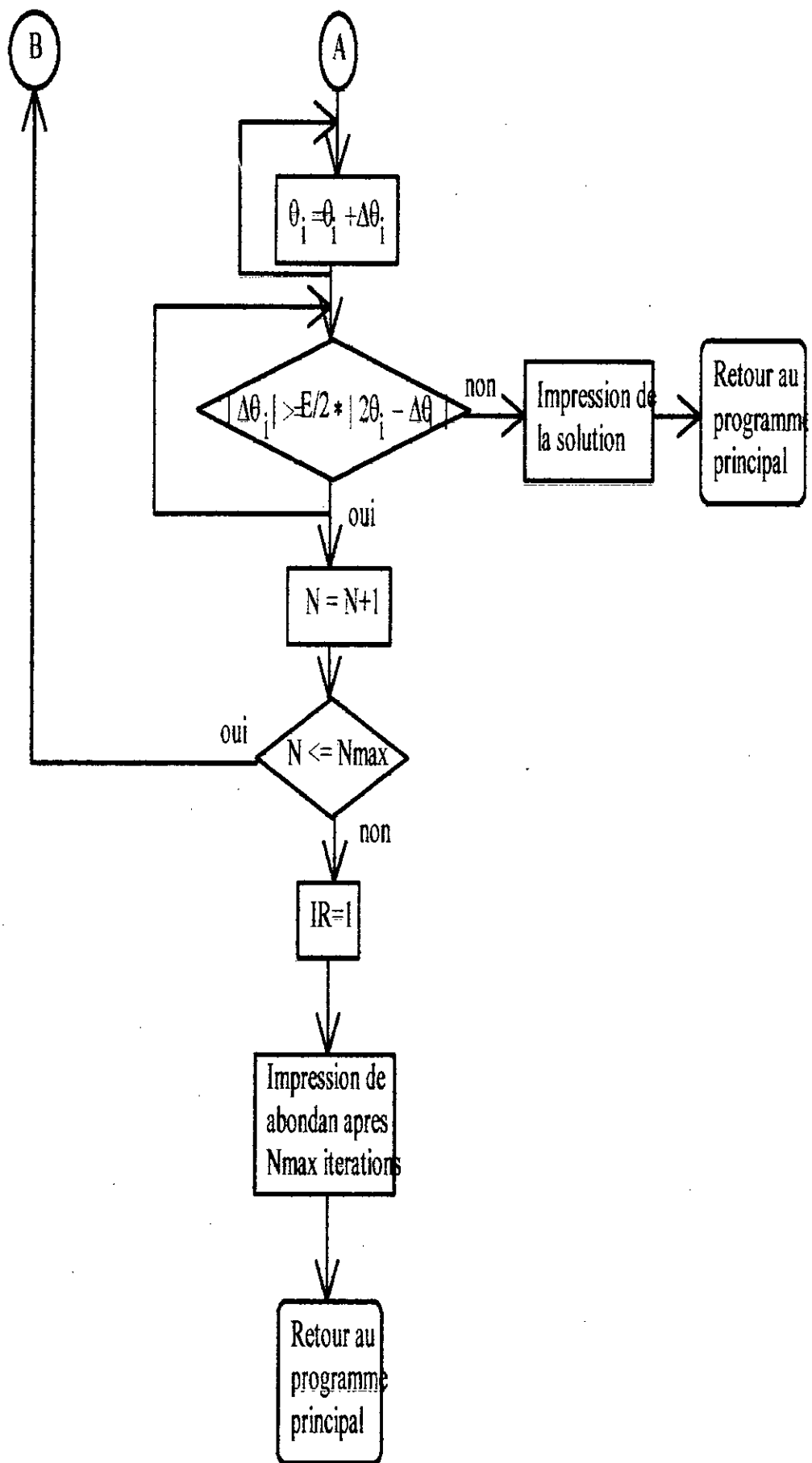
Iana=0: permet d'imprimer les vecteurs θ et $F(\theta)$;

IR: controle le bon déroulement des calculs:

- IR=0: le calcul s'est déroulé normalement;
- IR=1: la solution n'a pas été trouvée après Nmax itérations;
- IR=2: cela veut dire qu'un incident s'est produit au cours du calcul.

Organigramme de la méthode de Newton Raphson:

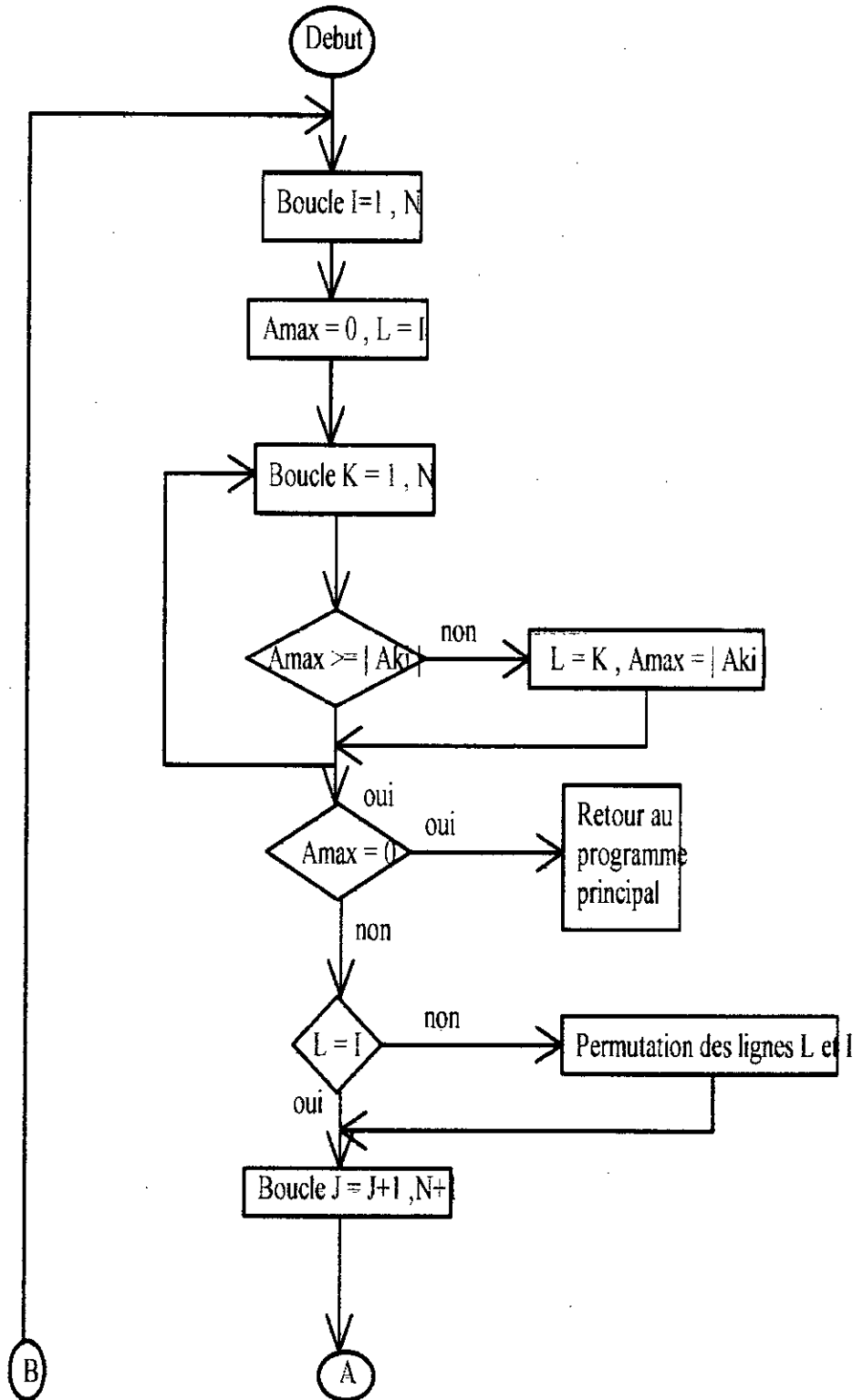


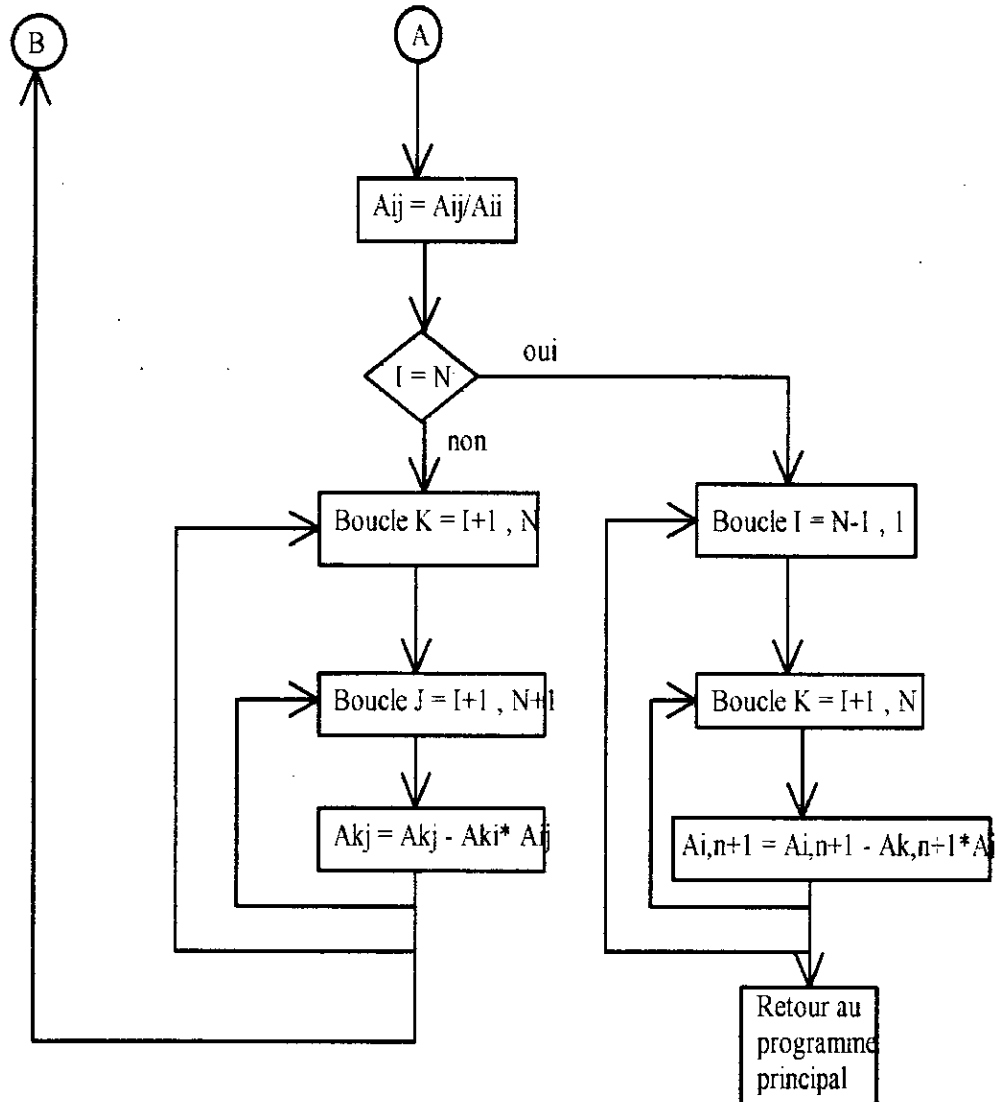


La solution du système linéaire:

$$DF(\theta).\Delta\theta + F(\theta) = 0$$

S'obtient par la méthode de Gauss dont voici l'organigramme:





4.7.8 DISCUSSION DE LA CONVERGENCE

La méthode de Newton Raphson converge sous les conditions suffisantes suivantes[6]:

1 - si les fonctions $f_i(\theta)$ admettent des dérivées partielles premières continues dans un convexe contenant la solution θ^* . Cette condition est vérifiée dans notre cas;

2 - si la matrice Jacobienne est non singulière dans un voisinage de θ^* ;

3 - si le vecteur initial $\theta^{(0)}$ est suffisamment proche de θ^* .

LE MOTEUR PAS A PAS

5.1 INTRODUCTION

Le principe du moteur pas à pas est connu depuis déjà assez longtemps, mais il ne s'est réellement développé que dans les années soixante.

C'est l'avènement des composants électroniques qui a rendu possible, du point de vue industriel et économique, ce développement.

La simplicité de cet actionneur réside dans sa possibilité de commande de position et de vitesse en boucle ouverte; le progrès technologique de l'électronique de puissance a permis l'utilisation de ce type de moteurs de plus en plus puissant et à prix réduit.

L'application de ces moteurs a commencé par la péri-informatique (déroulement de papier, entraînement de bande, de carte, de tête d'imprimante ou de machine à écrire ...). Actuellement, elle s'étend vers la commande des machines outils ainsi que la robotique[9].

5.2 PRINCIPE DU MOTEUR PAS A PAS

La figure 5.1 montre la structure d'un moteur pas à pas; celui-ci est appelé à réluctance variable. Nous allons étudier d'abord comment fonctionne ce moteur en utilisant l'exemple de la figure 5.1.

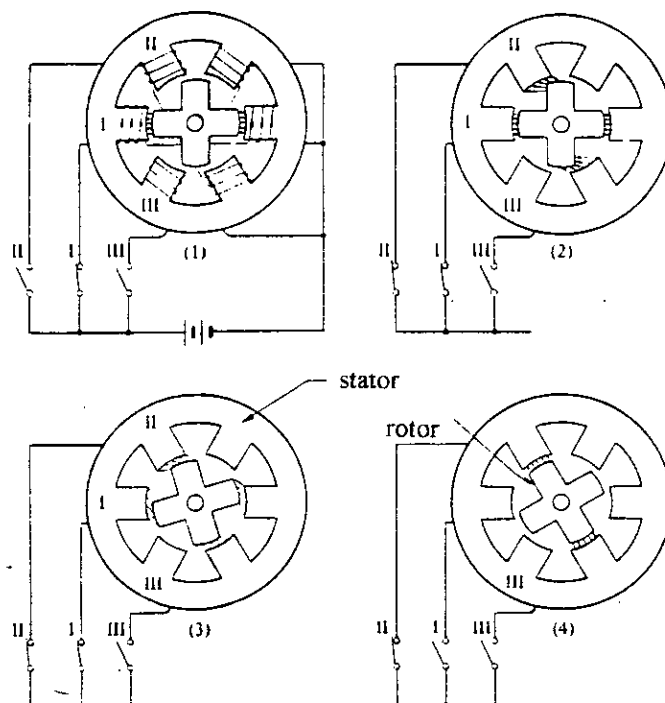


Fig 5.1: Structure d'un moteur pas à pas.

Le stator porte six pôles ou dents tandis que le rotor a quatre pôles. Le stator et le rotor sont en acier doux. Trois bobinages sont placés sur le stator comme montré sur la figure. Chacun est divisé en deux parties branchées en série. Chaque bobinage est appelé « phase »; de ce fait ce moteur est un moteur à trois phases.

Le bobinage est alimenté en courant continu à travers trois interrupteurs I, II et III.

Au début (1), la phase I est alimentée en courant via l'interrupteur I, on peut dire aussi que la phase I est excitée. Cette excitation engendre un flux magnétique dans l'entrefer comme indiqué par les flèches. Dans ce cas la, deux dents portant la phase I, qui est excitée, sont alignées avec deux des quatre dents du rotor. C'est un état d'équilibre pour le système. Quand l'interrupteur II est fermé, la phase II est excitée en plus de la phase I; un flux magnétique est créé par le bobinage II comme montré par (2). Cela crée un couple qui fait tourner le rotor jusqu'à la nouvelle position d'équilibre (3). Ainsi le rotor tourne d'un angle fixe appelé « pas angulaire » qui est de 15° dans notre cas. Si l'interrupteur I est ouvert, la bobine I ne sera plus alimentée et alors le rotor effectuera une autre rotation de 15° pour atteindre l'état d'équilibre (4).

La position angulaire du rotor peut être repérée en connaissant le nombre de pas effectué grâce à un compteur incrémental.

Si les interrupteurs sont actionnés selon une séquence bien définie, le rotor effectuera des rotations régulières d'un pas. La vitesse de rotation peut être, elle aussi, contrôlée.

De nos jours ce sont les transistors en commutation qui sont utilisés comme interrupteurs et le signal de commutation est généré par des circuits intégrés digitaux ou par microprocesseurs.

Comme expliqué plus haut, le moteur pas à pas est un moteur électrique qui convertit un signal de commande digital en un mouvement mécanique.

Comparé à d'autres moteurs ayant la même fonction, les systèmes utilisant les moteurs pas à pas ont les avantages suivants :

1- La possibilité d'un asservissement de position ou de vitesse en boucle ouverte.

2- Les erreurs de positions sont non cumulatives.

3- Les moteurs pas à pas sont compatibles avec les équipements digitaux modernes.

5.3 LES PRINCIPAUX TYPES DE MOTEURS PAS A PAS

5.3.1 LE MOTEUR PAS A PAS A RELUCTANCE VARIABLE

Le moteur pas à pas à réluctance variable peut être considéré comme étant le plus simple type de moteurs pas à pas.

La figure 5.2 montre le schéma général d'un moteur pas à pas à réluctance variable; ce schéma nous facilitera l'explication de son principe de fonctionnement. C'est un moteur à trois phases avec un stator portant six dents. Chaque ensemble de deux dents alignées porte une partie du bobinage d'une phase et ces deux bobinages sont reliés entre eux soit en séries ou en parallèle (dans la figure ils sont reliés en séries). Comme on le voit sur la figure le rotor a quatre dents.

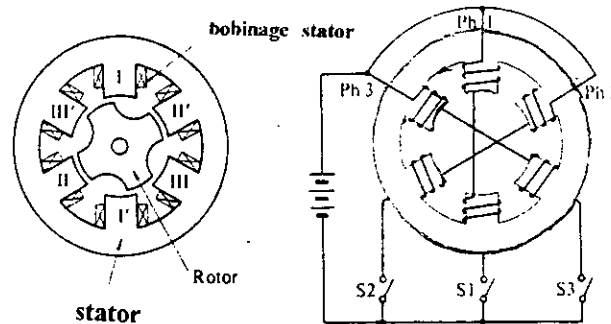


Fig 5.2: Moteur pas à pas à réluctance variable.

Le stator et le rotor sont réalisés en alliage de silicium. Ce matériau doit avoir une grande perméabilité et permettre le passage d'un grand flux magnétique à travers lui quand une faible force électromotrice lui est appliquée.

Chaque phase est contrôlé par un interrupteur. Si la phase I est excitée, le flux magnétique sera comme indiqué par la figure 5.3. Alors le rotor sera positionné de tel sorte que les dents 1 et 1' et deux des quatre dents du rotor soient alignées. Quand les dents du rotor et celles du stator sont alignées ainsi, la réluctance magnétique est minimale.

Si le rotor bouge d'un côté ou de l'autre de la position d'équilibre sous l'effet d'un couple externe appliqué à l'arbre du rotor, un couple de rappel

tendra à remettre le rotor dans sa position d'équilibre comme indiqué par la figure 5.4.

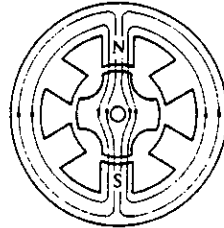


Fig 5.3: Flux magnétique dans le moteur.

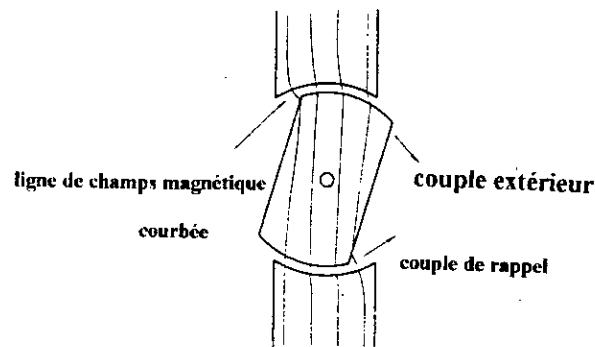


Fig 5.4: Couple de rappel tendant à remettre le rotor dans sa position d'équilibre.

Comme on le voit dans cette même figure, quand les dents du rotor et du stator ne sont pas dans l'alignement de la phase excitée, la réluctance magnétique est grande. Le moteur à réluctance variable travaille dans le but de minimiser cette réluctance magnétique.

Lorsque la phase I n'est plus excitée et que la phase II est excitée, le rotor se met soudainement en mouvement comme le montre la figure 5.5. Le moteur tourne d'un angle de 30° pour minimiser la réluctance magnétique. Cette rotation d'un pas angulaire à chaque commutation est appelée « pas ».

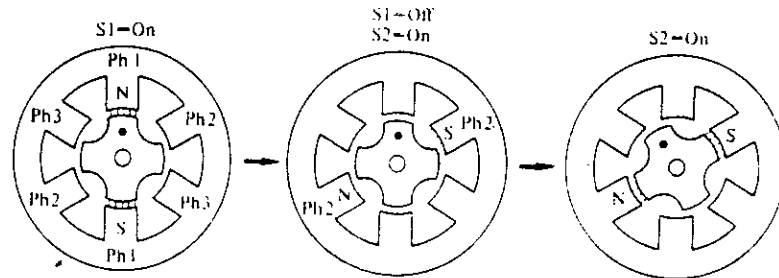


Fig 5.5: Détail de fonctionnement d'un moteur à réluctance variable.

5.3.2 LE MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT

Le moteur pas à pas utilisant un aimant permanent dans son rotor est appelé moteur pas à pas à aimant permanent. L'exemple d'un moteur pas à pas à aimant permanent à quatre phases est donné par la figure 5.6. Un aimant cylindrique est utilisé comme rotor et le stator a quatre dents.

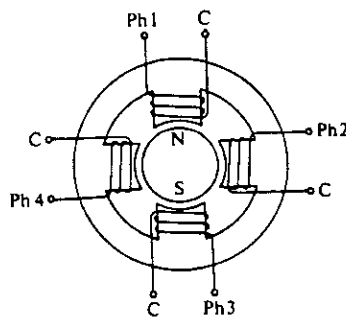


Fig 5.6: Moteur pas à pas à aimant permanent.

Le schéma de base du circuit de commande est décrit en figure 5.7. La borne marquée « C » de chaque phase est connecté à la borne « + » de l'alimentation en courant continu. Si les phases sont excitées suivant la séquence Ph 1 - 2 - 3 - ... le rotor se mettra en rotation comme indiqué par la figure 5.8. Le pas angulaire est de 90° dans cette machine. Si le nombre de

dents du stator et le nombre de pôles magnétiques du stator sont doublés, le moteur deviendra un moteur à quatre phases avec un pas angulaire de 45° .

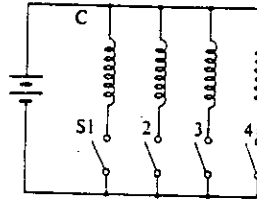


Fig 5.7: Schéma du circuit de commande.

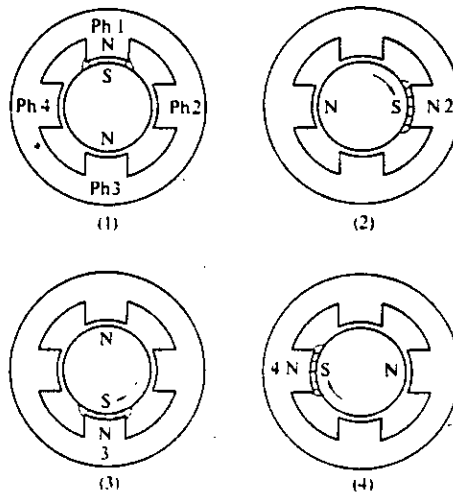


Fig 5.8: Fonctionnement du moteur à aimant permanent.

Pour diminuer le pas angulaire du moteur pas à pas à aimant permanent, le nombre de pôles magnétiques et le nombre de dents du stator doivent être augmentés. Cependant cette augmentation est limitée.

L'un des avantages du moteur pas à pas à aimant permanent est le fait qu'il y a un couple de maintien du rotor même en l'absence d'excitation.

Il y a deux désavantages à l'utilisation du moteur à aimant permanent :

1- l'aimant est coûteux.

2- la densité maximale du flux est limitée par le niveau de la rémanence magnétique de l'aimant.

5.3.3 LE MOTEUR PAS A PAS HYBRIDE

Un autre type de moteur pas à pas ayant un aimant permanent comme rotor est le moteur pas à pas hybride. Le terme hybride vient du fait que ce moteur est une combinaison du moteur à aimant permanent et du moteur à réluctance variable. Le schéma du moteur hybride est donné par la figure 5.9 La structure du stator est la même que celle du moteur à réluctance variable, seulement le bobinage et les bornes de connexions sont différentes de ceux du moteur à réluctance variable.

Dans le moteur pas à pas à réluctance variable, seul une ou deux bornes d'une même phase sont montées sur un pôle, tandis que dans le cas d'un moteur hybride à quatre phases, les bornes de deux phases différentes sont montées sur un même pôle comme indiqué par la figure.

Cependant un pôle n'appartient pas à une seule phase. Les deux bornes du pôle sont montées en schéma bifilaire, elles produisent différentes polarités magnétiques suivant l'excitation.

Une autre caractéristique importante du moteur hybride est la structure de son rotor. Un aimant cylindrique est placé dans le cœur du rotor comme indiqué par la figure. Chaque pôle de l'aimant est couvert par des dents en acier doux. La structure en dents des deux sections est décalée l'une de l'autre d'une demie largeur de dent. Dans certains moteurs les dents du rotor sont alignées, mais ce sont celles du stator qui sont décalées.

Les lignes de champs générées par les bornes du stator sont des lignes hétéropolaires.

Dans ce type de moteur, le couple est créé par l'interaction entre ces lignes de champs et la structure en dents dans l'entrefer.

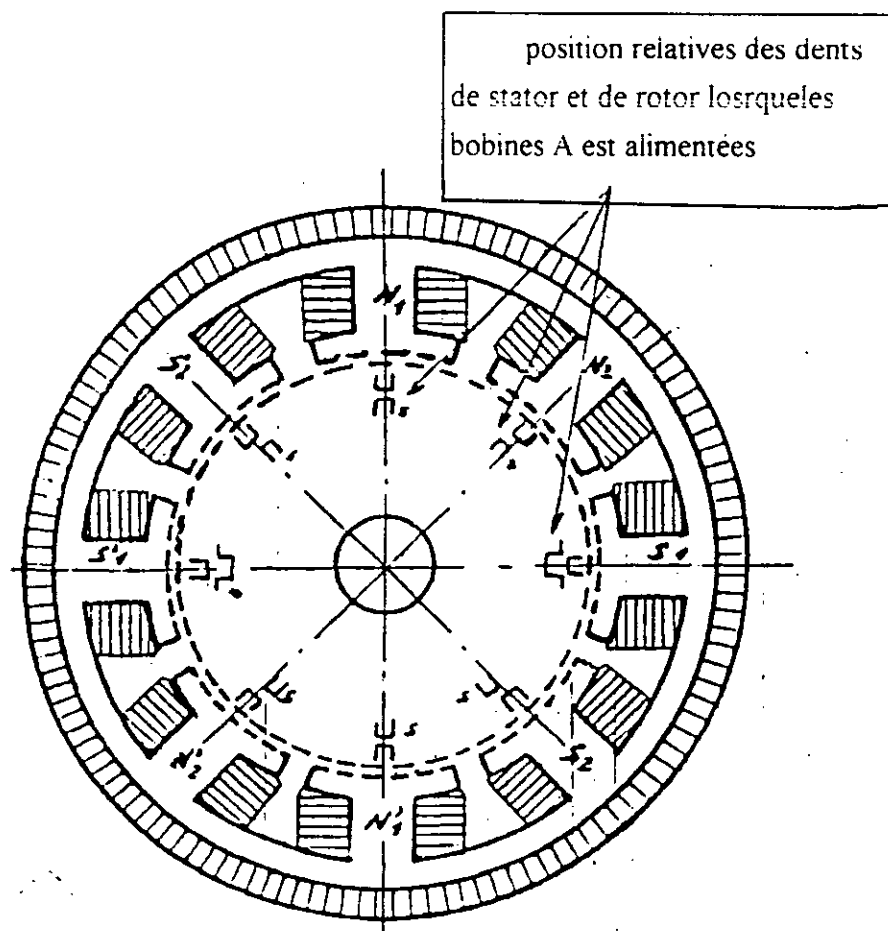
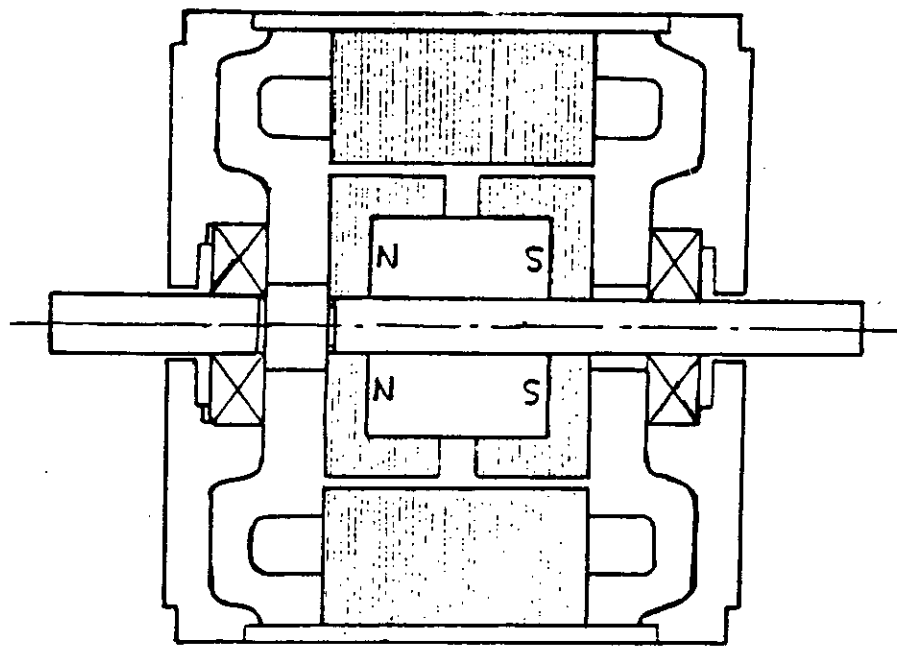


Fig 5.9: Schéma d'un moteur hybride.

Pour expliquer ce phénomène, référons nous au modèle déroulé de la figure 5.10. Dans ce schéma, on voit que la largeur des dents du stator est la même que celle du rotor. Cependant dans certains moteurs, la largeur des dents du stator est un peu plus grande que celle du rotor pour réduire les tressaillement du couple et améliorer la précision du positionnement. La partie supérieure de cette figure est une section du côté sud du pôle de l'aimant tandis que la partie inférieure représente le côté nord du pôle. Ce qui nous intéresse ici, c'est les lignes de champs sous les dents des pôles I et III dans ce modèle. Le pôle I est maintenant excité pour produire le pôle nord et le pôle III est excité pour produire le pôle sud; ils créent ainsi une distribution de lignes de champs indiquée en traits plein sur la figure. Les lignes en pointillées représente le flux due a l'aimant.

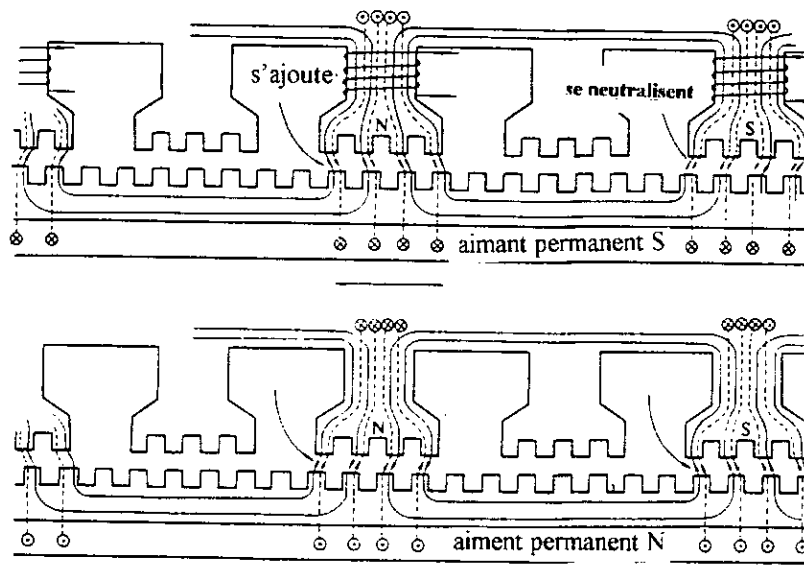


Fig 5.10: Modél déroulé d'un moteur hybride.

On peut remarquer qu'il n'y a pas de couple effectif généré par le champs magnétique due à une borne seule comme c'est le cas du moteur pas à pas à réluctance variable, parce que les dents du rotor du côté nord du pôle sont décalées d'une demie largeur de dent par rapport au côté sud du pôle. L'aimant permanent produit un couple de détente, mais il n'a pas une grande importance dans le cas du moteur hybride.

Lorsque le champs magnétique due aux bornes et à l'aimant permanent sont superposés, le résultat est suggéré dans la même figure. La force qui pousse vers la gauche apparaît sur la partie supérieure de la section, parce que les deux champs s'ajoutent dans la structure de la dent sur le pôle I, ce qui augmente l'orientation de la force vers la gauche, tandis que les deux composantes du champs se neutralisent et ainsi affaiblissent l'orientation de la force vers la droite sous le pôle III.

La même force est produite dans la section inférieure du schéma, les champs du stator et du rotor sont dans la même direction sous le pôle III, tandis qu'ils sont dans des directions opposées sous le pôle I. D'où la force résultante sera dirigée vers la gauche. Après que le rotor se soit déplacée d'un quart de largeur de dent dans cette direction, la force se réduit à zéro et ainsi une position d'équilibre est atteinte.

Comme on l'a vu auparavant l'aimant joue un rôle important dans la création de la force motrice. Mais on doit noter que la structure en dents du stator et du rotor est conçue pour faire des petits pas angulaires dans le moteur pas à pas hybride.

5.4 LES CARACTERISTIQUES DES MOTEURS PAS A PAS

5.4.1 CARACTERISTIQUES STATIQUES

5.4.1.1 CARACTERISTIQUE COUPLE-DEPLACEMENT ANGULAIRE

Le moteur pas à pas est d'abord dans un état d'équilibre suite à une excitation de l'une de ses phases. Un couple externe est appliqué à l'arbre du moteur ce qui conduit à un déplacement angulaire. La relation entre le couple externe et le déplacement angulaire est dessinée en figure 5.11.

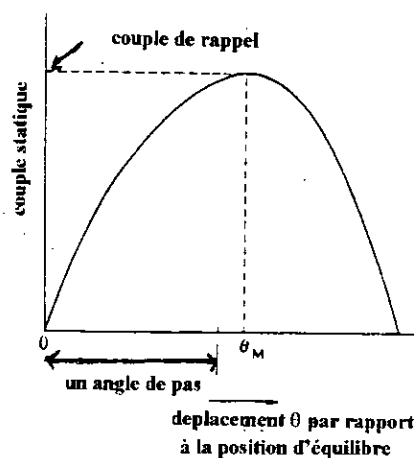


Fig 5.11: Caractéristique couple-déplacement angulaire.

Ce graphe est généralement appelé le graphe de la caractéristique « T/θ », et le maximum du couple statique est appelé « couple de maintien »,

et se trouve en $\theta = \theta_m$ sur la figure 5.11. A un déplacement supérieur à θ_m , le couple statique n'agit plus dans la direction de la position d'équilibre originel, mais dans le sens opposé à la prochaine position d'équilibre. Ce couple de maintien est défini comme étant le couple statique maximum qui peut être appliqué à un moteur alimenté sans causer de mouvement continu.

5.4.1.2 CARACTERISTIQUE COUPLE-INTENSITE DE COURANT

Le couple de maintien est proportionnel au courant, et cette relation est régulièrement appelée caractéristique « T/I ». La figure 5.12 compare la caractéristique T/I d'un moteur hybride avec celle d'un moteur à réluctance variable, le pas angulaire des deux moteurs est de $1,8^\circ$.

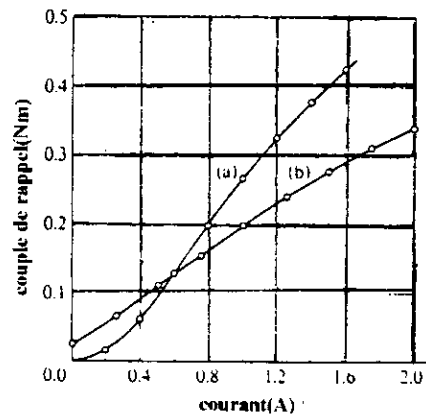


Fig 5.12: Caractéristique couple-intensité de courant

5.4.2 CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

Les caractéristiques relatives aux moteurs en mouvement ou au démarrage sont appelées caractéristiques dynamiques.

5.4.2.1 CARACTERISTIQUE COUPLE DE DEMARRAGE

Cette caractéristique définit la fréquence des impulsions de commande qui permet le démarrage et l'arrêt du moteur sans perte de pas. Le nombre d'impulsions dans le train d'impulsion utilisé pour le test est de 100 impulsions. On recherche la fréquence maximale à partir de laquelle le moteur ne démarre plus pour différents couples de frictions comme indiqué par la

figure 5.13. Quand on mesure le couple de démarrage, il faut spécifier clairement le système de commande, la méthode de mesure...

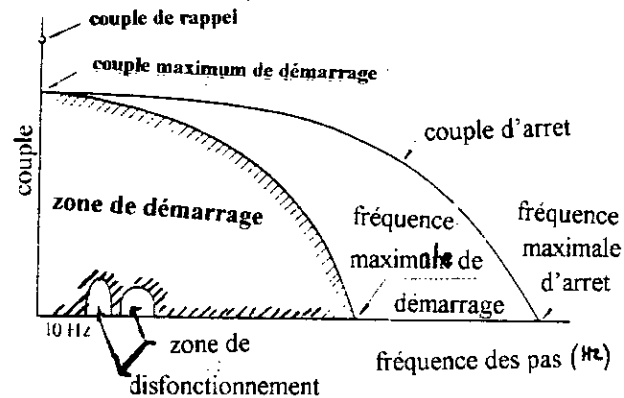


Fig 5.13: Caractéristique couple-fréquence de démarrage.

5.4.2.2 CARACTERISTIQUE COUPLE D'ARRET

Après que le moteur ait démarré grâce à une commande donnée et dans un mode d'excitation donné dans la zone de démarrage, la fréquence des impulsions est graduellement augmentée, le moteur va éventuellement se désynchroniser. La relation entre le couple de friction et la fréquence maximale à laquelle le moteur reste synchronisé est appelée caractéristique couple d'arrêt.

5.4.2.3 LA FREQUENCE MAXIMAL DE DEMARRAGE

Elle est définie comme étant la fréquence maximale des impulsions qui permet au moteur de démarrer et de s'arrêter sans perte de pas.

5.4.2.4 LA FREQUENCE MAXIMALE DE DECELERATION

Elle est définie comme étant la fréquence maximale à laquelle le moteur peut démarrer sans perte de pas.

5.4.2.5 COUPLE DE DEMARRAGE MAXIMAL

Il est défini comme étant le couple de friction maximal auquel le moteur peut démarrer avec un train d'impulsions de fréquence inférieur à 10Hz.

5.5 LES DIFFERENTS MODES D'EXCITATIONS

Pour que le moteur puisse tourner il faudrait exciter les phases selon une séquence bien définie. Plusieurs modes d'excitations existent; les plus importants sont décrits ci-dessous :

5.5.1 MODE D'EXCITATION MONOPHASE

L'excitation monophasée consiste à n'exciter qu'une seule phase à la fois, comme l'indique la figure 5.14 qui représente le chronogramme des signaux d'excitations d'un moteur à quatre phases.

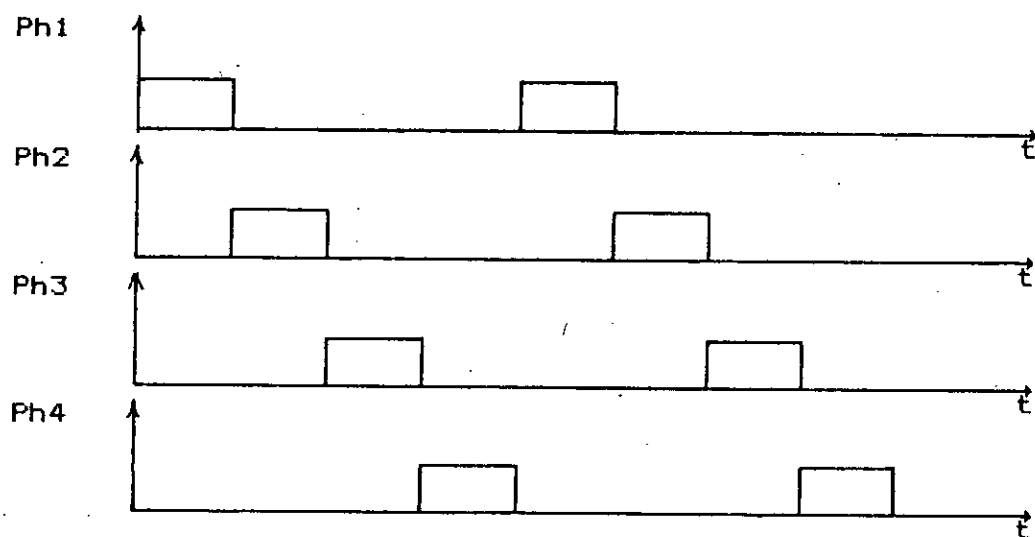


Fig 5.14: Excitation monophasée.

La phase excitée est représentée par un signal d'amplitude unité. Dans l'autre cas elle est non excitée.

Pour faire tourner le moteur dans le sens des aiguilles d'une montre, on applique la séquence d'excitation suivante :

ph1...ph2...ph3...ph4... dans l'autre sens la séquence est :
ph4...ph3...ph2...ph1...

5.5.2 MODE D'EXCITATION DOUBLE PHASE

Le principe de l'excitation double phase est d'exciter deux phases à la fois ce qui permet d'augmenter le couple moteur. Ce mode d'excitation est le plus ancien et le plus répandu. La figure 5.15 montre le chronogramme des signaux d'excitations d'un moteur à quatre phases.

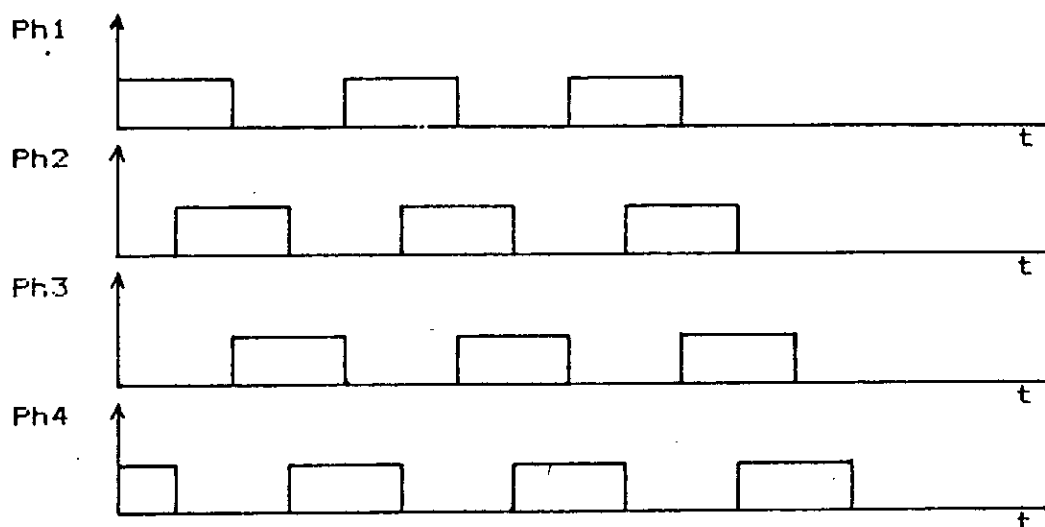


Fig 5.15: Excitation double phase.

5.5.3 MODE D'EXCITATION A DEMI PAS

En combinant les deux modes précédents, on arrive à faire fonctionner le moteur en demi pas. La figure 5.16 montre le chronogramme d'un tel mode.

Le défaut de ce mode vient du fait que le couple n'est pas constant ce qui engendre un fonctionnement statique et dynamique différent d'une position à une autre.

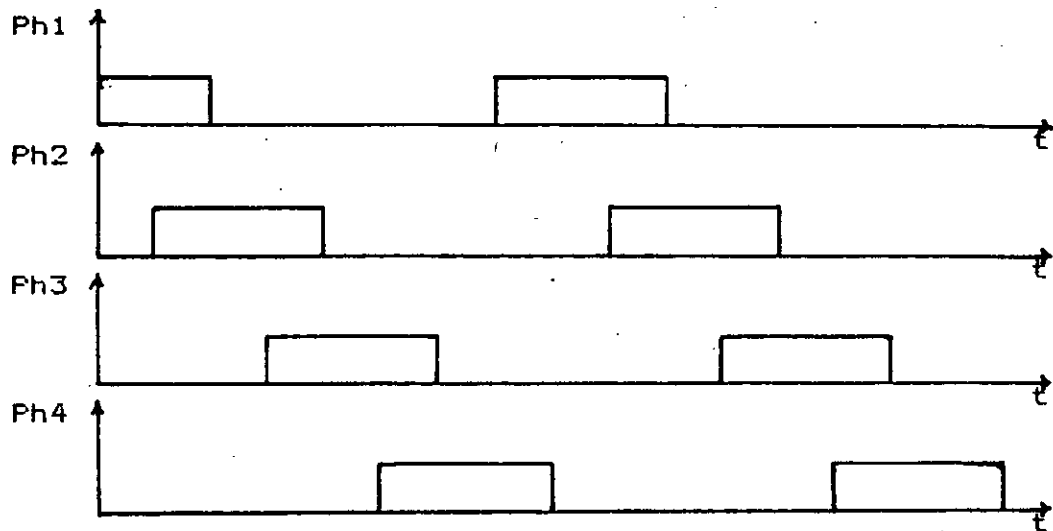


Fig 5.16: Excitation demi pas.

5.5.4 SYSTEME DE COMMANDE DES MOTEURS PAS A PAS EN BOUCLE OUVERTE

L'un des problèmes les plus importants dans les applications à moteurs pas à pas est le système de commande. Les systèmes de commande des moteurs pas à pas sont classés en deux familles : commande en boucle ouverte ou en boucle fermée. On va discuter ici du cas de la commande en boucle ouverte et on donnera une vue générale de la commande en boucle fermée.

5.5.4.1 SYSTEME DE COMMANDE

Un système de commande simple d'un moteur pas à pas est représenté par le diagramme de la figure 5.17. Le nombre de phases est quatre dans notre exemple. Le diagramme est divisé en deux parties pour faciliter l'explication.

La figure 5.18 (a) représente le séquenceur logique du moteur. Quand l'impulsion de commande de pas est appliquée au séquenceur logique, les états de sorties terminaux changent pour commander le moteur de tel sorte qu'il tourne d'un pas angulaire dans la direction désirée. La direction de rotation est déterminée par l'état logique de l'entrée de direction, c'est à dire le niveau haut pour CW (sens des aiguilles d'une montre) et un niveau bas pour CCW (sens inverse).

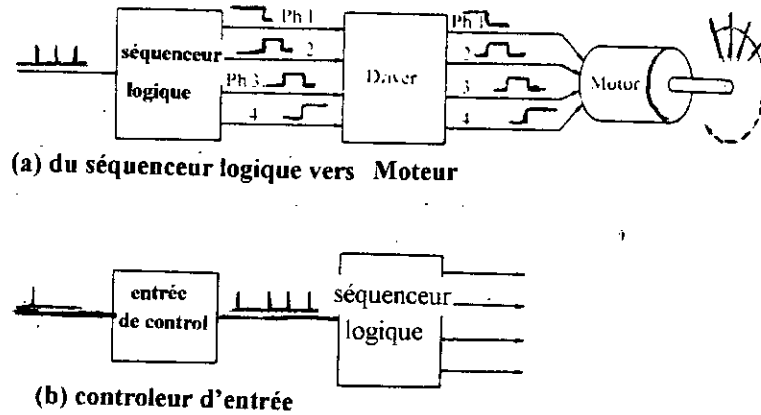


Fig 5.17: Diagramme d'un système de commande d'un moteur pas à pas.

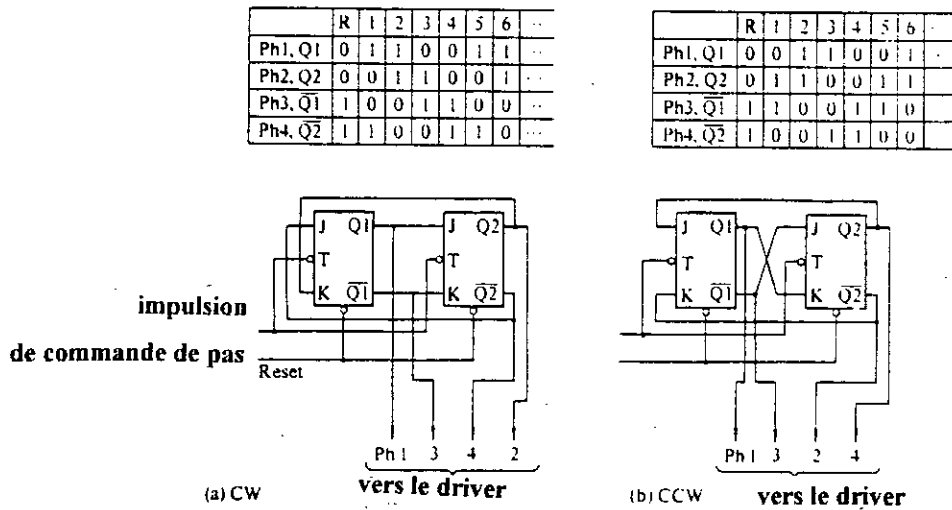


Fig 5.18: Séquenceur logique double phase pour un moteur à quatre phases.

Dans quelques applications le séquenceur logique est unidirectionnel et donc n'a pas de signal de direction. Si un incrément de mouvement est effectué par un seul pas, le diagramme de la figure 5.18 (a) représente tous le système. Mais quand un incrément est réalisé par plusieurs pas, un autre étage est nécessaire pour produire le train d'impulsions nécessaire au séquenceur logique et il est représenté par la figure 5.18 (b). Ce circuit logique est appelé « contrôleur d'entrée ».

Dans les applications sophistiquées la fonction de contrôleur d'entrée est réalisée par un circuit électronique intelligent comme par exemple un microprocesseur qui génère un train d'impulsions pour accélérer, ralentir et arrêter le moteur de la façon la plus efficace.

5.5.4.2 LE SEQUENCEUR LOGIQUE

Le séquenceur logique est un circuit logique qui contrôle l'excitation des bobinages d'une façon séquentielle, répondant à des impulsions de commande de pas. Le séquenceur logique est généralement composé de registres à décalages et de portes logiques. De nos jours, les registres à décalage en circuit intégré sont souvent utilisés. Mais on peut réaliser un séquenceur logique en utilisant des éléments discrets par combinaison de bascules JK et de portes logiques.

5.5.4.2.1 EXCITATION DOUBLE PHASE POUR UN MOTEUR A QUATRE PHASES

Un type simple de séquenceurs peut être construit avec seulement deux bascules JK, comme indiqué par la figure 5.18 pour le cas unidirectionnel. La table de vérité de la séquence logique est donnée dans la même figure. La correspondance entre les sorties terminaux du séquenceur et les bobinages de phases à contrôler est donné par :

$$Q1 \rightarrow Ph1$$

$$Q1' \rightarrow Ph2$$

$$Q2 \rightarrow Ph3$$

$$Q2' \rightarrow Ph4.$$

Si $Q1$ est au niveau haut, la phase 1 est excitée, et si $Q1$ est au niveau bas elle n'est pas excitée. Comme on le voit sur les deux tables, les circuits (a) et (b) ont des séquences d'excitation opposées, la direction du circuit (a) est définie comme étant CW et celle de (b) comme CCW. Pour changer le sens de rotation, les connexions du séquenceur doivent commuter entre (a) et (b).

Le circuit du commutateur de direction est décrit dans la figure 5.19 et peut être utilisé à cet effet. La fonction essentielle est réalisée par la combinaison de trois NAND ou deux AND avec un NOR. Dans le circuit (a), si le signal de commande de direction est au niveau haut ainsi que celle de l'entrée terminal A, il apparaît un niveau haut à la sortie terminal C. De même, si la commande de direction est au niveau bas, le signal en C sera le même que l'entrée terminal B. Dans le circuit (b), $C = A'$ pour une commande au niveau haut et $C = B'$ dans le cas contraire. La figure 5.20 montre un séquenceur bidirectionnel double phase pour un moteur à quatre phases.

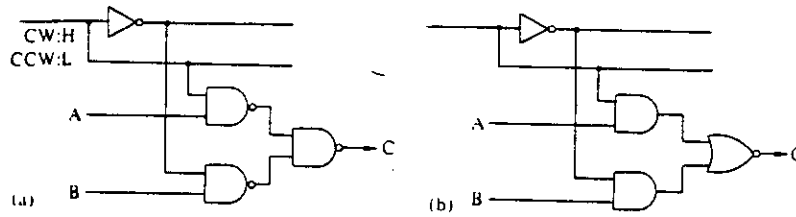


Fig 5.19: Circuit de commutation de direction.

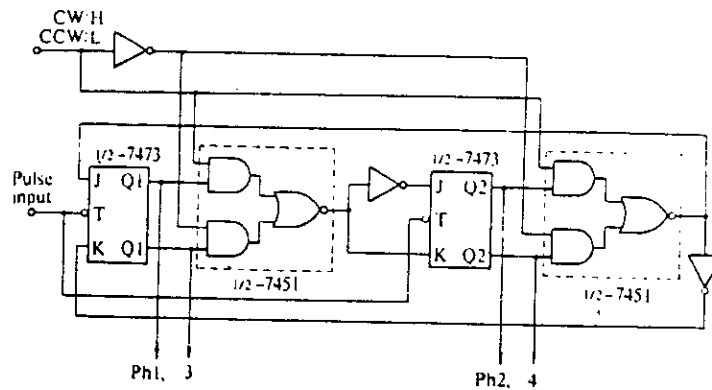


Fig 5.20: Schéma d'un séquenceur bidirectionnel.

5.5.4.2.2 EXCITATION MONOPHASE POUR UN MOTEUR A QUATRE PHASES

Un séquenceur monophasé est obtenu en ajoutant quatre portes AND aux sorties terminal du séquenceur double phase comme le montre la figure 5.21.

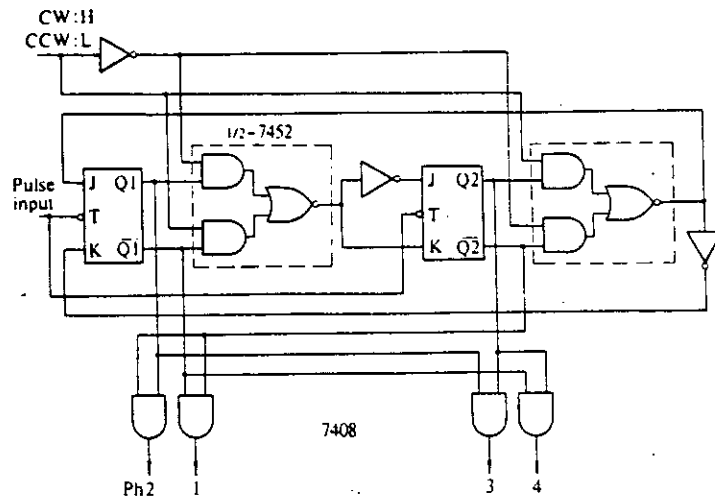


Fig 5.21: Schéma d'un séquenceur monophasé.

5.5.4.3 LA COMMANDE DU MOTEUR (DRIVER)

5.5.4.3.1 LA CONNEXION DU SEQUENCEUR ET DU DRIVER

Les signaux de sorties du séquenceur logique sont transmis aux entrées terminal du driver par lesquels l'excitation des bobinages du moteur sont commandés. La méthode la plus simple de connexion est la connexion directe comme l'indique la figure 5.22 (a) et (b). Mais si le courant de sortie du séquenceur n'est pas suffisant pour commander les transistors de puissance, il sera nécessaire de mettre des buffers pour amplifier le courant comme l'indique la figure 5.22 (c) et (d).

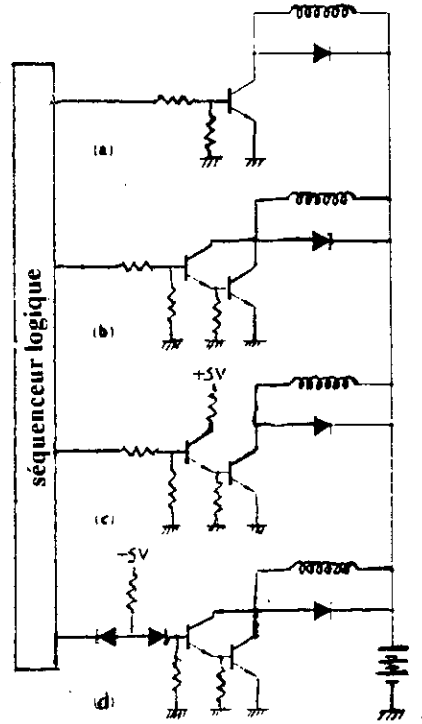


Fig 5.22: Connection du séquenceur au driver.

5.5.4.3.2 PROBLEMES LIES AU DRIVER

Le bobinage du moteur pas à pas est inductif et apparaît comme une combinaison d'inductances et de résistances en séries. Le circuit équivalent du bobinage est décrit par la figure 5.23. En concevant le driver, on est obligé de tenir compte de ce problème. Les plus mauvaises conditions de fonctionnement du moteur pas à pas, des transistors de puissance et de l'alimentation, doivent être considérées.

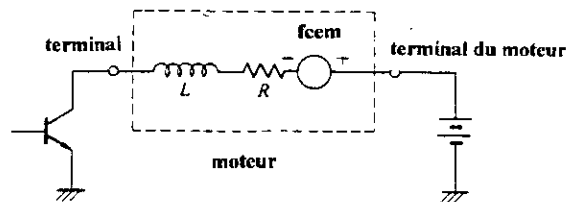


Fig 5.23: Circuit équivalent d'un bobinage du moteur.

Quand le transistor de la figure 5.23 est bloqué, une tension importante, égale à $L \cdot (\partial i / \partial t)$, apparaît et peut conduire au claquage du transistor. Pour supprimer cette tension et protéger le transistor, il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles on trouve :

- 1- suppression par une diode de roue libre (figure 5.24).
- 2- suppression par une diode en série avec une résistance pour décharger rapidement l'énergie emmagasinée dans la bobine (figure 5.25).
- 3- suppression par diode zener, qui est généralement connectée avec une diode ordinaire (figure 5.26).

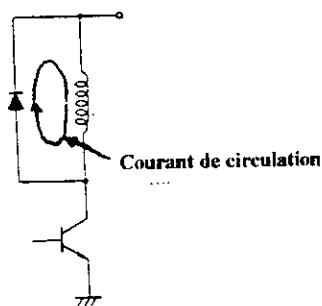


Fig 5.24: Suppresseur à diode de roue libre.

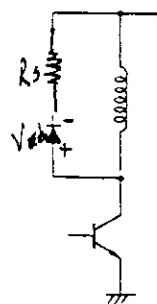


Fig 5.25: Suppresseur à diode avec résistance en série.

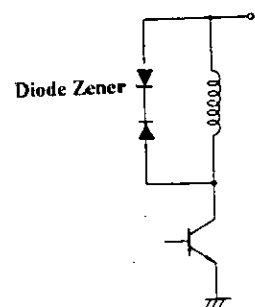


Fig 5.26: Suppresseur diode Zener.

Une comparaison des effets de ces supresseurs est donnée par la figure 5.27.

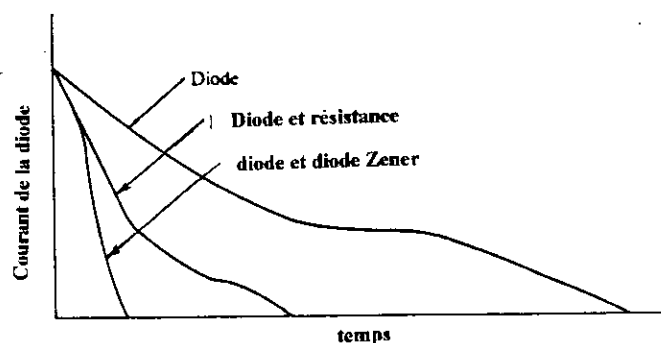


Fig 5.27: Comparaison des effets des supresseurs.

5.5.4.4 GENERALITES SUR LA COMMANDE EN BOUCLE FERMEE

Dans les systèmes de commande vus plus haut, les impulsions de commande de pas sont prises d'une source externe et on prévoyait que le moteur était capable de suivre ces impulsions. Ce type d'opérations est appelée commande en boucle ouverte. La commande en boucle ouverte est attractive et largement utilisée dans les applications de contrôle de position et de vitesse. Cependant, les performances des moteurs pas à pas, commandées en boucle ouverte, sont limitées. Cela vient du fait que le moteur pas à pas n'arrive plus à suivre les impulsions de commande quand celles-ci sont trop importante. De plus le mouvement du moteur, quand il est commandé en boucle ouverte, tend à être oscillatoire.

Les performances du moteur pas à pas peuvent être grandement améliorées en utilisant un contrôle de position ou de vitesse pour déterminer quelle phase doit être alimentée et à quel moment. Ce type de commande est appelé commande en boucle fermée. Dans la commande en boucle fermée, un capteur de position est nécessaire pour connaître la position du rotor. Un capteur typique est l'encodeur optique qui est généralement couplé à l'arbre du moteur. Dans des systèmes très avancés, on utilise, pour connaître la position du rotor, la forme du courant dans les bobinages du moteur.

La commande en boucle fermée est meilleur que celle en boucle ouverte, pas seulement pour éviter les pertes de pas, mais aussi parce que le mouvement est plus rapide et moins saccadé.

5.6 OBSERVATION

Notre bras manipulateur utilise six moteurs pas à pas de même type, dont voici la description:

- type de moteur: moteur pas à pas à réluctance variable;
- nombre de phases: quatre;
- angle de pas: 7.3° .

**CARTE D'ACQUISITION ET CONTROLE DE
PERIPHERIQUES**

6.1 INTRODUCTION

Il est très fréquent, dans les commandes automatiques programmées, d'utiliser des cartes d'acquisition et d'interface, qui assurent une adaptation entre les systèmes de décisions dits « informationnels » et les systèmes d'exécutions dits « opérationnels ».

En ce qui concerne notre étude, qui consiste à commander un bras manipulateur avec un micro-ordinateur, on a équipé ce dernier avec une carte d'acquisition et une carte d'interface externe, afin de permettre au robot utilisé d'être commandé de la façon la plus simple et efficace possible.

Ces cartes ont pour but de sélectionner et de commander les moteurs du robot à travers sa carte de puissance fig 6.1.

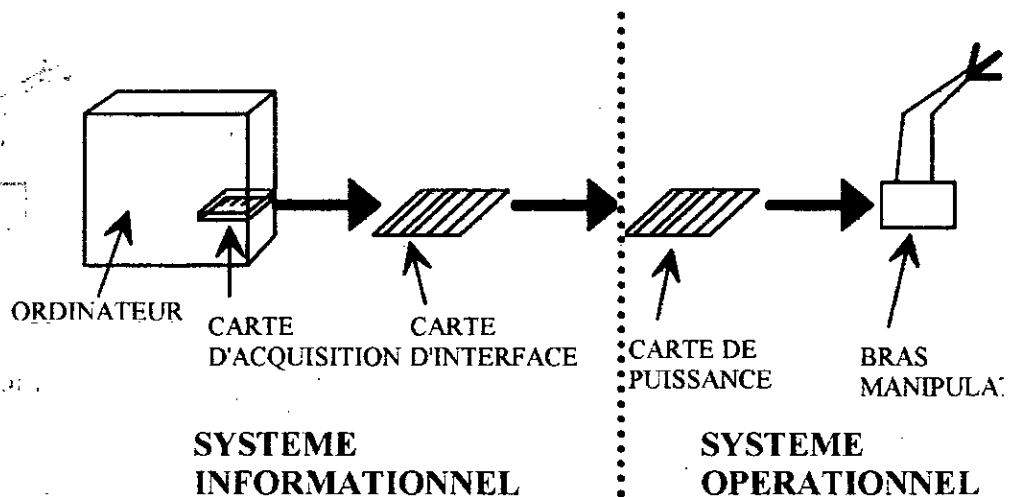


Fig 6.1: le schéma de commande du bras manipulateur.

6.2 LA CARTE D'ACQUISITION

La carte d'acquisition utilisée a été conçue et mise sur le marché par la société américaine « KEITHLEY METRABYTE CORPORATION » sous le nom « Metrabyte DAS-8 »[10].

Sa constitution matériel et sa programmation logicielle assure plusieurs fonctions électroniques telles que:

- la fonction temporisation;
- la conversion analogique-numérique;
- la réception et l'émission de données binaires en parallèle, issues de milieux extérieurs, ou vers le micro-ordinateur.

6.2.1 INSTALLATION LOGICIEL

Après avoir installé la carte à l'intérieur du micro-ordinateur, on doit réserver, à partir d'une adresse de base choisit, toutes les adresses des registres et accumulateurs situés sur la carte et ceci grâce aux programmes spéciaux qui se trouvent sur les disquettes livrées avec la carte d'acquisition et aux fichiers de configuration sous DOS.

Le fichier CONFIG.SYS du système d'exploitation, réserve toutes les adresses concernées qui seront stockées dans un fichier nommé «DAS8.ADR»; de plus, il existe plusieurs fichiers qui facilitent les manoeuvres logicielles concernant la carte et ses modes de programmation.

Le tableau suivant donne les différents registres existant sur la carte et leurs adresses respectives réservées par le système:

ADRESSE(H)	Registre de lecture	Registre d'écriture
300	A/D octet faible	Conversion A/D en 8 bits
301	A/D octet fort	Conversion A/D en 12 bits
302	Registre d'état	Registre de contrôle
304	Compteur de lecture 0	Compteur d'écriture 0
305	Compteur de lecture 1	Compteur d'écriture 1
306	Compteur de lecture 2	Compteur d'écriture 2
307		Registre de contrôle des compteurs

6.2.1.1 LES MODES DE PROGRAMMATION DE LA CARTE

On trouve dans les disquettes éditées, livrées avec la carte, une importante bibliothèque de programmes écrits en BASIC, qui servent à la sélection des modes de programmation et assurent une bonne souplesse logicielle dans la commande de la carte.

Ces programmes permettent d'avoir accès à toutes les fonctions de la carte d'acquisition avec un minimum de programmation.

Etant donné que notre programme est écrit en langage C, nous avons préféré programmer directement la carte d'acquisition.

6.2.2 FONCTION TEMPORISATION

Cette fonction est assurée dans la carte par le triple compteur-temporisateur 8254 d'Intel; du côté fréquentiel, le circuit peut aller jusqu'à 8 Mhz contrairement à son prédécesseur le 8253 qui est limité à 3 Mhz.

La fig. 6.2 montre le synoptique du 8254 avec ses trois compteurs (0, 1, 2) et la fig. 6.3 fournit son brochage. Ce circuit établit des intervalles de temps

avec précision ou compte des événements et émet, éventuellement, une interruption à l'issue de son programme[10], [8].

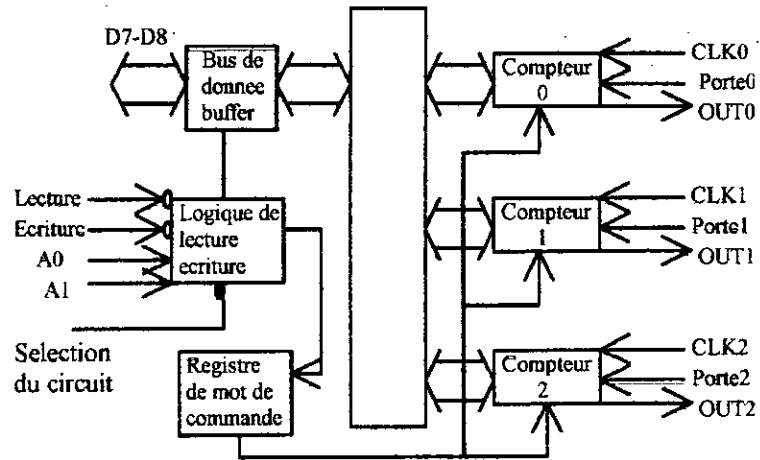


Fig 6.2: synoptique du temporisateur programmable 8254.

Il pourra servir de:

- générateur de rythmes programmable;
- compteur d'événements;
- multiplicateur de rythmes binaires;
- horloge temps réel;
- monostable;
- contrôleur de moteurs.

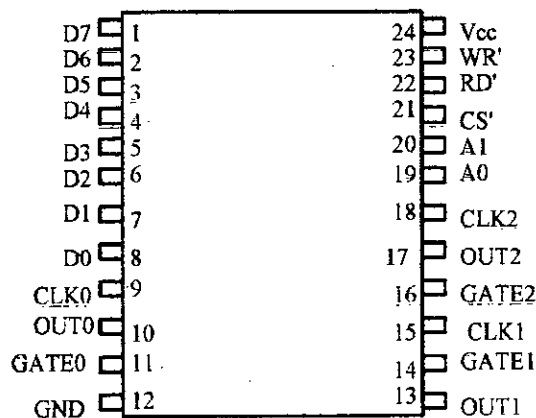


Fig 6.3: brochage du 8254.

Son buffer 8 bits a des sorties à 3 états; le microprocesseur l'adresse de façon classique, par exemple à l'aide de ses instructions d'entrées-sorties(IN ou OUT).

Le 8254 reçoit des mots de commandes dans le but de:

- programmer les modes de fonctionnement;
- charger les registres de comptages;
- lire les valeurs comptées.

Le tableau suivant résume ces fonctions avec leur adressage spécifique:

CS'	RD'	WR'	A ₁ '	A ₀ '	Fonction
0	1	0	0	0	Chargement compteur 0
0	1	0	0	1	Chargement compteur 1
0	1	0	1	0	Chargement compteur 2
0	1	0	1	1	Ecriture mot de mode
0	0	1	0	0	Lecture compteur 0
0	0	1	0	1	Lecture compteur 1
0	0	1	1	0	Lecture compteur 2
0	0	1	1	1	Pas d'opérations 3 états
1	X	X	X	X	Inhibition 3 états
0	1	1	X	X	Pas d'opérations 3 états

CS' = non(CS);
 RD' = non(RD);
 WR' = non(WR);
 A₁' = non(A₁);
 A₀' = non(A₀);

Les lignes RD et WR sont commandées par le microprocesseur et elles sont actives au niveau bas. On constate que lorsque A₀ et A₁=1, c'est le registre de mot de commande qui est sélectionné; ce registre ne peut qu'être écrit.

Les compteurs fonctionnent en binaires ou en BCD. La fig 6.4 illustre le montage de principe du 8254.

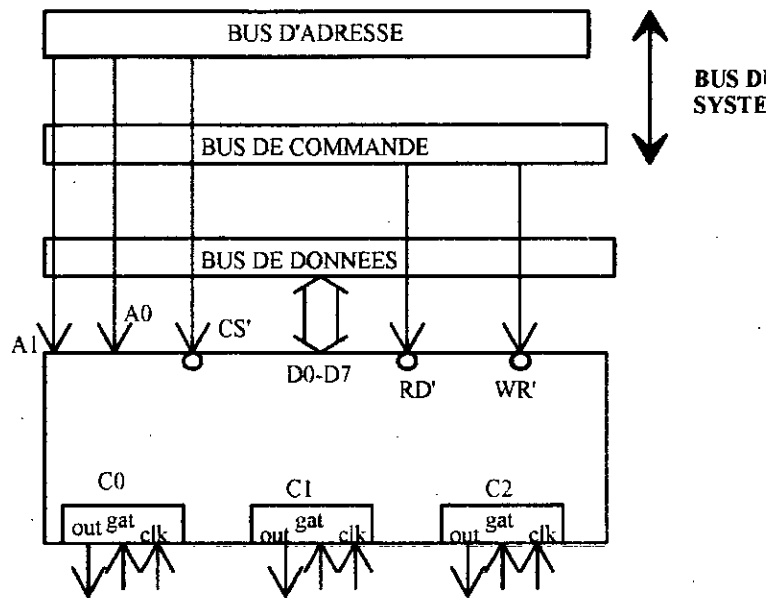
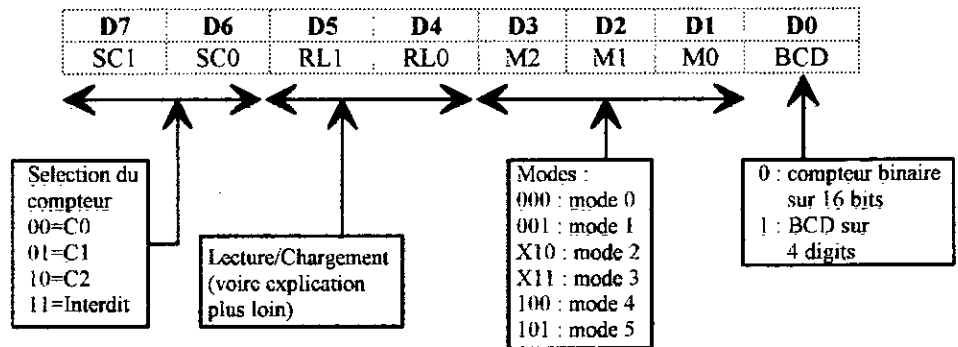


Fig 6.4: insertion du 8254 dans un montage.

6.2.2.1 LES MODES DE FONCTIONNEMENT DU 8254

Le 8254 doit être initialisé en mode par son microprocesseur. Le format du mot de commande est le suivant:



Chaque compteur doit être programmé successivement. Les bits RL1 et RL0(pour Read/Load) ont les fonctions suivantes:

RL1	RL0	Fonction
0	0	Verrouillage du compteur instantanée pour lecture au vol
0	1	Chargement de l'octet poids faible uniquement
1	0	Chargement de l'octet poids fort uniquement
1	1	Chargement de l'octet poids faible puis de l'octet poids fort

6.2.2.2 DESCRIPTION DES MODES DE FONCTIONNEMENT DES COMPTEURS

6.2.2.2.1 MODE 0

(Interrupt on terminal count).

Après chargement de la valeur à décompter et temporisation d'une impulsion d'horloge, le décompte commence. La sortie est au niveau bas. Lorsque le décompte atteint 0, la sortie passe au niveau 1, ce qui se traduit par l'émission d'une demande d'interruption. Elle reste à 1 jusqu'au chargement d'un nouveau mode ou d'une nouvelle valeur. Le décompte se poursuit.

6.2.2.2.2 MODE 1

(Programmable one-shot).

La sortie se comporte comme une sortie de monostable à une impulsion d'horloge après le front montant de l'impulsion appliquée à la porte de commande et revient à 1 à l'issue du décompte. Une modification de la valeur du comptage pendant qu'elle est à 0 n'affecte pas la durée de son état 0. Le compte courant peut être lu à tout instant sans l'affecter non plus. Le monostable est redeclenchable.

6.2.2.2.3 MODE 2

(Rate generator).

Ici le compteur fonctionne en diviseur par N. La sortie reste basse pendant une impulsion d'horloge, la période entre deux impulsions de la sortie dépend de la valeur chargée à décompter. Un rechargement du compteur en cours de service n'affecte que l'impulsion de sortie suivante. A zéro, la commande de porte force la sortie à 1. Lorsque la porte passe à 1, le décompte démarre. De ce fait la porte peut servir à synchroniser les impulsions.

6.2.2.2.4 MODE 3

(Square wave rate generator).

Ce mode est presque identique au mode 2, à ceci près que la sortie change de niveau logique au milieu de la période. Avec un nombre de comptage paire, le rapport cyclique est de 50% très exactement. Si le nombre de comptage est impaire, la longueur de la durée pendant laquelle la sortie est au niveau haut dépasse d'une période d'horloge celle pendant laquelle la sortie est au niveau bas.

6.2.2.2.5 MODE 4

(Software triggered strobe).

Après établissement du mode, la sortie est à 1. Le chargement de la valeur déclenche le décompte. A son issue, la sortie passe à 0 pour une période d'horloge, puis revient à 1. Si le compteur est rechargé entre deux impulsions

de sortie, le comptage se poursuit avec la nouvelle valeur. Ce comptage est inhibé si la porte devient basse, ce qui permet de le gérer par logiciel.

6.2.2.2.6 MODE 5

(Hardware triggered strobe).

Le décompte commence sur le front montant de la porte de commande. La sortie passe à 0 à son issue pendant une période d'horloge. Le compteur peut être redéclenché mais la sortie ne pourra pas passer à 0 tant que le décompte n'aura pas eu lieu après une commande de déclenchement sur la porte.

6.2.2.3 ADRESSAGE DU 8254 DANS LE SYSTEME

Le circuit programmable 8254 d'Intel occupe 4 emplacements mémoires. Ces adresses sont définies par rapport à l'adresse de base de la carte(DAS-8), qui est, en code hexadécimal, 300.

Le tableau ci-dessous donne les différentes adresses des registres utilisés sur la carte.

<i>Référence</i>	<i>Adresse en %H</i>	<i>Type de registre</i>	<i>Description</i>
Baseadr+4	304	Ecriture/Lecture	Compteur 0
Baseadr+5	305	Ecriture/Lecture	Compteur 1
Baseadr+6	306	Ecriture/Lecture	Compteur 2
Baseadr+7	307	Ecriture seulement	Registre de commande

L'accès logiciel a ces registres se fera par des instructions(INPUT, OUTPUT) adéquates du langage de programmation utilisé dans le système.

6.2.3 FONCTION CONVERSION ANALOGIQUE NUMERIQUE

La Metra Byte DAS-8 contient 8 canaux analogiques, un convertisseur analogique-numérique de 12 bits avec un temps de conversion allant de 25 μ s à 30 μ s et une fréquence d'accès de 30 KHz.

Le registre de fin de conversion A/N est constitué de 12 bits: un registre (LSB) de 1 octet qui occupe l'adresse H300 et un autre registre(MSB) de 1 octet qui occupe l'adresse H301:

<i>Bits</i>	<i>D7</i>	<i>D6</i>	<i>D5</i>	<i>D4</i>	<i>D3</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D0</i>
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8

Baseadr+1 (MSB).

<i>Bits</i>	<i>D7</i>	<i>D6</i>	<i>D5</i>	<i>D4</i>	<i>D3</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D0</i>
	B9	B10	B11	B12	0	0	0	0

Baseadr+0 (LSB).

Pour connaître la correspondance analogique-numérique, on est amené à consulter le tableau suivant:

<i>Binaire</i>	<i>Hexa</i>	<i>Voltage analogique</i>
0000 0000 0000	000	-5.0000 V
0000 0000 0001	001	-4.9976 V
-		
0100 0000 0000	400	-2.5000 V
-		
1000 0000 0000	800	±0 V
1000 0000 0001	801	+0.0024 V
-		
1100 0000 0000	C00	+2.5000 V
1111 1111 1111	FFF	+4.9976 V

6.2.4 UTILISATION DES CANAUX ANALOGIQUES

La sélection du CANAL utilisé se fait à l'aide du registre de contrôle(en écriture seulement) qui est à l'adresse H302:

<i>Bits</i>	<i>D7</i>	<i>D6</i>	<i>D5</i>	<i>D4</i>	<i>D3</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D0</i>
	OP4	OP3	OP2	OP1	INTE	MA2	MA1	MA0

Baseadr+2.

OP4-OP1: bits de sorties de la carte, seront étudiés ultérieurement.

INTE: bit d'interruption qui sert comme un bit d'initialisation dans le système.

MA2-MA0: ces bits sélectionnent le CANAL courant analogique et il peut être lu également à travers le registre d'état:

MA2	MA1	MA2	CANAL
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

On est amené encore à voir le registre d'état qui se situe à l'adresse(H302)(lecture seulement):

<i>Bits</i>	<i>D7</i>	<i>D6</i>	<i>D5</i>	<i>D4</i>	<i>D3</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D0</i>
	EOC	IP3	IP2	IP1	IRQ	MA2	MA1	MA0

Baseadr+2.

EOC: bit de fin de conversion: si EOC=1, l'opération de conversion n'est pas terminée, une fois que EOC passe à 0, cela veut dire que la conversion est terminée.

IP3-IP1: bits d'entrées de données digitales, seront étudiés ultérieurement.

IRQ: Après génération d'une interruption IRQ est à l'état haut, il passe à l'état bas par écriture du registre de contrôle.

MA2-MA0: correspond au canal courant analogique utilisé.

6.2.5 FONCTION EMISSION RECEPTION DES DONNEES BINAIRES

Cette fonction a pour but essentiel d'échanger des informations entre l'ordinateur et le milieu extérieur(fig 6.5).

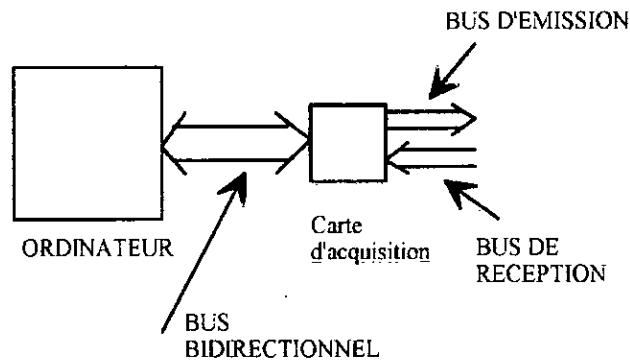


Fig 6.5: échange d'information entre l'ordinateur et le milieu extérieur.

Les bits de données entrant, IP3, IP2 et IP1, se trouvent dans le registre d'état à l'adresse H302.

Bits	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
	X	IP3	IP2	IP1	X	X	X	X

Baseadr+2.

X: bits ayant d'autres fonctions.

Les bits de données sortant, OP4 à OP1, se trouvent dans le registre de contrôle dans la même adresse.

Bits	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
	OP4	OP3	OP2	OP1	X	X	X	X

Baseadr+2.

X: bits ayant d'autres fonctions.

La programmation de ces registres se fait par l'utilisation des instructions appropriées des langages de programmation.

**CONCEPTION ET REALISATION DU
SYSTEME DE COMMANDE**

7.1 PRESENTATION DU SYSTEME DE COMMANDE

On peut schématiser notre système de commande par la fig 7.1.

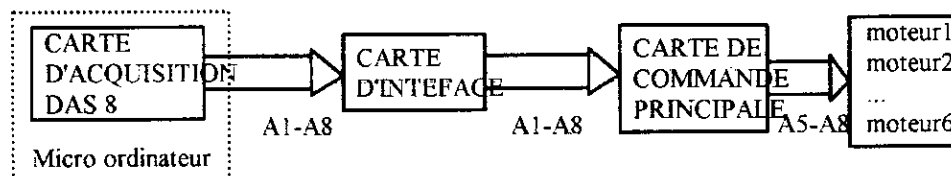


Fig 7.1: schéma synoptique du système de commande.

Le système de commande est constitué de plusieurs étages à savoir:

- la carte d'acquisition: utilisée comme support des signaux de commande;
- la carte d'interface: sa fonction est d'adapter le système micro-ordinateur à la carte de commande principale;
- la carte de commande principale: utilisée pour sélectionner et piloter les moteurs pas à pas du bras manipulateur.

7.2 DEFINITION DES DIFFERENTS SIGNAUX DE COMMANDE UTILISES

Les 8 bits de commandes provenant de la carte d'acquisition sont envoyés aux entrées des deux buffers situés sur la carte d'interface pour être ensuite envoyés vers la carte de commande principale; on trouve les signaux suivants[6]:

- le bit A_1 : utilisé comme signal de synchronisation des phases des moteurs utilisés(et permet le passage des signaux de la carte d'acquisition vers la carte de commande).
- les bits A_8 , A_7 , A_6 et A_5 : sont utilisés pour la commande des quatre phases du moteur pas à pas.

Le tableau suivant donne les séquences d'excitation à pas complet:

A ₈	A ₇	A ₆	A ₅
Ph1	Ph2	Ph3	Ph4
1	0	0	1
1	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1

- les bits A₄, A₃ et A₂: utilisés pour sélectionner l'adresse d'un des six moteurs. L'adresse de chaque moteur est donnée par le tableau suivant:

A ₂	A ₃	A ₄	
0	0	1	La main
0	1	0	Poignet 1
0	1	1	Poignet 2
1	0	0	Avant bras
1	0	1	Epaule
1	1	0	Bras

7.3 PROGRAMMATION ET UTILISATION DE LA CARTE D'ACQUISITION

Dans notre étude, on a exploité deux des fonctions essentielles de la carte d'acquisition, à savoir:

- la fonction temporisation: utilisée pour générer le bit A₁ de synchronisation et pour démultiplexer la sortie de la carte d'acquisition et ainsi transformer ces quatre signaux de sorties en huit signaux qui sont nécessaires pour commander la carte de commande principale;

- la fonction émission de données digitales: cette fonction est utilisée pour générer les signaux A₂ A₃ A₄ et A₅ A₆ A₇ A₈ qui permettent la sélection et le pilotage des moteurs pas à pas.

Pour les manoeuvres materielles, on procède de la manière suivante: on se branche directement sur ses pins(37 pins) situés sur la face arrière de l'unité centrale du micro ordinateur(fig 7.2)(voire aussi annexe).

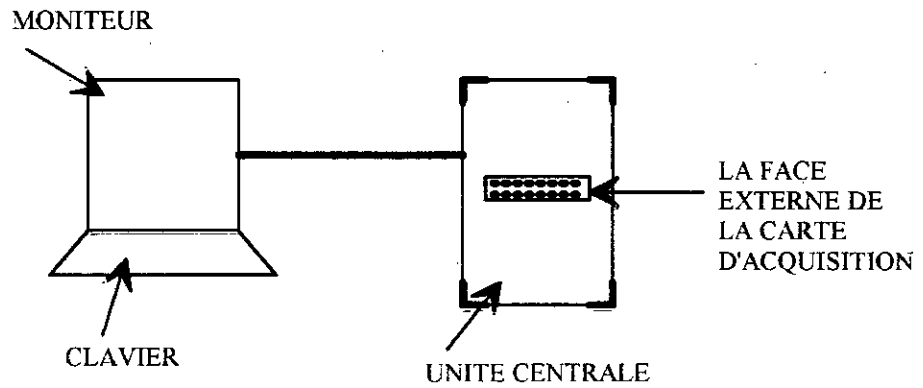


Fig 7.2: la carte d'acquisition dans le micro ordinateur.

Le connecteur de la carte contient les sorties de tous les signaux nécessaires utilisés dans notre système de commande.

7.3.1 FONCTION TEMPORISATION

Cette fonction est assurée par le triple compteur temporisateur 8254, qui est, dans cette carte d'acquisition, configuré comme indiqué par la fig 7.3.

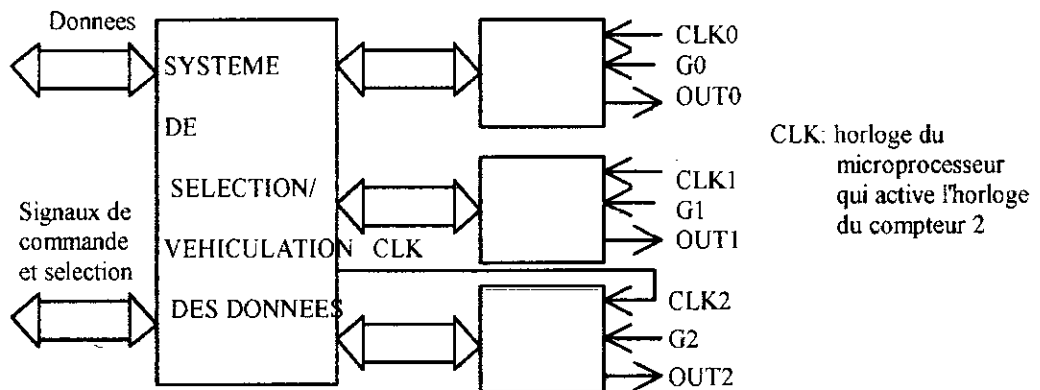


Fig 7.3: synoptique du 8254 dans la carte DAS-8.

Pour programmer les modes de fonctionnement des compteurs, on est amené à étudier chaque tâche réalisée par chaque compteur (C0, C1, C2):

- C0: on a utilisé sa sortie (OUT0) comme bit de validation et de sélection des buffers situés sur la carte d'interface;

- C1: la sortie de compteur (OUT1) sert à générer le signal A_1 (signal de synchronisation);

- C2: on a utilisé sa sortie (OUT2) comme signal d'horloge (CLK0 et CLK1) des compteurs C0 et C1 (voir fig 3.2), car il est le seul compteur à être synchronisé avec l'horloge du microprocesseur.

7.3.1.1 LA PROGRAMMATION DES COMPTEURS

7.3.1.1.1 COMPTEUR 0

D'après l'étude du mode de fonctionnement du 8254 et d'après la tâche qu'on veut réaliser avec ce compteur, le mode le plus approprié est le mode 0 qui est illustré par le chronogramme suivant (fig 7.4).

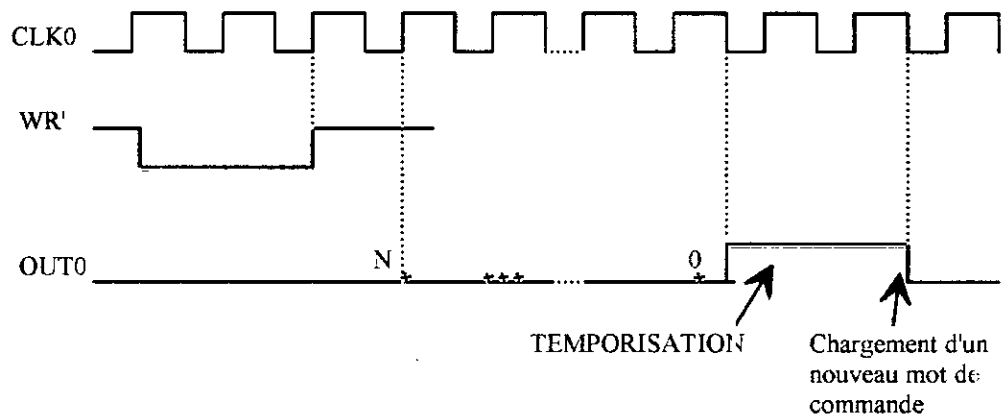


Fig 7.4: chronogramme du mode 0.

Le choix de ce mode s'effectue en écrivant dans le registre de commande le nombre H10 (H pour hexadécimal) (fig 7.5) et ensuite on charge le compteur par une valeur, la sortie du compteur reste au niveau bas jusqu'à ce que le décompte atteigne 0; et là, la sortie passe au niveau haut et y reste jusqu'au chargement d'une nouvelle valeur ou changement du mode de commande (fig 7.6).

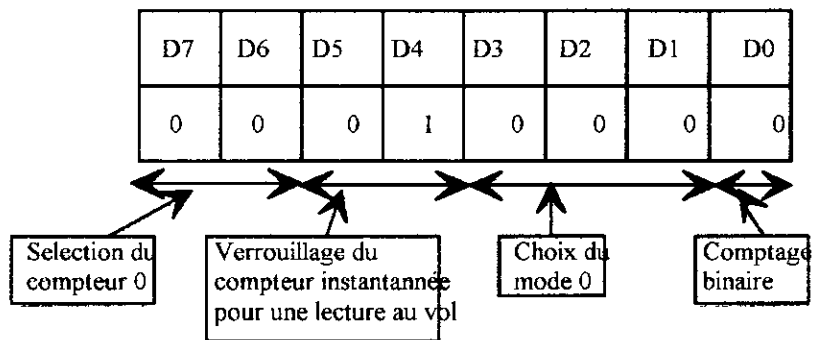


Fig 7.5: configuration du registre de controle en mode 0.

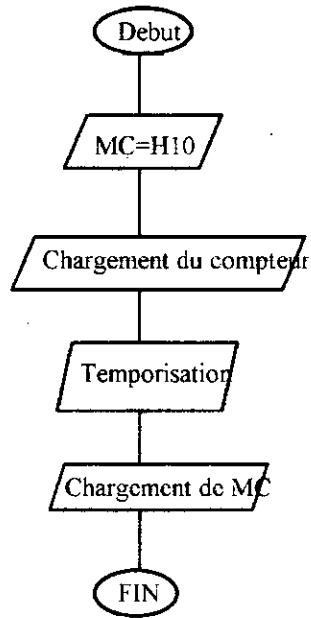


fig 7.6: Organigramme de la fonction validation.

7.3.1.1.2 COMPTEUR 1

La sortie du compteur 1 sert comme bit de synchronisation (A_1), donc il suffit de le programmer avec le mode 3 pour avoir à la sortie OUT1 un signal carré.

On doit écrire dans le registre de commande la valeur H56; la période du signal carré généré est fixée par la valeur du nombre chargé dans le compteur (fig 7.7).

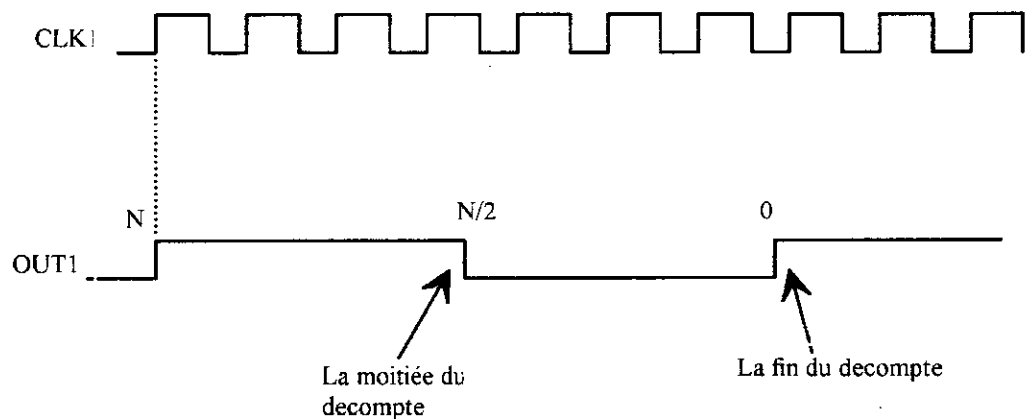


Fig 7.7: chronogramme de fonctionnement du mode 3.

7.3.1.1.3 COMPTEUR 2

D'après le schéma synoptique du 8254 dans la carte DAS8 de la fig 3.2 et d'après les explications données en 3.1, on doit programmer le compteur 2

en mode 3 pour pouvoir générer un signal carré sur la sortie OUT2. Ce signal servira comme horloge pour les compteurs C0 et C1(voir fig 7.8).

Pour cela, on doit charger le registre de commande avec la valeur H96.

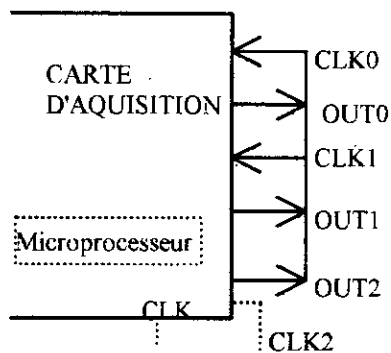


Fig 7.8: la liaison entre C2 et (C0 et C1).

7.3.2 LA FONCTION EMISSION DE DONNEES DIGITALES

Afin de pouvoir générer les signaux de sélection et de pilotage des moteurs pas à pas, on doit connaître l'emplacement de ces signaux sur la carte d'acquisition, ces signaux sont les sorties OP1, OP2, OP3, OP4, accessibles par la programmation du registre de controle à l'adresse H302(fig 7.9).

Bits	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
	OP4	OP3	OP2	OP1	X	X	X	X

Baseadr+2.

X: bits ayant d'autres fonctions.

Fig 7.9: registre de controle.

On a utilisé ces bits de sortie deux fois:

- pour sélectionner le moteur à commander;
- pour piloter les phases du moteur sélectionné.

Ce qui nous donne les deux configurations de la fig 7.10.

A ₄	A ₃	A ₂	0	X	X	X	X
OP4	OP3	OP2	OP1	X	X	X	X

A ₈	A ₇	A ₆	A ₅	X	X	X	X
OP4	OP3	OP2	OP1	X	X	X	X

Fig 7.10: configuration du registre de controle dans les deux utilisations.

Pour démultiplexer les sorties, on utilise la sortie OUT0 comme signal de validation.

7.4 LA CARTE D'INTERFACE

Cette carte est placée entre la carte d'acquisition et la carte de commande principale; elle assure deux fonctions:

- protéger la carte d'acquisition;
- démultiplexer les signaux de la sortie de la carte d'acquisition (fig 7.11).

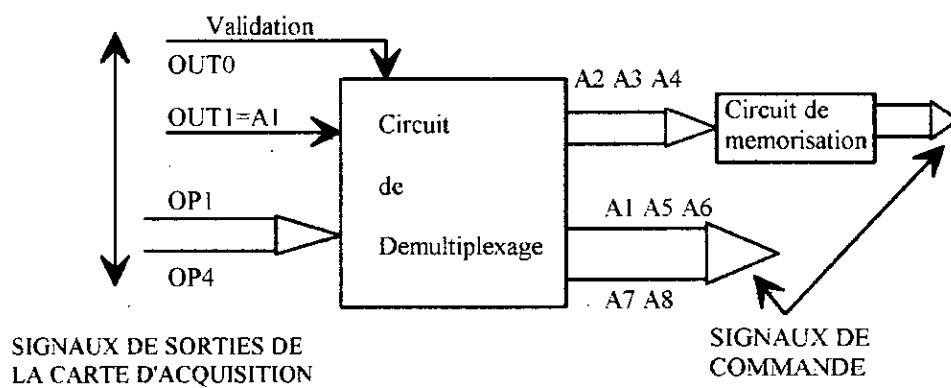


Fig 7.11: schéma synoptique de la carte d'interface.

7.4.1 CIRCUIT DE DEMULTIPLEXAGE

Ce circuit est composé essentiellement de trois circuits intégrés, deux buffers 74125 à trois états et un inverseur 7400 (porte NAND).

Ce circuit a pour fonction d'assurer le démultiplexage entre les signaux de sélection et les signaux de pilotage, ceci grâce à l'activation ou non des deux buffers utilisés. Selon que le bit de validation (OUT0), issu de la sortie du compteur 0 est au niveau haut ou au niveau bas, seul l'un des deux buffers est validé à la fois et cela est obtenu grâce au troisième circuit intégré (NAND).

7.4.1.1 CIRCUIT DE MEMORISATION

Pour conserver l'adresse du moteur sélectionné, on doit la mémoriser dès son envoi de la carte d'acquisition et ceci grâce au circuit intégré de mémorisation à savoir la bascule D.

Pour consulter le circuit électronique de la carte d'interface, se reporter à l'annexe.

7.5 LA CARTE DE COMMANDE PRINCIPALE

Le schéma bloc de la carte est représenté par la figure 7.12.

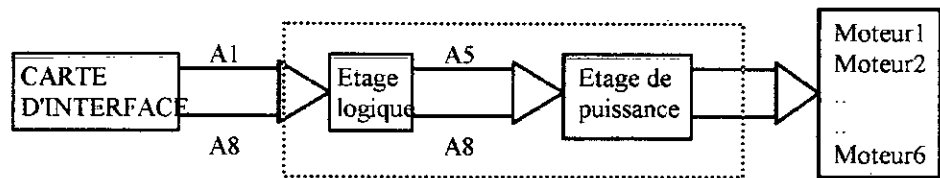


Fig 7.12: schéma synoptique de la carte de commande principale.

La carte de commande est constituée de deux étages:

- étage logique pour le décodage des adresses et des commandes de phases;
- étage de puissance pour le pilotage des moteurs pas à pas.

On analyse maintenant chaque étage en détail en se référant au schéma électrique donné en annexe.

7.5.1 ETAGE LOGIQUE

Le schéma synoptique de cet étage est donné par la fig 7.13.

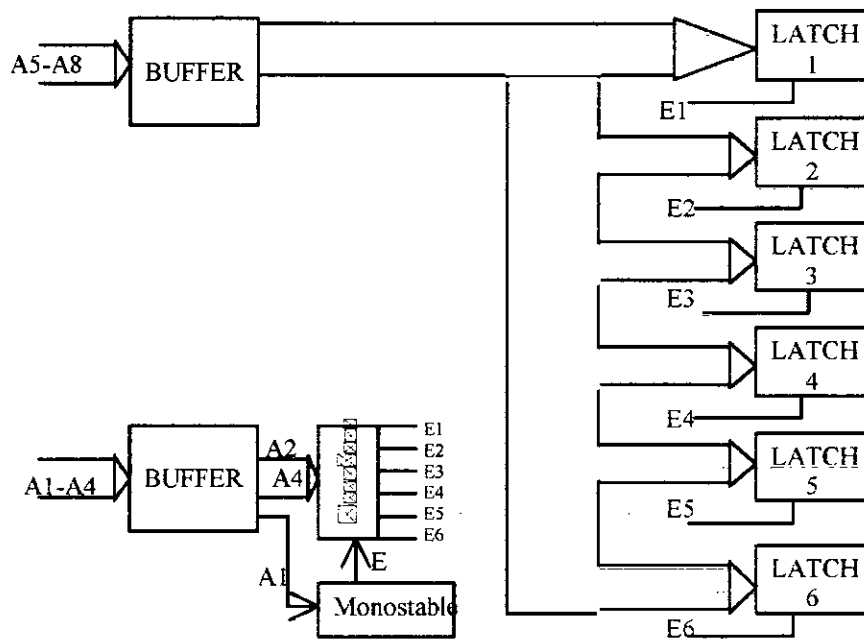


Fig 7.13: étage logique de la carte de commande.

Les huit bits de commande provenant de la carte d'interface sont envoyés aux entrées de deux buffers 74125, qui doivent être validés par un signal bas afin que les données présentes à l'entrée soient transmises à la sortie.

Le buffer du bit A_1 est toujours validé, sa sortie est branchée à une résistance de pull-up afin que cette ligne reste toujours au niveau haut, à moins qu'elle ne soit commandée par l'ordinateur. Ce bit sert à:

- valider les buffers des bits A_2 à A_8 ;
- activer le monostable par une impulsion négative.

Cet étage est constitué par les éléments suivants:

1 - le monostable 74123: qui produit une impulsion d'horloge de durée τ_2 égale à 500 μ s environ et sert à valider le décodeur 74138;

2 - le décodeur 74138: produit une impulsion de niveau bas pour chaque adresse $A_2 A_3 A_4$, d'une durée égale à celle de sa validation. Cette impulsion sert à valider la bascule 74175 correspondante.

3 - les latch 74175: les données relatives à la commande des phases des moteurs ($A_5 A_6 A_7 A_8$) vont en parallèle à tous les latches; seule celle qui est validée laisse passer les données à sa sortie et les mémorise pendant une certaine durée. Les bits $A_5 A_6 A_7 A_8$ commandent les quatre enroulements du moteur correspondant à l'adresse choisie.

Le chronogramme de fonctionnement de cet étage est donné par la fig 7.14.

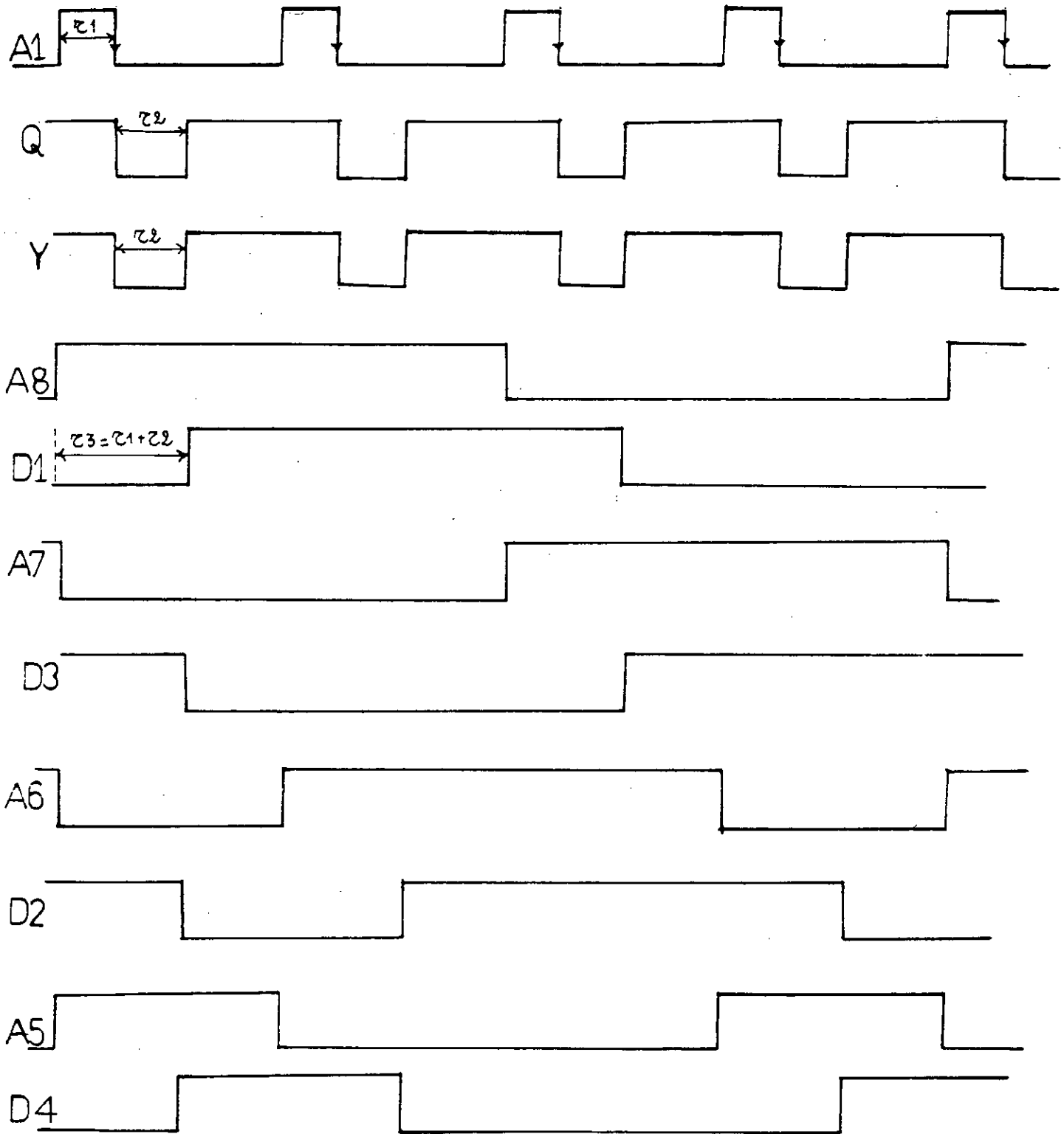


Fig 7.14: Chronogramme de fonctionnement de l'étage logique.

τ_1 : durée de l'impulsion de synchronisation du bit A_1 ;

τ_2 : durée de l'impulsion du monostable;

τ_3 : temps de retard;

A_1 : signal de validation;

Q: signal de sortie du monostable;

y: signal de sortie du décodeur;

A_8 : la phase 1;

A_7 : la phase 2;

A_6 : la phase 3;

A_5 : la phase 4;

D_1 : sortie du latch 1;

D_2 : sortie du latch 2;

D_3 : sortie du latch 3;

D_4 : sortie du latch 4;

7.5.2 ETAGE DE PUISSANCE

Le schéma synoptique de cet étage est donné par la fig 7.15.

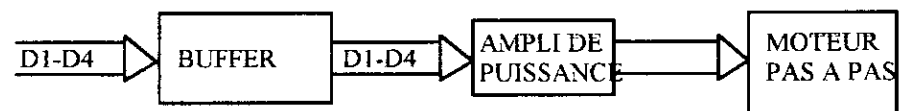


Fig 7.15: schéma synoptique de l'étage de puissance.

Cet étage est constitué par les circuits suivants:

1 - quatre circuits 7407: chacun de ces circuits contient six amplificateurs à collecteur ouvert et est alimenté par une tension $V_{cc}=12V$ à travers des résistances de $4.7 K\Omega$. Ces circuits servent à:

- l'isolation des circuits de puissance(ULN 2003) et de l'étage logique;
- piloter les circuits ULN 2003.

2 = quatre circuits ULN 2003: chacun de ces circuits contient 7 transistors darlington permettant l'amplification du courant jusqu'à 500mA. Le courant de pilotage des enroulements des moteurs doit être au minimum égal à 300mA.

Le schéma équivalent d'une ligne de pilotage d'une phase est représenté par la fig 7.16.

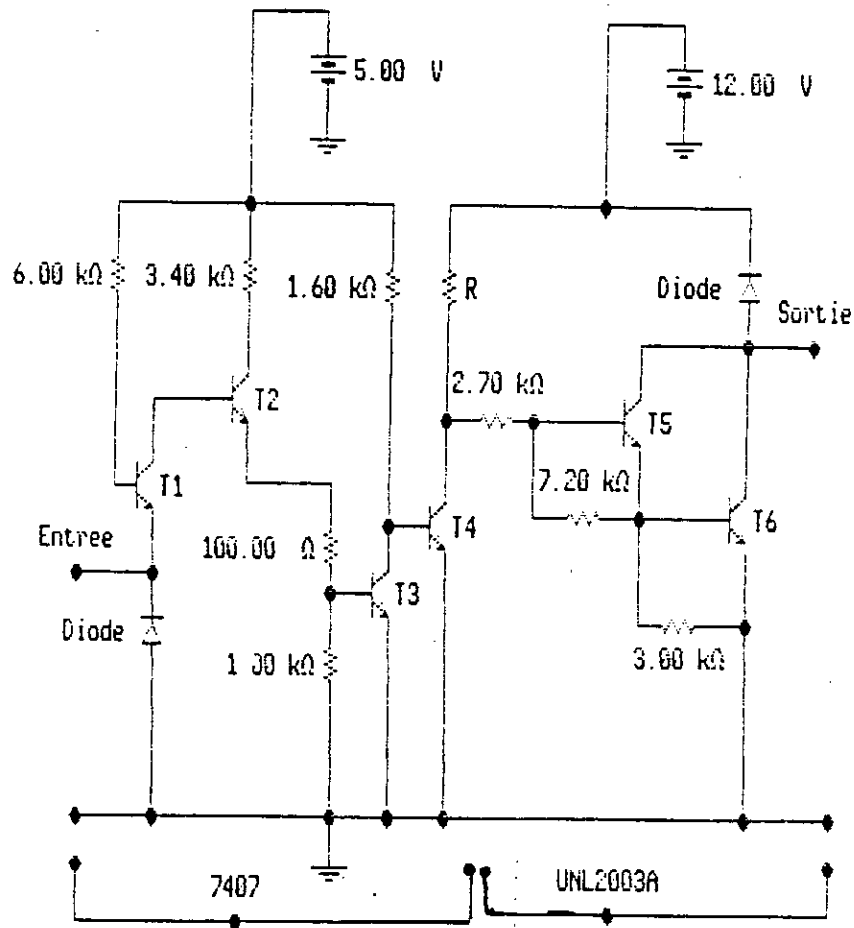


Fig 7.16: Schéma équivalent d'une ligne de pilotage d'une phase.

DESCRIPTION DU LOGICIEL

8.1 INTRODUCTION

Pour commander la carte d'acquisition, et de ce fait le robot, on a écrit un programme permettant de générer les signaux de commande et on a doté ce programme d'une interface utilisateur assez simple qui permet, même aux non initiés, de faire fonctionner le robot.

Le programme a été réalisé en langage C. On aurait pu choisir un autre langage de programmation, tel le PASCAL, mais le C offre des avantages que d'autres n'ont pas. On peut citer, par exemple, la portabilité du code source sur d'autres machines que le PC, sa rapidité, sa modularité, ses nombreuses bibliothèques de fonctions... Mais c'est surtout le fait qu'il est de plus en plus utilisé dans les universités qui nous a définitivement décidé.

8.2 INTRODUCTION AU LANGAGE C

La première version de ce langage a été écrite par DENIS RITCHIE du laboratoire BELL en 1972. En 1980, l'institut Américain de normalisation(ANSI), définit un standard du langage C connu, maintenant, sous le nom de « ANSI C ». Les versions du langage C qui existent sur le marché sont toutes conformes à cette norme; elles ne diffèrent, les une des autres, que par certaines bibliothèques de fonctions[12].

La version du langage C utilisée dans notre projet, est celle de BORLAND « Turbo C 2.0 » qui est très répandue sur PC. La structure modulaire du langage C fait qu'on peut réaliser, assez facilement, des programmes de grande taille.

La structure générale d'un programme en C est la suivante:

```
#include <bibliothèque de fonctions>
-
variables;
-
-
Type Fonction( Paramètres)
{
-
commandes;
-
}
-
main()
{
-
commandes;
-
}
```

La commande « include » permet d'insérer dans le programme une ou plusieurs bibliothèques de fonctions livrées avec le langage ou écrites par l'utilisateur. Parmi les bibliothèques standards du C on peut citer:

- `stdio.h` : comporte toutes les fonctions chargées de la gestion des entrées sorties.

- `math.h` : comporte de nombreuses fonctions mathématiques.

- `conio.h` : rassemble toutes les fonctions gérant la communication avec les périphériques de l'ordinateur.

Les variables utilisées par le C doivent être déclarées avant leur utilisation. Ces variables peuvent être de divers types. Parmi les types de variables supportées par le langage C, on peut citer:

- `int` : qui est le type entier;

- `float` : qui est le type réel;

- `char` : qui est le type caractère.

Le langage C permet de structurer le programme grâce aux fonctions écrites par l'utilisateur. Lors de l'appel de ces fonctions, par le programme principal ou une autre fonction, on peut leur transmettre des paramètres et, de la même façon, ces fonctions peuvent renvoyer à la fonction appelante une valeur définie par le type de la fonction, ce type pouvant être de n'importe quel des types du langage C.

Tous programme en C doit comporter une partie `main()`, qui est le programme principal, car ce sont ces commandes qui seront exécutées lors du démarrage du programme.

8.3 DESCRIPTION DU LOGICIEL MOUVROB

Le programme a été structuré en modules pour en simplifier la conception. Il effectue tâches suivantes:

1 - commande directe;

2 - séquence automatique;

3 - commande inverse.

8.3.1 COMMANDE DIRECTE

Ce sous programme offre la possibilité d'exécuter deux tâches différentes:

- la première permet de mouvoir le robot avec le clavier; l'utilisateur sélectionne une des articulations et la fait fonctionner dans un sens ou dans l'autre grâce aux touches de direction(\leftarrow et \rightarrow) du clavier. Pour arrêter le mouvement il suffit d'appuyer sur une touche du clavier autre que les touches de direction; et pour pouvoir choisir une autre articulation il faut, d'abord, appuyer sur « RETURN ».

- la deuxième permet de commander une des articulations du robot avec introduction des paramètres suivants:

- la période de travail [25(rapide) à 60(lent)];
- le sens de rotation;
- le nombre de tours à effectuer(équivalent à quatre fois le nombre de pas).

8.3.2 SEQUENCE AUTOMATIQUE

Ce sous programme permet de générer une séquence de mouvement automatique prédéfinie.

8.3.3 COMMANDE INVERSE

Le robot doit d'abord être initialisé, ce qui permettra de connaître la position initiale(x_0, y_0, z_0) de l'effecteur; l'utilisateur peut alors introduire les coordonnées finales(x_f, y_f, z_f) que l'outil terminal doit atteindre.

8.4 DESCRIPTION DE L'INTERFACE UTILISATEUR

L'interface utilisateur a été conçue pour rendre la commande du robot la plus simple possible. Elle est constituée d'une succession de menus clairs ainsi que de boîtes de dialogues donnant les explications nécessaires sur les démarches à suivre en fonction de la tâche à effectuer.

Dès le lancement du programme « MouvRob » le menu principal apparaît sur l'écran(fig 8.1). Ce dernier présente les fonctions que peut réaliser le logiciel, l'utilisateur peut donc sélectionner l'une des tâches présentées en 2.2.

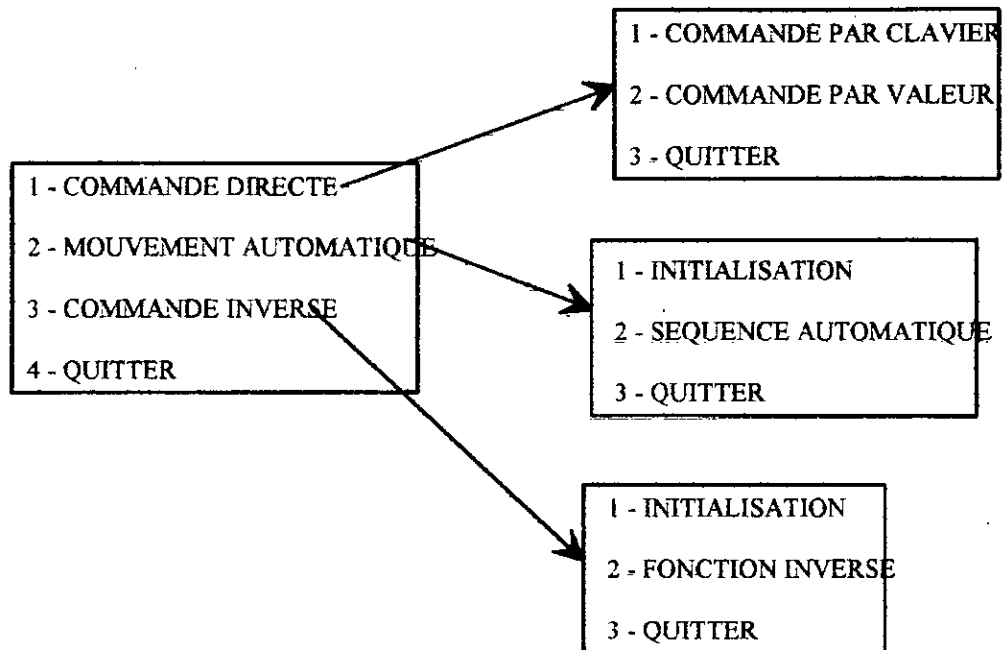


Fig 8.1: représentation des différents menus du programme.

8.5 COMPOSITION DU LOGICIEL

Le programme a été structuré en modules pour en simplifier la conception.

Ces modules sont intégrés au programme principal grâce à la commande « include » du langage C. Le module le plus important du logiciel est « Sign.h », car il comporte toutes les fonctions nécessaires au fonctionnement du robot.

En effet, il inclut la fonction *Bouge()* qui, en lui donnant les paramètres adéquats (adresse du moteur, nombre de pas, sens, vitesse), permet de mouvoir n'importe quelle articulation.

La fonction du langage C qui nous a été la plus utile est la fonction « outp »; elle se trouve dans la bibliothèque de fonctions « conio.h » avec le format suivant:

```
outp( adr, val);
```

Cette fonction permet d'écrire une donnée binaire de 8 bits (val) sur un périphérique d'adresse « adr ».

8.5.1 LES DIFFERENTS MODULES DU LOGICIEL

La liste des différents modules du programme est la suivante:

- Init.h: comporte les fonctions qui permettent d'initialiser la position des différentes articulations du robot;
- Direct.h: contient les fonctions de commande directes du robot;
- Inverse.h: contient les fonctions de commande inverses du robot;
- Automa.h: comporte les fonctions nécessaires à l'accomplissement, par le robot, d'une séquence de mouvement préprogrammée;
- Sign.h: inclut les fonctions de base pour le fonctionnement du robot. Elle est utilisée par tous les modules ci-dessus;
- LitEcrit.h: comporte quelques fonctions de base d'entrée/sortie utilisées par le module Sign.h;
- Cadr.h: contient des fonctions de base pour l'affichage utilisées pour générer les différents menus.

8.6 LES ORGANIGRAMMES DES PROGRAMMES

Nous donnons dans ce qui suit l'organigramme de MouvRob ainsi que ses différents sous programmes.

Voici les paramètres utilisés dans les organigrammes:

CH: numéro du moteur [1..6];

FR: période des signaux d'excitation des phases;

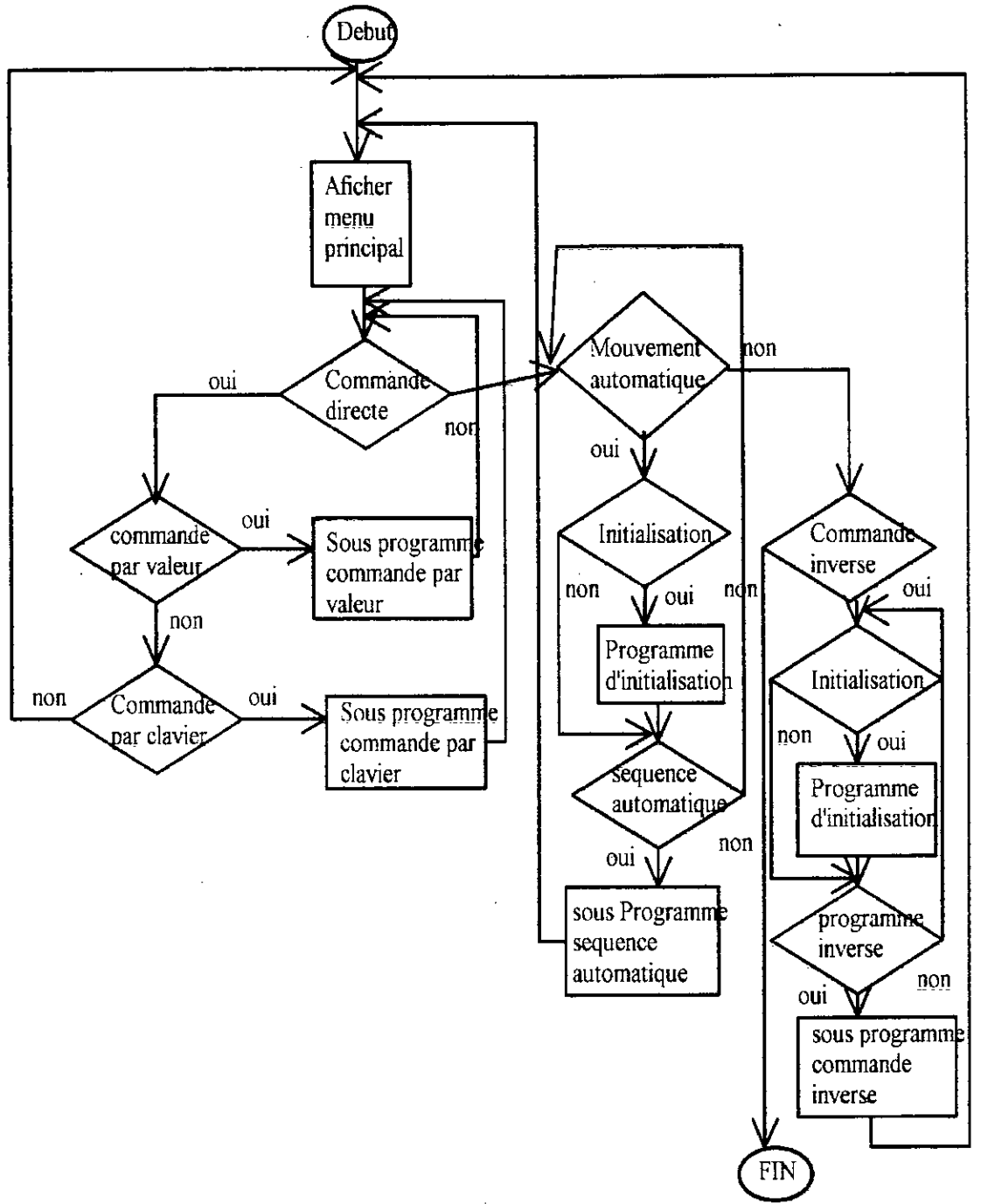
NP: représente le nombre de pas;

SEN: sens de rotation du moteur sélectionné(0: CW, 1: CCW);

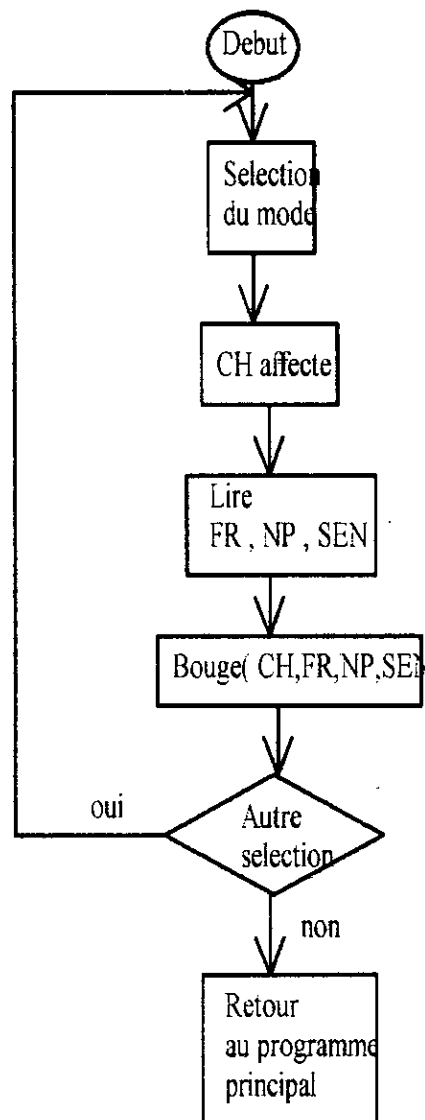
X0, Y0, Z0: les coordonnées initiales de l'outil terminale;

Xf, Yf, Zf: les coordonnées finales de l'outil terminale;

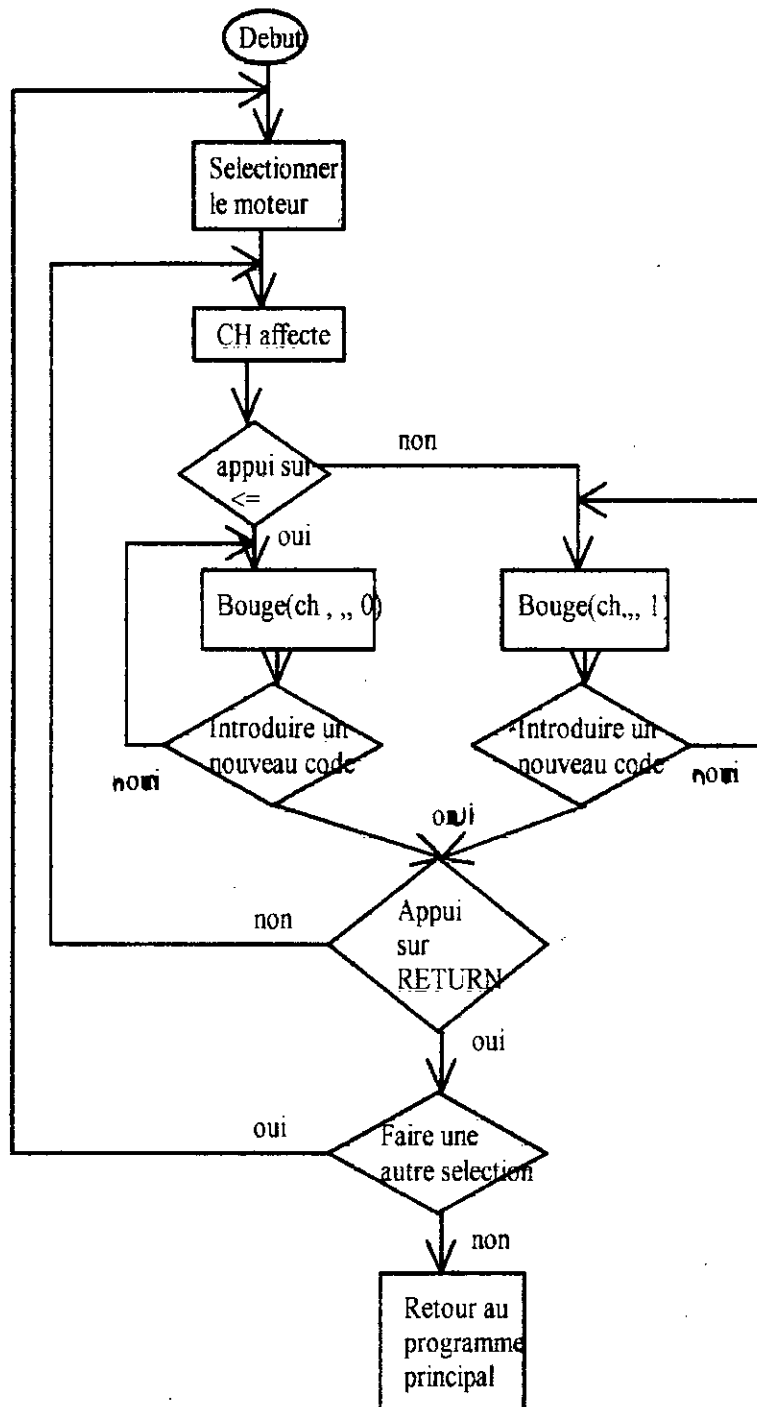
IR: paramètre indiquant le bon ou mauvais déroulement du calcul.



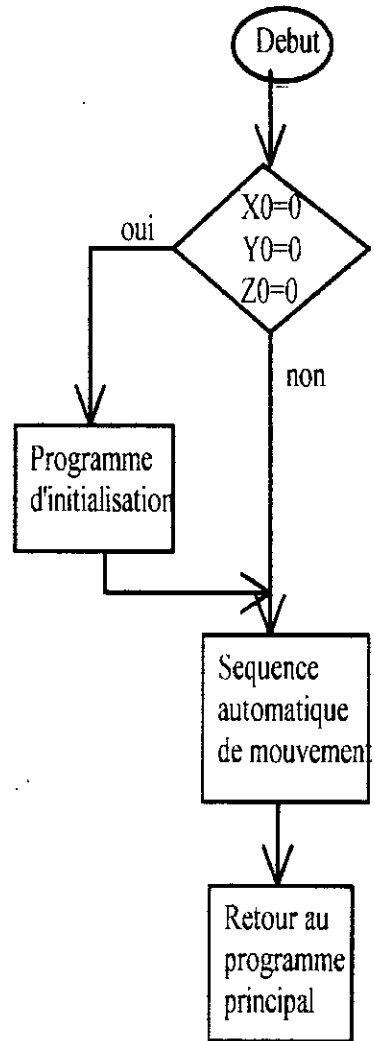
Organigramme du sous programme Commande par Valeur:



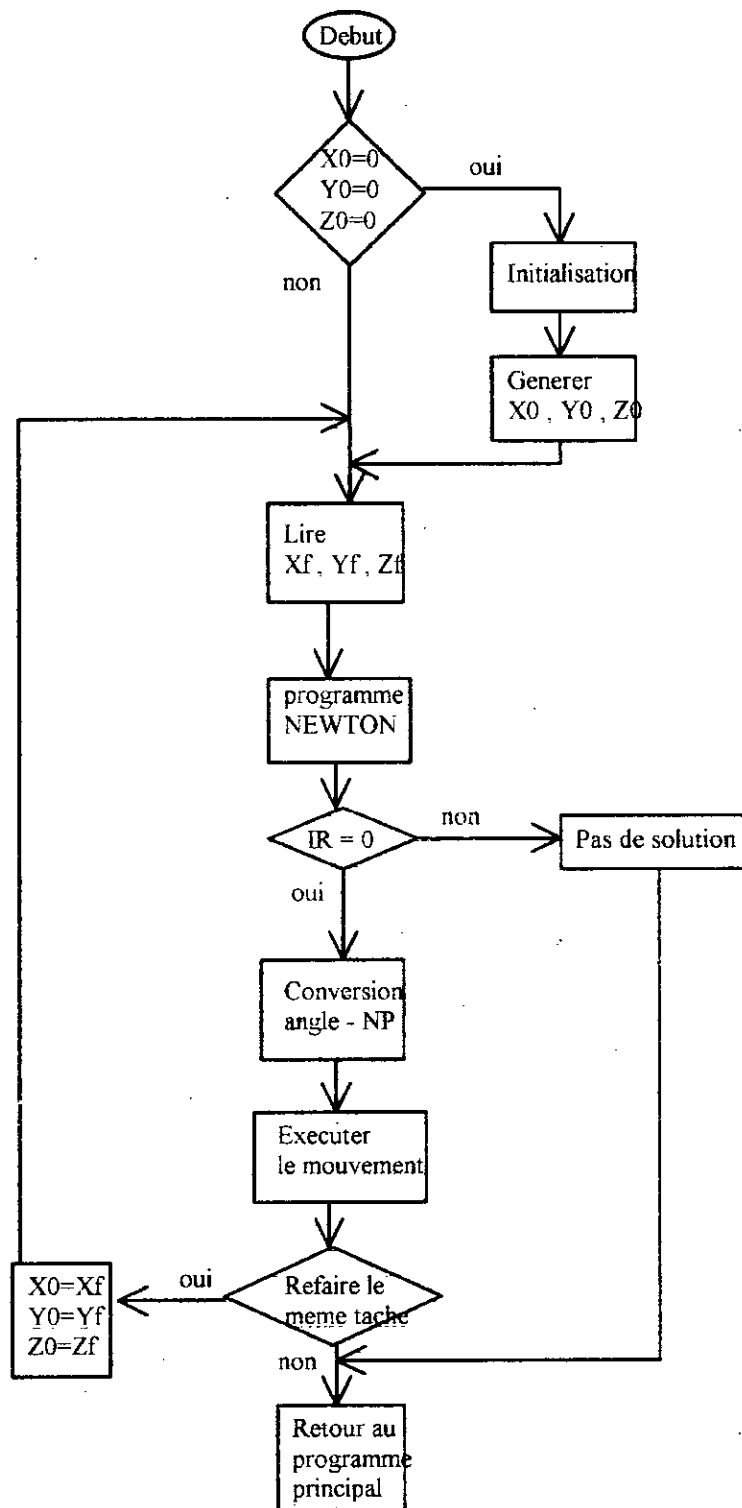
Organigramme du sous programme Commande par Clavier:



Organigramme du sous programme Commande de Mouvement Automatique:



Organigramme du sous programme Commande Inverse:



CONCLUSION

9. CONCLUSION

Le but de notre projet était de réaliser un système de commande qui permette de faire fonctionner le robot à travers un ordinateur.

A cet effet et pour mener à terme notre travail, nous avons procédé:

- à la réalisation d'une carte d'interface qui sert à démultiplexer les signaux provenant de l'ordinateur via la carte d'acquisition.

- à la conception d'un programme de gestion du robot. Ce programme est doté d'une interface utilisateur qui simplifie grandement son exploitation.

Les travaux effectués dans le cadre de ce projet nous ont permis par ailleurs d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la robotique, comme il nous a permis de nous initier au langage C.

Au plan pratique, nous avons éprouvé de sérieuses difficultés pour la réalisation de la carte d'interface compte tenu de l'indisponibilité de certains composants.

Il est à relever en outre que l'accès difficile à certains ouvrages a constitué, pour nous, un handicap qui nous a quelque peu retardé.

C'est justement en raison de cette difficulté que nous avons été amenés à développer longuement le chapitre traitant des moteurs pas à pas.

Nous pensant par là, faciliter la tâche aux étudiants intéressés par ce sujet.

En définitive nous espérons que notre objectif a été atteint et que notre travail sera utile aux étudiants dans le cadre des travaux pratiques, comme il pourrait servir de base à de futurs projets de fins d'études.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Science et Vie
« *La science des robots* »
Hors série 1982.
- [2] Larousse
« *Enciclopédie Larousse* »
Edition 1980.
- [3] Jean-Marie Kauffmann et Pierre Andre
« *Les robots: constitutions technologique* »
Tome 4
Edition Hermes- 1983.
- [4] A. Pruski
« *Robotique générale* »
Edition Ellipses- 1988.
- [5] B. Gorla
« *Modèles des robots manipulateurs:
application à leur commande* »
Edition Cepadues- 1984.
- [6] T. Zenina et M. Sobaihi
Thèse Projet de fin d'études
« *Conception et réalisation d'une carte
de commande d'un bras manipulateur* »
ENP- Juin 1994.
- [7] C. Vibet
« *Robots: principes et controle* »
Edition Ellipses- 1987.
- [8] J. Vignes
« *Algorithmes numérique* »
Tome 2
Edition Technique- 1980.

- [9] T. Kenjo
« *Stepping motors and their microprocessor controls* »
Oxford University- 1984.
- [10] Keithley Metrabyte Corporation
« *User Manual of DAS-8* »
1988.
- [11] A. Kelley and I.Pohl
« *A Book on C* »
The Benjamin/Cummings
Publishing Company, Inc- 1989.

ANNEXES

ANNEXE A: BROCHAGE DE LA CARTE D'ACQUISITION DAS-8

PIN	NAME	FUNCTION
1	+12v	+12v power supply from P.C. buss (observe loading limits)
2	CLK0	8254 Counter 0 clock input
3	OUT0	8254 Counter 0 output
4	CLK1	8254 Counter 1 clock input
5	OUT1	8254 Counter 1 output
6	OUT2	8254 Counter 2 output
7	OP1	Digital output #1
8	OP2	Digital output #2
9	OP3	Digital output #3
10	OP4	Digital output #4
11	DIG.COM.	Digital Common. Return for all logic signals and power supply currents. Connected to computer frame.
12	L.L.GND.	
13	L.L.GND.	
14	L.L.GND.	Low level grounds. These are common returns and shields for the analog input channels.
15	L.L.GND.	
16	L.L.GND.	
17	L.L.GND.	
18	L.L.GND.	
19	VREF	+10.00v(±0.1V) precision ref. voltage from A/D.
20	-12V	-12V power from P.C. buss (observe loading limits).
21	GATE0	8254 Counter 0 gate input
22	GATE1	8254 Counter 1 gate input
23	GATE2	8254 Counter 2 gate input
24	INT. IN	Interrupt input. Positive edge-triggerred input.
25	IP1	Digital input #1
26	IP2	Digital input #2
27	IP3	Digital input #3
28	DIG. COM.	Digital common. (same as pin 11).
29	+5V	+5V power from P.C. buss (observe loading limits).
30	IN 7	Channel #7 analog input
31	IN 6	Channel #6 analog input
32	IN 5	Channel #5 analog input
33	IN 4	Channel #4 analog input
34	IN 3	Channel #3 analog input
35	IN 2	Channel #2 analog input
36	IN 1	Channel #1 analog input
37	IN 0	Channel #0 analog input

ANNEXE B: LES ANGLES DE BRYANT

Les angles de Bryant assurent le passage du repère R_n à R_{n+1} par trois rotations successives autour de X_0 , Y_1 et Z_2 (fig B.1).

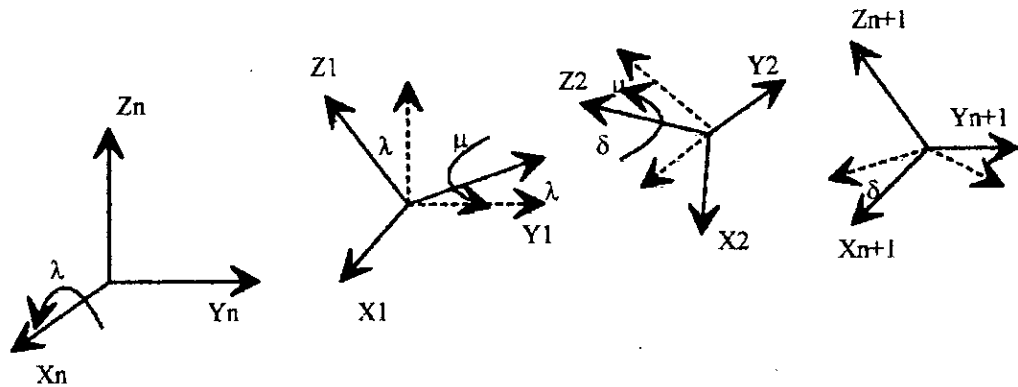


Fig B.1: les angles de Bryant.

Le calcul de la matrice de passage s'effectue de la manière suivante:

$$M_i^{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \mu & 0 & \sin \mu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \mu & 0 & \cos \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_i^{n+1} = \begin{bmatrix} \cos \mu \cos \delta & -\cos \mu \sin \delta & \sin \mu \\ \sin \lambda \sin \mu \cos \delta + \cos \lambda \sin \delta & -\sin \lambda \sin \mu \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta & -\sin \lambda \cos \mu \\ -\cos \lambda \sin \mu \cos \delta + \sin \lambda \sin \delta & \cos \lambda \sin \mu \sin \delta + \sin \lambda \cos \delta & \cos \lambda \cos \mu \end{bmatrix}$$

ANNEXE C: LES ANGLES D'EULER

Le passage du repère R_{n+1} à R_n , dont l'orientation est définie par les angles d'Euler, comme pour les angles de Bryant, s'effectue en trois rotations Z_1, X_2, Z_3 (Fig C.1).

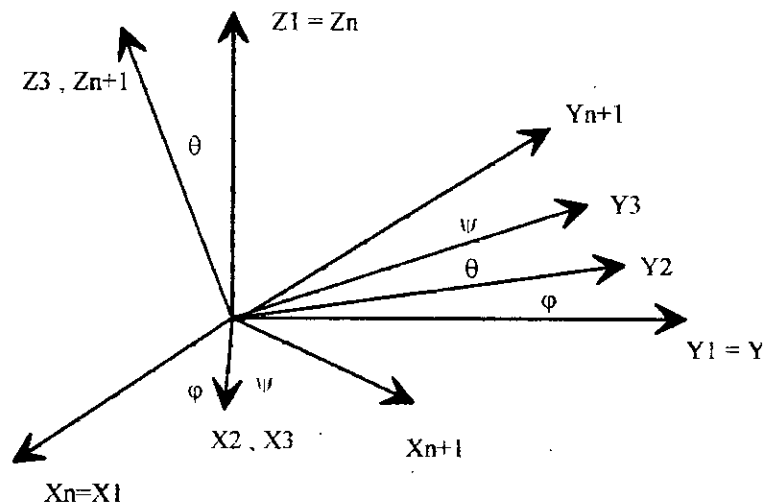


Fig C.1: les angles d'Euler.

Le calcul de la matrice de passage se fait de la manière suivante:

$$M_i^{+1} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho & 0 \\ -\sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

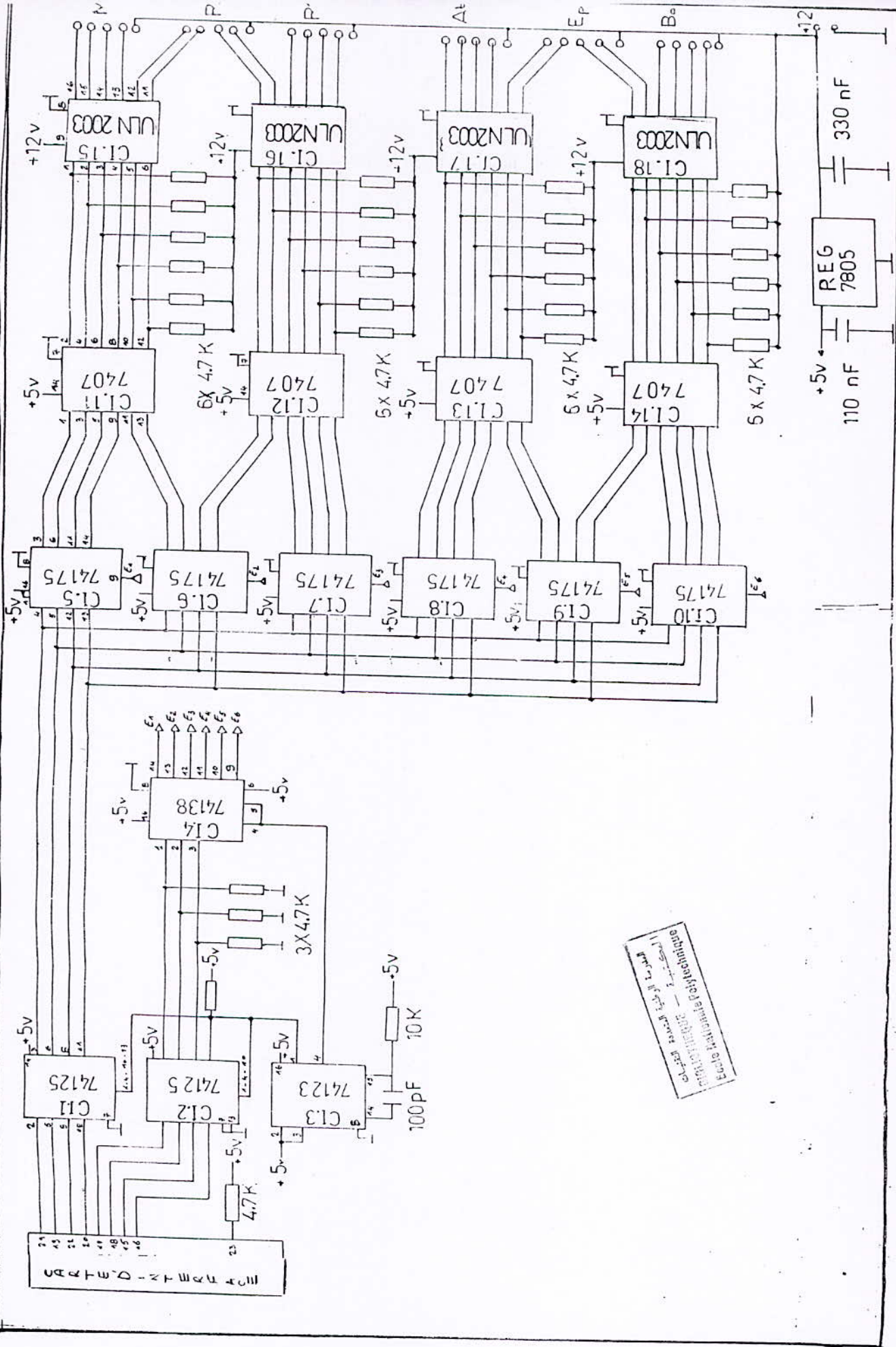
$$M_i^{+1} = \begin{bmatrix} \cos \rho \cos \psi - \sin \rho \cos \theta \sin \psi & \cos \psi \sin \rho + \cos \rho \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \psi \\ -\cos \rho \sin \psi - \sin \rho \cos \theta \cos \psi & -\sin \rho \sin \psi + \cos \rho \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \cos \psi \\ \sin \rho \sin \theta & -\cos \rho \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En général, les angles d'Euler ne sont pas aisément mesurables; il est préférable de limiter leur utilisation pour le cas où les trois rotations sont réellement réalisables.

Annexe D : Les Schémas électriques des cartes.

- Schéma électrique de carte de commande

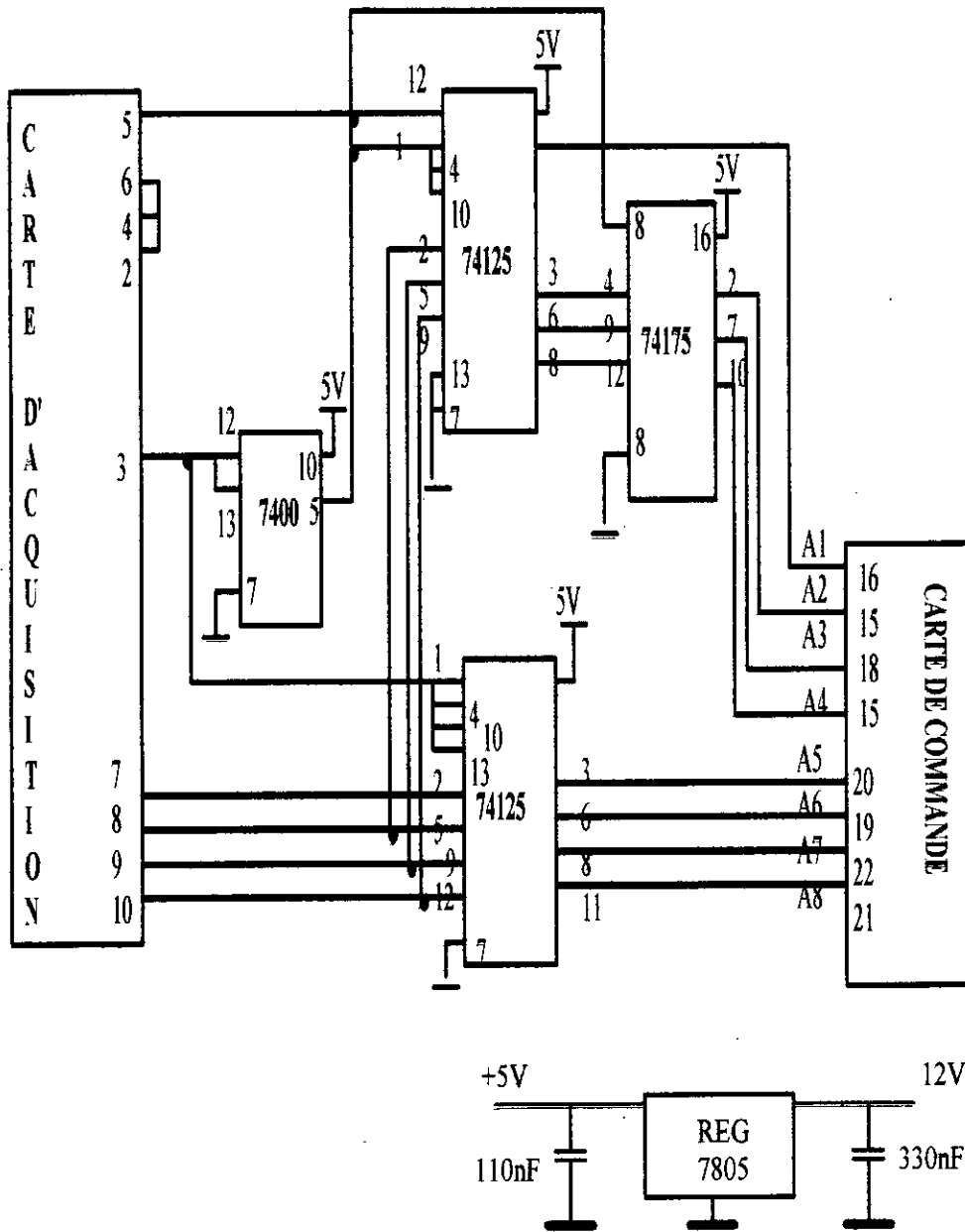
principale



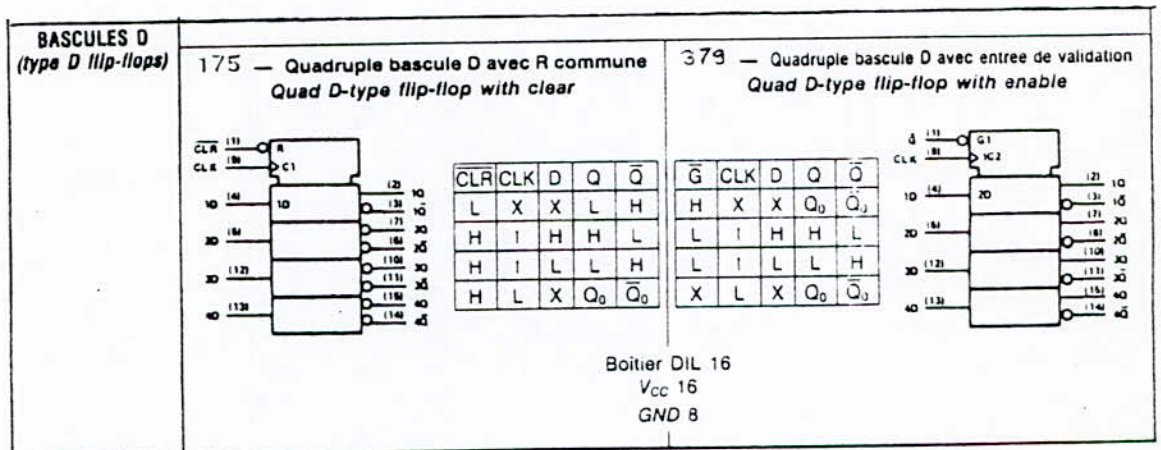
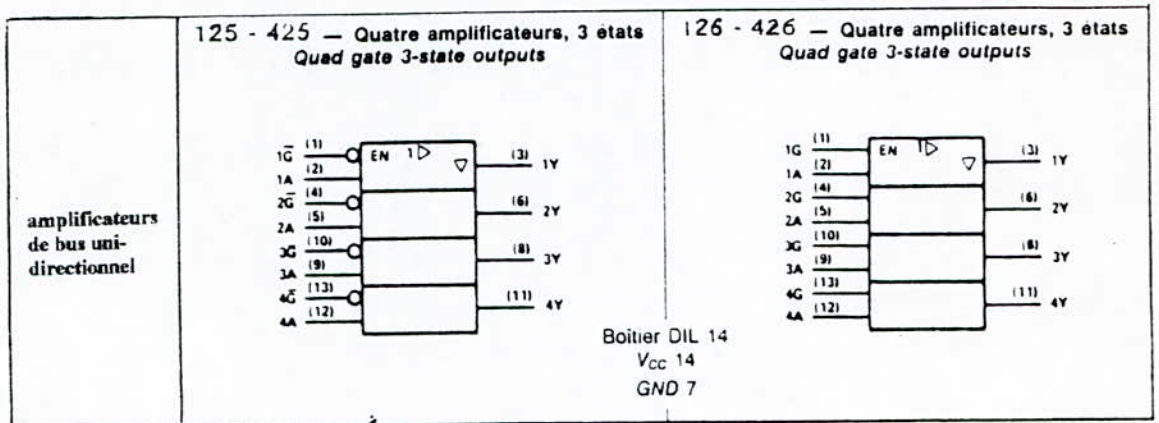
الدراسة الوطنية للتحليلات
 ANALYTIC - المصنعة
 Ecole Nationale Polytechnique

الدراسة الوطنية للتحليلات
 ANALYTIC - المصنعة
 Ecole Nationale Polytechnique

ANNEXE E: SCHEMA ELECTRIQUE DE LA CARTE D'INTERFACE



ANNEXE F: BROCHAGE DES CIRCUITS INTEGRES UTILISES



TTL

