

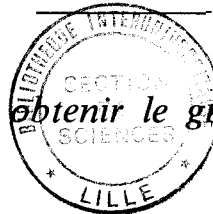
# THÈSE

N° d'ordre 1383

*présentée à*

## L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le grade de



DOCTEUR DE 3<sup>e</sup> CYCLE

*SPÉCIALITÉ :*

***AUTOMATIQUE & INFORMATIQUE INDUSTRIELLE***

par

**Lotfi OSMAN**

**PERCEPTION ET DESCRIPTION DU CONTEXTE LOCAL  
APPLIQUÉES A LA COMMANDE D'UN ROBOT SOUS-MARIN**

*soutenue le 21 Mai 1987 devant la commission d'examen*

<b>MM. J. G. POSTAIRE</b>	Professeur, Université de LILLE I	Président
<b>P. LOPEZ</b>	Professeur, I.N.S.A. de TOULOUSE	Rapporteur
<b>J. RIPOCHE</b>	Professeur, Université du Havre	} Membres
<b>A. FAURE</b>	Professeur, Université du Havre	
<b>J. N. FOULC</b>	Maître de conférences, Université de MONTPELLIER II	

A mes parents,

A mes frères et soeur,

Avec ma profonde affection.

Cette thèse présentée à l'Université de LILLE I résulte d'un travail de recherche effectué au Laboratoire d'Automatique et de COmmande des systèmes (L.A.CO.S) de l'Université du HAVRE sous la direction de Monsieur le Professeur Alain FAURE .

AVANT-PROPOS  
\*\*\*\*\*

Je remercie vivement Monsieur J.G.POSTAIRE Professeur à l'Université des sciences et techniques de LILLE I d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter la présidence du jury .

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'égard de Monsieur le professeur A.FAURE directeur du Laboratoire d'Automatique et de COMmande des Systèmes (L.A.CO.S) de m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche et participer à ce jury .

Je suis très honoré de la présence de Monsieur le Professeur P.LOPEZ Professeur à l'I.N.S.A de TOULOUSE . Je le remercie chaleureusement d'avoir examiné ce mémoire .

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur J.N.FOULC Maître de conférences à l'Université de MONTPELLIER II pour le dévouement , les encouragements et les nombreux conseils qu'il m'a apportés tout au long de cette thèse .

Je tiens également à exprimer tous mes remerciements à Monsieur J.RIPOCHE Professeur à l'Université du HAVRE et directeur du Laboratoire L.E.A.H - Ultrasons d'avoir accepté de participer à ce jury .

Je remercie enfin tous les membres du L.A.CO.S qui ont contribué au maintien d'une ambiance amicale .



SOMMAIRE  
\*\*\*\*\*

	Page
INTRODUCTION GENERALE -----	1
CHAPITRE I : MODELES ET COMMANDE DES ROBOTS MANIPULATEURS -----	
I.1 Introduction	4
I.2 Définitions	4
I.2.1 Robot manipulateur - Effecteur	4
I.2.2 La versatilité	4
I.2.3 L'auto-adaptativité à l'environnement	5
I.2.4 Coordonnées généralisées	5
I.2.5 Coordonnées opérationnelles	6
I.3 Principaux modèles des manipulateurs	6
I.3.1 Modèle géométrique	6
I.3.2 Modèle géométrique inverse	6
I.3.3 Modèle cinématique	6
I.3.4 Modèle variationnel	7
I.3.5 Modèle variationnel inverse	7
I.3.6 Modèle dynamique généralisé	8
I.4 Elaboration des signaux de consigne des asservissements	10
I.4.1 Cas des robots programmés par apprentissage	10
I.4.2 Cas des robots programmés en langage de haut niveau	10
I.5 Commande des robots manipulateurs	11
I.5.1 Quelques commandes classiques	11
I.5.1.1 Commande en position	11
I.5.1.2 Commande en vitesse	13

	Page
I.5.1.3 Commande dynamique	16
I.5.2 Commande en boucle fermée	19
I.5.2.1 Introduction	19
I.5.2.2 Saisie d'une cible fixe	20
I.5.2.3 Saisie d'objets en mouvement	21
I.5.2.4 Suivi de joint dans l'espace par un robot de soudage	23
I.5.2.5 Manipulation d'objets en contact	24
I.6 Conclusion	25
CHAPITRE II : UTILISATION et CINEMATIQUE DU MINI-MOVER 5	
II.1.1 La partie mécanique	26
II.1.1.1 Les degrés de liberté	26
II.1.1.2 Transmission et réduction	30
II.1.2 Les moteurs et leurs alimentations	30
II.2 Systèmes de commande du manipulateur Mini-Mover 5	30
II.2.1 Interface électronique	30
II.2.2 Commande	32
II.3 Cinématique du manipulateur Mini-Mover 5	35
II.3.1 Position du problème	35
II.3.2 Transformation de coordonnées: Méthode générale	36
II.3.2.1 Les variables généralisées	38
II.3.2.2 Les divers repères orthogonaux et les matrices de rotation	38



	Page
II.3.2.3 Transformation de coordonnées directe	40
II.3.2.4 Transformation de coordonnées inverse	42
II.3.3 Transformation de coordonnées simplifiée	42
II.3.3.1 Transformation de coordonnées directe	44
II.3.3.2 Transformation de coordonnées inverse	44
II.3.3.3 Conclusion	45
CHAPITRE III : PRISE EN COMPTE DU CONTEXTE LOCAL DANS	
-----	
LA COMMANDE DES ROBOTS MANIPULATEURS	
III.1 Principes généraux	47
III.1.1 Notion du contexte local	47
III.1.2 Perception du contexte local	48
III.1.3 Domaines d'application des dispositifs de perception du contexte local	49
III.2 Utilisation de dispositifs sensoriels pour la reconnaissance du contexte local	52
III.2.1 Position du problème	52
III.2.2 Outils techniques d'analyse du contexte local	52
III.2.2.1 Capteurs à ultra-sons	53
III.2.2.2 Capteurs optiques à rayons infrarouges	59
III.2.2.3 Capteurs optiques à rayons Laser	61
III.2.2.4 Quelques autres capteurs	66
III.3 Description de certaines techniques sensorielles utilisées en robotique	66
III.4 Conclusion	69

	Page
CHAPITRE IV : EXPERIMENTATION - APPLICATION SOUS-MARINE	
-----	
IV.1 Introduction	70
IV.2 Organisation matérielle	70
IV.2.1 Le robot et son contexte local	70
IV.2.2 La chaîne d'acquisition des mesures	72
IV.2.3 Le calculateur	79
IV.3 Application au suivi de surface	82
IV.3.1 Position du problème	82
IV.3.2 Mise en oeuvre pratique	83
IV.3.3 Résultats	92
IV.4 Perception en vue de reconnaissance d'objets	96
IV.4.1 Position du problème	96
IV.4.2 Classification par la méthode de distance minimale entre les représentations des formes	97
IV.4.2.1 Principe de la méthode	97
IV.4.2.2 Fonctions décision	99
IV.4.2.3 Détermination de la fonction décision	100
IV.4.3 Mise en oeuvre expérimentale	102
IV.4.3.1 Description symbolique	102
IV.4.3.2 Expérimentation	105
IV.4.4 Résultats	108
IV.5 Remarques générales	117
IV.5.1 Imprécision d'origine logicielle	120
IV.5.2 Imprécision d'origine matérielle	120
CONCLUSION GENERALE	122
-----	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	125
-----	

## \* ANNEXES :

## ANNEXE I : TRANSFORMATION DE COORDONNEES DIRECTE ET INVERSE

I.1	Transformation de coordonnées directe. Méthode générale.	134
I.1.1	Calcul de Ep	135
I.1.2	Calcul de Rp	137
I.2	Transformation de coordonnées inverse	139

## ANNEXE II : LE CIRCUIT PORTE ELECTRONIQUE

II.1	Le buffer d'entrée	142
II.2	Commande de la porte électronique	143
II.3	La porte analogique	144

## ANNEXE III : LE MINI-MOVER 5

## SYSTEME DE COMMANDE &amp; PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

III.1	Présentation détaillée des 6 instructions de commande "ARMBASIC" du robot Mini-Mover 5	165
III.2	Les principales caractéristiques du MINI-MOVER 5	150

\*\*\*\*\*

INTRODUCTION GENERALE  
\*\*\*\*\*

La robotique est un nouvel axe de recherche qui a vu le jour il y a seulement quelques décennies. Depuis, l'évolution rapide de cette discipline et l'énorme progrès qu'elle a connu ces dernières années permettent de la considérer comme étant une science à part entière .

Cette nouvelle science vise à doter certaines machines de facultés leur permettant d'effectuer de façon autonome les tâches qui leur ont été attribuées. Ces machines, qualifiées de ROBOTS, doivent alors posséder un logiciel plus ou moins complexe et être muni d'un équipement sensoriel adapté , ce dernier représentant un des aspects essentiels de la robotique.

Les informations délivrées par les capteurs extéroceptifs permettent au robot d'appréhender son contexte local afin de s'y adapter : détection et évitement d'obstacles , identification d'objets , localisation , etc...

Ces informations sont exploitées par le logiciel afin d'élaborer une stratégie d'exécution d'opérations, satisfaisante.

Parmi les différents sujets développés en robotique, l'aspect modélisation et commande représente un travail important pour l'automaticien.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'aspect commande en boucle fermée sur l'environnement, ce qui se traduit par la prise en compte du contexte local dans lequel le robot évolue , et cela grâce à son équipement sensoriel.

En ce qui concerne les moyens de perception existants , le capteur à ultra-sons représente pour certaines applications une

solution intéressante compte-tenu de sa simplicité et de son efficacité. La possibilité d'émettre un signal ultra-sonore vers un objet réfléchissant permet d'extraire un certain nombre d'informations relatives au contexte local du robot. C'est pourquoi ce type de capteur a attiré l'attention de plusieurs spécialistes en robotique notamment lorsque l'intervention doit se dérouler en milieu sous-marin.

Le senseur à ultra-sons peut ainsi jouer le rôle d'un capteur de position ou être utilisé pour détecter et identifier un objet. Toutefois, notons que la précision des mesures est liée à la nature de l'objet utilisé (état de surface, pouvoir de réflexion...).

Notre contribution, dans le cadre de cette thèse, porte sur la commande du robot ainsi que sur la perception de son contexte local. Actuellement, ce sujet n'est pas très développé dans la littérature ; c'est pourquoi nous nous proposons tout au long de ce travail de l'aborder en le concrétisant par deux applications typiques réalisées sur un mini-robot à poste fixe.

Ce travail étant centré sur l'aspect commande, nous avons dans un premier temps fait un tour d'horizon sur les différents types de commande en le précédant par une description succincte de principaux modèles des manipulateurs. Ceci fait l'objet du premier chapitre, et permet de mieux situer notre approche sur ce point.

Nous présentons dans le deuxième chapitre une description détaillée du manipulateur Mini-Mover 5 mis à notre disposition

par le L.A.C.O.S et sur lequel nous avons expérimenté notre technique . Nous consacrons dans ce même chapitre un paragraphe traitant de la cinématique du manipulateur.

Dans le troisième chapitre, nous expliquons la notion de contexte local et citons divers organes sensoriels susceptibles de permettre au manipulateur d'agir sur son environnement. Ceci est suivi d'une présentation de quelques travaux utilisant en partie les différents outils d'analyse évoqués précédemment .

Nous exposons dans le quatrième et dernier chapitre notre dispositif expérimental et décrivons en détail notre procédure à travers deux applications sous-marines : suivi de surface et reconnaissance d'objets.

\*\*\*\*\*

CHAPITRE I  
\*\*\*\*\*

MODELES ET COMMANDES DES ROBOTS MANIPULATEURS

---



## 1.1 INTRODUCTION

La commande des manipulateurs est sans doute l'un des aspects les plus importants de la robotique actuelle /35/. L'introduction d'informations sensorielles dans cette commande contribue grandement à l'exécution de certaines tâches en fonction du contexte local dans lequel agissent ces robots .

Ce chapitre aura donc pour vocation la mise en relief des principales commandes des robots manipulateurs , en commençant par une vue d'ensemble des différents modèles existants . Les commandes évoquées feront alors plus ou moins appel aux modèles cités et seront illustrées par des exemples concrets .

## 1.2 DEFINITIONS

### 1.2.1 Robot-manipulateur ; Effecteur

Un robot manipulateur est un système mécanique articulé constitué d'une chaîne simple de  $n$  corps rigides reliés entre-eux par des articulations et possédant un certain nombre de degrés de liberté . Le dernier corps est appelé effecteur ou organe terminal. A chaque corps  $C_i$  est associé un repère  $R_i$ ; le repère  $R_0$  est le repère fixe lié au bâti , le repère  $R_n$  est le repère lié à l'effecteur, dans le cas d'un robot à  $n$  degrés de liberté (si chaque articulation met en jeu un degré de liberté).

### 1.2.2 La versatilité

Elle concerne la potentialité géométrique et mécanique du robot, c'est-à-dire son aptitude physique à l'exécution de tâches diverses d'une part, à l'exécution diversifiée d'une même tâche , d'autre part; ce dernier point implique que le manipula-

teur soit redondant vis-à-vis de la tâche .

### 1.2.3 L'auto-adaptativité à l'environnement

---

Il s'agit de la capacité d'initiative du robot pour mener à bien des tâches incomplètement spécifiées, et ceci malgré des modifications imprévues de l'environnement. Cette propriété conduit le robot à mettre en jeu :

- sa capacité de perception de l'environnement (Capteurs) ;
- ses capacités de réflexion pour analyser l'espace de la tâche et élaborer une stratégie d'exécution ;
- ses modes de commande automatique.

### 1.2.4 Coordonnées généralisées

---

Chaque position et orientation de l'organe terminal d'un robot correspond à une configuration géométrique de ce dernier. Cette configuration peut être définie par l'ensemble de variables dites articulaires. Une variable articulaire traduit les déplacements relatifs intervenant entre deux corps rigides adjacents  $C_i$  et  $C_{i-1}$  sous l'action d'une force extérieure produite par un ou plusieurs actionneurs (Ces déplacements sont liés aux variables moteurs correspondant aux positions angulaires des moteurs et/ou aux positions linéaires des vérins). Les variables articulaires ( $\theta_i$ )  $i = 1, 2, \dots, n$  appelées également coordonnées articulaires ou coordonnées généralisées sont indépendantes et définissent la configuration de la chaîne. Si  $n > 6$ , le manipulateur est dit "redondant" (au sens de six degrés de liberté pour situer l'effecteur considéré comme un solide indéformable) .

### 1.2.5 Coordonnées opérationnelles

---

La configuration de l'organe terminal d'un robot est définie par un ensemble de  $n$  quantités scalaires fixant sa position et son orientation par rapport au repère fixe  $R_0$ .

La position est définie par 3 coordonnées cartésiennes  $x, y, z$ . Quant à l'orientation, elle peut être représentée par plusieurs possibilités parmi lesquelles nous pouvons choisir par exemples les 3 angles d'Euler  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Soit  $X = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$

## 1.3 PRINCIPAUX MODELES DES MANIPULATEURS /52/ .

### 1.3.1 Modèle géométrique

---

C'est l'expression qui permet d'associer à une configuration  $\underline{\theta}$  du manipulateur le vecteur de coordonnées opérationnelles correspondant, indépendamment de tout mouvement.

Soit  $\underline{X} = f(\underline{\theta})$  (1-1)

### 1.3.2 Modèle géométrique inverse

---

C'est la fonction  $f^{-1}$  quand elle existe, c'est-à-dire :

$$\underline{\theta} = f^{-1}(\underline{X}) \quad (1-2)$$

L'existence de cette fonction inverse, le nombre de solutions possibles et le calcul approché ou non de  $\underline{\theta} = f^{-1}(\underline{X})$  constituent un problème largement abordé dans la littérature /2/ - /3/.

### 1.3.3 Modèle cinématique

---

Le mouvement d'un point appartenant au corps  $C_i$  est défini par ses vitesses de translation et de rotation instantanées par

rapport à  $R_0$ . L'ensemble des vitesses de translation et de rotation des repères  $R_i$  par rapport à  $R_0$ , exprimées dans  $R_i$  constitue le modèle cinématique du manipulateur, qui peut s'exprimer sous forme récursive /1/.

#### I.3.4 Modèle variationnel

---

C'est un cas particulier du modèle cinématique, relatif à l'effecteur  $C_n$ , et obtenu en dérivant (1\_1). Nous obtenons :

$$\begin{matrix} \underline{\Delta X} \\ (m \times 1) \end{matrix} = \begin{matrix} [J(\underline{\theta})] \\ (m \times n) \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \underline{\Delta \theta} \\ (n \times 1) \end{matrix} \quad (1-3)$$

$[J(\underline{\theta})] = \left[ \frac{\partial f}{\partial \theta} \right]$  est la matrice Jacobienne de la fonction  $f$ . Elle est de dimension  $(m \times n)$

Plusieurs méthodes de calcul sont proposées dans la littérature /2/ .

#### I.3.5 Modèle variationnel inverse

---

C'est, s'il existe, le modèle permettant de calculer à  $\underline{\theta}$  et  $\underline{\Delta X}$  donnés :

$$\begin{matrix} \underline{\Delta \theta} \\ (n \times 1) \end{matrix} = \begin{matrix} [J]^{-1} \\ (n \times m) \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \underline{\Delta X} \\ (m \times 1) \end{matrix} \quad (1-4)$$

Classiquement, la matrice  $J$  n'est inversible qu'aux conditions suivantes :

\_ Elle est carrée, c'est-à-dire que les dimensions  $n$  et  $m$  des vecteurs  $\underline{\Delta \theta}$  et  $\underline{\Delta X}$  sont les mêmes.

\_ Son déterminant n'est pas nul, ce qui ne dépend que des valeurs des variables articulaires, c'est-à-dire de la configuration  $\underline{\theta}$  du robot ( Le rang de  $J$  est égal à  $m = n$  ).

Ces deux conditions peuvent ne pas être vérifiées de 3 manières :

- a)  $m < n$  (Par exemple, seules quelques composantes de  $\underline{\Delta X}$  sont imposées);
- b)  $m > n$  (Le nombre de degrés de liberté est insuffisant) ;
- c) le déterminant de J est localement nul , les  $\delta x_i$  étant indépendants ;
- d) les  $\delta x_i$  ne sont pas indépendants .

Pour ces diverses situations, il n'existe pas de solutions, ou il en existe une infinité . Dans ce dernier cas, on utilise une inverse généralisée minimisant un critère donné, par exemple "quadratique" .

### I.3.6 modèle dynamique généralisé

-----

Lorsque la vitesse de déplacement des systèmes mécaniques articulés est élevée, les modèles géométrique et cinématique deviennent inadaptes puisqu'ils font l'hypothèse d'un équilibre statique pour toute configuration prise par le robot au cours de ses déplacements. Il devient alors nécessaire de faire appel à un modèle dynamique tenant compte de l'apparition des forces inertielles , centrifuges et de couplage d'une part , et en considérant une intégration possible des jeux , frottements et élasticités, d'autre part.

Une étude bibliographique montre que de nombreux modèles mathématiques de systèmes mécaniques articulés ont été établis /2/ - /34/ ; ces modèles utilisent l'un des formalismes suivants: Equations de Newton-Euler , équations de Lagrange , fonction de Gibbs , principe de travaux virtuels de d'Alembert...

*A titre d'exemple, considérons une chaîne formée de n corps*

articulés numérotés de 1 à n. Le corps numéro 0 étant fixe.

Selon Lagrange, la forme générale représentant le mouvement de cette chaîne s'écrit:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = Q_i + \Gamma_{\theta_i} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-5)$$

Le Lagrangien L est la différence entre l'énergie cinétique T et l'énergie potentielle U interne au système.

$Q_i$  désigne le couple dû à la pesanteur et influençant l'évolution de  $\theta_i$ .

$\Gamma_{\theta_i}$  appelée ième force généralisée et désignant le couple extérieur influençant l'évolution de  $\theta_i$  est directement liée aux couples produits par les moteurs.

L'équation (1-5) permet d'écrire les équations dynamiques du manipulateur :

$$\sum_{j=1}^n (A_{ij} \cdot \ddot{\theta}_j + C_{ij} \cdot \dot{\theta}_j^2 + \sum_{k=j+1}^n B_{ijk} \cdot \dot{\theta}_j \cdot \dot{\theta}_k) = Q_i + \Gamma_{\theta_i}; i = 1, 2, \dots, n \quad (1-6)$$

$A_{ij}$ ,  $B_{ijk}$ ,  $C_{ij}$ ,  $Q_i$  sont fonctions des variables généralisées.

La relation (1-6) ci-dessus correspond à n équations différentielles du second degré couplées et non linéaires. Ces n équations peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\Gamma_{\theta} = [A] \cdot \ddot{\underline{\theta}} + [B] \cdot \dot{\underline{\theta}} \cdot \dot{\underline{\theta}} + [C] \cdot \dot{\underline{\theta}}^2 - Q \quad (1-7)$$

$[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  sont 3 matrices de coefficients dynamiques respectifs  $A_{ij}$ ,  $B_{ijk}$ ,  $C_{ij}$ . Elles traduisent les effets des forces inertielles, des forces centrifuges et des forces de Coriolis dues aux mouvements des différents corps rigides constituant le manipulateur.

## I.4 ELABORATION DES SIGNAUX DE CONSIGNE DES ASSERVISSEMENTS

Elle dépend principalement du niveau de programmation des robots. Nous distinguerons tour à tour le cas des robots programmés par apprentissage et le cas des robots programmés en langages de haut niveau /1/ - /51/ .

### I.4.1 Cas des robots programmés par apprentissage

-----

Les signaux de consigne des asservissements sont obtenus directement lors de la phase d'apprentissage, par mesure et enregistrement des indications des capteurs de position situés au niveau de chaque articulation. L'élaboration des signaux de consigne, et leur restitution, ne présentant pas de difficultés majeures. La mise en oeuvre de la commande des actionneurs est dans ce cas assez simple. La loi de commande des actionneurs peut être continue (si les actionneurs sont analogiques), ou discrètes (si les actionneurs sont numériques ou bien si des convertisseurs numériques/analogiques sont utilisés).

### I.4.2 Cas des robots programmés en langage de haut niveau

-----

Un des principaux intérêts des langages de haut niveau est de pouvoir programmer des tâches relativement complexes (telles que l'assemblage de pièces mécaniques) et de contribuer efficacement à l'accroissement de la versatilité des robots. Les signaux de consigne des asservissements doivent alors être générés par le calculateur, en temps réel, à partir d'une trajectoire de l'organe terminal définie dans un repère fixe.

## I.5 COMMANDE DES ROBOTS MANIPULATEURS

Les principales techniques de commande des robots existantes font essentiellement appel aux modèles décrits précédemment. Nous pourrions d'ores et déjà distinguer 2 types de commande :

### I.5.1 Quelques commandes classiques

Nous présentons ci-dessous 3 méthodes permettant de générer les signaux de consigne des asservissements par ordinateur; ces méthodes s'appliquent aux cas suivants : "Commande en position", "Commande en vitesse" , et "Commande dynamique".

#### I.5.1.1 Commande en position

Soit  $\underline{X}(R_0)$  le vecteur représentant la position et l'orientation de l'organe terminal d'un manipulateur par rapport à  $R_0$ .

Soit  $\underline{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$  le vecteur des variables articulaires , "n" étant le nombre d'articulations de la structure de ce manipulateur.

La relation (1-1) peut être généralisée et écrite sous forme matricielle :

$$\underline{X}(R_0) = F(\underline{\theta}) \quad (1-8)$$

Les variables  $\theta_i$  sont repérées par rapport à une position d'initialisation ( $\underline{\theta}_0$ ).

La commande en position se résout par l'inversion de la fonction  $F$  , d'où :

$$\underline{\theta} = F^{-1} \cdot \underline{X}(R_0) \quad (1-9)$$

La matrice carrée  $F$  de dimension  $(n \times n)$  comporte généralement des coefficients non linéaires (fonctions trigonométriques). Elle représente le modèle géométrique non linéaire du robot .



Une étude complète de l'inversion du modèle géométrique non linéaire a été proposée par Roth /37/.

Illustrons cette commande en position sur un exemple simple. Soit un manipulateur à 2 mouvements de translation et un mouvement de rotation (Figure I.1). Nous avons alors :

$$\underline{\theta} = (T_1, \theta, T_2) \quad \& \quad \underline{x}_M(R_0) = (X_{M_0}, Y_{M_0}, Z_{M_0})^T$$

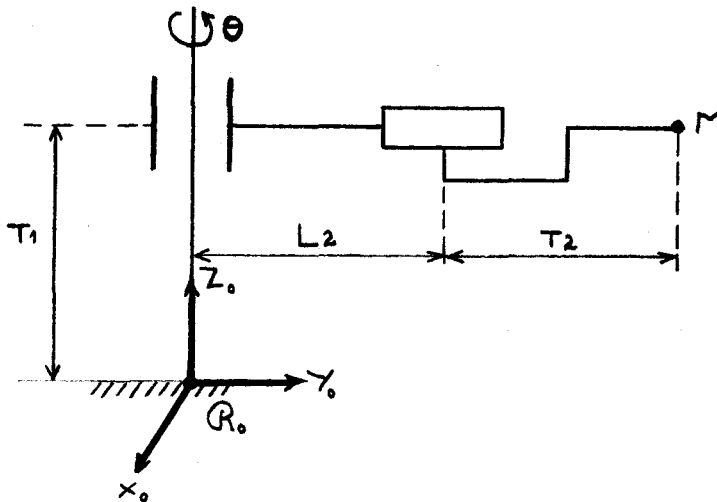


Figure I.1 : Manipulateur à 3 degrés de liberté.  
----- ( 2 translations & 1 rotation )

La géométrie du système nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} X_{M_0} = - (L_2 + T_2) \times \cos \theta \\ Y_{M_0} = (L_2 + T_2) \times \sin \theta \\ Z_{M_0} = T_1 \end{cases}$$

En supposant  $0 < \theta < \pi$ , il est très aisé d'inverser ce système, ce qui nous conduit au système suivant :

$$\begin{cases} T_1 = Z_{M_0} \\ T_2 = -L_2 + \frac{Y_{M_0}}{\sin \theta} \\ \theta = \text{Arc tg} \left( -\frac{Y_{M_0}}{X_{M_0}} \right) \end{cases}$$

Notons finalement que cette commande en position, si simple soit-elle, peut poser certains problèmes (Oscillations, imprécisions) aussitôt que la variation demandée sur  $\underline{\theta}$  devient trop importante. De toute façon, la vraie difficulté se manifeste surtout dans le problème de la résolubilité plutôt que dans d'autres /2/.

#### 1.5.1.2 Commande en vitesse

La commande en vitesse peut être assimilée à une commande en position dans laquelle chaque position est fonction du temps : A la variation de temps  $\Delta t$  sont associées les variations  $\underline{\Delta X}(R_0)$  et  $\underline{\Delta \theta}$  ; de plus, si les variations sont prises suffisamment petites (Période d'échantillonnage faible), la fonction  $F$  peut être linéarisée. Dans la pratique, les tâches confiées aux robots évoluent de façon continue dans le temps; l'équation (1-8) peut être transformée en une équation aux variations :

$$\underline{\Delta X}(R_0) = \left[ \frac{\partial F}{\partial \theta} \right] \cdot \underline{\Delta \theta} = [J] \cdot \underline{\Delta \theta}$$

où  $J$  désigne la matrice Jacobienne de  $\underline{F}$ .

Si  $n$  est le nombre de degrés de liberté du manipulateur et  $m$  le nombre de données indépendantes caractérisant la tâche, les dimensions de  $\underline{\Delta X}(R_0)$ ,  $[J]$  et  $\underline{\Delta \theta}$  sont respectivement  $(m \times 1)$ ,  $(m \times n)$  et  $(n \times 1)$ .

$$\text{Si } \underline{X}(R_0) = (f_1(\underline{\theta}), f_2(\underline{\theta}), \dots, f_m(\underline{\theta}))^T = \underline{F}(\underline{\theta})$$

$$\text{alors } [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_m} \end{bmatrix}$$

La commande en vitesse consiste à déterminer les accroissements  $\underline{\Delta\theta}$  connaissant  $\underline{\theta}(t)$ ,  $(X(t))_{R_0}$  et les accroissements désirés  $\underline{\Delta X}(R_0)$  pendant  $\Delta T$  après l'instant  $t$ .

Si  $n = m$  et si  $\text{Dét } J \neq 0$  alors le calcul de  $\underline{\Delta\theta}$  est possible à partir de l'équation :  $\underline{\Delta\theta} = [J]^{-1} \cdot \underline{\Delta X}(R_0)$  (Cf I.3.5)

Appliquons ce type de commande sur un manipulateur à 3 degrés de liberté: 2 de rotation et 1 de translation (Figure I.2)

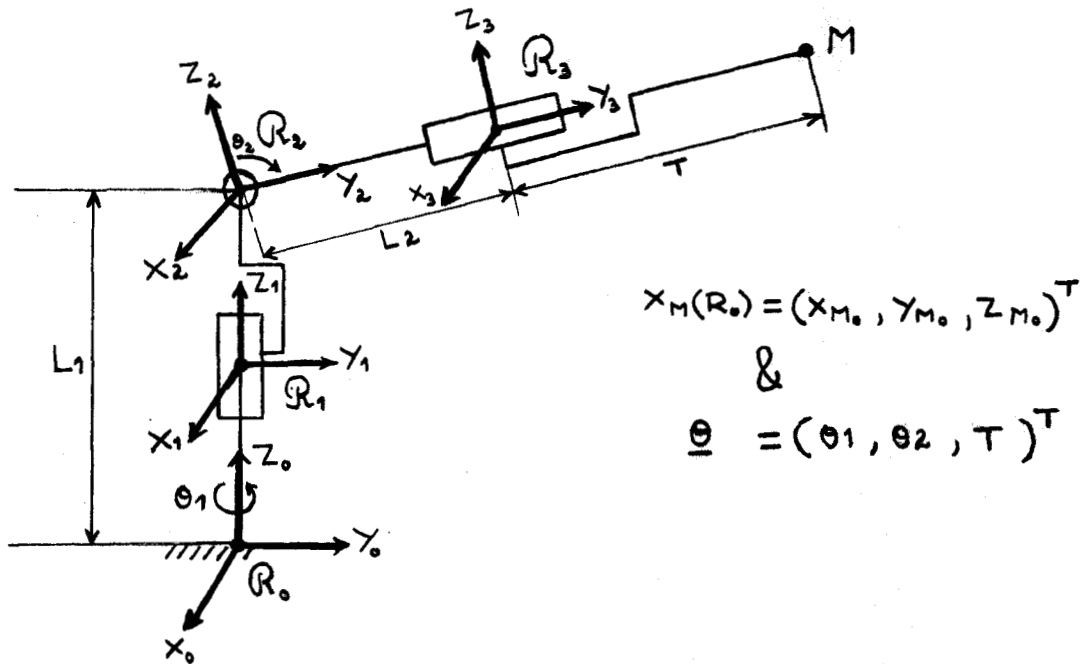


Figure I.2 : Manipulateur à 3 degrés de liberté.  
 -----  
 (2 rotations & 1 translation)

Utilisant la méthode exposée en II.3.2.2, on peut successivement poser :

$$M_0 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{pmatrix}; \quad M_2 = (I)$$

"I" est la matrice Identité.

$$* \quad \underline{X_M}(R_0) = \underline{OB}(R_0) + M_3 \cdot \underline{BM}(R_3)$$

d'où :

$$** \quad \underline{OB}(R_0) = \underline{OA}(R_0) + M_2 \cdot \underline{AB}(R_2)$$

$$\begin{cases} X_{M_0} = -\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) \\ Y_{M_0} = \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) \\ Z_{M_0} = L_1 + \sin\theta_2(L_2+T) \end{cases}$$

La différentiation de  $X_{M_0}$ ,  $Y_{M_0}$  et  $Z_{M_0}$  nous conduit au système suivant :

$$\begin{cases} \Delta X_{M_0} = -\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) \cdot \Delta\theta_1 + \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2(L_2+T) \cdot \Delta\theta_2 - \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \Delta T \\ \Delta Y_{M_0} = -\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) \cdot \Delta\theta_1 - \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2(L_2+T) \cdot \Delta\theta_2 + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \Delta T \\ \Delta Z_{M_0} = \cos\theta_2(L_2+T) \cdot \Delta\theta_2 + \sin\theta_2 \cdot \Delta T \end{cases}$$

La matrice Jacobienne s'écrit alors :

$$J = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) & \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2(L_2+T) & -\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ -\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2(L_2+T) & -\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2(L_2+T) & \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \\ 0 & \cos\theta_2(L_2+T) & \sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

L'inversion de cette matrice permet dès lors la détermination des accroissements des variables articulaires  $\Delta\theta_1$ ,  $\Delta\theta_2$  et  $\Delta T$  connaissant évidemment les accroissements souhaités :  $\Delta X_{M_0}$ ,  $\Delta Y_{M_0}$  et  $\Delta Z_{M_0}$ .

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = \frac{-\cos\theta_1 \cdot \Delta X_{M_0} - \sin\theta_1 \cdot \Delta Y_{M_0}}{\cos\theta_2(L_2+T)} \\ \Delta\theta_2 = \frac{\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \Delta X_{M_0} - \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot \Delta Y_{M_0} + \cos\theta_2 \cdot \Delta Z_{M_0}}{L_2+T} \\ \Delta T = -\sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \Delta X_{M_0} + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \Delta Y_{M_0} + \sin\theta_2 \cdot \Delta Z_{M_0} \end{cases}$$

L'équation générale de la commande en vitesse s'écrit alors :

$$\underline{\Delta\theta} = [J]^{-1} \cdot \underline{\Delta X} \quad (\text{Cf I.3.5})$$

Comme pour la commande en position, la commande en vitesse connaît elle aussi certains problèmes. Ceux-ci se produisent dès que la matrice  $J$  n'est pas inversible (c'est-à-dire quand elle n'est pas carrée et que son déterminant est nul).

Le lecteur intéressé pourrait consulter la référence /2/ ; des solutions à ce problème y sont proposées.

### 1.5.1.3 Commande dynamique

---

D'une manière générale, la conception et la réalisation d'une commande dynamique porte sur les points suivants :

- détermination de la loi de variation des variables articulaires ;
- choix d'un modèle mathématique du manipulateur ;
- élaboration des équations dynamiques ;
- calcul des couples des actionneurs et mise en oeuvre d'un dispositif de commande.

#### a) Détermination de la loi de variation des variables articulaires

---

La tâche étant définie par une trajectoire continue  $X(t)$  dans un repère fixe, la première opération consiste à échantillonner la trajectoire, on obtient alors  $X(t_i)$ ; la période d'échantillonnage  $t_i$  doit être compatible avec la linéarisation de  $X = F(\theta)$  et le temps de calcul nécessaire à la détermination des couples moteurs à chaque pas d'échantillonnage.

La deuxième opération consiste à déterminer la loi de variation des variables articulaires  $\theta(t_i)$  en utilisant un transformateur de coordonnées, et une méthode de coordination

de mouvement dans le cas où le manipulateur est redondant vis-à-vis de la tâche .

b) Choix d'un modèle mathématique du manipulateur

Le modèle mathématique décrit par la relation (1-6) ou (1-7) résume le problème de commande dynamique : Déterminer la loi d'évolution du couple de chaque actionneur en fonction du temps à partir de la loi d'évolution des variables articulaires.

c) Elaboration des équations dynamiques

La détermination des équations dynamiques n'est possible que si l'on dispose d'une description complète du manipulateur : Degrés de liberté (nombre , localisation et type), caractéristiques de chaque corps rigide (forme, dimensions, masse, position du centre de gravité, tenseur d'inertie). L'élaboration des équations dynamiques d'un système mécanique articulé nécessite de nombreux calculs et transformations mathématiques très longs à la main , et les risques d'erreurs sont nombreux . Des chercheurs ont alors mis au point des programmes qui délivrent automatiquement et sous forme littérale les coefficients dynamiques à partir d'une description convenable du système .

Citons-en trois parmi les plus intéressants /2/ :

\* T.O.A.D (TeleOperator Arm Design) .

\* E.D.Y.L.M.A (Equations DYnamiques Littérales d'un Manipulateur Articulé) .

\* O.S.S.A.M (Ohio State Symbolic Algebraic Manipulator) .

d) Calcul des couples actionneurs

Nous avons vu précédemment qu'à chaque période d'échantillonnage de la trajectoire, le calculateur déterminait les valeurs des coordonnées généralisées  $\theta_i$  ; la deuxième phase de la commande dynamique consiste à calculer à partir des équations dynamiques (1-6) les valeurs des forces généralisées  $\Gamma_{\theta_i}$  puis les couples actionneurs  $\Gamma_i$ . Toutefois, cette opération nécessite le calcul des coefficients  $A_{ij}$ ,  $B_{ijk}$ ,  $C_{ij}$  et le calcul des couples  $Q_i$  pour chaque période d'échantillonnage. Pour les grandes vitesses, cette période d'échantillonnage est trop grande et le fonctionnement devient instable.

Dans la pratique, les commandes dynamiques assurant un fonctionnement stable s'effectue sous l'une des conditions suivantes :

- simplification du modèle dynamique avec le risque de perte de validité du modèle (Les forces centrifuges et de coriolis sont souvent négligées) ;
- calcul des coefficients dynamiques hors ligne : nécessité d'une grande capacité mémoire ;
- découplage des équations (résolution des équations plus simples) ;
- amélioration du logiciel et du matériel.

La modélisation étant forcément imparfaite et les calculs par leur durée risquant d'engendrer des retards, des méthodes auto-correctives faisant appel à des modèles simplifiés ont été mises en oeuvre /2/ :

- Méthode de Kahr.
- Méthode de Paul.
- Méthode de Bejczy.
- Méthode de la configuration spatiale.
- Méthode de Khatib et Lemaitre.
- Méthode du découplage linéaire.
- Commande prédictive de Liégeois, Khalil et Fournier.

La commande dynamique des robots va devenir une nécessité lorsqu'ils vont s'intégrer sur les chaînes de fabrication à forte cadence. Si le problème progresse vers une bonne maîtrise sur le plan théorique, on se heurte encore aux problèmes temporels dont on peut espérer trouver la solution dans les progrès de l'informatique : Calculateurs parallèles, opérateurs spécialisés, fortes tailles mémoires, etc...

### I.5.2 Commande en boucle fermée

-----

#### I.5.2.1 Introduction

-----

Nous allons maintenant présenter quelques exemples de commande ayant un caractère adaptatif vis-à-vis du contexte local et qui constituent de ce fait un type de commande en boucle fermée à l'égard de la tâche à effectuer. Cette approche suppose en particulier que les informations issues des capteurs extéroceptifs puissent être exploitées d'une manière pertinente par rapport à la tâche. L'insertion d'informations proximétriques dans la commande peut jouer un rôle important pour la prise en compte réelle et permanente du contexte local.



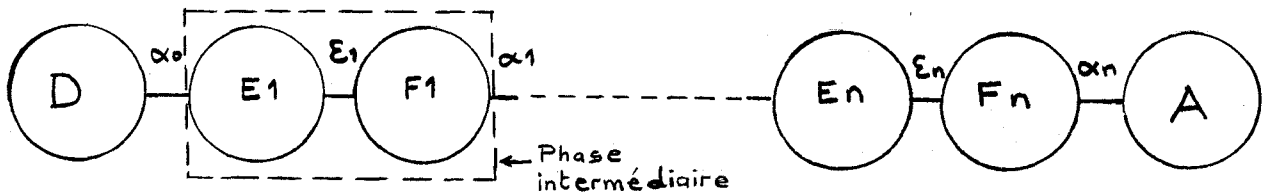
### I.5.2.2 Saisie d'une cible fixe

---

L'opération consiste à amener l'organe terminal du robot d'une position de départ D à une position d'arrivée A.

La configuration des capteurs utilisés pour cette tâche fait que les déplacements de l'effecteur s'effectuent correctement. D'autre part, la cible est supposée préhensible et est située dans un contexte local dépourvu d'obstacles /15 - /31/ .

Dans certains cas, des phases intermédiaires de la position  $E_i$  à la position  $F_i$  sont à considérer. Ainsi, le mouvement de l'effecteur est schématisé de la manière suivante :



$E_1, E_2, \dots, E_n$  étant les informations instantanées des capteurs (Ces informations sont insuffisantes pour accomplir totalement la tâche à effectuer d'où une stratégie appropriée à concevoir).

$\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ : L'évolution peut être asservie continûment sur les signaux capteurs. Le système est en boucle fermée sur la cible .

Cette opération de saisie nécessite préalablement une phase d'initialisation permettant à l'organe terminal du robot, en l'occurrence une pince bi ou tri-digitale, de se positionner correctement par rapport à la cible. Ceci est réalisé grâce à des indicateurs d'écart obtenus à partir des informations capteurs .

Jusqu'ici, la saisie d'objets fixes est facile à réaliser. Des difficultés apparaissent dès que les hypothèses citées plus haut ne sont plus remplies, notamment lorsque le contexte local du robot est pourvu d'obstacles. Pour résoudre ce problème, ESPIAU propose un algorithme qui permet au préhenseur de réallier simultanément la saisie et la navigation dans un espace tridimensionnel et en présence d'obstacles /6/. Cet algorithme prend en compte instantanément les actions élémentaires associées aux capteurs. Le choix de ces actions ainsi que les contraintes imposées sur les mouvements ressort d'un niveau supérieur de commande qui élabore ces stratégies d'évolution.

Le problème de saisie d'objets fixes par un robot a été également traité au L.A.CO.S du HAVRE. L'étude envisagée était fondée sur l'acquisition visuelle en vue de commander le robot (Multisoft) en boucle fermée. Il s'agit de reconnaître et de saisir des pièces de formes différentes situées dans une certaine zone et de les déplacer dans une autre zone dans un ordre et un endroit définis. L'algorithme proposé permet de donner une certaine flexibilité à ce genre de problème et d'obtenir également des performances satisfaisantes /36/.

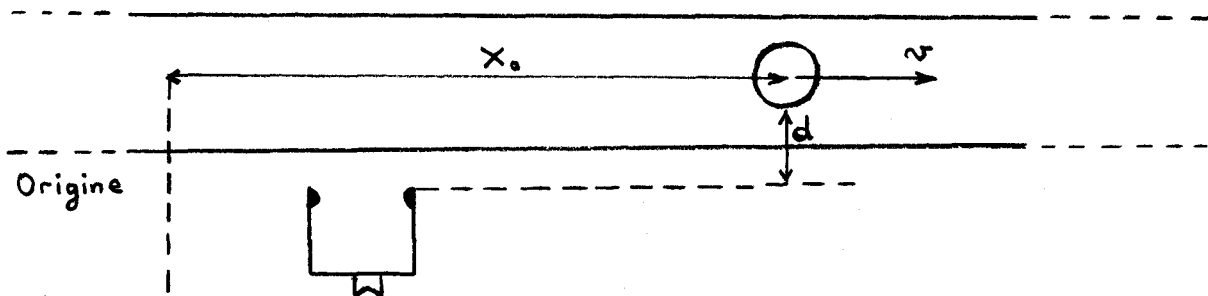
### 1.5.2.3 Saisie d'objets en mouvement

---

Nous nous intéresserons à une manipulation souvent rencontrée dans l'industrie ; il s'agit de la saisie d'un objet circulant sur un convoyeur à vitesse éventuellement inconnue mais à peu près constante /6/ - /33/. Il existe des solutions

plus ou moins précises à ce problème parmi lesquelles nous citerons par exemple celle qui consiste à associer au robot un système de vision (Caméra) permettant d'effectuer la reconnaissance et la localisation des pièces. Certaines applications asservissent même le déplacement de la caméra à celui de l'objet. Bien que l'information fournie par la caméra soit en fait une mesure de position, l'imprécision de ce type de capteur et ses non linéarités ne permettent pas une mesure assez fiable pour effectuer des tâches de précision ; ce rôle serait réservé à des capteurs de proximité, spécialisés et plus précis.

Une autre solution basée uniquement sur des informations proximétriques peut résoudre notre problème. L'approche est effectuée dans un plan et l'objet est supposé préhensible. Le système de saisie est schématisé de la façon suivante :



Dans cette approche, deux étapes sont nécessaires. D'abord celle de l'initialisation qui est déclenchée dès la détection de l'objet et puis celle de la poursuite. ESPIAU propose diverses fonctions de sécurité et d'amélioration des performances : Test d'arrêt, de poursuite prédictive, etc... /6/ .

#### I.5.2.4 Suivi de joint dans l'espace par un robot de soudage /38/

Un joint dans l'espace est défini par une suite de points et orientations, c'est-à-dire une suite de repères.

Le soudage automatique avec un robot est conçu pour résoudre le problème de la localisation du joint et du positionnement de la torche sur celui-ci. Ce problème peut être posé autrement : en fonction des informations sur la localisation d'un point J du joint, fournies par un capteur, il faut déterminer le déplacement de la torche pour que celle-ci se situe sur ce même point, avec un temps de retard dû au décalage entre le capteur et la torche .

Les modes de commande dépendent de différents types de liaison entre le détecteur de joint et le robot et aussi de différentes répartitions des degrés de liberté entre le robot et le capteur. Ces commandes sont fonctions de trois informations délivrées par le capteur (ce dernier pouvant être mécanique, à Laser ou à courant de Foucault) : écart en distance, hauteur et orientation. Les informations fournies sont en général bruitées, c'est pourquoi un filtrage de signaux capteurs s'avère alors nécessaire. Il en est de même pour la position du capteur qui, elle aussi, est noyée dans du bruit.

Notons enfin que certains modes de commande ont été expérimentés sur un bras de télémanipulation du C.E.A / SACLAY, de type MA 23 M doté d'un capteur à courant de Foucault.

### I.5.2.5 Manipulation d'objets en contact /32/ - /47/

Les opérations mécaniques telles que l'assemblage , l'ébavurage ou même la manoeuvre d'une manivelle constituent un domaine qui a pris une part prépondérante en robotique. Pour réaliser des tâches de ce type, le robot doit travailler dans une configuration où son effecteur subit des contraintes d'efforts. Il est alors fondamental de maîtriser les efforts dus à la mise en contact du robot avec les objets à manipuler afin de contrôler les petits déplacements de l'organe terminal et de pouvoir réaliser des opération d'insertion .

Pour cela, le robot doit être muni d'un capteur d'effort ou de pression pouvant lui acquérir une information précise sur les forces et les moments générés lors du contact. C'est pourquoi une commande par retour d'effort s'impose comme étant le meilleur choix. Ceci constitue également un exemple typique de commande en boucle fermée puisque, par le seul sens du toucher, le robot doit être capable de se mouvoir dans un contexte partiellement connu et effectuer des tâches nécessitant la mise en contact de pièces mécaniques entre elles /32/ ou encore suivre un contour /47/ .

## I.6 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons décrit quelques modèles susceptibles d'être utilisés dans la commande des robots manipulateurs, et de faire la lumière sur les méthodes de commande existantes. Après avoir rappelé succinctement quelques types de commandes classiques, nous avons mis le point sur celles qualifiées de boucle fermée tout en les concrétisant par des applications industrielles existantes. Le principe de base se traduit par l'exploitation des informations provenant du contexte local selon une approche de l'automatique conduisant à la construction des boucles fermées. La particularité de ces commandes en boucle fermée réside dans le fait que les boucles sont fermées sur des informations extéroceptives, approche peu utilisée dans la littérature jusqu'à présent.

CHAPITRE II  
\*\*\*\*\*

UTILISATION ET CINEMATIQUE DU MANIPULATEUR MINI-MOVER 5

---

## II.1 DESCRIPTION ET CARACTERISTIQUE DU MANIPULATEUR MINI-MOVER

### II.1.1 La partie mécanique

#### II.1.1.1 Les degrés de liberté

La partie mobile comporte quatre éléments rigides articulés entre-eux /11/ - /12/ . (Figure II.1).

a) Une boîte représentant le corps et possédant un seul degré de liberté de rotation appelé rotation base. Ce mouvement varie de  $\pm 90^\circ$  et est noté  $\alpha_1$ . Il s'agit d'un angle formé par l'axe du corps du robot et l'axe longitudinal de la base du robot .

b) Le bras, lui aussi, possède un seul degré de liberté de rotation appelé rotation épaule . Cette rotation varie de  $-35^\circ$  à  $+144^\circ$ ; elle est notée  $\alpha_2$ .  $\alpha_2$  étant l'angle formé par l'axe du bras manipulateur et l'axe horizontal passant par l'épaule.

c) L'avant-bras possède également un seul degré de liberté de rotation, appelé rotation coude. Son mouvement varie de  $-149^\circ$  à  $0^\circ$ , il est noté  $\alpha_3$ . Cet angle est formé par l'axe de l'avant-bras du manipulateur et l'axe horizontal passant par le coude .

d) La pince, quant à elle, est dotée de deux degrés de liberté de rotation appelés rotations poignet (Figure II.2.a) .

- \* Une rotation poignet Pitch (P) variant de  $\pm 90^\circ$  et formée par l'axe longitudinal de l'avant-bras et l'axe longitudinal de la pince (Figure II.2.b).

- \* Une rotation poignet Roll (R) variant de  $\pm 180^\circ$  et formée par l'axe transversal de l'avant-bras et l'axe transversal de la pince (Figure II.2.c).



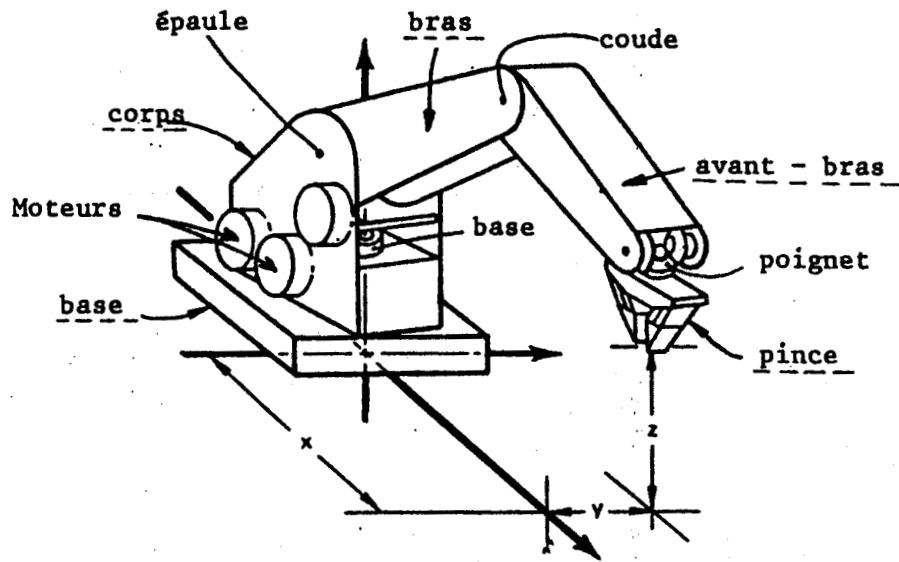


Figure II.1 : Vue globale du robot MINI-MOVER 5 utilisé .

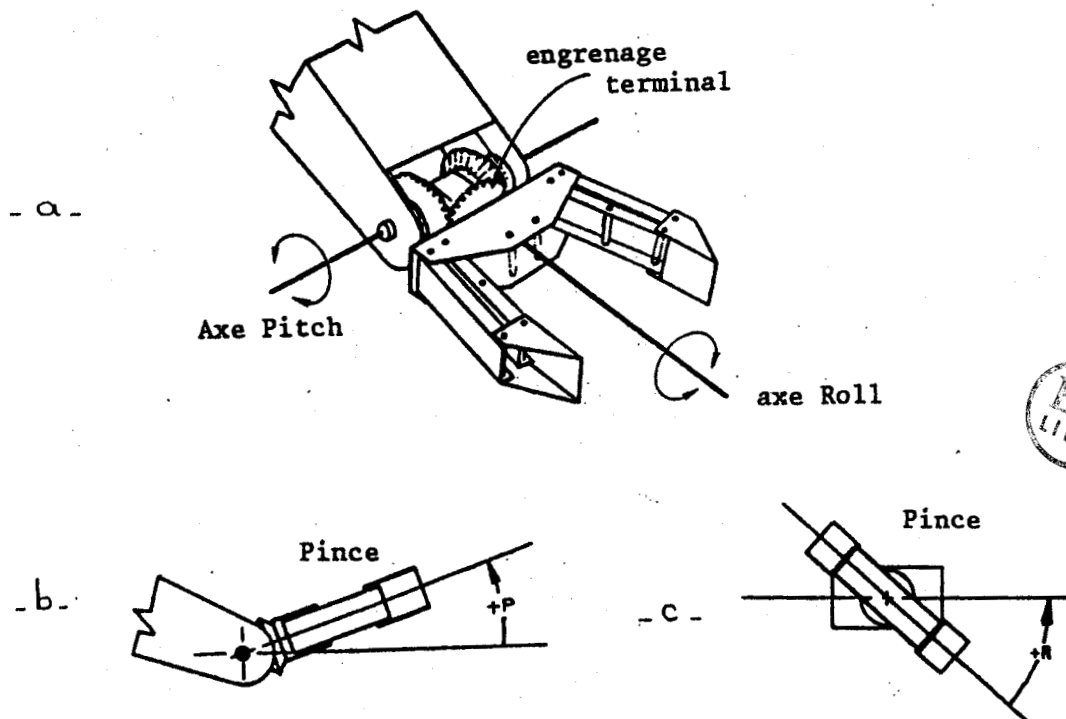


Figure II.2 : Rotations poignet du MINI-MOVER 5 .

- b- Rotation Pitch (P)O .
- c- Rotation Roll (R)O .

Le Mini-Mover 5 possède donc 5 degrés de liberté de rotation dont deux correspondant au positionnement et à l'orientation de l'organe terminal, c'est-à-dire la pince. De plus, un degré de liberté auxiliaire permet d'assurer la saisie d'un objet entre les deux doigts de la pince. L'état de celle-ci est spécifié par le paramètre "O" appelé ouverture pince.

La pince étant pourvue d'un dispositif de mesure de l'effort de pression entre ses deux doigts (Figure II.3), le paramètre "O" sera précédé d'un signe + ou - selon que l'effort de pression est nul ou non.

- Si cet effort de pression est nul, "O" doit être exprimé positivement. Sa valeur correspond alors à l'ouverture de la pince (en mm).
- Si par contre, l'effort n'est pas nul, "O" doit être exprimé négativement. Sa valeur correspond dans ce cas là à une force de serrage (en N).

Signalons par ailleurs que l'ouverture maximale de la pince est de 75 mm et que la force maximale de serrage est 13 N.

Enfin, notons que l'extrémité de la pince peut être positionnée dans un espace ne représentant qu'une partie d'une sphère de rayon 444 mm environ (Figure II.4). Cette partie de l'espace accessible définit le volume maximum que le manipulateur peut balayer en passant par l'ensemble de ses configurations géométriques.

Nous signalons qu'un tableau récapitulatif se trouve dans l'annexe III.

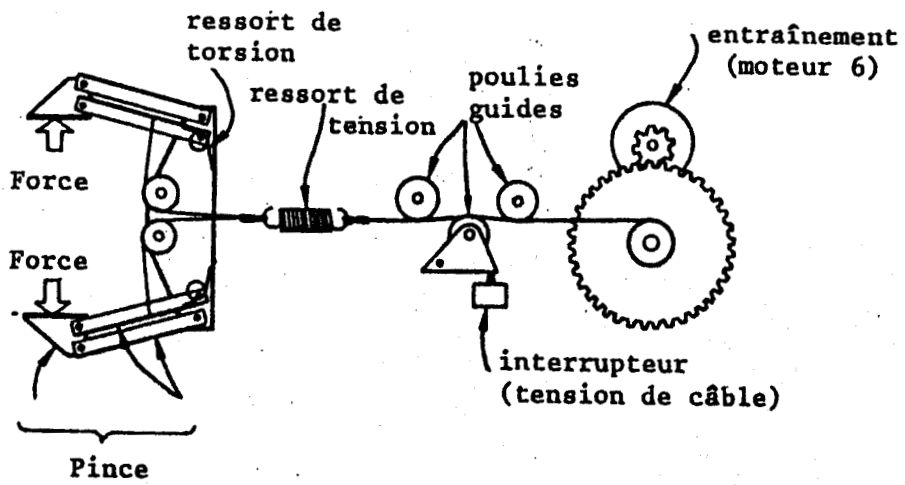
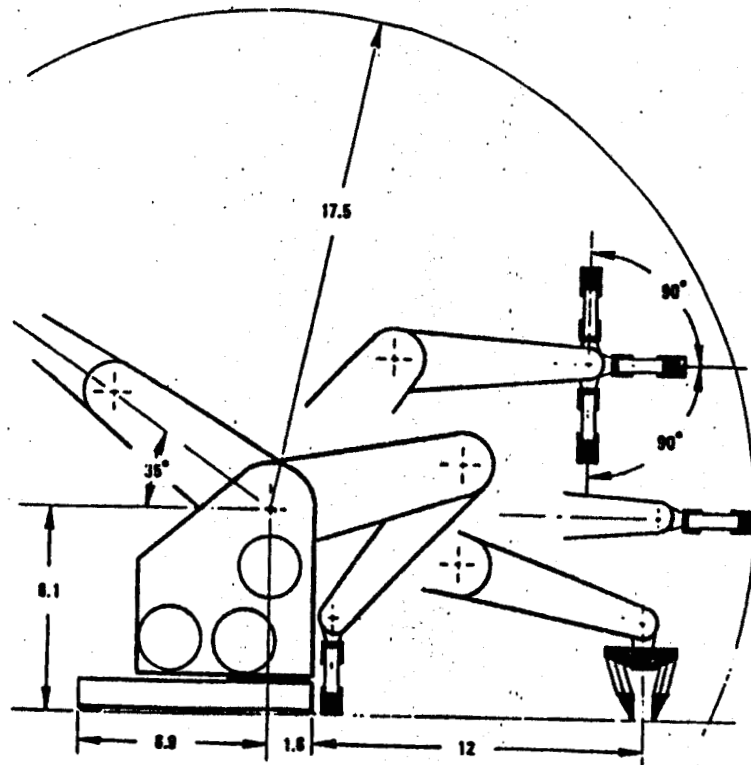


Figure II.3 : Dispositif actionneur de la pince .



NOTE: Dimensions in inches. (1 inch = 25,4 mm)

Figure II.4 : Espace d'atteignabilité du MINI-MOVER 5 .

### II.1.1.2 Transmission et réduction

---

La transmission des mouvements des moteurs aux diverses articulations se produit par l'intermédiaire des réducteurs à engrenage et des câbles métalliques passant par des poulies. Ce procédé présente l'avantage d'obtenir un minimum de frottements et de jeu mécanique et par conséquent d'être relativement précis ( Figure II.5 ) .

### II.1.2 Les moteurs et leurs alimentations

---

En raison de la légèreté et de la solidité de la transmission, les articulations sont actionnées par 6 moteurs placés sur le corps du manipulateur ; ce sont des moteurs électriques pas-à-pas fonctionnant en boucle ouverte et comportant 48 pas par tour. Chacun de ces moteurs possède 4 enroulements alimentés en commutation par des transistors disposés sur une carte interface. Ainsi, à chaque configuration de l'ensemble des 4 signaux alimentant les enroulements, correspond une position angulaire du rotor . La séquence générée se traduit par l'alimentation d'un, puis de deux enroulements, alternativement /1/. Grâce à cette procédure d'alimentation, le nombre de pas par tour est doublé d'où alors une meilleure précision du positionnement de la pince .

## II.2 SYSTEME DE COMMANDE DU MANIPULATEUR MINI-MOVER 5

### II.2.1 Interface électronique

---

Le Mini-Mover 5 est muni d'une carte interface développée de manière à permettre à l'opérateur de commander le

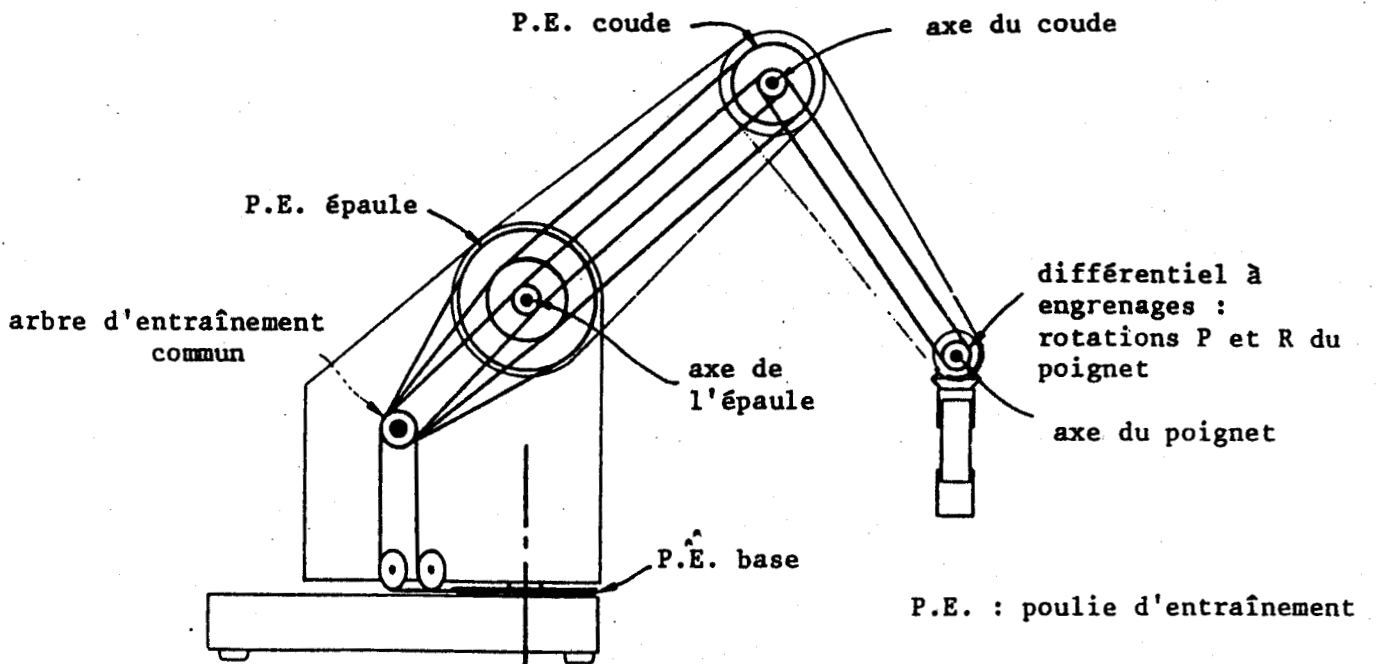


Figure II.5 : Transmission des mouvements :  
 ----- Engrenages , poulies , cables .

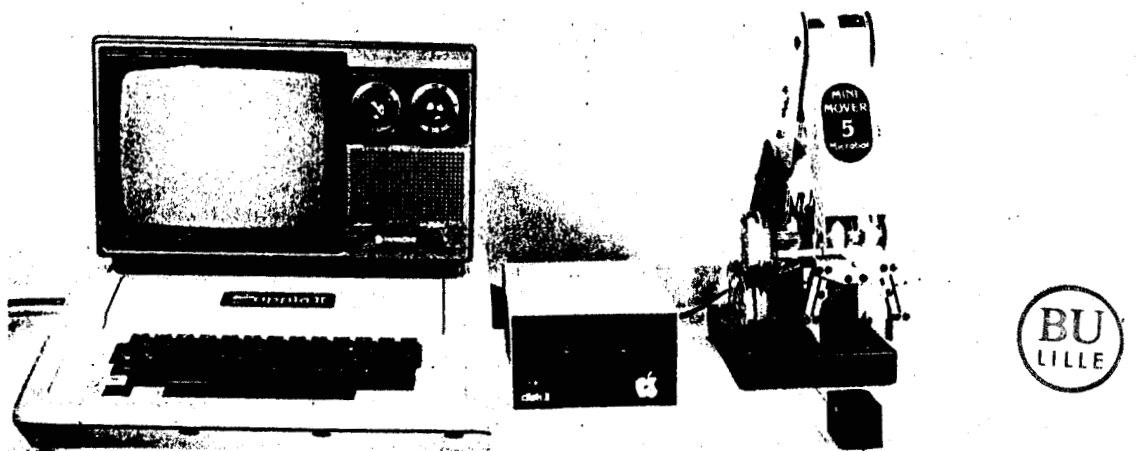


Figure II.6 : Commande du MINI-MOVER 5 à partir d'un APPLE II .  
 -----

manipulateur à partir d'un ordinateur du type APPLE II (Figure II.6) ou TRS 80 ou encore à partir d'un port 8 bits parallèles.

La liaison entre les enroulements des moteurs pas-à-pas et les signaux de contrôle issus du système de commande est obtenue grâce à cette carte, laquelle est organisée en 7 circuits de verrouillage : 4 bits parallèles de sortie et une seule entrée de 4 bits, comme le montre la figure II.7.

Les informations circulant sur le bus des adresses servent à aiguiller les 4 bits de données sur l'un des sept circuits de sortie à verrouillage ou les 4 bits d'entrée sur le buffer correspondant.

Ainsi, le dispositif de commande peut envoyer (à destination des circuits alimentant les enroulements des moteurs pas-à-pas) une succession de 4 bits parallèles sur le ou les moteur(s) désiré(s). Entre deux émissions, les enroulements des moteurs continuent à être alimentés (Circuit de sortie à verrouillage).

Le signal issu de l'interrupteur détectant un effort de pression sur les doigts de la pince est connecté à l'un des 4 bits du port auxiliaire d'entrée. L'utilisateur ne dispose donc que de 3 bits pour prendre en compte certaines informations extérieures (apparition d'obstacle, présence d'objet, ...).

Le port auxiliaire de sortie est entièrement libre, il peut être utilisé pour commander d'autres dispositifs.

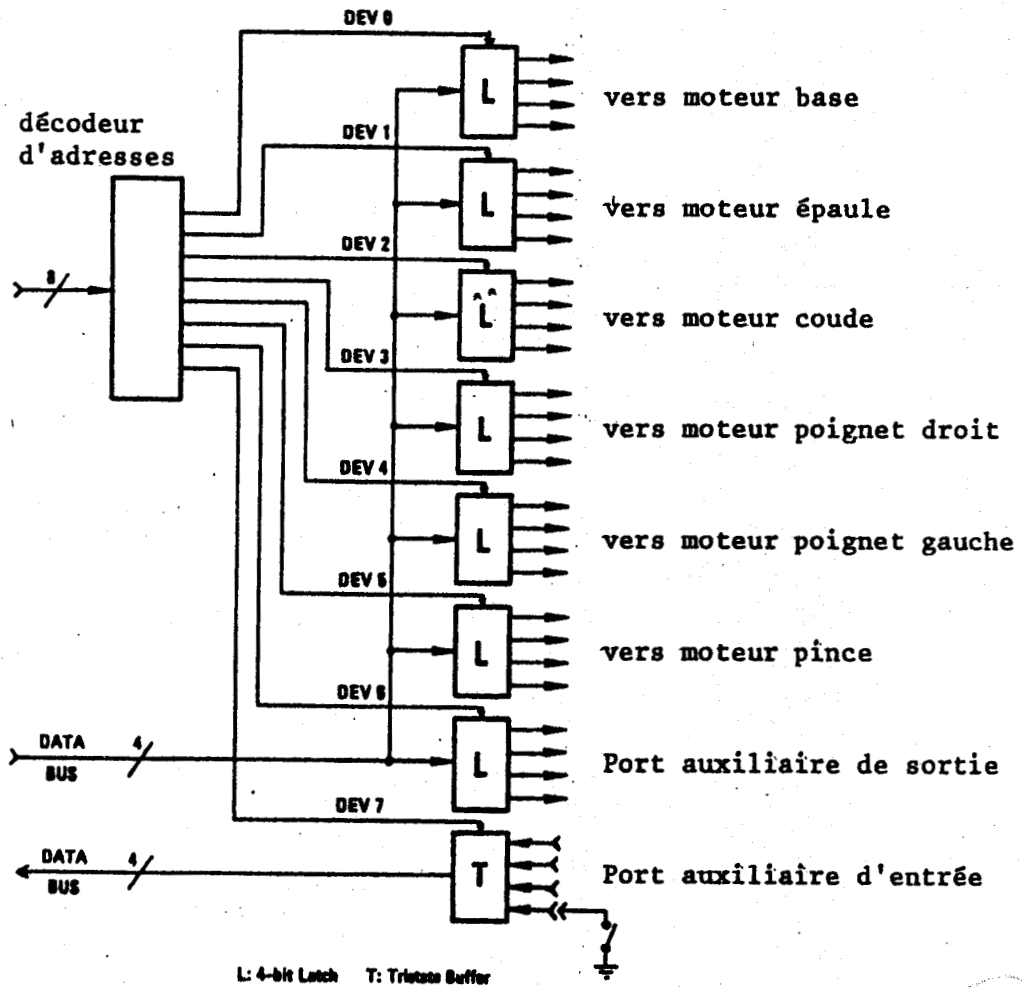


Figure II.7 : Organisation de l'interface Calculateur/Robot .

### II.2.2 Commande

-----

Pour pouvoir commander le Mini-Mover 5, il faut d'abord enficher une carte (Microbot, Inc. Part No .AAB-II) dans un des connecteurs du calculateur. Cette carte contient un langage de haut niveau appelé "ARMBASIC" .

Une fois le calculateur, en l'occurrence l'APPLE II, est mis sous tension et initialisé (Appui sur la touche RESET ), l'opérateur doit activer l'ARMBASIC. Pour cela, il suffit de taper au clavier : PR # n (Return)  
"n" étant le numéro du connecteur choisi.

Sur l'écran du moniteur apparaît alors les indications suivantes :

```
ARMBASIC    V2 . x
COPYRIGHT   1981
MICROBOT    INC
```

L'ARMBASIC permet de commander le Mini-Mover 5 grâce aux 6 commandes suivantes :

- @ STEP → Mouvement du manipulateur.
- @ CLOSE → Fermeture de la pince.
- @ SET → Commande manuelle.
- @ RESET → Mise à zéro des registres de commande des moteurs.
- @ READ → Lecture des registres de commande des moteurs.
- @ ARM → Commande alternative des deux manipulateurs .

Exceptée la commande a READ, les cinq autres commandes peuvent directement être exécutées en les entrant sur le



clavier. En revanche, toutes les six commandes peuvent être exécutées dans un programme écrit soit en BASIC entier, soit en BASIC étendu (APPLE II ou APPLE IIe).

Ces différents points sont détaillés dans l'annexe III.

## II.3 CINEMATIQUE DU MANIPULATEUR MINI-MOVER 5

### II.3.1 Position du problème

-----

Le problème de la cinématique des manipulateurs est largement traité dans la littérature /1/ - /2/ - /3/ - /4/ - /39/ - /40/.

On considère les 3 vecteurs suivants :

- \* X(Ro) représentant un point de la trajectoire dans l'espace de la tâche. Les composantes de ce vecteur sont en général au nombre de 6: 3 pour le positionnement et 3 pour l'orientation .
- \* θ représentant les variables articulaires .
- \* M représentant les variables moteurs .

Le problème consiste à déterminer M à partir de la connaissance de X(Ro), or le passage de X(Ro) à M se fait par l'intermédiaire de θ :

$$\underline{X(Ro)} \longrightarrow \underline{\theta} \longrightarrow \underline{M}$$

Toute articulation possédant en général son actionneur, les variables moteurs  $M_i$  sont alors proportionnelles aux variables articulaires  $\theta_i$ . Le passage de θ à M ne pose par conséquent

pas de problème notable. Le véritable problème se présente par contre dans le passage de  $X(R_0)$  à  $\underline{\theta}$  : Il faudrait être en mesure de connaître, en chaque point de la trajectoire de l'extrémité de la pince, le vecteur représentant les variables articulaires. Pour cela, une transformation de coordonnées est nécessaire .

### II.3.2 Transformation de coordonnées : Méthode générale

---

Un manipulateur est un système mécanique articulé formant une chaîne de corps rigides  $C_0, C_1, \dots, C_n$  reliés entre-eux par des articulations. A chacun de ces corps est associé un repère cartésien  $R_0(x_0, y_0, z_0)$  ;  $R_1(x_1, y_1, z_1)$  ; ..... ;  $R_n(x_n, y_n, z_n)$  .

La figure II.8 montre le modèle géométrique du manipulateur Mini-Mover 5 et fait apparaître les repères  $R_i$  liés aux corps  $C_i$ .

La position relative d'un corps  $C_i$  par rapport au corps  $C_{i-1}$  se trouvant en amont définit la coordonnée généralisée  $\theta_i$  liée à l'articulation  $i$  (Figure II.9).

Connaissant les deux paramètres  $\theta_i$  et  $l_i$  correspondant respectivement à la position et la longueur de chaque corps, il est possible de définir la position et l'orientation de l'extrémité de la pince dans l'espace de la tâche .

Cette opération est appelée transformation de coordonnées directe :

$$\underline{X}(R_0) = f(\underline{\theta}, \underline{L}) \quad (2-1)$$

"f" étant une fonction non linéaire (présence de fonctions trigonométriques ).

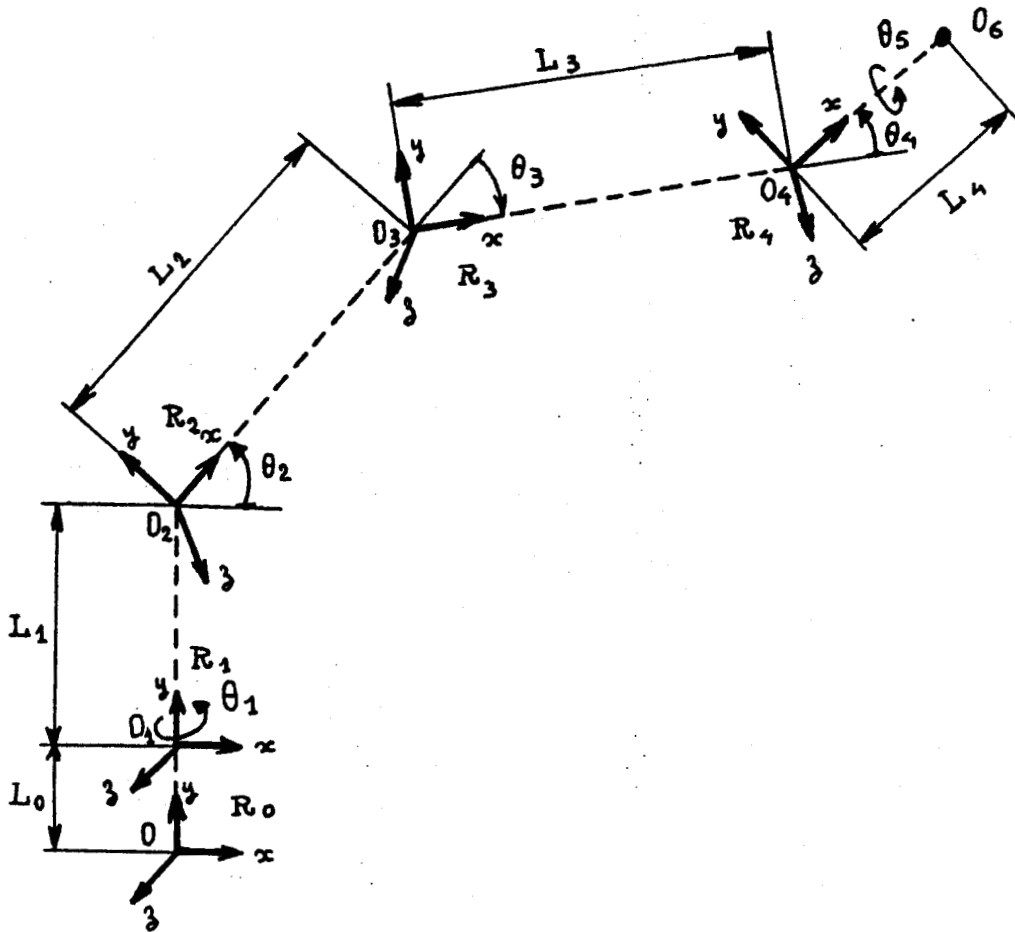


Figure II.8 : Modèle géométrique du robot MINI-MOVER 5 .  
 -----  
 (Coordonnées généralisées)

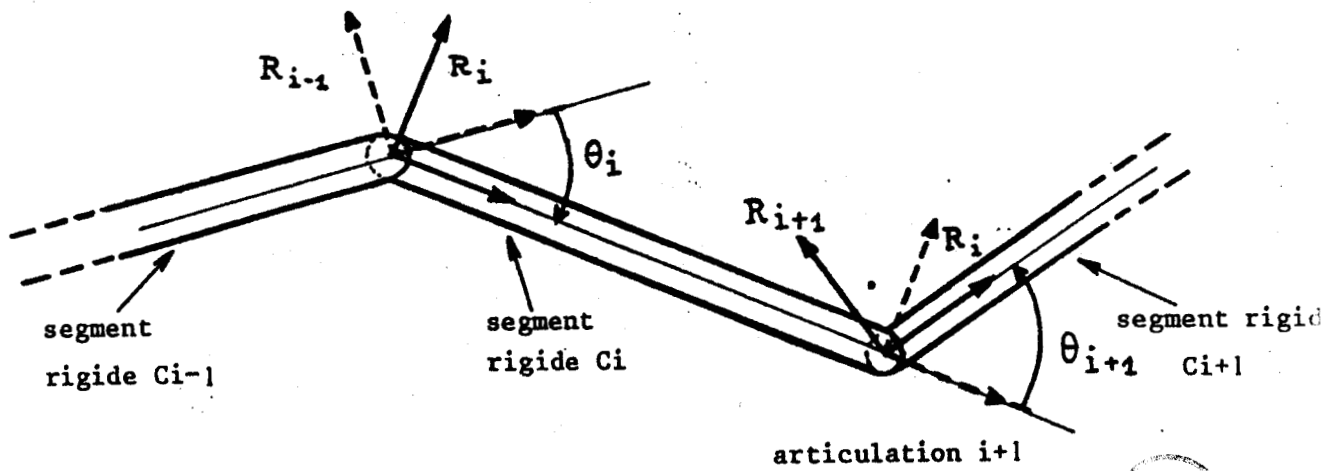


Figure II.9 : Définition des coordonnées généralisées .  
 -----



Le problème de la commande du manipulateur se trouve ainsi résolu puisqu'à partir de la connaissance de la fonction  $f$ , il est possible d'en déterminer sa fonction inverse :

$$\underline{\theta} = f^{-1}( \underline{X}(R_0) , \underline{L} ) \quad (2-2)$$

Cette opération est appelée transformation de coordonnées inverse.

### II.3.2.1 Les variables généralisées /12/

---

Généralement, pour modéliser un système mécanique articulé, on définit une coordonnée généralisée par degré de liberté. Chaque degré de liberté du manipulateur Mini-Mover 5 sera appelé  $\theta_i$  avec  $i=1,2,3,4,5$ .

Le vecteur représentant ces variables s'écrit :

$$\underline{\theta} = ( \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5 )^T$$

La figure II.8 montre comment sont définies ces coordonnées généralisées.

### II.3.2.2 Les divers repères orthogonaux et les matrices de rotation

---

A partir du repère fixe  $R_0$  lié à la base du manipulateur, les autres repères liés aux différentes rotations sont les suivants /1/ - /2/ - /12/ :

Repère R1 : Il est obtenu à partir du repère R0 par rotation autour de OY d'un angle  $\theta_1$ .

Repère R2 : Il est obtenu par rotation du repère R1 autour de OZ d'un angle  $\theta_2$ .

Repère R3 : Il est obtenu par rotation du repère R2 autour de OZ d'un angle  $\theta_3$ .

Repère R4 : Il est obtenu par rotation du repère R3 autour de OZ d'un angle  $\theta_4$ .

Repère R5 : Il est obtenu par rotation du repère R4 autour de OX d'un angle  $\theta_5$ .

Soit  $V_i$  un vecteur exprimé dans le repère  $R_i$ . Ce vecteur peut s'exprimer dans le repère  $R_{i-1}$  en utilisant la matrice de transformation  $M_{i-1}^i$  tel que :  $V_{i-1} = [M_{i-1}^i] \cdot V_i$

Les matrices de transformation sont les suivantes :

$$M_0^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_1 & 0 & C_1 \end{bmatrix} ; \quad M_1^2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad M_2^3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_3^4 = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad M_4^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_5 & -S_5 \\ 0 & S_5 & C_5 \end{bmatrix}$$

avec :  $C_i = \cos(\theta_i)$  ;  $S_i = \sin(\theta_i)$  ;  $(i+j) = \theta_i + \theta_j$   
et  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

A partir de ces matrices, on peut déduire la matrice de transformation  $M_j^i$  ( $i$  et  $j$  prenant des valeurs comprises entre 0 et 5) par des multiplications successives des matrices de transformation entre  $R_i$  et  $R_j$ .

Par exemple, la matrice  $M_5$  liée au passage du repère  $R_5$  (Organe terminal) au repère fixe  $R_0$  (Base) peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} M_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_5 \end{bmatrix}$$

Ainsi sont obtenues les matrices suivantes :

$$M_0 = \begin{bmatrix} C1C2 & -C1S2 & S1 \\ S2 & C2 & 0 \\ -C2S1 & S1S2 & C1 \end{bmatrix} ; \quad M_3 = \begin{bmatrix} C1C(2+3) & -C1S(2+3) & S1 \\ S(2+3) & C(2+3) & 0 \\ -S1C(2+3) & S1S(2+3) & C1 \end{bmatrix}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} C1C(2+3+4) & -C1S(2+3+4) & 0 \\ S(2+3+4) & C(2+3+4) & 0 \\ -S1C(2+3+4) & S1S(2+3+4) & C1 \end{bmatrix}$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} C1C(2+3+4) & -C1C5S(2+3+4)+S1S5 & C1S5S(2+3+4)+S1C5 \\ S(2+3+4) & C5C(2+3+4) & -S5C(2+3+4) \\ -S1C(2+3+4) & S1C5S(2+3+4)+C1S5 & -S1S5S(2+3+4)+C1C5 \end{bmatrix}$$

### II.3.2.3 Transformation de coordonnées directe /12/

---

La position de l'extrémité de l'organe terminal du Mini-Mover 5 dans l'espace de la tâche est définie par les 3 coordonnées du vecteur  $\underline{OO_6}$  pris par rapport au repère  $R_0$ .

$$\begin{bmatrix} XO_6 \\ YO_6 \\ ZO_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_0 \\ 0 \end{bmatrix} + M_0 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix} + M_2 \cdot \begin{bmatrix} L_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + M_4 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + M_5 \cdot \begin{bmatrix} L_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

D'où alors :

- $XO_6 = C1 \cdot [L_2.C2 + L_3.C(2+3) + L_4.C(2+3+4)]$
- $YO_6 = L_0 + L_1 + L_2.S2 + L_3.S(2+3) + L_4.S(2+3+4)$
- $ZO_6 = -S1 \cdot [L_2.C2 + L_3.C(2+3) + L_4.C(2+3+4)]$

Quant à l'orientation de l'extrémité de la pince, elle est définie par :

\* Ep (Elévation de la pince).

\* Rp (Rotation de la pince ).

Ep et Rp sont liés à la rotation du poignet suivant respectivement les axes Pitch et Roll .

Ces deux paramètres prennent les valeurs suivantes :

$$E_p = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad \& \quad R_p = \theta_1 - \theta_5 \quad (\text{Voir Annexe I})$$

La transformation de coordonnées directe se traduira par conséquent de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 = c_1 \cdot [L_2 \cdot C_2 + L_3 \cdot C(2+3) + L_4 \cdot C(2+3+4)] \\ Y_0 = L_0 + L_1 + L_2 \cdot S_2 + L_3 \cdot S(2+3) + L_4 \cdot S(2+3+4) \\ Z_0 = -s_1 \cdot [L_2 \cdot C_2 + L_3 \cdot C(2+3) + L_4 \cdot C(2+3+4)] \\ E_p = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\ R_p = \theta_1 - \theta_5 \end{array} \right.$$

### II.3.2.4 Transformation de coordonnées inverse /12/

---

La fonction inverse est obtenue en résolvant les 5 équations à 5 inconnus déterminées précédemment à la suite de la transformation de coordonnées directe (Voir Annexe I) .

On obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = - \text{Arc tg } \frac{Z_0}{X_0} \\ \theta_2 = \text{Arc tg } \frac{Y'}{X'} + \text{Arc tg } \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{X'^2 + Y'^2} - 1} \\ \theta_3 = - 2 \cdot \text{Arc tg } \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{X'^2 + Y'^2} - 1} \\ \theta_4 = E_p - \theta_2 - \theta_3 \\ \theta_5 = \theta_1 - R_p \end{array} \right.$$

Avec :  $X' = \frac{X_0}{C_1} - L_4 \cdot \cos(E_p)$  &  $Y' = Y_0 - L_0 - L_1 - L_4 \cdot \sin(E_p)$

Remarque: En raison de la conception mécanique du Mini-Mover 5 ,  
 -----  
 la coordonnée généralisée  $\theta_3$  ne peut être que négative.

### II.3.3 Transformation de coordonnées simplifiée /12/

---

Compte-tenu des particularités du manipulateur ( Couplages mécaniques), les variables articulaires sont choisies de manière à ce que chaque articulation soit repérée par rapport à un axe horizontal (Voir Figure II.10) .

Nous appellerons  $\alpha_i$  ces variables articulaires.



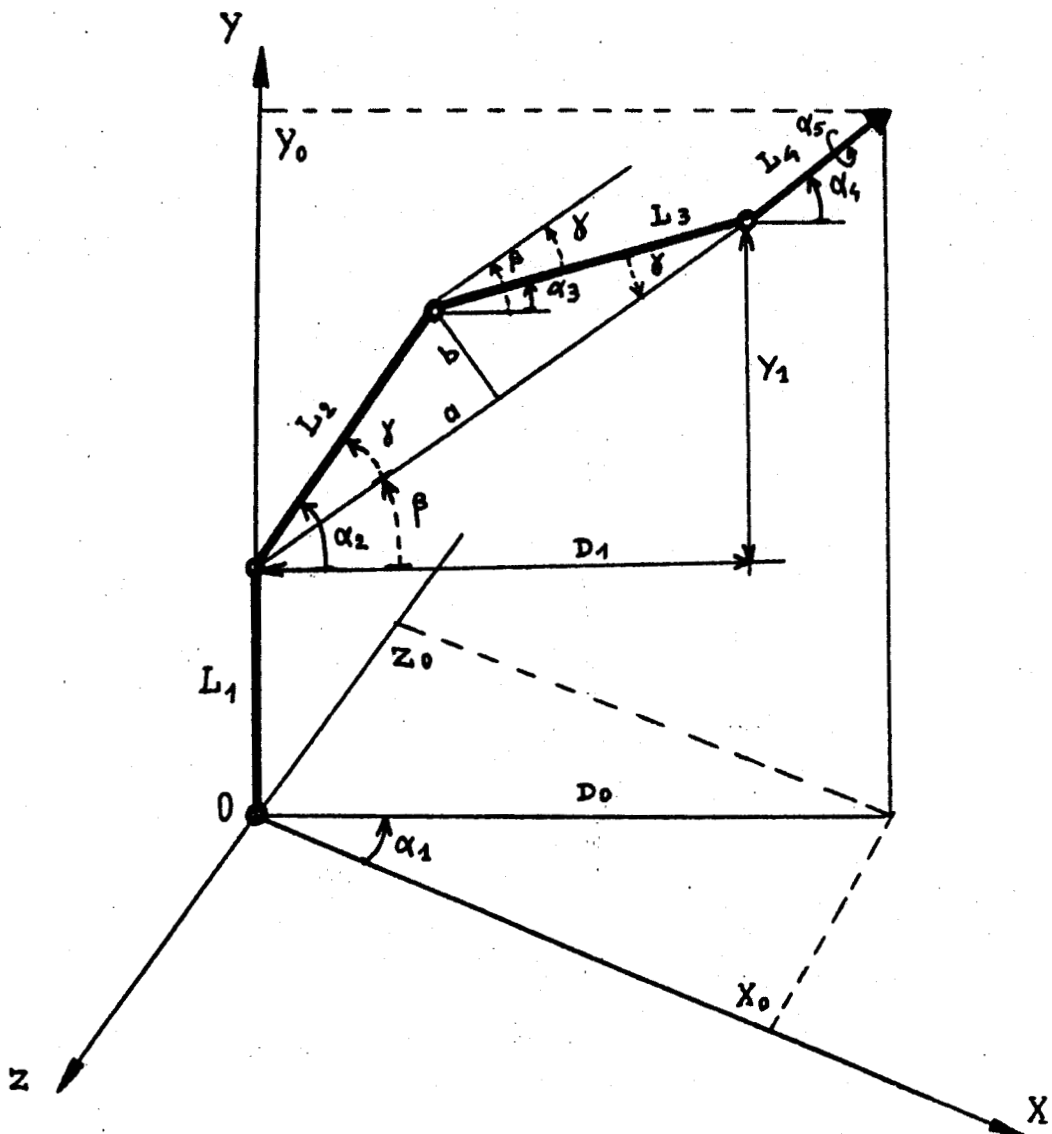


Figure II.10 : Définition des variables articulaires  $\alpha_i$  .  
 -----  
 (Coordonnées simplifiées)



### II.3.3.1 Transformation de coordonnées directe

---

Il s'agit de déterminer le vecteur  $\underline{X(Ro)}$  en fonction de  $\underline{\alpha}$  et  $\underline{L}$ . La figure II.10 permet de déterminer directement les coordonnées du vecteur  $\underline{X(Ro)}$  lequel est associé à la transformation de coordonnées directe :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_o = \cos \alpha_1 \cdot [L_2 \cdot \cos \alpha_2 + L_3 \cdot \cos \alpha_3 + L_4 \cdot \cos \alpha_4] \\ Y_o = L_1 + L_2 \cdot \sin \alpha_2 + L_3 \cdot \sin \alpha_3 + L_4 \cdot \sin \alpha_4 \\ Z_o = -\sin \alpha_1 \cdot [L_2 \cdot \cos \alpha_2 + L_3 \cdot \cos \alpha_3 + L_4 \cdot \cos \alpha_4] \\ E_p = \alpha_4 \\ R_p = \alpha_1 - \alpha_5 \end{array} \right.$$

Remarque:  $R_p$  est la rotation de la pince par rapport au plan  $OY_oZ_o$  lorsque  $\alpha_4 = -90^\circ$ .

### II.3.3.2 Transformation de coordonnées inverse

---

La figure II.10 nous permet également de déterminer géométriquement  $\underline{\alpha}$  En fonction de  $\underline{X(Ro)}$  et  $\underline{L}$ . Il en ressort :

$$\alpha_1 = -\text{Arc tg} \frac{Z_o}{X_o} \quad ; \quad \alpha_4 = E_p \quad ; \quad \alpha_5 = \alpha_1 - R_p$$

Par ailleurs, nous avons :  $\alpha_2 = \beta + \delta$  et  $\alpha_3 = \beta - \delta$

Or

$$* \beta = \text{Arc tg} \frac{Y_1}{D_1} \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} Y_1 = Y_o - L_1 - L_4 \cdot \sin(E_p) \\ \& \\ D_1 = \sqrt{X_o^2 + Z_o^2} - L_4 \cdot \cos(E_p) \end{array} \right.$$

et

$$* \delta = \text{Arc tg} \frac{b}{a} \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} b = \sqrt{L_2^2 - a^2} \\ \& \\ a^2 = \frac{D_1^2 + Y_1^2}{4} \end{array} \right.$$

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{L_2^2}{a^2} - 1} \quad \text{et} \quad \delta = \text{ARC tg} \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{D_1^2 + Y_1^2} - 1}$$

D'où alors :

$$\alpha_2 = \text{Arc tg} \frac{Y_1}{D_1} + \text{Arc tg} \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{D_1^2 + Y_1^2} - 1}$$

&

$$\alpha_3 = \text{ARC tg} \frac{Y_1}{D_1} - \text{Arc tg} \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{D_1^2 + Y_1^2} - 1}$$

### II.3.3.3 Conclusion

Nous pouvons aisément vérifier la concordance des résultats de la transformation de coordonnées (Directe & Inverse) obtenue par la méthode générale et la méthode simplifiée .

Les relations liant les variables articulaires sont :

Méthode simplifiée :	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
Méthode générale :	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_2 + \theta_3$	$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4$	$\theta_5$

L'utilisation de la méthode générale (Emploi de coordonnées généralisée) conduirait à des difficultés lors de la mise en oeuvre de la commande, en raison de la présence des couplages mécaniques.

C'est pourquoi, compte-tenu des particularités du manipulateur, il est préférable d'employer la méthode de coordonnées simplifiée. Dans ce cas, les variables moteurs  $M_i$  s'expriment par :

$$M_i = K_i \cdot \alpha_i \quad ; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

- \*  $M_i$  = Nombre de pas effectués par le moteur  $i$  .
- \*  $k_i$  = Constante caractéristique du mouvement  $i$  .
- \*  $\alpha_i$  = Variation d'amplitude du mouvement  $i$  .

Les constantes  $k_i$  sont déterminées par l'ensemble du dispositif actionneur (entraînement & transmission) :

- \*  $\alpha_1$  (Base)  $\longrightarrow$   $k_1 = 19.64$  pas/degré.
- \*  $\alpha_2$  (Epaule)  $\longrightarrow$   $k_2 = 19.64$  pas/degré.
- \*  $\alpha_3$  (Coude)  $\longrightarrow$   $k_3 = 11.55$  pas/degré.
- \* P & R (Poignet)  $\longrightarrow$   $k_4 = k_5 = 4.27$  pas/degré.

Les moteurs 4 et 5 (moteur poignet gauche et moteur poignet droit) s'associent pour réaliser les rotations P et R de l'effecteur telles que :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{P_5}{k_5} - \frac{P_4}{k_4} \right] \quad \& \quad R = - \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{P_5}{k_5} + \frac{P_4}{k_4} \right]$$

\* "0" : Ouverture Pince

- Effort de pression nul  $\longrightarrow$   $k_6 = 12.2$  pas/N .
- Effort de pression non nul  $\longrightarrow$   $k_7 = 5.8$  pas/N .

CHAPITRE III  
\*\*\*\*\*

PRISE EN COMPTE DU CONTEXTE LOCAL DANS  
-----  
LA COMMANDE DES ROBOTS MANIPULATEURS  
-----

### III.1 PRINCIPES GENERAUX

Notre étude serait incomplète si nous ne consacrons pas une partie de cette thèse à l'analyse du terme "Contexte" et la présentation des moyens techniques permettant de le percevoir et par suite de le reconnaître.

En effet, l'évolution d'un robot manipulateur dans un milieu partiellement ou totalement inconnu passe nécessairement par la connaissance préalable de celui-ci. Ceci est possible grâce à un ou plusieurs capteurs adéquats convenablement placés dans le robot. Ce dernier est ainsi en mesure de se passer de l'intervention humaine pour tendre alors vers une autonomie plus marquée /6/ - /7/.

#### III.1.1 Notion du contexte local

---

Dans le système de perception extéroceptive d'un robot, les mesures sensorielles ne concernent que le contexte "local" du robot. Sachant qu'à chaque instant, une tâche permet de définir deux types d'objets :

- les obstacles : tout objet (ou partie) s'opposant ou perturbant l'exécution de la tâche ;
- les cibles : tout objet (ou partie) sur lequel porte l'action instantanée requise par la tâche.

Le contexte "global", lui, est constitué par l'ensemble des obstacles et des cibles à un instant donné, et le contexte local n'est qu'une portion de celui-ci, situé dans l'espace se trouvant au voisinage des parties mobiles du robot manipulateur.

Généralement, ce contexte local n'est pas perçu dans son intégralité. En particulier, la portion observée se réduit souvent à un certain voisinage du préhenseur seul, celui-ci peut alors être considéré comme autonome d'un point de vue de la perception de ses interactions avec les objets .

### III.1.2 Perception du contexte local

---

La perception est l'un des aspects les plus importants de la robotique actuelle . Elle se réalise grâce à des capteurs appropriés examinant généralement une portion de l'espace de travail relative à l'objet et fixée a priori.

Dans un contexte global, les modes de perception se caractérisent par :

- un volume d'informations à traiter relativement important;
- l'absence d'informations relatives Objet/Robot;
- un espace indépendant d'éventuelles modifications de l'univers.

Par contre, dans un contexte local, l'utilisation d'informations obtenues nécessaires pour des méthodes de commande spécifiques permet de :

- réduire le volume des traitements numériques permettant d'accomplir les tâches qui sont purement locales ;
- diminuer la précision exigée en boucle ouverte si les informations locales sont situées en bout de chaînes ;
- autoriser l'adaptation du robot aux variations inattendues de l'environnement , non perceptibles dans le contexte global .

Généralement, un proximètre est un capteur de choix car il est capable de fournir des informations relatives aux objets se trouvant dans le contexte local. Un capteur de proximité appartient à l'une des classes suivantes :

- a/ proximètre informant sur l'objet (situé dans la portion du contexte local observé) ;
  - \* s'agit-il d'un obstacle ou d'un objet ?
  - \* quelles sont ses caractéristiques ?  
(état de surface , couleur , géométrie .....).
- b/ proximètre informant sur la relation objet/robot ;
  - \* nature du mouvement relatif s'il existe ;
  - \* distance ou géométrie apparente ;
  - \* réaction spécifique du capteur vis-à-vis de l'objet .

### III.1.3 Domaine d'applications des dispositifs de perception du contexte local

D'après ce qui a été dit précédemment, il est évident que l'analyse du contexte local d'un robot manipulateur devient nécessaire lorsque l'environnement global est impossible à percevoir dans sa totalité à l'aide des capteurs globaux ; cet environnement global étant variable de façon peu (ou pas) connue à l'avance ou même fixe (ou répétitif), mais inconnu a priori . Des telles conditions sont assez souvent rencontrées dans le monde de la robotique .

Le domaine d'application des systèmes proximétriques est classifié selon que le milieu de travail est hostile ou non . Un milieu est qualifié d'hostile lorsque l'homme ne peut y accéder sans être muni de moyens particuliers de protection .



### III.1.3.1 Milieux hostiles

---

Il s'agit principalement des milieux des types suivants :

- Nucléaire .
- Sous-marin .
- Spatial .

Les applications dans ces milieux sont caractérisées par :

a/ Le travail en vision plus ou moins altéré, exigeant des retours judicieux d'informations, ce qui implique la nécessité de les multiplier et les varier afin de compenser l'insuffisance de la perception visuelle .

Dans cette perspective , les systèmes proximétriques s'avèrent intéressants et peuvent alors constituer un bon complément à la vision .

b/ La complexité des tâches à effectuer, comportant en particulier des manipulations d'outils variés. Cette complexité sous-entend une complexité du contexte local à analyser , c'est-à-dire comportant par exemple plusieurs objets et plusieurs obstacles . Dans ce cas, ce contexte local doit être examiné en permanence .

c/ Les contraintes d'adaptation du matériel à l'hostilité du milieu. Celles-ci présentent un effet limitatif sur l'examen du contexte local et imposent par conséquent des restrictions considérables vis-à-vis des technologies existantes .

### III.1.3.2 Milieux non hostiles

---

Les applications correspondantes sont soit de type industriel, soit de type médical :

#### a/ Applications industrielles .....

Ces applications peuvent s'effectuer dans des contextes connus. Elles concernent essentiellement l'assemblage à poste fixe si l'arrivée et la présentation des constituants ne sont pas parfaitement prévisibles. Elles concernent également le tri et le transport automatique dans un environnement couvert d'obstacles. L'intervention humaine est absente dans ces différents systèmes.

Les applications industrielles s'appliquent également dans des contextes répétitifs, ceux-ci représentant les premières applications en robotique : chaînes de montage, soudage, peinture etc... Ces contextes deviennent partiellement inconnus lorsque les activités de manipulation s'étendent à des configurations complexes, auquel cas la description totale de l'environnement devient impossible; ou encore lorsque l'on désire réduire la précision requise en boucle ouverte, ce qui implique en particulier l'usage des robots dits "flexibles".

#### b/ Applications médicales .....

Elles concernent particulièrement les téléthèses, prothèses ou orthèses destinées à aider les handicapés. Dans ce type d'applications, le contexte est connu. En plus, l'intervention humaine est présente dans la boucle de commande : les informa-

tions extraites du contexte sont généralement visuelles ou auditives. L'environnement global est celui de la vie courante, donc relativement encombré. La perception de l'espace de travail peut alors être particulièrement altérée .

### III.2 UTILISATION DE DISPOSITIFS SENSORIELS POUR

#### LA RECONNAISSANCE DU CONTEXTE LOCAL

##### III.2.1 Position du problème

-----

L'équipement sensoriel des robots représente lui aussi un des principaux aspects de la robotique. En effet, le relevé d'informations sur le contexte est une des qualités dont doit être impérativement doté un robot si celui-ci est amené à remplacer l'homme dans certains postes de travail /24/ - /50/.

A partir des différents capteurs constituant son équipement sensoriel, le robot peut acquérir des informations extéroceptives lui permettant ainsi de connaître l'état du contexte dans lequel il se trouve , et par conséquent de s'y adapter : détection d'obstacles , identification d'objets , contrôle de position , mesure des contraintes , etc...

##### III.2.2 Outils techniques d'analyse du contexte local

-----

Nous ne citerons que les capteurs qui se prêtent les mieux dans l'examen du contexte local. Ce sont les capteurs de proximité que nous avons également nommés proximètres et qui appartiennent à la classe des capteurs extéroceptifs . Généralement, ce sont des capteurs actifs, c'est-à-dire qu'ils émettent eux-mêmes les signaux qui doivent interagir avec le contexte et recouvrent les informations qui doivent être traitées.

Avant de présenter certains capteurs couramment utilisés en robotique, nous donnerons un bref aperçu des qualités qu'il est souhaitable de prendre en compte afin de les évaluer :

- un encombrement réduit ( pour faciliter leur intégration dans les mécanismes de préhension) ;
- une portée suffisante (pour couvrir tout le contexte local);
- un bon rapport signal/bruit (afin d'alléger les algorithmes de traitement) ;
- une insensibilité aux parasites ambiants (afin de limiter les fausses alarmes).

#### III.2.2.1 Capteurs à Ultra-Sons

Ces capteurs équipent certains robots mobiles, parfois en plusieurs exemplaires, et ce, en raison de leur simplicité et leur compacité /18/-/25/. Ils peuvent être soit de type céramique Piézo-électrique, soit de type électrostatique Polaroid. Leur principe consiste à exciter leurs cellules à l'aide des impulsions de fréquence égale à celle qui est propre à la pastille. Le récepteur convertit l'écho ultra-sonore en un signal électrique à l'aide, soit d'une deuxième céramique, évitant ainsi des interférences entre l'émission et la réception, soit de la même céramique.

Les mesures de distance ou de vitesse fournies par ces capteurs sont relativement correctes, compte-tenu bien sûr de la largeur des champs d'émission/réception et malgré une certaine sensibilité à l'orientation de l'objet. La distance est généralement évaluée par mesure du temps séparant l'émission de la réception après réflexion, et la vitesse par effet Doppler.

Les capteurs à ultra-sons peuvent mesurer des distances allant jusqu'à plusieurs mètres avec une précision de  $\pm 5$  mm .

Plusieurs réalisations de ces capteurs , spécifiques de la robotique , proviennent en FRANCE du L.A.A.S de Toulouse. Notons par ailleurs que la présence d'un milieu propagateur est ici indispensable , ce qui exclut naturellement les applications spatiales. En effet, dans le cas d'un bateau, on a besoin de connaître la profondeur d'eau qu'il a sous sa quille.

De plus , c'est le milieu liquide qui atténue le moins le signal ultrasonore , d'où l'utilisation des ultra-sons dans ces procédures d'assemblages sous-marines /20/ - /42/.

Soulignons enfin que les capteurs ultrasonores sont également utilisés dans d'autres domaines autre que celui de la robotique /19/ .

a/ Cellules à ultra-sons de type céramique piézo-électrique  
.....

Ce type de capteurs fait partie du système multisenseur équipant le robot mobile H.I.L.A.R.E (Heuristiques Intégrées au Logiciel et aux Automatismes dans un Robot Evolutif) du L.A.A.S de Toulouse /26/ - /27/ - /28/. Celui-ci est en fait muni de plusieurs torches émettrices/réceptrices constituées chacune de deux céramiques piézo-électriques, l'une émet, l'autre reçoit l'onde . La cellule émettrice est excitée par deux impulsions à 40 KHz. La portée maximale d'une torche, dans ces conditions, est de 1.70 m .

Le diagramme de détection d'une torche est présentée sur la figure III.1 .

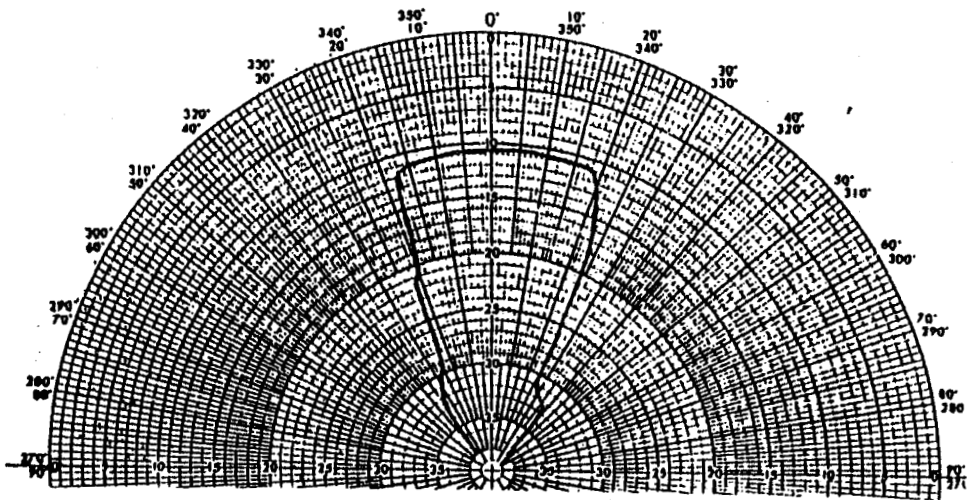


Figure III.1 : Lobe d'émission d'une torche à Ultra-Sons de  
----- type piézo-électrique .

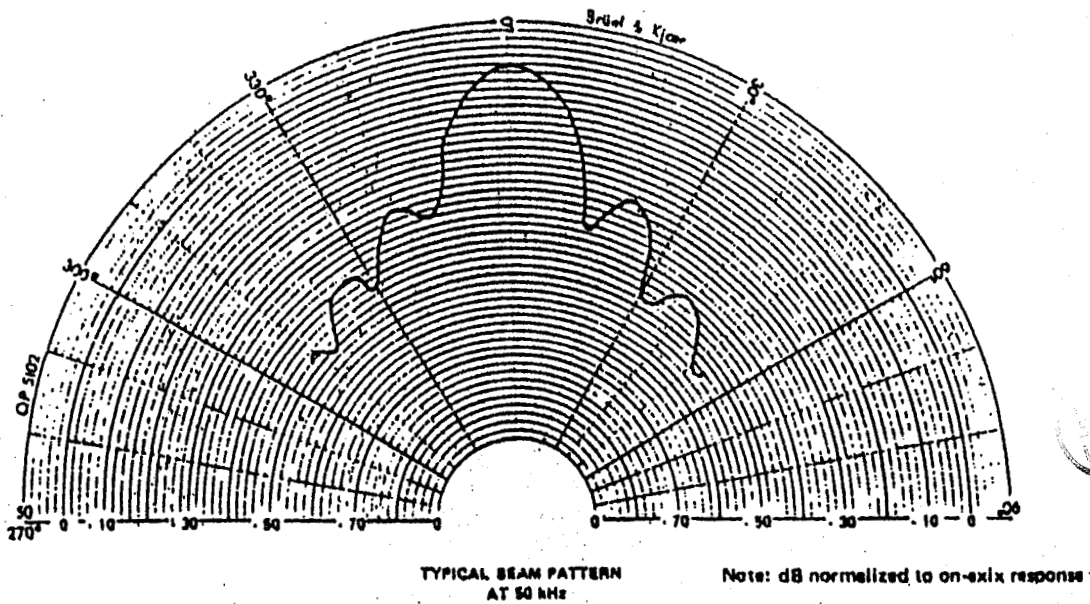


Figure III.2 : Diagramme de rayonnement d'une pastille à Ultra-  
----- Sons de type électrostatique Polaroid .

b/ Cellules à ultra-Sons de type électrostatique polaroid  
 .....

Le Kit d'évaluation Polaroid se caractérise par une seule pastille servant à la fois d'émetteur et de récepteur /41/ . L'excitation d'émission dure un peu plus de 1 ms et se compose de 56 périodes d'un signal dont la fréquence varie entre 50 et 60 KHz. Le choix de plusieurs fréquences sert à réduire la probabilité d'une absence de réflexion due à la configuration de l'objet et du capteur.

Le diamètre de la pastille (4cm) détermine la directivité du faisceau. Le diagramme de rayonnement à la fréquence de 50KHz montre pour une atténuation de 3dB ,un maximum d'ouverture égal à +/- 5° environ ( Voir Figure III.2).

Il n'en reste pas moins vrai que sa forte directivité associée à sa longueur d'onde le rende possible au problème de retour d'écho erroné suivant l'angle d'incidence du front de l'onde sur l'obstacle .

c/ Cellules à ultra-sons de type EFR-RSB 36  
 .....

Ces capsules ont un lobe principal d'émission de 30° et la réception de l'onde réfléchié par un plan n'est possible que si la normale à ce plan et l'axe du capteur fait au plus 15° . ( Voir Figure III.3) .

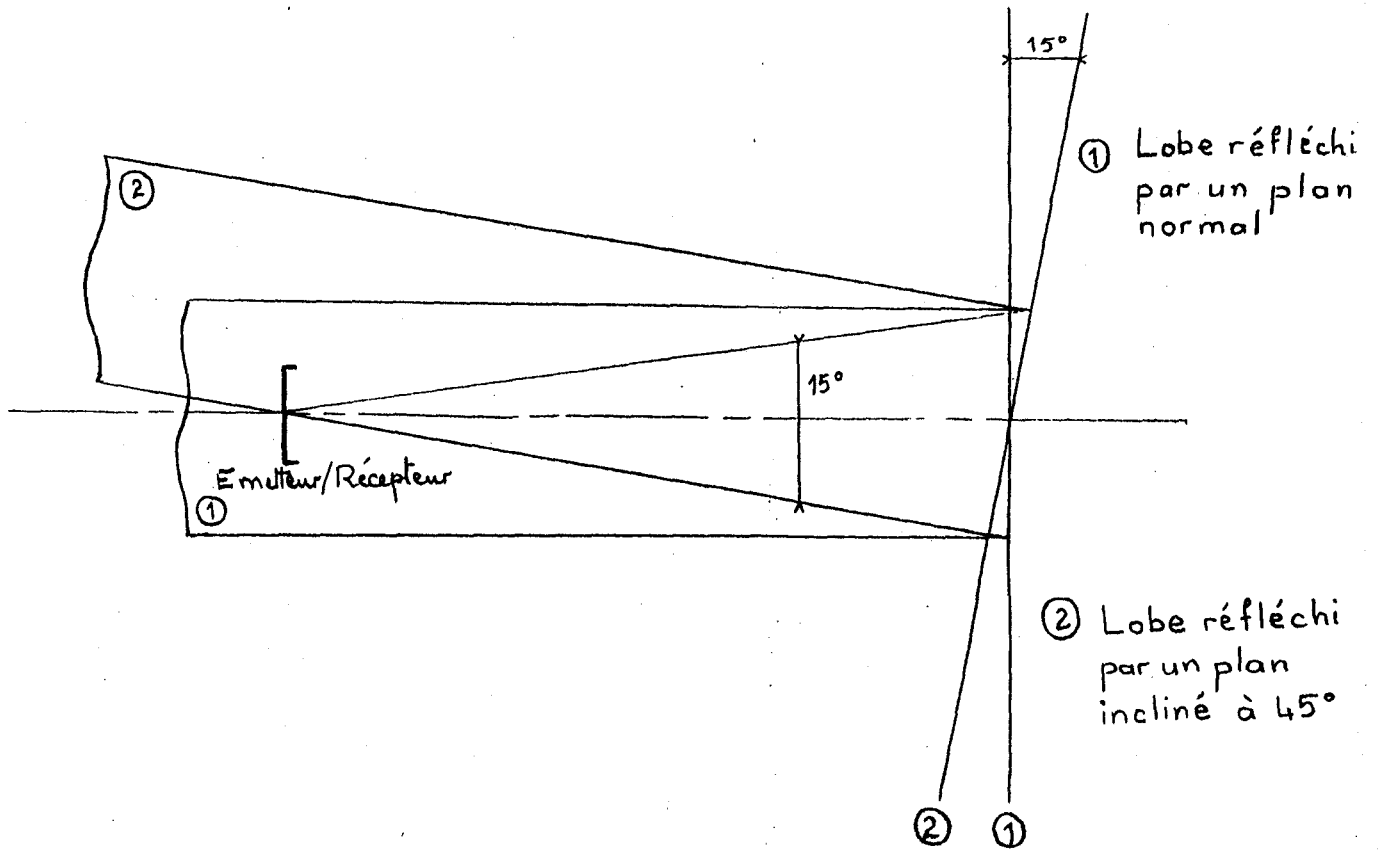


Figure III.3 : Lobe d'émission d'un émetteur Ultrasonore .

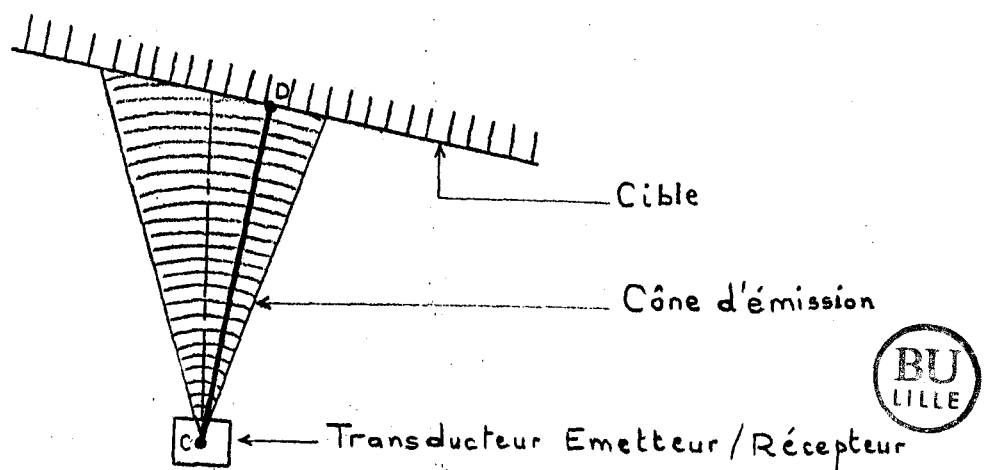


Figure III.4 : Détection de la plus courte distance (CD) .



d/ Conclusion  
 .....

Le système de perception à ultra-sons est très adéquat compte-tenu de sa compacité et sa facilité d'usage. Il possède en plus trois spécificités majeures :

- \* Il est d'abord caractérisé par un faisceau d'émission présentant un angle d'ouverture relativement important .

Le front avant de l'écho reçu est représentatif de la plus courte distance entre l'émetteur et l'impact du cône d'émission sur l'objet (Figure III.4) .

Il ne faut par conséquent pas associer la distance CD à l'axe médian du cône d'émission, sinon une erreur angulaire serait commise .

- \* Ce système est aussi caractérisé par une faiblesse. En effet, pour certaines configurations de l'objet où l'incidence du faisceau par rapport à la normale est trop grande, l'énergie retournée vers le récepteur est alors très faible, voire même inexistante /17/ .

- \* Enfin, une 3ème caractéristique, et c'est encore un inconvénient, puisque le système ultrasonore est en plus sensible aux parasites émanant des circuits électroniques environnants lorsque le gain de l'amplificateur associé est élevé .

### III.2.2.2 Capteurs optiques à rayons infrarouges

---

Ce type de capteurs peut également fournir des informations importantes concernant le voisinage de l'organe terminal d'un robot, notamment pour éviter un obstacle, localiser une pièce et aussi la reconnaître .

Ces capteurs de proximité à infrarouge sont constitués chacun d'un émetteur (photo-diode) et d'un récepteur (photo-transistor). Le signal électrique reçu est d'abord amplifié puis filtré afin de supprimer les bruits de fréquence élevée .

La courbe de réponse en intensité d'un capteur optique à infrarouge est fonction de l'angle que fait la surface par rapport à la perpendiculaire de l'axe du capteur. (Figure III.5).

L'intensité du signal reçu est aussi fonction de la qualité de la surface de l'objet. Prenons le cas où  $\alpha = 0$ , c'est-à-dire lorsque l'axe du capteur est perpendiculaire à la surface qui lui est en face. Pour une même distance, l'intensité du signal de réception n'est pas la même pour une surface lisse que pour une surface rugueuse. (Figure III.6).

Les capteurs optiques à rayons infraouges représentent la catégorie la plus largement étendue en mesure proximétrique car ils fournissent des informations ayant un bon rapport Signal/Bruit pour des portées variant de quelques millimètres à plusieurs dizaines de centimètres. En plus, ils bénéficient d'un critère de choix qui est leurs encombrements réduits, ce qui leur donne la possibilité d'être montés aussi près que possible

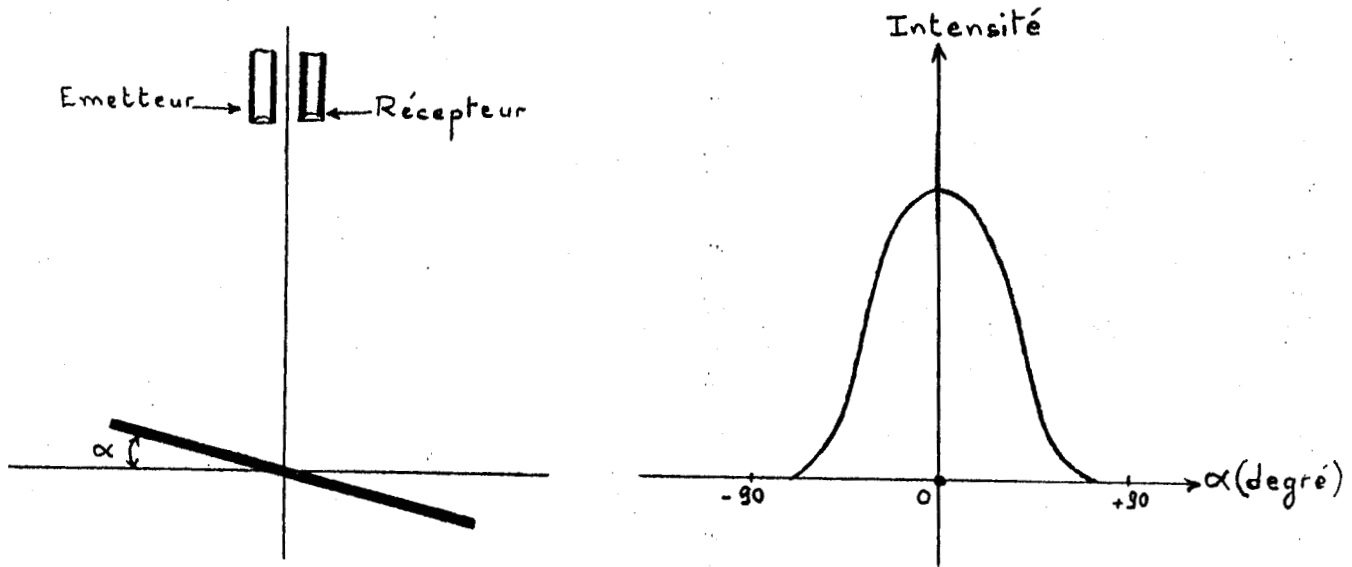


Figure III.5 : Courbe  $I = f(\alpha)$  d'un capteur à rayons Infra-rouges.

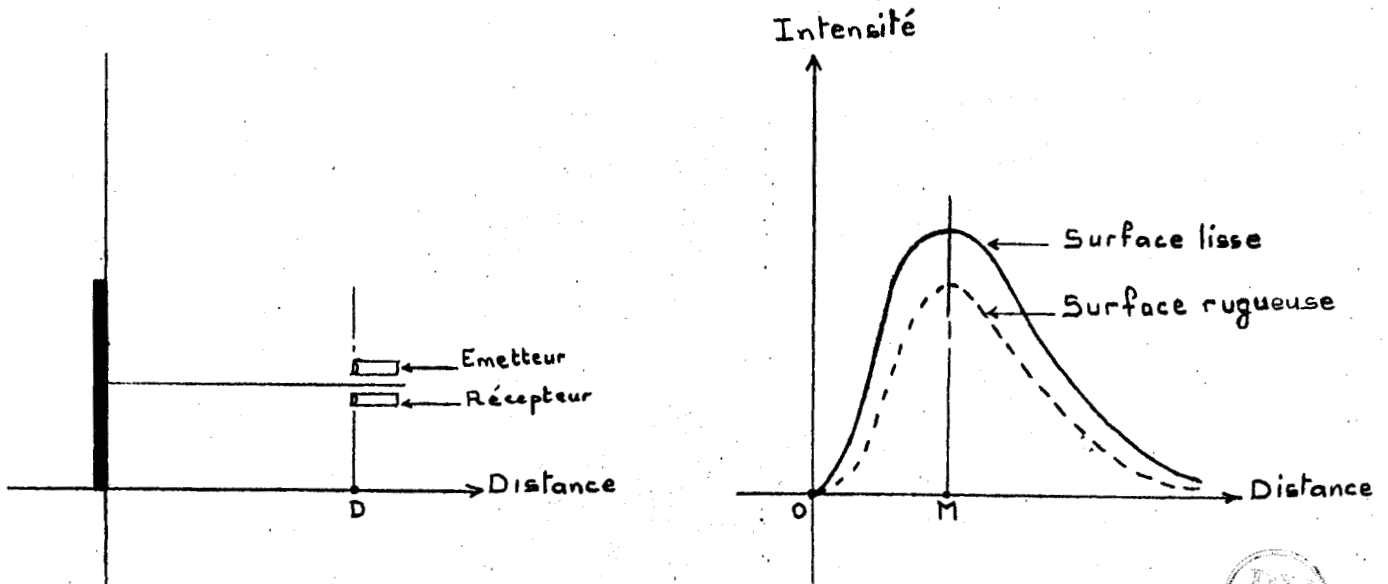


Figure III.6 : Courbes de réponse d'un capteur à Infra-rouge .

de l'effecteur du robot , et cela afin de pouvoir exploiter au mieux le balayage, et par conséquent, commander le robot en temps réel .

Enfin, signalons que ces capteurs peuvent également fournir des informations tridimensionnelles au sujet de l'environnement de la pince . C'est pourquoi ils sont utilisés dans plusieurs applications /9/.

### III.2.2.3 Capteurs optiques à rayons Laser

---

Ce sont des capteurs de triangulation. Le principe de triangulation consiste à mesurer l'angle entre la direction du faisceau émis et celle sous laquelle est vu le point d'impact sur l'obstacle /8/.

L'émission est assurée par un Lazer (HE-NE) dont il est possible de faire tourner le faisceau de façon à faire varier la direction d'émission. La direction du faisceau réfléchi peut être mesurée par une photo-diode, une barrette CCD ou une caméra , ou encore un détecteur de position .

-Soit  $\alpha$  la direction de l'émission; cette direction est mesurable à chaque instant .

-Soit  $\beta$  la direction du faisceau réfléchi .

Comme le montre la figure III.7 , la distance  $D$  est calculée à partir de la mesure de  $\alpha$  et  $\beta$  .

On montre que :

$$D = \frac{A}{\sin \beta + \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad /5/$$

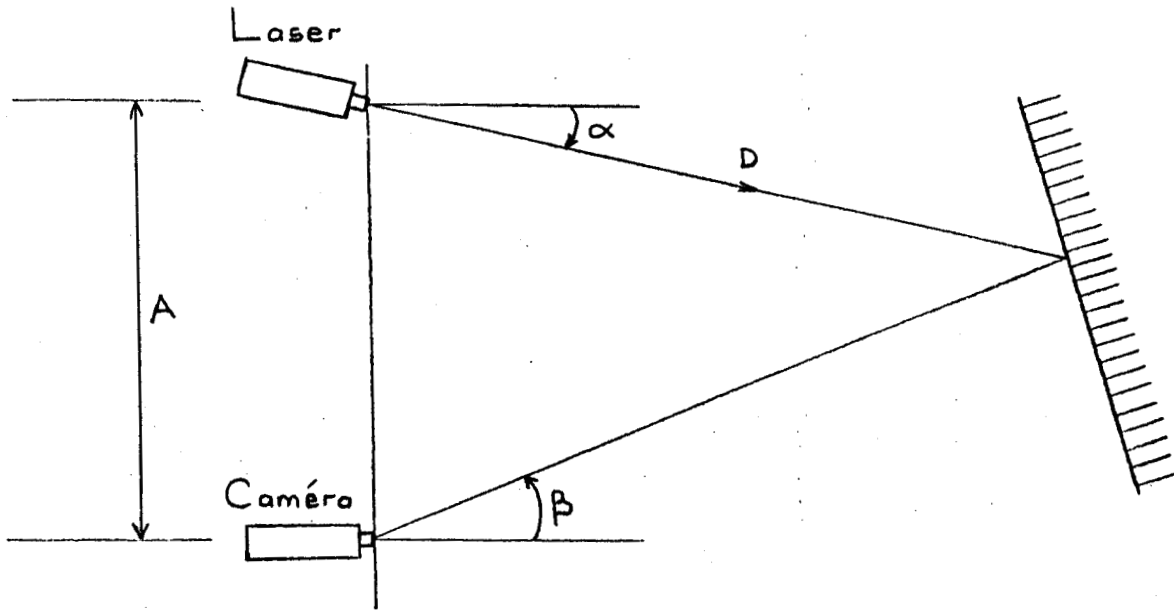


Figure III.7 : Principe du télémètre Laser .

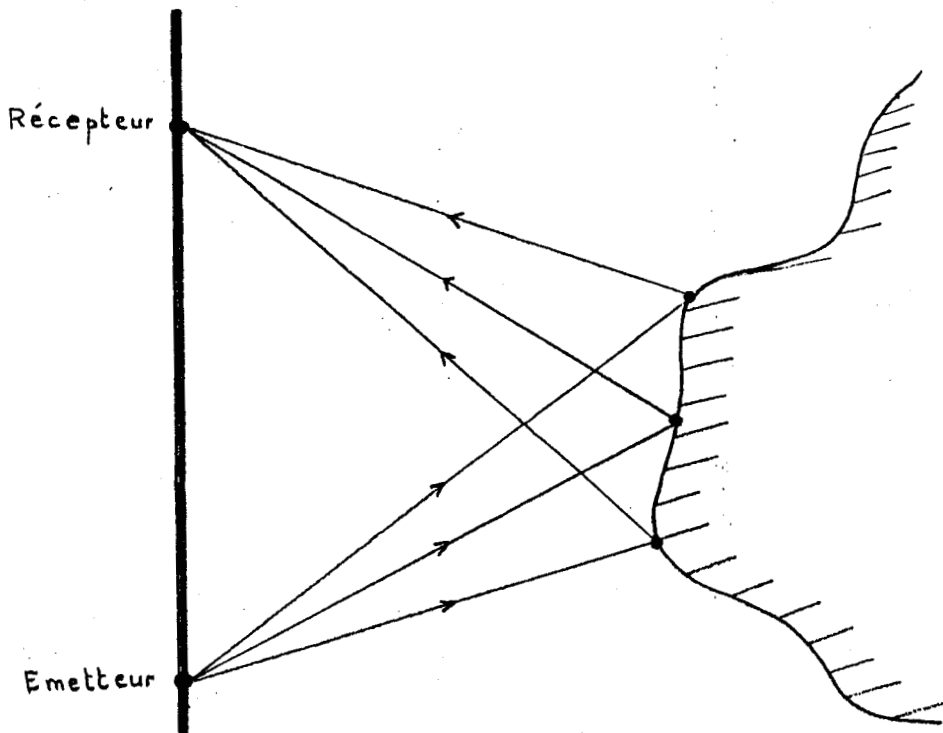


Figure III.8 : Zones d'ombres .



Le système de triangulation peut ainsi fournir une image de profondeur de la scène, celle-ci doit être balayée à différents sites. La manière la plus simple est de réfléchir le faisceau émis sur deux miroirs rotatifs dont les axes de rotation sont orthogonaux .

Le champ d'application de la plupart des systèmes à triangulation de ce type semblent s'orienter vers l'inspection et l'orientation des pièces manufacturées .

Dans le cas du robot mobile VESA III du L.A.T.E.A de Rennes /43/ , ce système doit permettre d'évaluer des profondeurs variant entre 2 et 5 m . Il est à noter que, comme pour la stéréo-vision, plus la ligne de base est grande, plus la mesure est précise , mais plus le système est sensible aux zones d'ombres . (Voir Figure III.8) .

Outre la méthode de triangulation, il existe deux méthodes pour mesurer la distance grâce au Laser /5/ qui peut émettre :

- soit en mode continu : la distance est alors évaluée par l'intermédiaire du déphasage qui existe entre l'onde modulée émise et l'onde modulée reçue après réflexion ;
- soit en mode pulsé : la distance est dans ce cas évaluée par l'intermédiaire du "temps de vol" de l'impulsion entre son émission et sa réception après réflexion .

a/ Télémètre Laser à déphasage

.....

Nous pourrions citer l'exemple de Stanford Research Institute /44/. L'intérêt de ce télémètre est de fournir à la

fois la phase et l'amplitude du signal réfléchi, ce qui donne alors une information tri-dimensionnelle en parfait accord avec l'information d'intensité . (Figure III.9) .

#### b/ Télémètre Laser à "temps de vol"

.....

Ce type de télémètre équipe actuellement le robot mobile H.I.L.A.R.E de Toulouse. Il s'agit du télémètre EUMIG LD 151 HS. La source Laser utilisée est un semi-conducteur Arsénium de Gallium (As-Ga) . La diode Laser As-Ga émet un rayonnement Infra-Rouge ( $\lambda = 904 \text{ nm}$ ) qui est focalisé par une optique émettrice. Une partie de l'énergie réfléchie par l'objet visé traverse l'optique réceptrice et atteint une photo-diode qui fournit le signal électrique de réception (Figure III.10) .

L'intervalle de temps s'écoulant entre l'émission et la réception est intégré électriquement . La valeur de la tension est proportionnelle à la distance mesurée .

Les capteurs optiques à rayons Lasers permettent d'obtenir des performances supérieures à celles des télémètres à rayons infrarouges ou à ultrasons puisque l'exploitation des mesures des distances est non seulement accélérée et simplifiée , mais précises . En effet, ces capteurs sont capables de mesurer des distances entre 0 et plusieurs mètres avec une précision de 1/100ème de mm. D'autre part, en tournant, ils peuvent donner un panorama du contexte local à la suite du traitement d'informations obtenues en chaque direction .

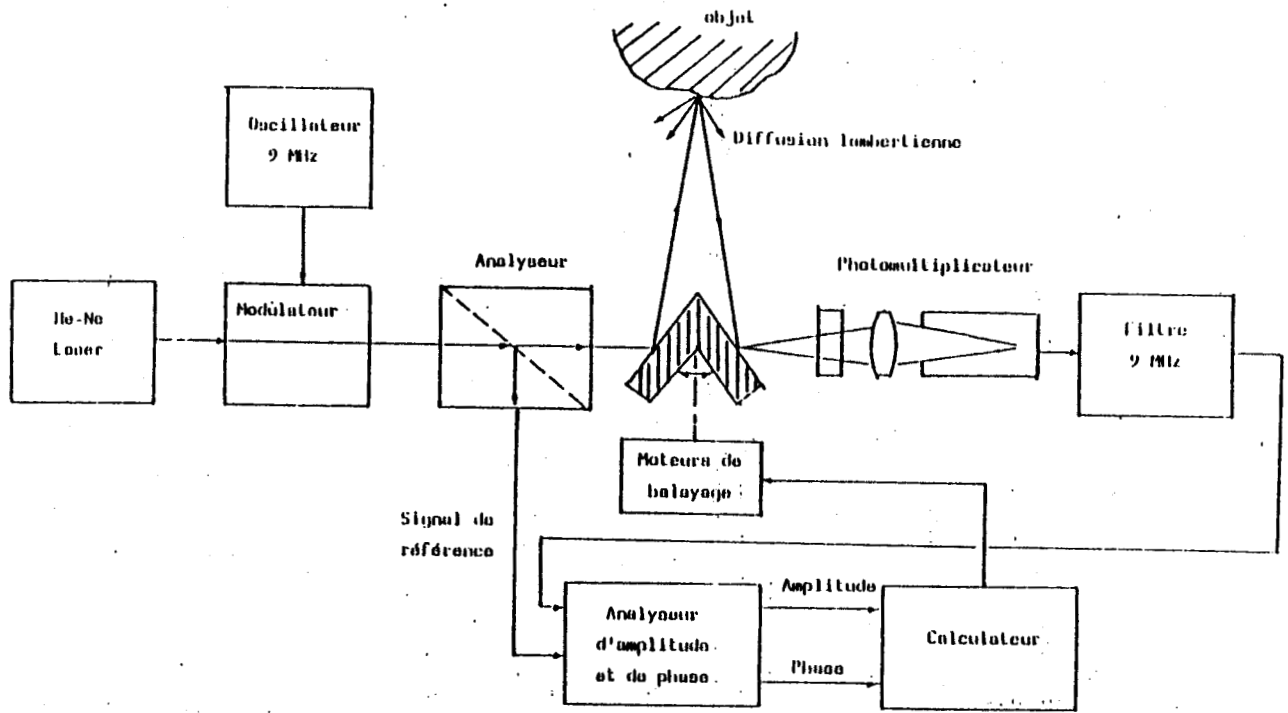


Figure III.9 : Télémètre Laser à déphasage .

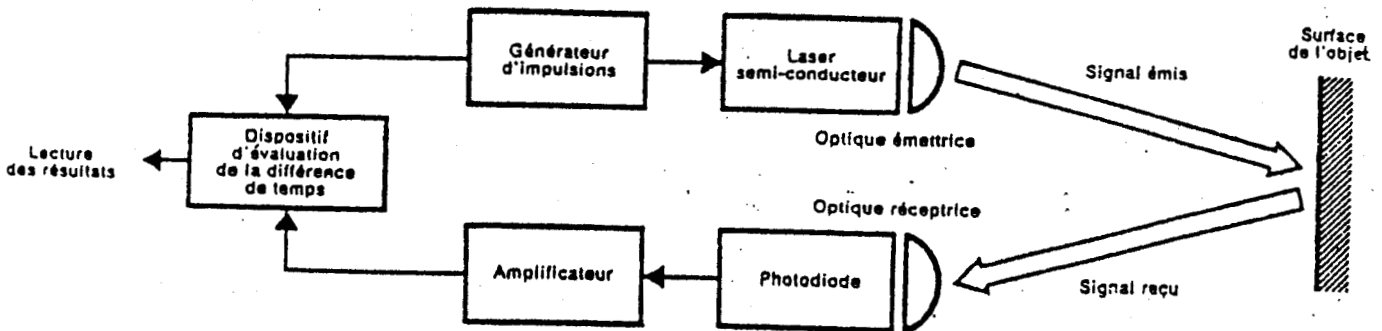


Figure III.10 : Télémètre Laser à "temps de vol" .



Notons par ailleurs que malgré ses qualités, les capteurs optiques à rayons Lasers sont peu utilisés en proximétrie, car ils impliquent un matériel électronique et opto-électronique assez complexe qui les rend fragiles et peu dynamiques. Ils sont par contre utilisés en télémétrie pour détecter les obstacles dans un contexte global.

#### III.2.2.4 Quelques autres capteurs

.....

Nous mentionnons entre autres les capteurs hyperfréquences (Radars), les capteurs inductifs, les capteurs capacitifs, les capteurs pneumatiques, les capteurs d'effort /32/, ....

Tous ces capteurs ont des qualités intrinsèques qui les font préférer dans certaines applications. En général, ils sont peu utilisés car ils ont des portées faibles (de l'ordre du mm) et des performances générales médiocres qui les destinent pratiquement qu'à transmettre des informations "tout ou rien" (Présence ou absence d'objets).

### III.3 DESCRIPTION DE CERTAINES APPLICATIONS SENSORIELLES

#### UTILISEES EN ROBOTIQUE

Nous citerons dans ce paragraphe certains travaux utilisant les outils sensoriels décrits précédemment.

Tout d'abord le projet H.I.L.A.R.E qui est effectué au L.A.A.S (Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes) de Toulouse. Ce projet est né vers la fin de l'année 1977.

Son but était , et est toujours , de réaliser un robot mobile autonome destiné à être un support expérimental pour la recherche en robotique, c'est-à-dire dans les divers domaines tels que : l'intelligence artificielle, la reconnaissance des formes, la commande, et bien sur leur intégration /5/-/26/-/27/-/28/-/29/. En définitive , ce projet comprend l'étude et l'intégration de la perception multisenseur , de la locomotion sur roues, de la capacité de manipulation d'objets, des systèmes informatiques répartis et des générateurs de plans permettant au robot de prendre des décisions et d'agir dans l'univers réel dans lequel il évolue .

Le système de perception employé se compose d'un système de vision tridimensionnel réalisé à partir d'une caméra vidéo (National WN 1350 E/N) complété par un télémètre Laser (EUMIG , Laser Radar LD 151 HS) afin de minimiser le temps d'acquisition d'informations sur l'univers d'évolution du robot , d'un système de repérage de la position du robot dans une pièce balisée par l'utilisation de capteurs à rayons infrarouges (HONEYWELL FEML S 3A), et enfin d'un système de proximités à ultrasons composé de 14 modules émetteurs/récepteurs , permettant d'une part la surveillance de l'environnement immédiat du robot pour vérifier qu'il n'ya pas d'obstacles imprévus , et d'autre part la navigation en "boucle fermée" sans avoir recours au système de vision.

Dans le même ordre d'idée , le L.A.T.E.A (Laboratoire d'Applications des Techniques Electroniques Avancées) de Rennes a construit un robot mobile VESA III dont l'équipement sensoriel

est constitué d'un dispositif multisenseur /25/. Ce dispositif intègre dans un même ensemble un télémètre à ultra-sons destiné à la mesure des distances, un dispositif optique à base des piles photo-voltaiques permettant la classification des teintes d'objets plans parmi un référentiel de teintes défini a priori, et un télémètre constitué d'un Laser mono-chromatique associé à un détecteur solide destiné à la localisation d'arrêtes verticales d'objets cylindriques à base polygonale. Chacun des capteurs entrant dans la constitution de l'ensemble délivre une information élémentaire (distance, teinte, localisation d'arrêtes).

De même, le laboratoire d'automatique de l'école nationale supérieure de mécanique de Nantes a développé et adapté des capteurs simples sur un mini-robot (Mini-Mover 5) afin qu'il ait connaissance de son environnement /30/.

L'implantation matérielle et logicielle sur ce mini-robot d'un capteur de distance à ultra-sons utilisant un principe "stéréoscopique" et d'un capteur optique de proximité à infra-Rouge permet au système de commande de disposer d'informations relativement précises sur la position d'un objet dans le référentiel du robot et sur certaines caractéristiques géométriques. Une quantité importante d'informations peut être obtenue malgré la simplicité des capteurs en utilisant des méthodes séquentielles liées au déplacement des capteurs solidaires du robot. Ces informations sont ensuite utilisées par des algorithmes de reconnaissance et d'identification d'environnement.

### III.4 CONCLUSION

L'exploitation d'informations sensorielles dans la commande des robots manipulateurs vis-à-vis de leur contexte constitue un pas important dans le domaine de la robotique . Le choix d'un ou plusieurs capteurs sensoriels s'avère alors nécessaire .

Les techniques sensorielles présentes actuellement montrent la très grande importance de l'utilisation d'un équipement sensoriel approprié , en particulier lorsque le robot doit évoluer dans un contexte partiellement ou totalement inconnu .

Ce chapitre relate certaines de ces techniques et met en évidence notamment quelques types de capteurs utilisés compte-tenu de l'application mise en oeuvre .

CHAPITRE IV  
\*\*\*\*\*

EXPERIMENTATION - APPLICATIONS SOUS-MARINES

---

## IV.1 INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, nous expliciterons notre technique Ultrasonore qui s'effectue dans un milieu sous-marin. Le dispositif expérimental utilisé est réalisé au L.A.CO.S du Havre ; il est schématisé sur la figure IV.1.

Nous détaillerons les différents éléments de ce montage dans le deuxième paragraphe, après quoi nous présenterons les applications effectuées dans notre laboratoire. Celles-ci consistent à suivre une surface de forme préalablement inconnue d'une part, ensuite à percevoir le contexte local dans le but de le reconnaître d'autre part.

## IV.2 ORGANISATION MATERIELLE

### IV.2.1 Le manipulateur et son contexte local

---

Le manipulateur utilisé dans notre application est un MINI-MOVER 5 (5 axes + Pince) motorisé par des moteurs pas-à-pas regroupés sur son corps.

La transmission s'effectue sur les différents axes par des cables. Certains mouvements mécaniques sont découplés par la commande numérique.

Le logiciel de commande réside dans une carte enfichable dans un micro-ordinateur APPLE IIe. Le langage de commande est utilisable à partir du BASIC.

La description détaillée de ce manipulateur se trouve dans le chapitre II. Le MINI-MOVER 5 est fixé au niveau de sa base

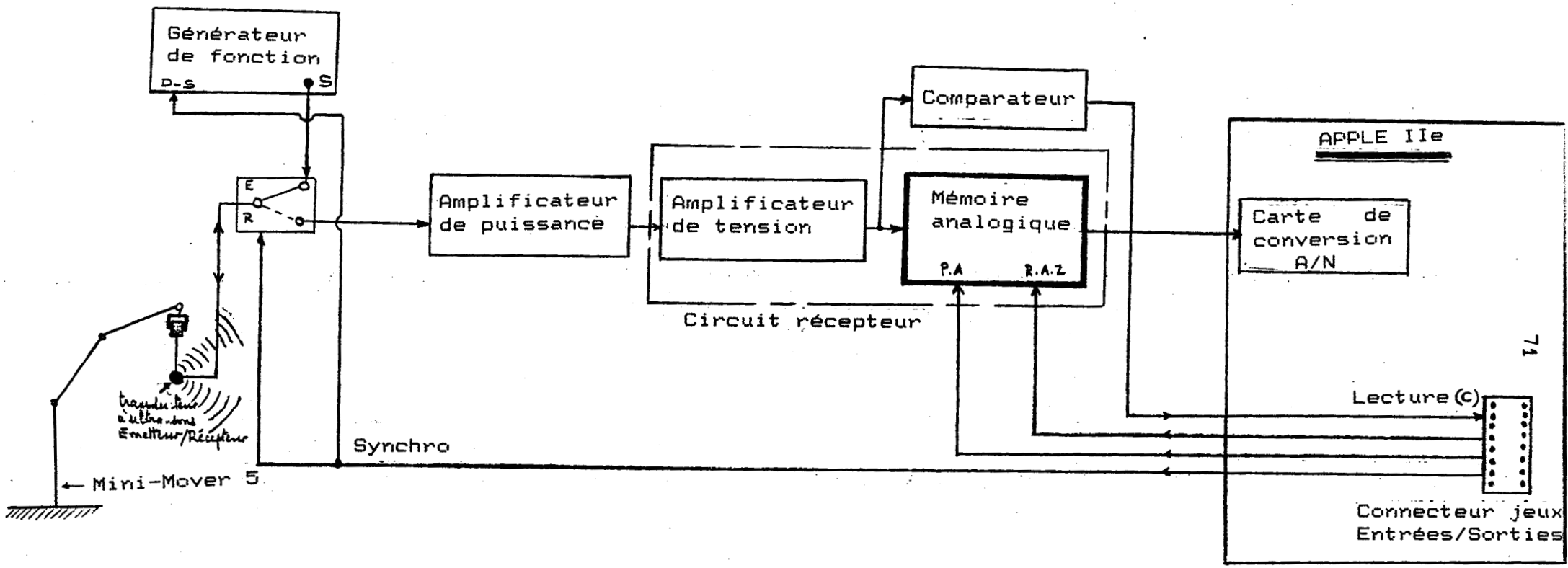


Figure IV.1 : Schéma synoptique du montage utilisé .

sur un support fixe de telle sorte que son préhenseur soit orienté vers le bas, ce dernier pouvant agir dans une cuvette en verre de dimensions  $1 \times 0.8 \times 0.5$  m , presque à moitié remplie d'eau .

Le contexte local du bras mobile du robot est constitué par plusieurs objets qui sont des plaques métalliques de formes différentes, placées à l'intérieur de la cuvette , c'est-à-dire complètement immergées . La nature de ce contexte est choisie en tenant compte du capteur utilisé .

Le manipulateur est alimenté extérieurement par une source continue 12V - 5A .

#### IV.2.2 La chaîne d'acquisition des mesures

-----

##### IV.2.2.1 Le capteur à Ultra-Sons

.....

Le capteur utilisé comporte essentiellement un transducteur à ultra-sons piézo-électrique du type semi-duplex , c'est-à-dire pouvant fonctionner alternativement en émetteur et en récepteur.

Le choix de ce type de capteur se justifie non seulement en raison de la nature du milieu expérimental (environnement sous-marin), mais aussi pour sa simplicité et son faible coût .

Ce transducteur est placé au niveau de la pince par l'intermédiaire d'un support afin que celle-ci soit hors de l'eau lors de son mouvement .

Le transducteur à ultra-sons utilisé est du type



PANAMETRICS , V 302 de diamètre 22 mm et de fréquence de fonctionnement 1 MHz .

#### IV.2.2.2 Générateur de fonction

.....

C'est un générateur de signaux du type TEKELEC ,TA 44 positionné en déclenché et permettant ainsi de délivrer des trains d'ondes sinusoïdales de durée égale à 20  $\mu$ s environ et de fréquence ajustée à 1 MHz (celle-ci est égale à la fréquence d'utilisation du transducteur).

Ce générateur est relié directement au capteur afin que ce dernier puisse émettre des ondes et en recevoir éventuellement .

#### IV.2.2.3 La porte électronique

.....

C'est un circuit réalisé dans le but de séparer les ondes émises par le générateur de fonction de celles provenant du circuit récepteur. Un signal synchro doit être injecté à son entrée . Une fois ce circuit mis sous tension continue (+15V , 0V , -15V) , le signal obtenu à sa sortie synchro est le suivant (Figure IV.2) :

Sortie synchro

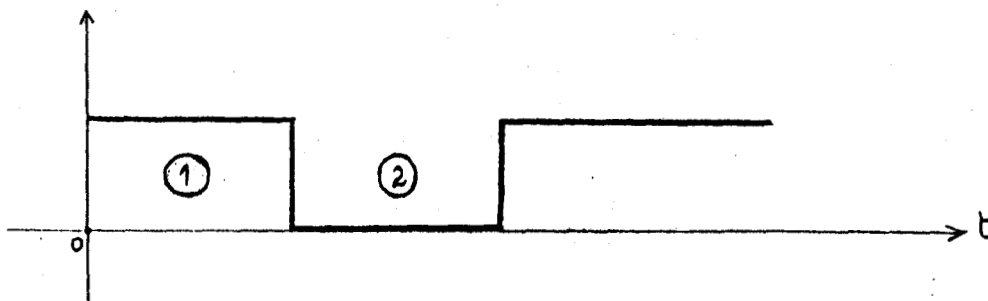


Figure IV.2 : Signal sortie synchro de la porte électronique .

Comme le montre la figure IV.2 , ce signal est caractérisé par deux états :

- \* L'état ① permet le passage de l'émission ( Porte fermée ) .
- \* L'état ② permet d'accueillir la réception quand elle existe .  
( Porte ouverte ) .

Deux potentiomètres permettent respectivement d'élargir la porte ou de la rétrécir , et de la déplacer si besoin est .

Le schéma de principe de cette porte électronique est représenté sur la figure IV.3 .

Les schémas électriques des trois étages apparaissant dans cette figure sont détaillés dans l'annexe II .

#### IV.2.2.4 L'amplificateur de puissance

.....

Afin de pouvoir exploiter au mieux les signaux de réception, il est nécessaire de les amplifier. Pour notre manipulation, nous avons utilisé un amplificateur de puissance du type EIL RF , POWER AMPLIFIER 240 L , dont le gain est de 50 dB et la bande passante peut aller de 20 KHz jusqu'à 10 MHz.

#### IV.2.2.5 Le circuit récepteur

.....

Ce circuit est réalisé sous forme d'une carte composée de deux parties (Figure IV.4) :

- a/ un amplificateur de tension du type AD 509 de gain 5 et fonctionnant à haute fréquence (de 10 Hz à 20 MHz) /46/ ,

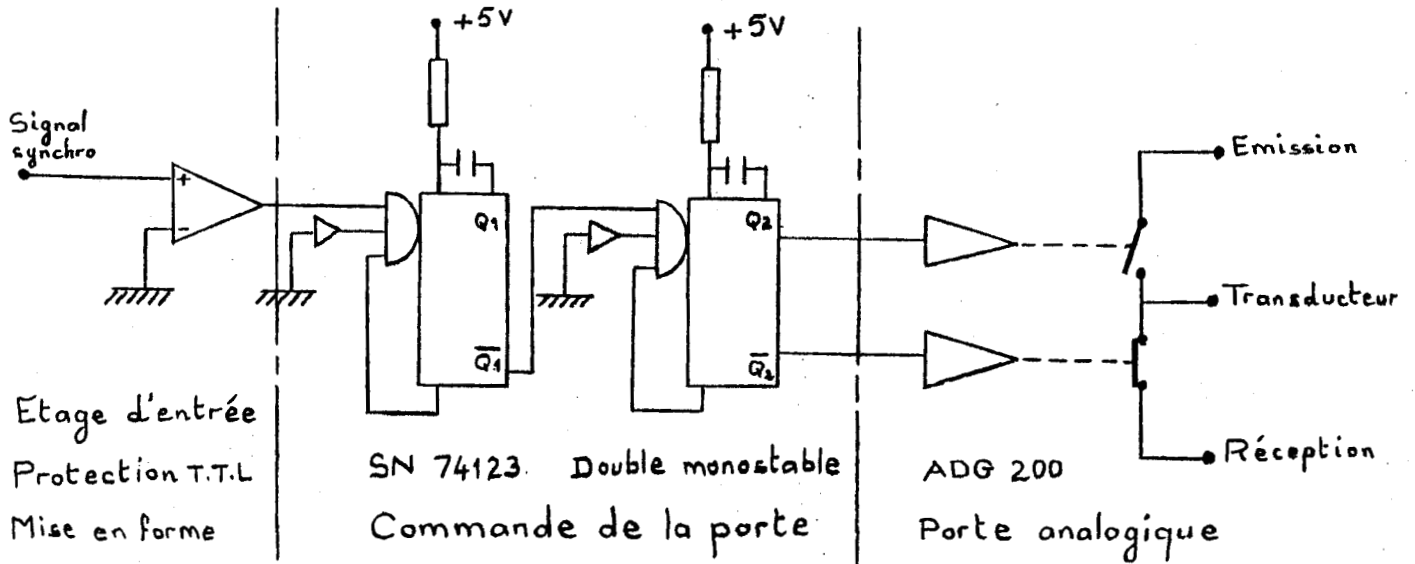


Figure IV.3 : Schéma de principe de la porte électronique .

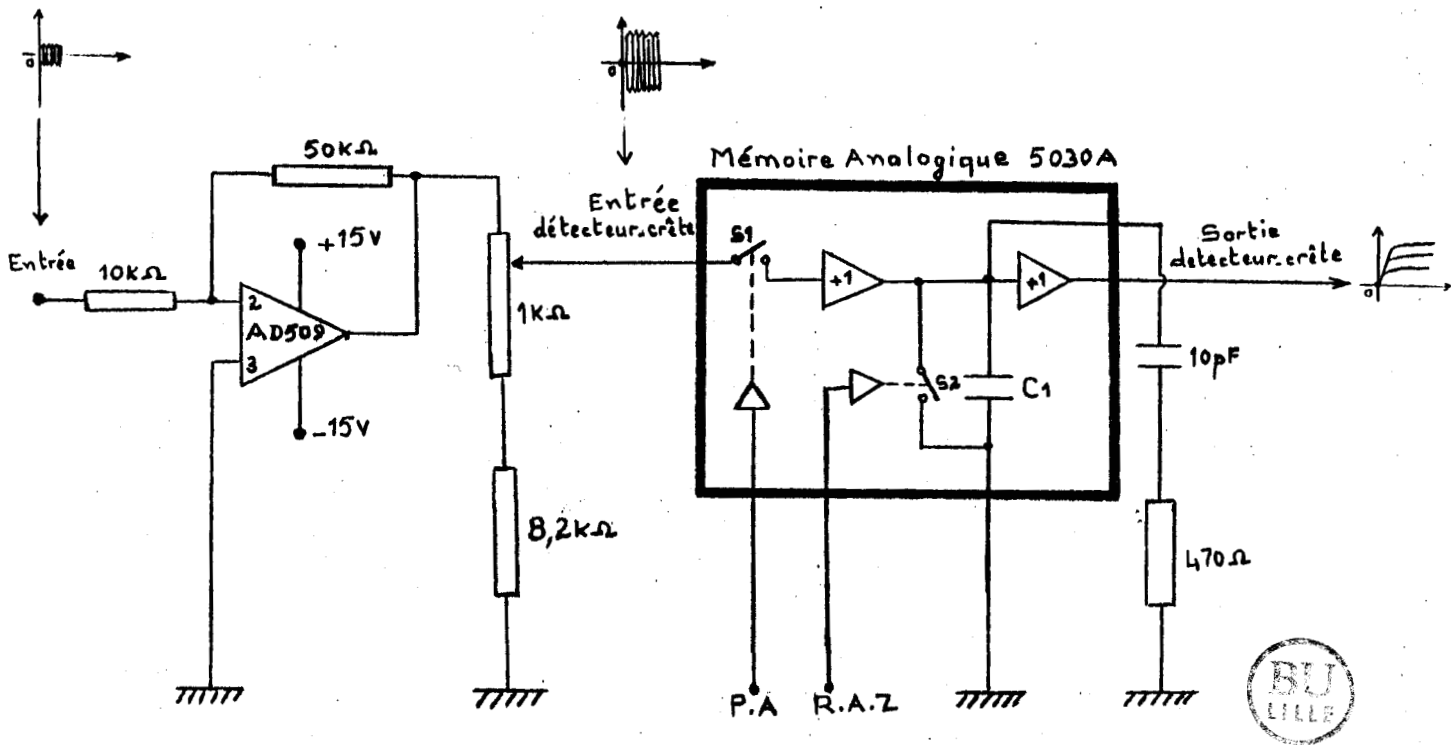


Figure IV.4 : Schéma électrique du circuit récepteur .

cet amplificateur est utilisé pour pallier à l'insuffisance de l'amplificateur de puissance ;

b/ un détecteur crête du type 5030 A fabriqué chez D.E.I /14/. Comme on peut le constater sur le schéma de la figure IV.4, ce détecteur crête, appelé également mémoire analogique, est commandé par deux signaux générés par le calculateur :

- P.A ( Porte Analogique ) ;
- R.A.Z ( Remise A Zéro ) .

L'allure du signal P.A est identique à celle de la porte électronique ( Figure IV.2 ) .

La fermeture de cette porte (Fermeture de S1) est tributaire de l'apparition d'une réception ultrasonore . Son ouverture est assurée par programmation (Voir le sous-programme E.R.A présenté dans la figure IV.10) .

L'intérêt de la présence de cette porte est de ne pas permettre aux signaux parasites de traverser le détecteur lorsqu'aucune vraie réception n'est reçue .

L'amplitude maximale de l'onde ultrasonore recueillie à l'entrée du détecteur crête est mémorisée . La tension analogique mémorisée est remise à zéro grâce à la commande R.A.Z ( Fermeture de S2 ) .

#### IV.2.2.6 Le convertisseur Analogique / Numérique

Il est utilisé pour convertir numériquement l'amplitude maximale du signal reçu apparaissant à la sortie du détecteur crête après mémorisation .

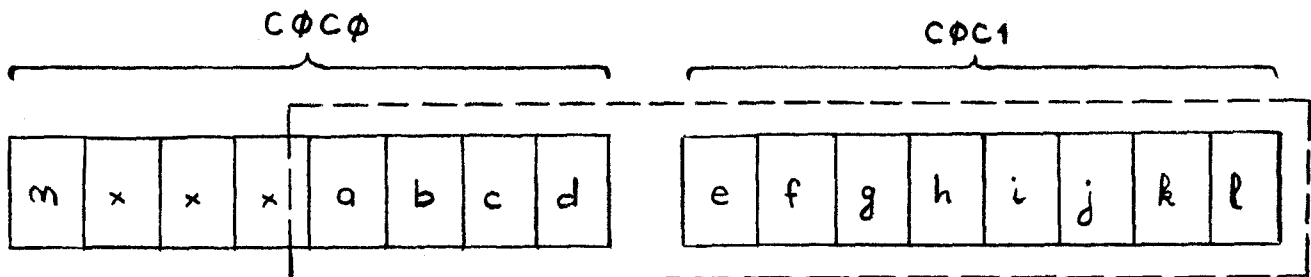
La carte de conversion que nous utilisons est du type Micro-Informatique Diffusion , C.A.N 1621 M1 . /13/ . Elle possède 16 voies d'entrées analogiques simples , 3 gammes de tension ( 0-5V ; +/- 2.5V ; +/- 5V ) et permet une résolution de 4096 points , ce qui correspond à 12 bits .

Le temps de conversion est de 25  $\mu$ s .

Pour notre expérience , nous avons utilisé la voie d'entrée numéro zéro et (0-5V) comme gamme de tension ; la carte étant enfichée dans le connecteur numéro 4 .

Afin de faciliter la compréhension de la programmation de cette carte de conversion , nous présentons dans le tableau 1 toutes les adresses mémoires et les paramètres caractéristiques.

La lecture de la valeur numérique s'effectue sur 12 bits, celles-ci sont disposés de la manière suivante :



OPERATION	ADRESSE		PARAMETRE		COMMENTAIRE
	Hexa	Déci	Hexa	Déci	
Voie d'entrée choisie : No 0	C0C0	49344	3E	62	Ecriture
Gamme de tension choisie : (0-5V)	C0C1	49345	00	0	Ecriture
Ordre de départ de conversion	C0C2	49346	00	0	Ecriture
Ordre de fin de conversion	C0C0	49344	-	-	Lecture
Lecture de la valeur numérique .	C0C1 C0C0	49345 49344	- -	- -	Lecture * C0C1 * C0C0

Tableau 1 : Programmation de la carte C.A.N utilisée .

ADRESSE	DECIMALE	HEXADECIMALE
Bit d'entrée C	49251 (-16285)	C063
Bit de sortie D-S	0 49240 (-16296)	C058
	1 49241 (-16295)	C059
Bit de sortie P.A	0 49242 (-16294)	C05A
	1 49243 (-16293)	C05B
Bit de sortie R.A.Z	0 49244 (-16292)	C05C
	1 49245 (-16291)	C05D

Tableau 2 : Adressage des signaux E/S (Niveaux T.T.L) .

Or notre calculateur (APPLE IIe) fonctionne sur des configurations binaires de dimension 8 (Octets) . Il va falloir par conséquent en extraire les 8 bits les plus significatifs , c'est-à-dire a , b , c , d , e , f , g et h . Cette opération est également assurée par le sous-programme E.R.A dont l'organigramme est présenté sur la figure IV.10 .

#### IV.2.2.7 Le comparateur

.....

Il est utilisé en tant qu'indicateur de présence de réception. En effet, dès qu'un écho ultrasonore se manifeste à la sortie de l'amplificateur de tension, il le signale au calculateur (Adresse C063). Ceci permet à la porte analogique de se fermer et au détecteur crête de sélectionner l'amplitude maximale de l'onde reçue et ensuite de la mémoriser .

L'avantage de ce comparateur est de ne pas permettre au circuit récepteur de tenir compte des signaux parasites apparaissant parfois malencontreusement. Ceci est rendu possible grâce à son seuil de tension de 0.5V environ . (Voir Figure V.5).

#### IV.2.3 Le calculateur

C'est un micro-ordinateur APPLE IIe, de capacité mémoire 64 Koctets . Il est l'un des éléments les plus actifs de notre dispositif expérimental car c'est lui qui élabore et supervise tous les signaux nécessaires au fonctionnement de la manipulation et effectue en plus le traitement des échos ultrasonores provenant du circuit récepteur .

La carte ARMBASIC contenant le logiciel de commande du MINI-MOVER 5 est enfichée dans le connecteur numéro 3, celle de la conversion Analogique/Numérique dans le connecteur numéro 4 .

Les opérations effectuées par ce calculateur sont les suivantes :

a/ commande de l'organe terminal du robot ;

b/ émission de 3 signaux binaires :

\* déclenchement du générateur de fonction et synchronisation simultanée de la porte électronique (D.S) ;

\* porte Analogique (P.A) ;

\* remise A Zéro du détecteur crête (R.A.Z) .

Ces 3 signaux transitent par un boîtier Entrées / Sorties jeux qui se trouve à l'intérieur du calculateur/45/.Figure IV.6.

Le tableau 2 montre l'adressage de ces signaux E/S .

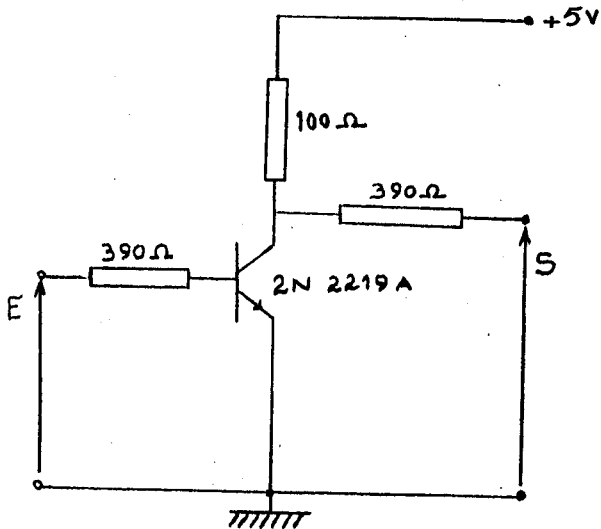
c/ vérification de l'état du comparateur ;

le calculateur lit la valeur binaire du bit numéro 7 de l'octet d'adresse COC3 ; cette valeur est égale à 0 ou 1 selon que l'écho de réception est présent ou non ;

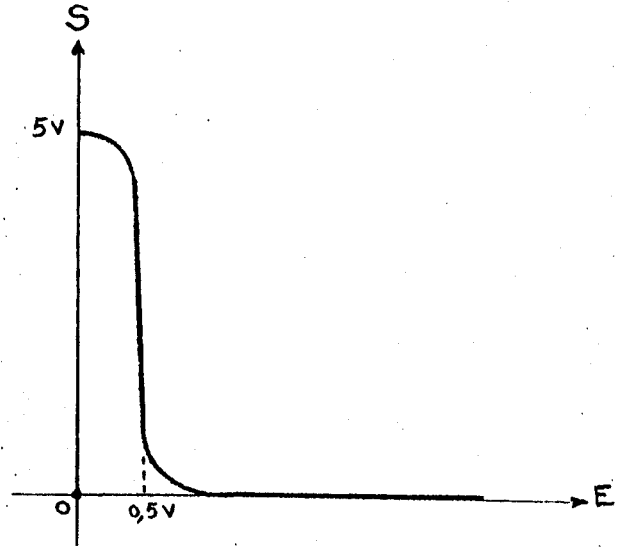
d/ conversion Analogique / Numérique de l'amplitude maximale ultrasonore reçu ;

e/ traitement des mesures obtenues (orientation , distance , reconnaissance des formes ...) .





- a -



- b -

Figure IV.5 : Le comparateur

- a- Montage à transistor .
- b- Caractéristique de transfert .

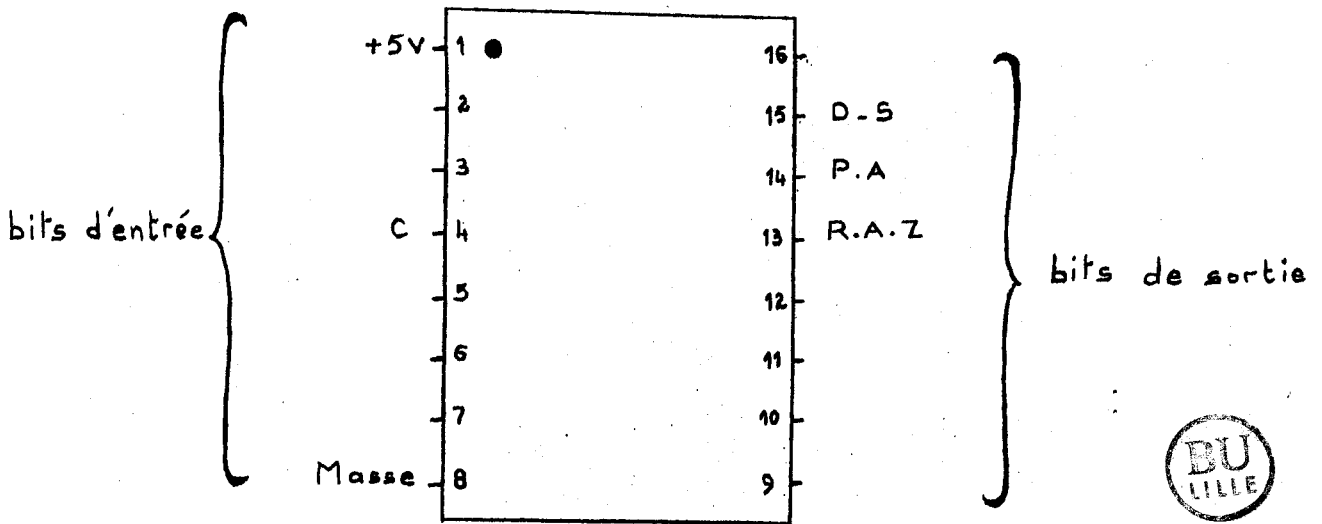


Figure IV.6 : Boitier "entrées/sorties jeux" de l'APPLE IIe .  
 ----- Affectation des broches E/S utilisés .

### IV.3 APPLICATION AU SUIVI DE SURFACE

#### IV.3.1 Position du problème

-----

Le problème de l'adaptation d'un robot vis-à-vis de son contexte local a été traité par plusieurs chercheurs /49/ - /50/. En effet, puisque l'amélioration des performances et l'extension des applications des robots passe nécessairement par la connaissance de l'environnement dans lequel ils doivent agir, ce qui leur permet d'évoluer intelligemment à ces variations .

Dans le même esprit, le laboratoire d'automatique industrielle de l'I.N.S.A de Lyon a présenté une solution à ce problème en réalisant un poignet actif doté de trois capteurs de proximité de type inductif /10/. Ce type de capteur ne peut fonctionner qu'à très courte distance d'un matériau ferromagnétique , et donc , ne peut pas être utile pour notre manipulation puisqu'il restreint considérablement le champ d'application.

Notre expérience se déroulant dans un milieu sous-marin, un capteur à ultra-sons s'est montré d'une grande efficacité puisqu'il permet au manipulateur d'agir dans un espace relativement plus étendu . Cette solution présente l'avantage d'être bien adaptée au milieu propagateur .

De notre côté, nous nous proposons dans un premier temps de réaliser une commande de type géométrique (basée par conséquent sur un modèle géométrique . Cf I.3.1) qui consiste à suivre à distance constante une surface de forme non prédéterminée. Le mouvement du manipulateur consiste alors à déplacer sa pince point à point (incrément constant fixé par l'opérateur ).

En chaque point de son parcours, la pince adapte son orientation à partir de ses deux axes Pitch et Roll. Outre l'orientation, le déplacement de la pince doit s'effectuer de manière à conserver une distance capteur/objet constante. Pour cela, une translation est quelquefois nécessaire .

#### IV.3.2 Mise en oeuvre pratique

En partant du fait que deux rotations et une translation suffisent pour suivre une surface quelconque , le préhenseur du MINI-MOVER 5 subira en chaque point de sa trajectoire ces trois mouvements . Les deux rotations lui permettent de s'orienter correctement face à la surface représentée localement par le plan tangent dont la normale est confondue avec l'axe Roll lorsque le positionnement est respecté. Quant à la translation , elle se fait suivant l'axe X pour garder une distance constante.

La figure IV.7 représente une configuration qui traduit cette procédure .

La pince se trouve initialement devant une surface plane dont l'axe X fait un angle  $\alpha$  par rapport à son axe Pitch et l'axe Y un angle  $\beta$  par rapport à son axe Roll. En ce point, tout comme en chaque point d'ailleurs , le capteur à ultra-sons qui est solidaire de la pince du robot subit systématiquement deux rotations appelées balayages : le premier d'angle  $45^\circ$  environ de part et d'autre de son axe Roll , le deuxième d'angle  $30^\circ$  de part et d'autre de son axe Pitch .

Au cours du premier balayage, le dispositif ultrasonore qui est géré par le calculateur, mesure et mémorise tous les deux degrés les valeurs de la distance et de l'amplitude (Valeur crete) de l'écho reçu.

A la fin de cette première opération, la pince subit le deuxième balayage. Comme précédemment, les valeurs des distances mesurées sont enregistrées dans la mémoire du calculateur, après quoi le manipulateur aura suffisamment d'informations pour orienter convenablement son effecteur.

Le vecteur OB de la figure IV.7 représente l'orientation définitive correspondant à ce point. Le trajet de l'écho ultrasonore obtenu est alors normal à la surface de la plaque métallique se trouvant face au transducteur.

La dernière phase consiste ensuite à évaluer la distance sélectionnée. La connaissance du temps écoulé entre le début d'émission et la réception du signal après réflexion sur l'objet permet de calculer la distance "d" que fait le capteur par rapport à l'objet. Cette valeur sera alors comparée à une consigne "D" fixée préalablement par l'opérateur. L'espace d'atteignabilité du robot étant assez réduit, nous avons fixé D à 15 cm.

Trois cas peuvent se présenter ( Voir Figure IV.8 ) :

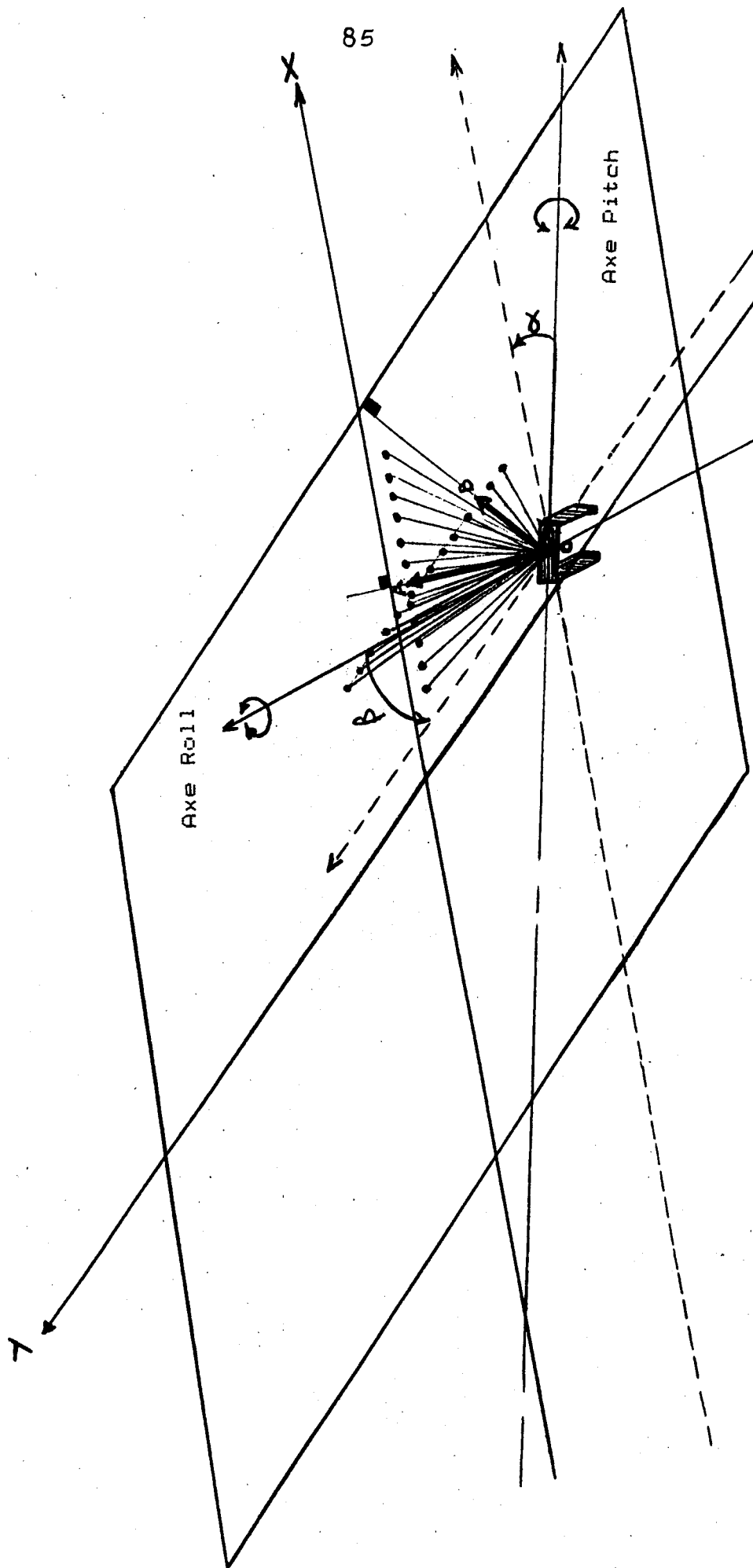


Figure IV.7 : Schématisation du balayage de la pince suivant  
 ----- ses axes Pitch et Roll .

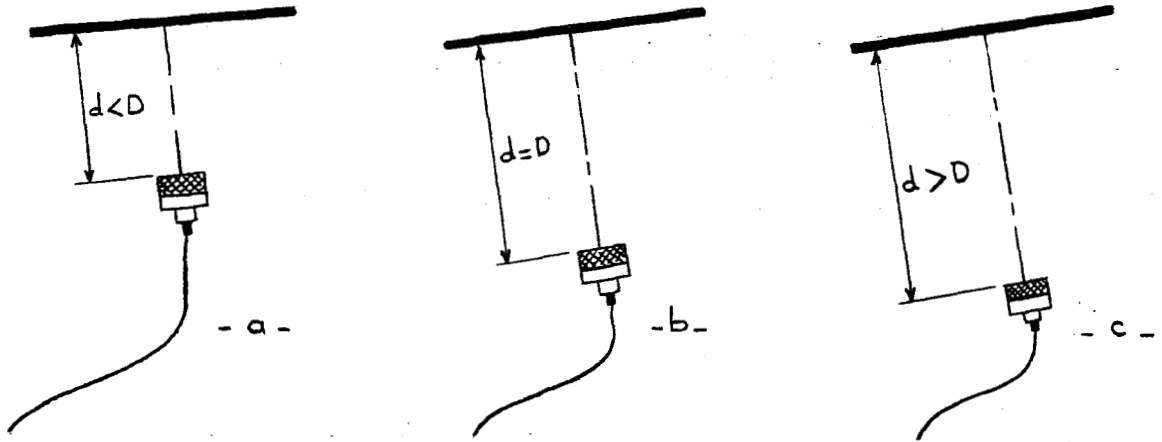


Figure IV.8 : Evaluation de la distance .

a/  $d < D$  : La distance mesurée étant inférieure à la consigne, la pince du robot recule d'une distance  $d = D - d$  puis passe au point suivant .

b/  $d = D$  : La distance étant correcte, la pince passe directement au point suivant .

c/  $d > D$  : Dans ce dernier cas possible, la pince avance d'une distance  $d = d - D$  puis continue son parcours .

Lors de nos expériences , nous avons constaté qu'il est tout à fait possible de ne pas tenir compte du balayage par rapport à l'axe Pitch. Ceci présente l'avantage de rendre les mesures non seulement plus rapides , mais aussi plus précises .

Finalement et grâce à un seul balayage , le dispositif Ultrasonore adopté permet à l'effecteur du MINI-MOVER 5 de retrouver en chaque point de sa trajectoire l'orientation correcte face à la surface à suivre , ce qui lui permet en définitive de la contourner tout en gardant une distance constante vis-à-vis d'elle .

Nous présentons dans la figure IV.9 l'organigramme de commande correspondant à ce fonctionnement .

Le programme principal fait appel à un sous-programme écrit en langage machine 6502 et dénommé E.R.A . Celui-ci a pour tâche d'assurer l'émission et la réception d'ondes ultrasonores ainsi que l'acquisition des paramètres distance et amplitude .

L'exécution de ce sous-programme permet l'émission de trois signaux binaires : D-S ; P.A ; R.A.Z et assure la lecture du signal binaire de contrôle C . Il permet également la conversion Analogique / Numérique de l'amplitude maximale du signal reçu et enfin le calcul ainsi que la mémorisation des paramètres distance et amplitude .

La figure IV.10 représente l'organigramme correspondant à ce sous-programme . Les signaux résultants sont représentés sur la figure IV.11 .

La distance capteur/objet est calculée grâce à la connaissance du temps écoulé entre l'émission et la réception de l'écho ultrasonore. Ce temps est déterminé à partir de la relation suivante :

$$t = t_1 + N.t_2 \quad (4-1)$$

- \*  $t_1$  étant le temps d'exécution des instructions machines entre le début de l'émission et le début de comptage des boucles ;
- \*  $t_2$  étant le temps d'exécution d'une boucle de comptage ;
- \*  $N$  étant le nombre de boucles d'attente séparant l'émission de la réception .

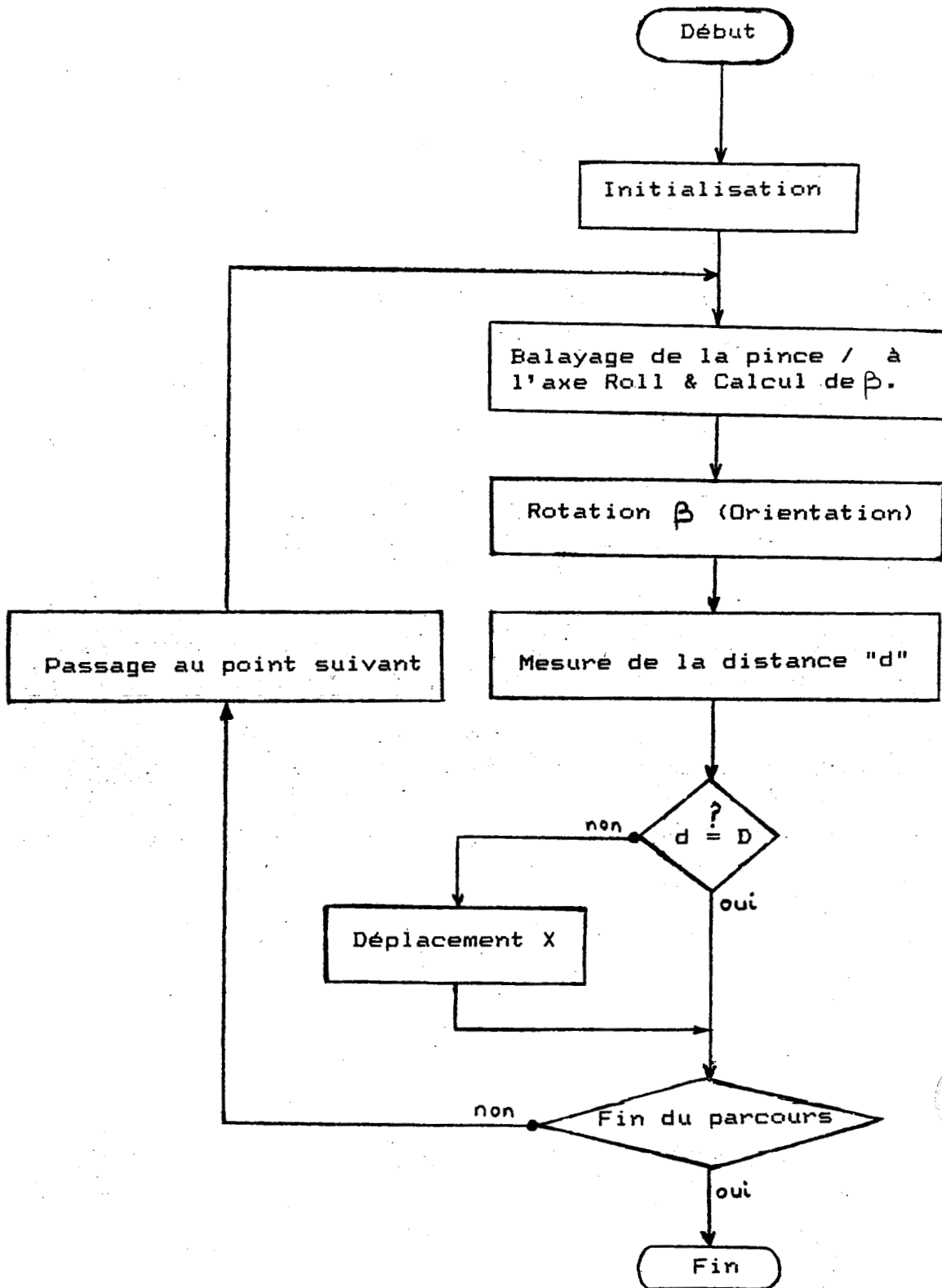


Figure IV.9 : Organigramme de suivi de surface .



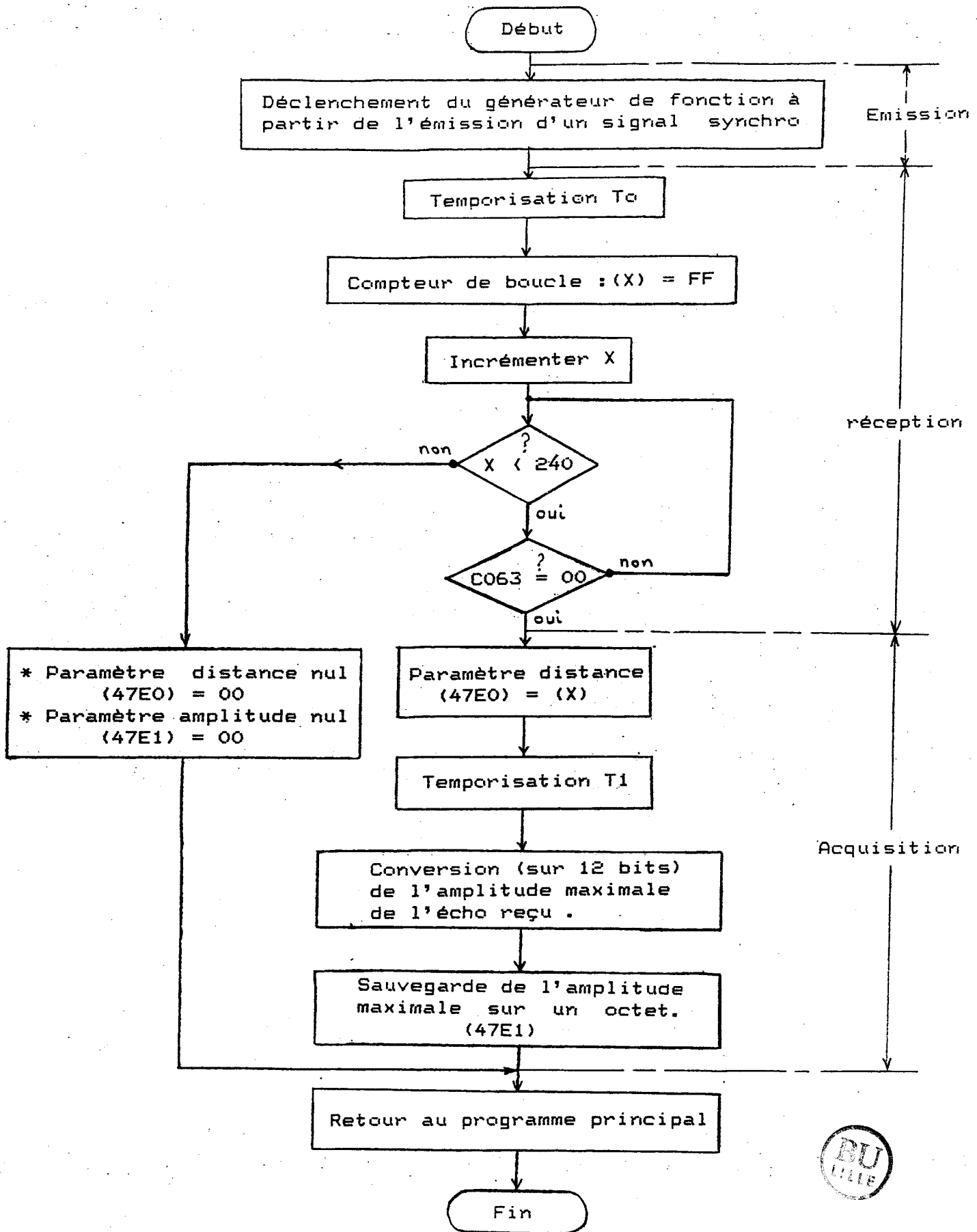


Figure IV.10 : Organigramme du sous-programme E.R.A.

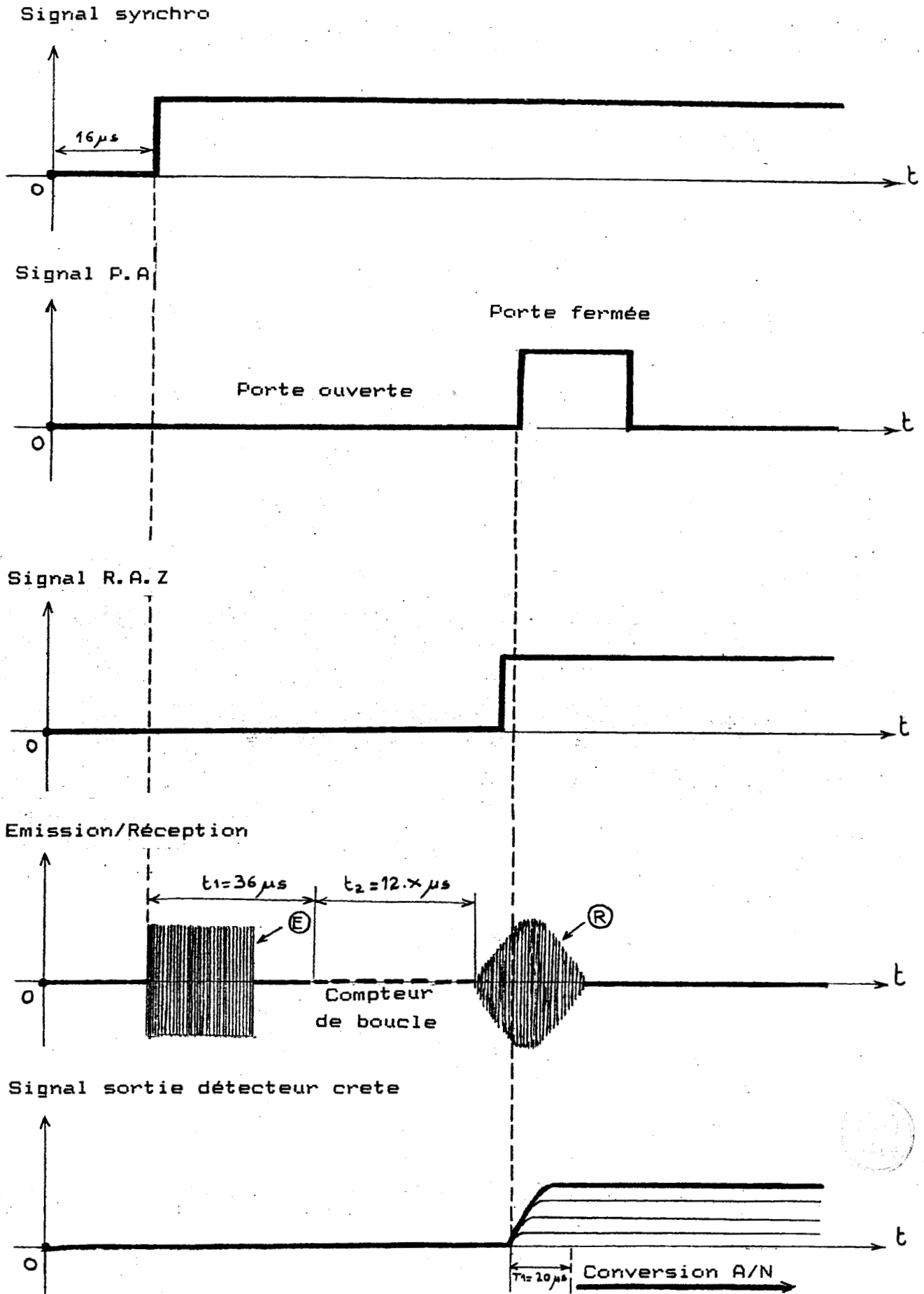


Figure IV.11: Chronogramme des signaux issus du sous-programme E.R.A

Soit  $C$  la vitesse de propagation des signaux Ultrasonores dans l'eau .

Soit  $d$  la distance capteur/objet .

Les trois grandeurs  $t$  ,  $C$  et  $d$  sont reliées par la relation suivante :

$$2.d = C.t \quad (4-2)$$

En remplaçant  $t$  par l'expression (4-1) , nous obtenons :

$$d = \frac{1}{2} . C. (t_1 + t_2) \quad (4-3)$$

Les valeurs numériques de  $C$  ,  $t_1$  et  $t_2$  sont les suivants :

$$C = 1460 \text{ m/s} \quad ; \quad t_1 = 36 \mu\text{s} \quad ; \quad t_2 = 12 \mu\text{s}$$

ce qui donne :

$$d = 0.73 . 10^{-3} . (12.N + 36) \quad (4-4)$$

$d$  est exprimée en mètres .

La détermination expérimentale de cette valeur est effectuée à une incertitude  $\Delta d$  près.  $\Delta d = 10 \text{ mm}$  (Cf. IV.5) .

Signalons par ailleurs que par suite de l'influence de perturbations ou de la grande directivité du transducteur, aucun écho n'est reçu en un ou plusieurs points de la trajectoire. Dans ce cas, le système tiendra compte de la position et de l'orientation antérieures. La réaction serait également la même en cas d'absence d'objet lors du parcours (trous) ou si la correction de la distance entraînerait la pince en un point situé au-delà de l'espace de fonctionnement du robot .

### IV.3.3 Résultats

Nous avons testé notre procédure sur une surface dont la forme est dessinée en perspective sur la figure IV.12 ci-dessous .

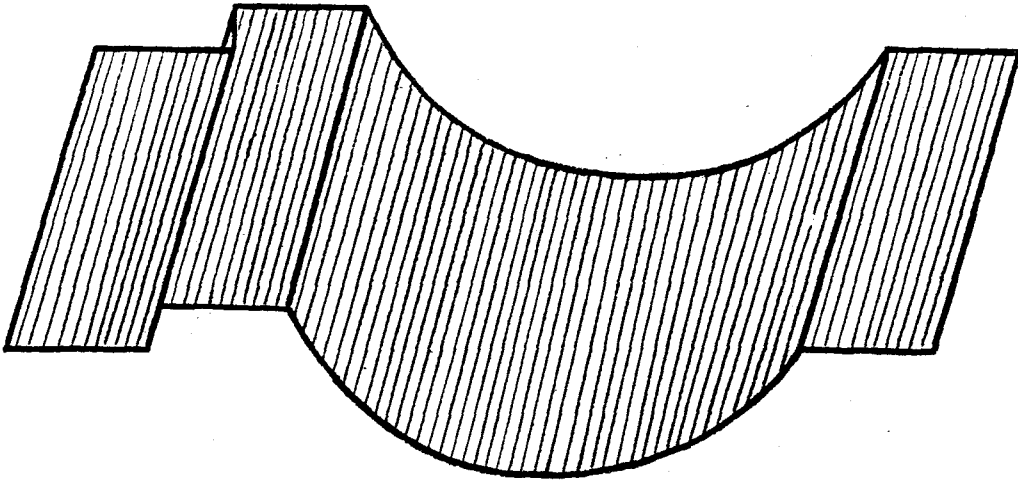


Figure IV.12 : Forme de l'objet choisi .

La figure IV.13 montre la vue de dessus de cette surface . Cette vue représente le chemin idéal que le robot devrait suivre point à point .

La figure IV.14 fait apparaître la trajectoire réellement parcourue par le robot .

Comme nous l'avons précisé antérieurement , la pince subit systématiquement un balayage en chaque point parcouru. Ceci consiste à imposer à la pince 25 orientations de part et d'autre de son axe Roll. Pour chaque orientation, le dispositif ultrasonore mesure l'amplitude de l'écho reçu, ainsi que la distance.



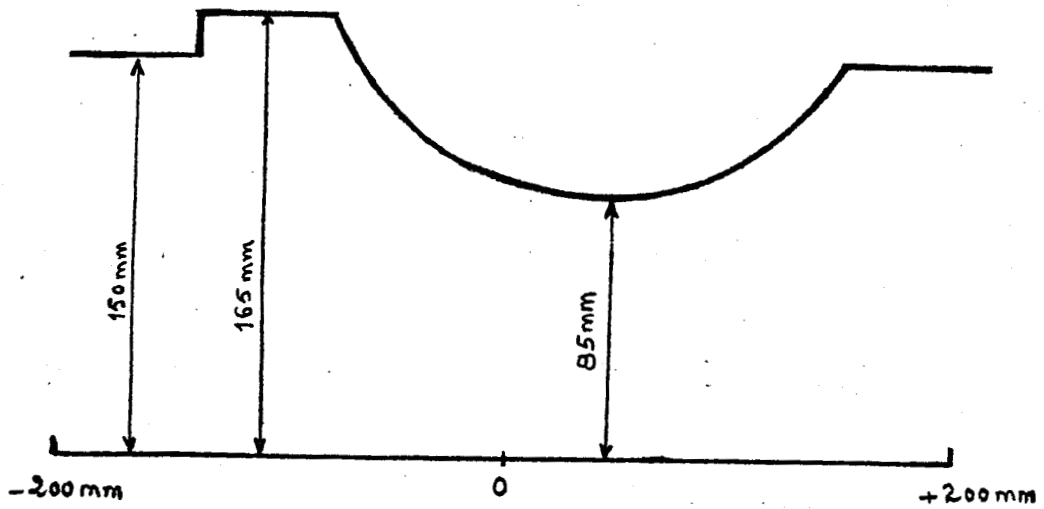


Figure IV.13 : Vue de dessus de l'objet choisi .

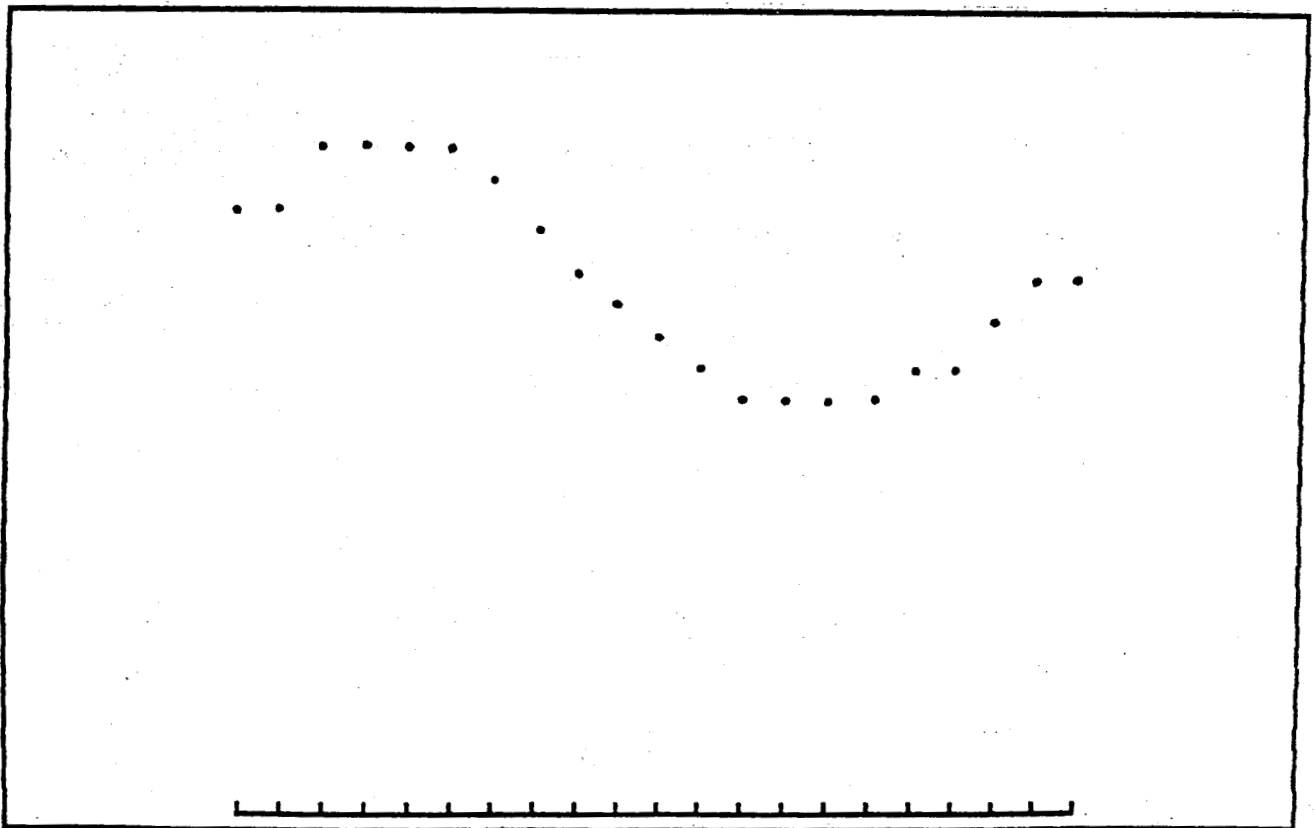


Figure IV.14 : Allure de la trajectoire réellement parcourue par le robot .

L'écho est perpendiculaire à la surface de l'objet lorsque la distance capteur/objet est minimale et non nulle (Figure IV.15) .

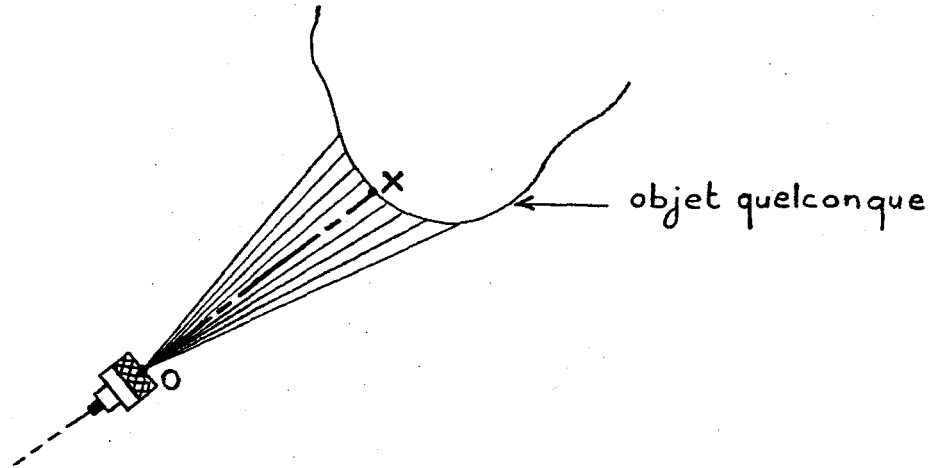


Figure IV.15 : Balayage de pince face à un objet quelconque .  
----- Sélection de la distance minimale (OX) .

Ainsi , la pince arrive à s'orienter convenablement face à l'objet à suivre . La distance minimale OX est alors déterminée.

Le tableau 3 montre les valeurs numériques des distances enregistrées en un des points de la trajectoire. Nous pouvons voir dans ce tableau que la distance minimale est égale à 16 cm. (Si en un point quelconque , il y'a plusieurs minimums, le programme sélectionne celui qui a été enregistré le premier). Cette valeur correspond à l'orientation numéro 23. La consigne D étant fixée à 15 cm , la pince du robot , devrait en ce point précis , avancer de 1 cm .

La trajectoire effectuée est finalement retranscrite sur papier après enregistrement des paramètres distances lors du mouvement du robot. Cette opération nécessite l'utilisation d'un programme de recopie d'écran et d'une imprimante graphique .

AMPLITUDE		DISTANCE
0	1	00 CM
0	2	00 CM
0	3	00 CM
0	4	00 CM
0	5	00 CM
0	6	00 CM
0	7	00 CM
0	8	00 CM
0	9	00 CM
0	10	00 CM
0	11	00 CM
0	12	00 CM
0	13	00 CM
0	14	00 CM
0	15	00 CM
0	16	00 CM
0	17	00 CM
0	18	00 CM
0	19	00 CM
0	20	00 CM
0	21	00 CM
0	22	00 CM
255	23	16 CM
43	24	17 CM
255	25	16 CM
163	26	19 CM
0	27	00 CM
255	28	16 CM
255	29	19 CM
248	30	19 CM
43	31	20 CM
255	32	18 CM
255	33	18 CM
255	34	18 CM
255	35	19 CM
0	36	00 CM
95	37	19 CM
0	38	00 CM
0	39	00 CM
0	40	00 CM
0	41	00 CM
0	42	00 CM
0	43	00 CM
0	44	00 CM
0	45	00 CM
0	46	00 CM
0	47	00 CM
0	48	00 CM
0	49	00 CM
0	50	00 CM

DISTANCE MINIMALE= 16CM

ORIENTATION CORRESPONDANTE= 23

AMPLITUDE CORRESPONDANTE= 255

Tableau 3 : Résultat du balayage effectué par la pince du robot en un des points de la trajectoire .

#### IV.4 PERCEPTION EN VUE DE RECONNAISSANCE D'OBJETS

##### IV.4.1 Position du problème

---

Nous évoquons dans ce chapitre l'aspect reconnaissance d'objets de notre manipulation . Cet aspect constitue un des éléments de base de la robotique d'aujourd'hui (perception intelligente de l'environnement) /21/ . En effet , les robots évolués , dotés d'un certain nombre de capteurs appropriés , doivent posséder les facultés nécessaires pour exécuter des tâches dans un environnement incertain /1/ .

On peut distinguer quatre phases dans une procédure d'élaboration de l'apprentissage de la reconnaissance /23/ :

- 1/ acquisition d'informations sensorielles ;
- 2/ sélection des caractéristiques pertinentes ;
- 3/ recherche automatique et formalisation des limites des classes ;
- 4/ exploitation de conclusions établies à l'étape précédente .

Des variables physiques telles que, par exemple, le son et la lumière peuvent être converties en signaux électroniques grâce à des transducteurs (microphones, photo-cellules, ...). Ces données physiques seront alors converties sous forme digitale capable d'être traitées par un ordinateur (1ère phase) .

Pour des formes d'ondes complexes telles que les ondes sonores, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques les plus utiles pour la classification de la forme de l'onde (2ème phase) .



Si le système de reconnaissance de forme conçu connaît déjà les différentes classes, l'ensemble des paramètres caractéristiques sera sélectionné lors de l'exécution de la tâche et les signaux issus des transducteurs seront alors traités afin d'en extraire les données désirées .

Cette étape étant accomplie, le système de reconnaissance de forme doit, grâce à une méthode d'identification, classifier les données obtenues (3ème phase) . Pour cela , le concepteur doit développer un classifieur qui , habituellement, se présente sous forme d'un ensemble de fonctions de décision . Celles-ci sont mises à jour à partir d'échantillons de caractéristiques différentes dont la classification est déjà connue (4ème phase) .

#### IV.4.2 Classification par la méthode de distance minimale ----- entre les représentations des formes -----

##### IV.4.2.1 Principe de la méthode -----

Si deux nuages de points sont parfaitement séparés dans un espace échantillon, une fonction de décision de la forme d'un hyperplan peut être utilisée pour séparer cet espace en deux régions .

Une technique peut alors être développée pour déterminer une fonction de décision qui séparera linéairement ces deux nuages de points . D'abord , il faut que les deux points qui représentent les valeurs typiques de chaque nuage doivent être déterminés. Ces deux points sont appelés prototypes ou centres du nuage puisqu'ils se situent normalement à une distance

moyenne des points du nuage qu'ils représentent . Chacun de ces deux points prototypes peut être trouvé en calculant la moyenne de  $m$  points regroupés dans le nuage correspondant.

Soit  $Z$  cette moyenne :

$$Z = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_i \quad ; \quad k = 1, 2 \quad (2 \text{ classes}) \quad (4-5)$$

$X$  est un point de l'espace échantillon (Nuage). Il est représenté par un vecteur  $\underline{X}_i / \underline{X}_i^T = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, 1)$ .

$n$  étant le nombre de caractéristiques du point échantillon .

Le "1" ajouté est nécessaire pour la compatibilité de la suite du raisonnement concernant les fonctions de décision .

Ensuite , pour un échantillon donné , certaines mesures de ressemblance par rapport aux prototypes sont nécessaires .

L'utilisation des fonctions distance comme outil de classification s'avère alors commode et surtout bien adapté . Ceci provient du fait que la façon la plus évidente pour établir une mesure de ressemblance entre les vecteurs de mesure consiste à déterminer leur proximité ; ces vecteurs sont considérés comme étant des points dans un espace Euclidien .

L'exemple de la figure IV.16 permet de conclure intuitivement que le point  $x$  appartient à la classe  $C2$  rien que parce qu'il est plus près de  $C2$  plutôt que de  $C1$  .

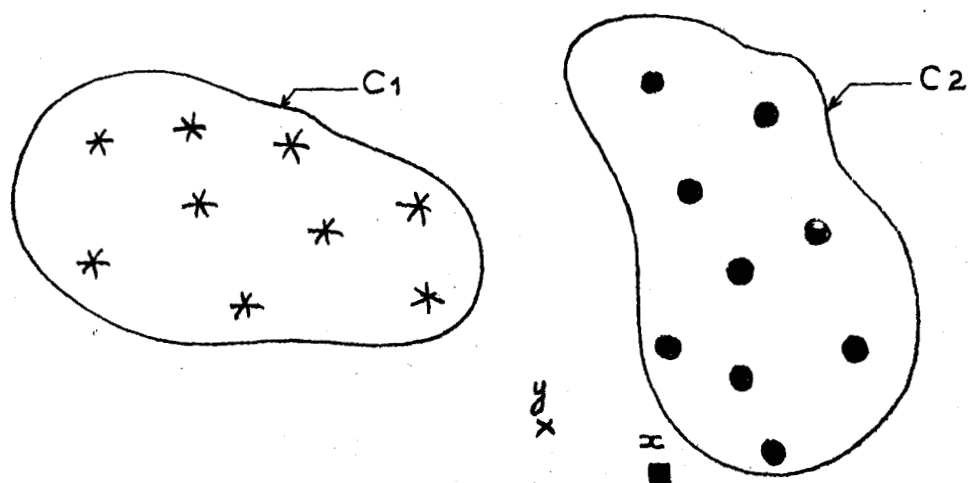


Figure IV.16 : Exemple de classification .

Pour que notre méthode aboutisse à des résultats probants , il faut que les éléments de mêmes caractéristiques soient bien regroupés et forment une classe parfaitement disjointe vis-à-vis des autres. Cependant, il est un peu plus difficile de classifier certains caractères. Le cas du point  $y$  de la figure IV.16 le prouve bien .

C'est alors que la classification par distance minimale est conçue, ce qui constitue un outil très intéressant pour résoudre le problème de classification /22/ .

Soulignons enfin que cette méthode est aussi valable dans le cas de plusieurs classes d'échantillons .

#### IV.4.2.2 Fonctions décision

Il s'agit d'établir un classifieur susceptible d'affecter tout échantillon à sa classe d'appartenance. Pour cela, il existe un moyen capable d'engendrer une fonction permettant de séparer deux classes, ou plusieurs fonctions quand il est question d'en séparer plus. Dans cette perspective , seules les fonctions de décision linéaires sont considérées. Néanmoins, l'extrapolation de



ces concepts aux fonctions non linéaires reste possible .

Dans un espace bidimensionnel , ces fonctions sont des droites. Elles peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$x_1 - a.x_2 - b = 0$$

ou encore

$$w_1.x_1 + w_2.x_2 + w_3 = 0$$

où  $a$  est la pente de la droite ;  $w_1 = 1$  ;  $w_2 = -a$  ;  $w_3 = -b$

Dans un espace de dimension  $n$  , les fonctions de décision sont des hyperplans, c'est-à-dire de la forme :

$$w_1.x_1 + w_2.x_2 + \dots + w_n.x_n + w_{n+1} = 0 \quad (4-6)$$

Ainsi , cette équation peut se traduire sous la forme vectorielle suivante :

$$\underline{W}^T . \underline{X} = 0 \quad (4-7)$$

où  $\underline{W}^T = (w_1 , w_2 , \dots , w_n , w_{n+1})$

et  $\underline{X}^T = (x_1 , x_2 , \dots , x_n , 1)$

$\underline{W}$  est appelé vecteur de pondération ou vecteur poids , ses composantes sont les coefficients de la fonction décision. Elles sont également appelées facteurs de pondération ou poids .

En somme , déterminer la fonction décision revient à déterminer les valeurs de ces coefficients .

#### IV.4.2.3 Détermination de la fonction décision

---

Soient  $\underline{X}_m$  le vecteur de mesures établies expérimentalement

&  $\underline{Z}_k$  les prototypes associés aux classes  $C_k$  ;  
 $k = 1, 2, \dots, k$

La distance Euclidienne entre un vecteur de mesures quelconque  $\underline{X}_m$  et la kème classe est donnée par la relation suivante :

$$D(k) = \|\underline{X}_m - \underline{Z}_k\| = \sqrt{(\underline{X}_m - \underline{Z}_k)^T \cdot (\underline{X}_m - \underline{Z}_k)} \quad (4-8)$$

$\underline{X}_m$  est affecté à la classe  $C_k$  si  $D(k) < D(1) \quad \forall 1 \neq k$ .

L'expression (4-8) peut être exprimée sous une forme plus aisée. Pour cela, nous élèverons ses deux termes au carré. Ceci nous conduit à :

$$\begin{aligned} D^2(k) &= \|\underline{X}_m - \underline{Z}_k\|^2 = (\underline{X}_m - \underline{Z}_k)^T \cdot (\underline{X}_m - \underline{Z}_k) \\ &= \underline{X}_m^T \cdot \underline{X}_m - 2 \cdot \underline{X}_m^T \cdot \underline{Z}_k + \underline{Z}_k^T \cdot \underline{Z}_k \\ &= \underline{X}_m^T \cdot \underline{X}_m - 2 \cdot (\underline{X}_m^T \cdot \underline{Z}_k - 0.5 \cdot \underline{Z}_k^T \cdot \underline{Z}_k) \end{aligned}$$

Comme  $\underline{X}_m^T \cdot \underline{X}_m$  est indépendant du prototype  $\underline{Z}_k$ , choisir le minimum  $D^2(k)$  revient à choisir le maximum  $(\underline{X}_m^T \cdot \underline{Z}_k - 0.5 \cdot \underline{Z}_k^T \cdot \underline{Z}_k)$ .

Ainsi, nous fondons la décision :

$$D(k)_{\underline{X}_m} = \underline{X}_m^T \cdot \underline{Z}_k - 0.5 \cdot \underline{Z}_k^T \cdot \underline{Z}_k \quad (4-9)$$

où le vecteur de mesures  $\underline{X}_m$  appartient à la classe  $C_k$  si :

$$D(k)_{\underline{X}_m} > D(1)_{\underline{X}_m} \quad \forall 1 \neq k$$

$\underline{Z}_k$  et  $\underline{X}_m$  sont naturellement de même dimension.

$$\underline{Z}_k^T = (z_1, z_2, \dots, z_n)$$

Une fois développée, l'expression (4-9) devient :

$$D(k)_{\underline{X}_m} = z_1 \cdot x_1 + z_2 \cdot x_2 + \dots + z_n \cdot x_n - 0.5 \cdot \underline{Z}_k \cdot \underline{Z}_k \quad (4-10)$$

Les coefficients du vecteur pondération  $\underline{W}$  peuvent alors en être déduits par identification . Il suffit pour cela de comparer les expressions (4-6) et (4-10) ; il en résulte :

$$\begin{cases} w_i = z_i & ; & i = 1, 2, \dots, n \\ w_{n+1} = - 0.5 \cdot \underline{Z_k} \cdot \underline{Z_k} \end{cases}$$

#### IV.4.3 Mise en oeuvre expérimentale

---

##### IV.4.3.1 Description symbolique

---

Nous allons illustrer notre méthode sur des objets de forme simple , c'est-à-dire de type plan ou cylindre ; et de forme hybride , c'est-à-dire à la fois plane et cylindrique. Ainsi , et comme le montre le tableau 4 , l'objet à reconnaître sera caractérisé par sa nature (N) qui peut donc être soit simple (S) , soit hybride (H).

D'autre part , tout objet (N) sera défini géométriquement. Pour les objets de type (S) , nous préciserons exactement sa forme : plane (P) ou cylindrique (C) .

Nous indiquerons sous forme d'indice d'autres détails concernant cette forme . Celle-ci pouvant être droite (D) ou inclinée (I) quand elle est plane , convexe (Cx) ou concave (Cv) quand elle est cylindrique .

Les objets de type (H) seront eux-aussi défini géométriquement et de la même manière , sauf que leur définition porte sur leurs deux formes .

Outre sa nature , l'objet sera par conséquent spécifié par

<u>NATURE (N)</u>	SIMPLE (S)			HYBRIDE (H)
<u>GÉOMETRIE (G<sub>α</sub>)</u>	PLAN (P)		CYLINDRE (C)	
	DROIT (D)	INCLINE (I)	CONVEXE (Cx)	CONCAVE (Cy)
	$G_{\alpha} = (G1_{\beta}, G2_{\gamma})$			
<u>DIMENSION (D)</u>	D = ( 0 , N ) ;			$\square \begin{cases} \square_{\beta} \\ \square_{\gamma} \end{cases}$
<u>TOPOLOGIE (T)</u>				ANGLE SAILLANT (T1)
				ANGLE RENTRANT (T2)

Tableau 4 : Caractéristiques d'un objet .

sa géométrie (G ).

Pour mieux le définir , nous ajouterons une autre indication sur l'objet utilisé, à savoir sa dimension (D). Nous entendrons par là si l'objet en question présente un bord ou non . Le cas échéant , nous expliciterons si celui-ci est à gauche du capteur ou à sa droite (Og ou Od) .

Enfin , une information supplémentaire ne concernant cette fois-ci que les objets de type (H), en l'occurrence, leur topologie (T) . En effet , quand l'objet se présente sous forme de deux plans , nous indiquerons leurs épaulements. Ceux-ci peuvent avoir l'une de ces deux configurations suivantes vis-à-vis du capteur ; soit sous forme d'angle saillant (T1), soit sous forme d'angle rentrant (T2) .

Précisons enfin que le capteur ultrasonore effectue son balayage régulièrement dans le sens des aiguilles d'une montre .

Cette description est formalisée par l'expression suivante:

$$N ( G_{\alpha} ; D ; T )$$

(4-11)

avec :

- \*  $N = ( S , H ) ;$
- \*  $G ; G1 ; G2 = ( P , C ) ;$
- \*  $\alpha = \beta = \delta = ( \rho , I , Cx , Cv )$  avec  $I = ( I^+ , I^- ) ;$
- \*  $D = ( O , N )$  avec  $O = ( Og , Od ) ;$
- \*  $T = ( T1 , T2 ) .$



Remarques :

-----

a/ Dans le cas d'un objet de type (H) :  $G_{\alpha} = (G1_{\beta}, G2_{\gamma})$  .

b/ Dans le cas d'un objet du type (S) , le paramètre T est inexistant .

c/  $l = (I^+, I^-)$  :

{	$I^+$	→	Inclinaison positive . (Sens de rotation du capteur)
{	$I^-$	→	Inclinaison négative .

#### IV.4.3.2 Expérimentation

-----

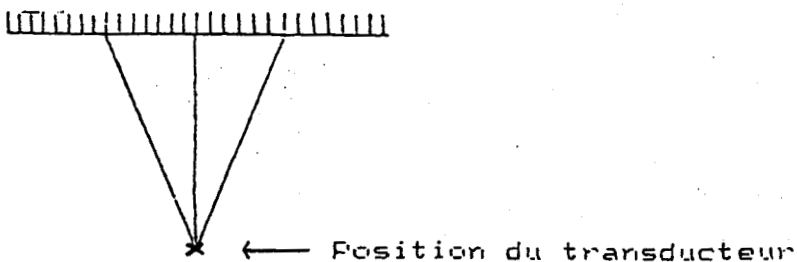
Elle se déroule dans un milieu sous-marin . Les coordonnées de l'organe terminal du robot sont :

$X = 170 \text{ mm}$  ;  $Y = 80 \text{ mm}$  ;  $Z = 500 \text{ mm}$  ;  $P = 0$  ;  $R = 0$  .

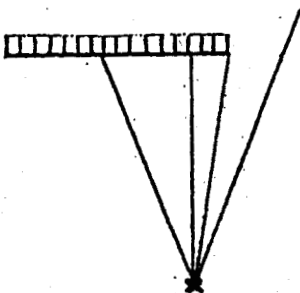
La pince bidigitale du robot est muni d'un transducteur ultrasonore émetteur/récepteur (Cf. IV.2.2.1) .

La manipulation consiste à reconnaître la forme d'un objet grâce à la méthode de classification décrite au début de ce chapitre. Elle est réalisée sur des objets métalliques spécifiés compte-tenu de l'expression (4-11) :

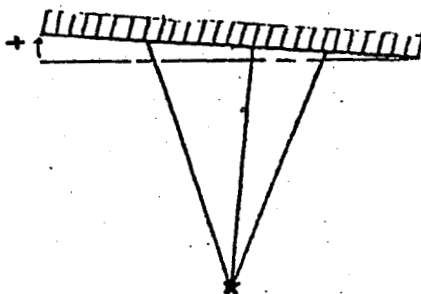
a)  $S(P_0; N)$ : Objet simple, plan, droit, et sans phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*



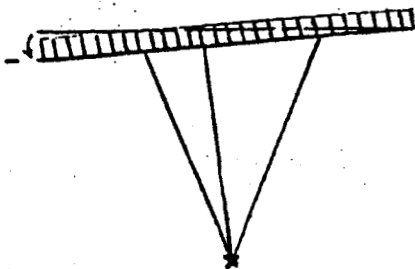
b)  $S(P_0; O_1)$ : Objet simple, plan, droit et avec phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*



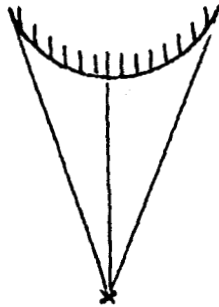
c)  $S(P_1; N)$ : Objet simple, plan, incliné positivement et sans phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*  
 de bord.  
 \*\*\*\*\*



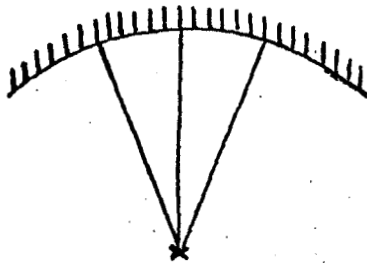
d)  $S(P_1; N)$ : Objet simple, plan, incliné négativement et sans phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*  
 de bord.  
 \*\*\*\*\*



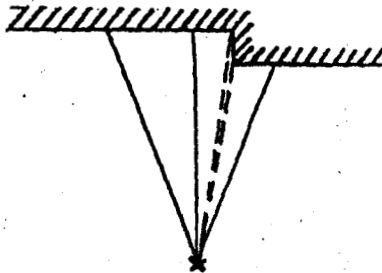
e)  $S(C_{cx}; N)$ : Objet simple, cylindrique, convexe et sans phénomène de bord  
 \*\*\*\*\*



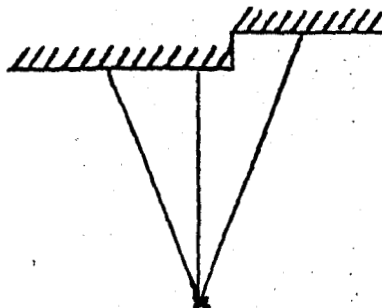
f)  $S(C_{cv}, N)$ : Objet simple, cylindrique, concave et sans phénomène de bord  
 \*\*\*\*\*



g)  $H(P_d, P_d; N; T1)$ : Objet hybride composé de deux plans droits formant un angle sortant et sans phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*



h)  $H(P_d, P_d; N; T2)$ : Objet hybride composé de deux plans droits formant un angle rentrant et sans phénomène de bord.  
 \*\*\*\*\*



#### IV.4.4 Résultats

---

Avant de présenter les résultats numériques obtenus expérimentalement, soulignons que la pince du robot reste constamment à une distance fixe de 200 mm (+/- 5 mm) vis-à-vis de l'objet à reconnaître.

Le transducteur, qui est solidaire de la pince, effectue un balayage de +/- 12° de part et d'autre de son axe longitudinal. Ce balayage est réalisé par pas de 0.5° degré. Le transducteur employé est assez directif, son angle d'ouverture est égal à +/- 4 degrés.

Pour chaque objet, nous noterons la valeur de l'amplitude (en Volts) du signal ultrasonore reçu correspondant à chaque pas, et obtiendrons par suite l'allure de la fonction Amplitude (écho) =  $f(\theta)$ .

Afin de mieux exploiter les valeurs numériques issues de mesures effectuées, nous leur appliquerons la Transformation de Fourier Rapide (T.F.R) /48/, laquelle nous permet d'avoir accès à des valeurs plus discriminantes pour la classification.

Les tableaux 5 jusqu'à 12 nous montrent les résultats numériques de mesures faites sur les huit objets décrits précédemment, ainsi que leurs T.F.R correspondant.

Les figures IV.17 jusqu'à IV.24 nous montrent les allures Amplitude =  $f(\theta)$  relatives à ces huit objets.

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 4.98
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 4.96
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 4.68
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 4.29
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 3.72
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 3.17
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 2.52
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 1.82
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= .31
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 0
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= 0
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= 0
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= 0
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= 0
AMPL(-9)= 0		AMPL(14)= 0
AMPL(-8)= .27		AMPL(15)= 0
AMPL(-7)= 1.72		AMPL(16)= 0
AMPL(-6)= 2.37		AMPL(17)= 0
AMPL(-5)= 2.88		AMPL(18)= 0
AMPL(-4)= 3.52		AMPL(19)= 0
AMPL(-3)= 4.07		AMPL(20)= 0
AMPL(-2)= 4.52		AMPL(21)= 0
AMPL(-1)= 4.82		AMPL(22)= 0

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.933		T(17)=3E-03
T(2)=.751		T(18)=.016
T(3)=.565		T(19)=.024
T(4)=.258		T(20)=.019
T(5)=.064		T(21)=5E-03
T(6)=.047		T(22)=9E-03
T(7)=.074		T(23)=.017
T(8)=.045		T(24)=.016
T(9)=4E-03		T(25)=7E-03
T(10)=.04		T(26)=4E-03
T(11)=.048		T(27)=.013
T(12)=.029		T(28)=.014
T(13)=2E-03		T(29)=8E-03
T(14)=.026		T(30)=2E-03
T(15)=.034		T(31)=.011
T(16)=.023		T(32)=.015

Tableau 5 : Objet référencé "S(P<sub>0</sub> ; N)" .

-----

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 2.43
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 2.43
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 2.23
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 1.96
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 0
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 0
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 0
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 0
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= 0
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 0
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= 0
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= 0
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= 0
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= 0
AMPL(-9)= 0		AMPL(14)= 0
AMPL(-8)= 0		AMPL(15)= 0
AMPL(-7)= 0		AMPL(16)= 0
AMPL(-6)= 1.35		AMPL(17)= 0
AMPL(-5)= 1.62		AMPL(18)= 0
AMPL(-4)= 1.92		AMPL(19)= 0
AMPL(-3)= 2.07		AMPL(20)= 0
AMPL(-2)= 2.23		AMPL(21)= 0
AMPL(-1)= 2.31		AMPL(22)= 0

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.965		T(17)=.087
T(2)=.865		T(18)=.058
T(3)=.713		T(19)=.021
T(4)=.529		T(20)=.032
T(5)=.336		T(21)=.063
T(6)=.161		T(22)=.079
T(7)=.062		T(23)=.076
T(8)=.121		T(24)=.057
T(9)=.169		T(25)=.027
T(10)=.173		T(26)=.023
T(11)=.14		T(27)=.051
T(12)=.085		T(28)=.071
T(13)=.03		T(29)=.075
T(14)=.048		T(30)=.063
T(15)=.084		T(31)=.036
T(16)=.098		T(32)=.011

Tableau 6 : Objet référencé "S(P<sub>0</sub> ; Od)" .

-----



AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 0		
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 0		
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 1.68		
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 2.23		
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 2.78		
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 3.31		
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 3.8		
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 4.25	T(1)=.93	T(17)=.017
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= 4.37	T(2)=.742	T(18)=.031
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 4.5	T(3)=.49	T(19)=.026
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= 4.43	T(4)=.244	T(20)=8E-03
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= 4.33	T(5)=.062	T(21)=.014
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= 3.82	T(6)=.044	T(22)=.023
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= 3.29	T(7)=.057	T(23)=.016
AMPL(-9)= 0		AMPL(14)= 2.37	T(8)=.028	T(24)=7E-03
AMPL(-8)= 0		AMPL(15)= 2.11	T(9)=.033	T(25)=.02
AMPL(-7)= 0		AMPL(16)= 1.58	T(10)=.049	T(26)=.024
AMPL(-6)= 0		AMPL(17)= 1.29	T(11)=.036	T(27)=.014
AMPL(-5)= 0		AMPL(18)= 0	T(12)=2E-03	T(28)=7E-03
AMPL(-4)= 0		AMPL(19)= 0	T(13)=.032	T(29)=.025
AMPL(-3)= 0		AMPL(20)= 0	T(14)=.047	T(30)=.032
AMPL(-2)= 0		AMPL(21)= 0	T(15)=.038	T(31)=.023
AMPL(-1)= 0		AMPL(22)= 0	T(16)=.011	T(32)=9E-03

## RESULTAT DE LA T.F.R

Tableau 7 : Objet référencé "S(P<sub>T+</sub>; N)" .

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 0		
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 0		
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 0		
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 0		
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 0		
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 0		
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 0		
AMPL(-16)= .27		AMPL(7)= 0	T(1)=.933	T(17)=.01
AMPL(-15)= 2.05		AMPL(8)= 0	T(2)=.751	T(18)=.016
AMPL(-14)= 2.58		AMPL(9)= 0	T(3)=.503	T(19)=.032
AMPL(-13)= 3.13		AMPL(10)= 0	T(4)=.253	T(20)=.03
AMPL(-12)= 3.6		AMPL(11)= 0	T(5)=.056	T(21)=.015
AMPL(-11)= 4.03		AMPL(12)= 0	T(6)=.06	T(22)=9E-03
AMPL(-10)= 4.27		AMPL(13)= 0	T(7)=.087	T(23)=.021
AMPL(-9)= 4.5		AMPL(14)= 0	T(8)=.055	T(24)=.021
AMPL(-8)= 4.47		AMPL(15)= 0	T(9)=.012	T(25)=.01
AMPL(-7)= 4.29		AMPL(16)= 0	T(10)=.044	T(26)=6E-03
AMPL(-6)= 4.17		AMPL(17)= 0	T(11)=.055	T(27)=.02
AMPL(-5)= 3.66		AMPL(18)= 0	T(12)=.034	T(28)=.023
AMPL(-4)= 3.01		AMPL(19)= 0	T(13)=2E-03	T(29)=.014
AMPL(-3)= 2.54		AMPL(20)= 0	T(14)=.033	T(30)=5E-03
AMPL(-2)= 2.13		AMPL(21)= 0	T(15)=.046	T(31)=.016
AMPL(-1)= 1.41		AMPL(22)= 0	T(16)=.036	T(32)=.022

## RESULTAT DE LA T.F.R

Tableau 8 : Objet référencé "S(P<sub>T-</sub>; N)" .

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 2.9
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 2.88
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 2.78
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 2.64
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 2.47
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 2.01
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 1.74
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 1.41
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= 0
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 0
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= 0
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= 0
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= 0
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= 0
AMPL(-9)= 0		AMPL(14)= 0
AMPL(-8)= 0		AMPL(15)= 0
AMPL(-7)= 0		AMPL(16)= 0
AMPL(-6)= 1.39		AMPL(17)= 0
AMPL(-5)= 1.6		AMPL(18)= 0
AMPL(-4)= 2.13		AMPL(19)= 0
AMPL(-3)= 2.27		AMPL(20)= 0
AMPL(-2)= 2.62		AMPL(21)= 0
AMPL(-1)= 2.84		AMPL(22)= 0

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.939		T(17)=.042
T(2)=.771		T(18)=.014
T(3)=.537		T(19)=.021
T(4)=.289		T(20)=.041
T(5)=.08		T(21)=.042
T(6)=.056		T(22)=.023
T(7)=.109		T(23)=9E-03
T(8)=.093		T(24)=.033
T(9)=.037		T(25)=.044
T(10)=.023		T(26)=.036
T(11)=.061		T(27)=.012
T(12)=.064		T(28)=.018
T(13)=.037		T(29)=.039
T(14)=5E-03		T(30)=.043
T(15)=.039		T(31)=.029
T(16)=.053		T(32)=.011

Tableau 9 : Objet référencé "S(Ccx ; N)" .

-----

AMPL(-23)= 5		AMPL(0)= 5
AMPL(-22)= 5		AMPL(1)= 4.94
AMPL(-21)= 5		AMPL(2)= 5
AMPL(-20)= 4.92		AMPL(3)= 5
AMPL(-19)= 4.92		AMPL(4)= 5
AMPL(-18)= 5		AMPL(5)= 5
AMPL(-17)= 4.94		AMPL(6)= 5
AMPL(-16)= 5		AMPL(7)= 5
AMPL(-15)= 4.92		AMPL(8)= 5
AMPL(-14)= 4.92		AMPL(9)= 4.94
AMPL(-13)= 4.9		AMPL(10)= 5
AMPL(-12)= 5		AMPL(11)= 4.92
AMPL(-11)= 5		AMPL(12)= 5
AMPL(-10)= 5		AMPL(13)= 5
AMPL(-9)= 5		AMPL(14)= 4.92
AMPL(-8)= 5		AMPL(15)= 5
AMPL(-7)= 5		AMPL(16)= 5
AMPL(-6)= 5		AMPL(17)= 5
AMPL(-5)= 5		AMPL(18)= 5
AMPL(-4)= 5		AMPL(19)= 5
AMPL(-3)= 5		AMPL(20)= 5
AMPL(-2)= 5		AMPL(21)= 5
AMPL(-1)= 5		AMPL(22)= 5

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.259		T(17)=.02
T(2)=.198		T(18)=4E-03
T(3)=.12		T(19)=.011
T(4)=.039		T(20)=.022
T(5)=.024		T(21)=.023
T(6)=.057		T(22)=.012
T(7)=.058		T(23)=3E-03
T(8)=.036		T(24)=.014
T(9)=5E-03		T(25)=.021
T(10)=.024		T(26)=.017
T(11)=.038		T(27)=4E-03
T(12)=.032		T(28)=7E-03
T(13)=.014		T(29)=.016
T(14)=5E-03		T(30)=.019
T(15)=.023		T(31)=.012
T(16)=.028		T(32)=1E-03

Tableau 10 : Objet référencé "S(Ccv ; N)" .

-----

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 4.98
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 4.11
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 4.7
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 4.25
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 3.72
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 3.33
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 2.56
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 2
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= 1.43
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 1.11
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= .74
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= .58
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= .43
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= .31
AMPL(-9)= 0		AMPL(14)= 0
AMPL(-8)= 0		AMPL(15)= 0
AMPL(-7)= .29		AMPL(16)= 0
AMPL(-6)= 2.27		AMPL(17)= 0
AMPL(-5)= 2.76		AMPL(18)= 0
AMPL(-4)= 3.13		AMPL(19)= 0
AMPL(-3)= 3.43		AMPL(20)= 0
AMPL(-2)= 3.92		AMPL(21)= 0
AMPL(-1)= 4		AMPL(22)= 0

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.912		T(17)=.019
T(2)=.688		T(18)=.017
T(3)=.418		T(19)=6E-03
T(4)=.195		T(20)=.016
T(5)=.066		T(21)=.026
T(6)=.028		T(22)=.029
T(7)=.052		T(23)=.032
T(8)=.062		T(24)=.033
T(9)=.046		T(25)=.026
T(10)=.033		T(26)=.016
T(11)=.04		T(27)=.01
T(12)=.038		T(28)=.016
T(13)=.031		T(29)=.028
T(14)=.034		T(30)=.035
T(15)=.031		T(31)=.034
T(16)=.02		T(32)=.031

Tableau 11 : Objet référencé " $H(P_D, P_D ; N ; T1)$ ".

-----

AMPL(-23)= 0		AMPL(0)= 4
AMPL(-22)= 0		AMPL(1)= 3.76
AMPL(-21)= 0		AMPL(2)= 3.41
AMPL(-20)= 0		AMPL(3)= 3.05
AMPL(-19)= 0		AMPL(4)= 2.63
AMPL(-18)= 0		AMPL(5)= 2.31
AMPL(-17)= 0		AMPL(6)= 1.92
AMPL(-16)= 0		AMPL(7)= 1.58
AMPL(-15)= 0		AMPL(8)= 1.39
AMPL(-14)= 0		AMPL(9)= 0
AMPL(-13)= 0		AMPL(10)= 0
AMPL(-12)= 0		AMPL(11)= 0
AMPL(-11)= 0		AMPL(12)= 0
AMPL(-10)= 0		AMPL(13)= 0
AMPL(-9)= 1.29		AMPL(14)= 0
AMPL(-8)= 1.5		AMPL(15)= 0
AMPL(-7)= 1.94		AMPL(16)= 0
AMPL(-6)= 2.45		AMPL(17)= 0
AMPL(-5)= 2.74		AMPL(18)= 0
AMPL(-4)= 3.21		AMPL(19)= 0
AMPL(-3)= 3.52		AMPL(20)= 0
AMPL(-2)= 3.72		AMPL(21)= 0
AMPL(-1)= 3.94		AMPL(22)= 0

RESULTAT DE LA T.F.R

-----

T(1)=.911		T(17)=.021
T(2)=.678		T(18)=8E-03
T(3)=.387		T(19)=.026
T(4)=.134		T(20)=.025
T(5)=.018		T(21)=4E-03
T(6)=.053		T(22)=.02
T(7)=.016		T(23)=.032
T(8)=.035		T(24)=.022
T(9)=.057		T(25)=2E-03
T(10)=.038		T(26)=.023
T(11)=6E-03		T(27)=.027
T(12)=.031		T(28)=.012
T(13)=.031		T(29)=.01
T(14)=6E-03		T(30)=.024
T(15)=.023		T(31)=.019
T(16)=.034		T(32)=2E-03

Tableau 12 : Objet référencé " $H(P_D, P_D ; N ; T2)$ ".

-----





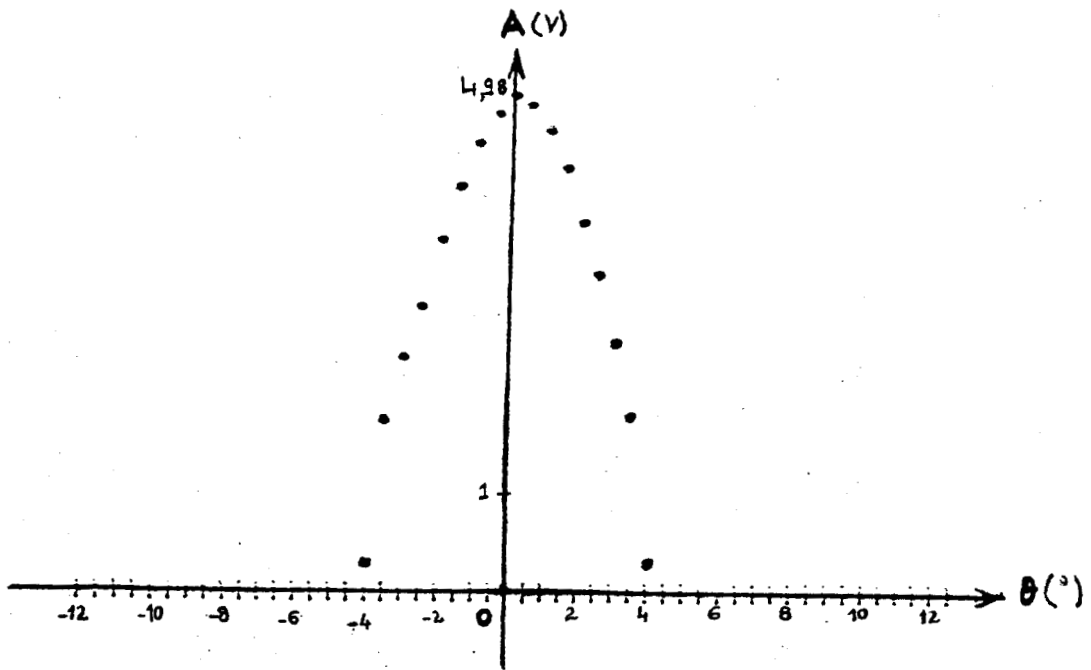


Figure IV.17 : "S(P<sub>D</sub>; N)"

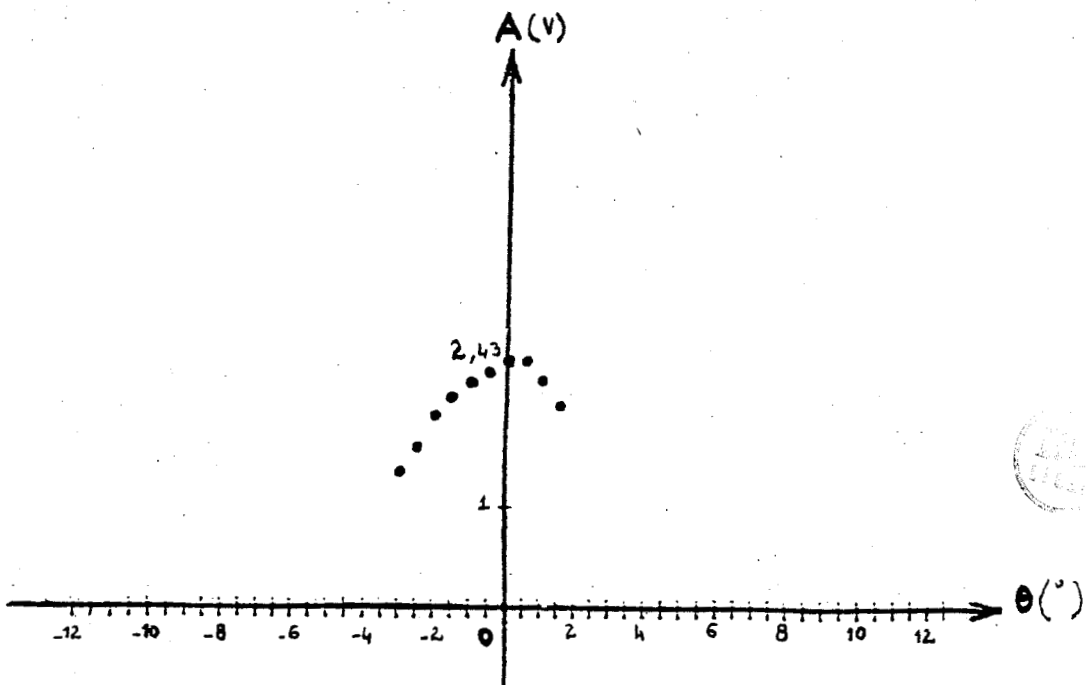


Figure IV.18 : "S(P<sub>D</sub>; Od)"

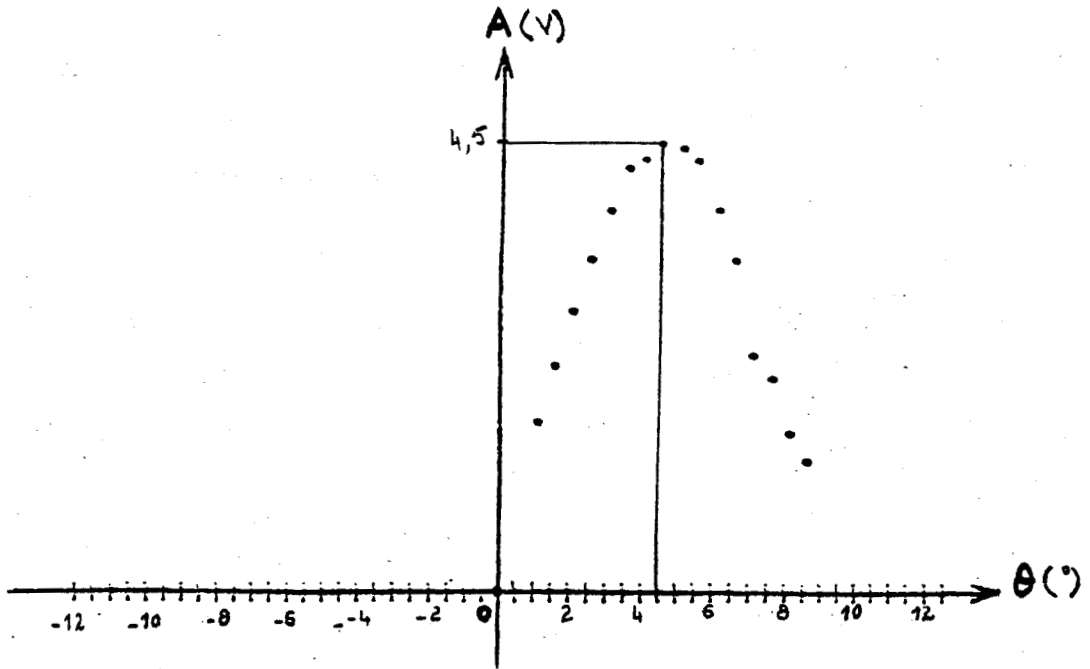


Figure IV.19 : " $S(P_{I+}; N)$ "

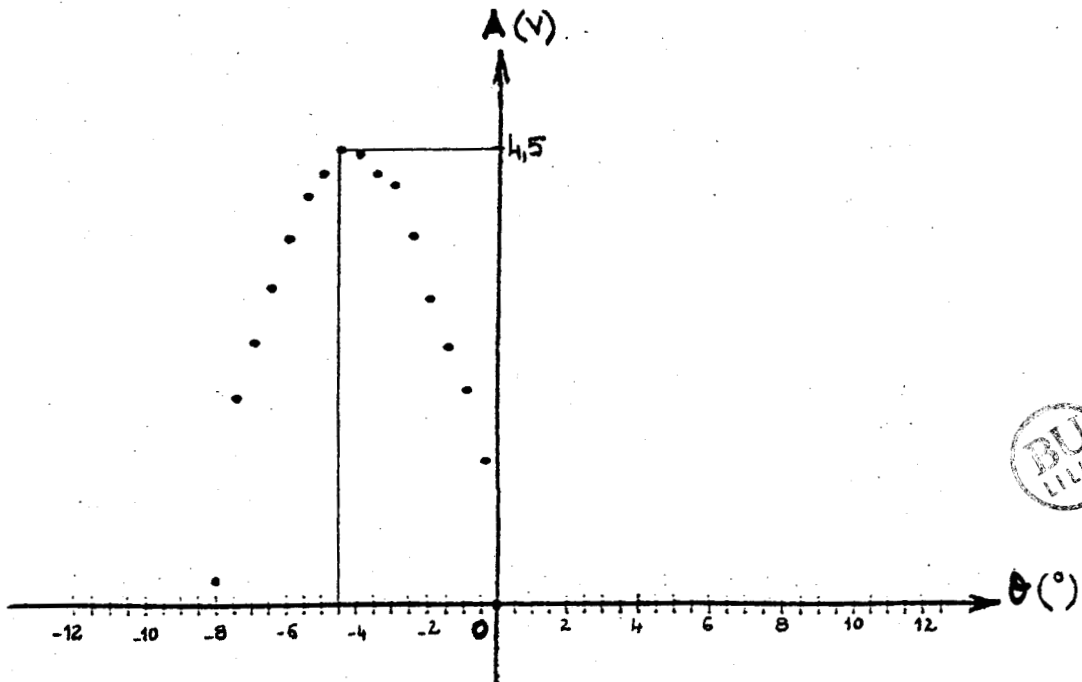


Figure IV.20 : " $S(P_{I-}; N)$ "



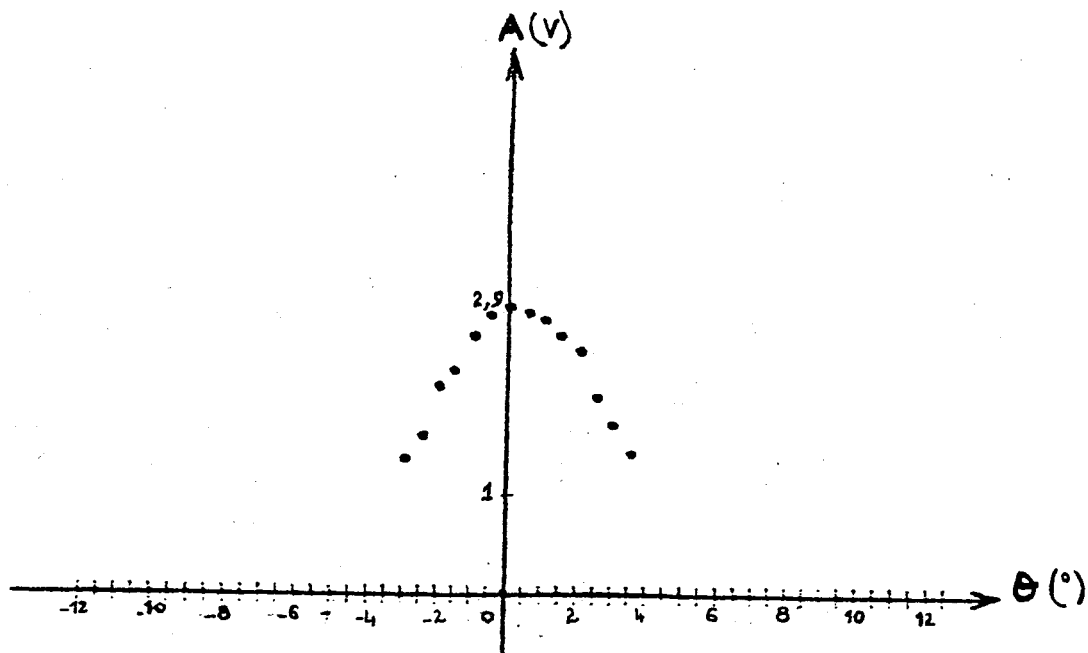


Figure IV.21 : "S(Cox ; N)"

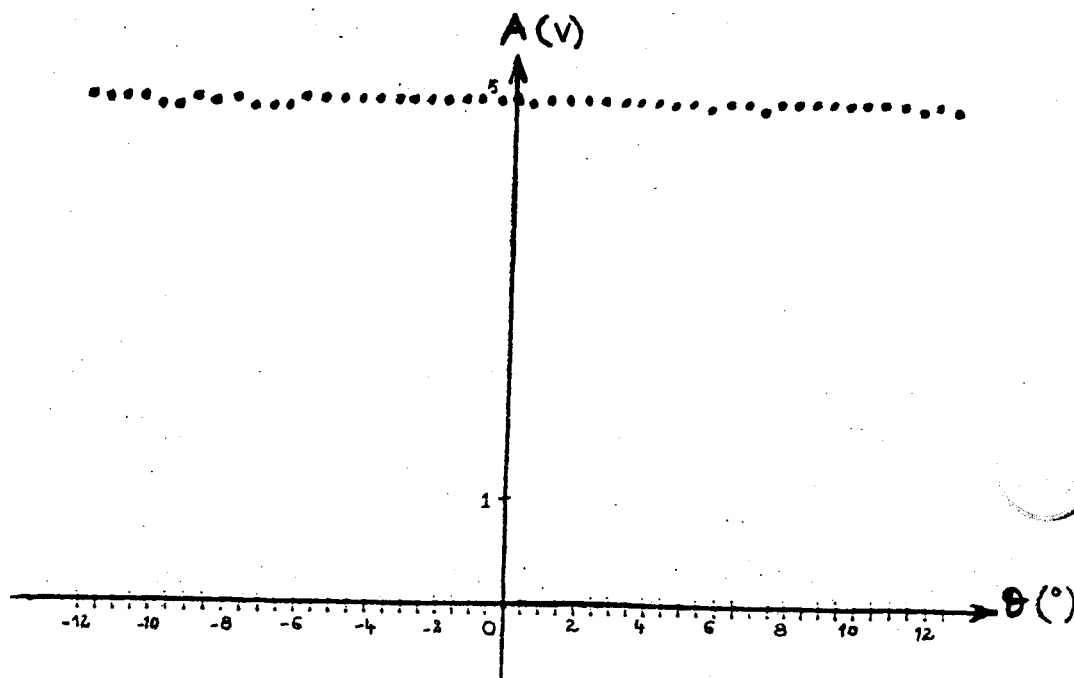


Figure IV.22 : "S(Ccv ; N)"

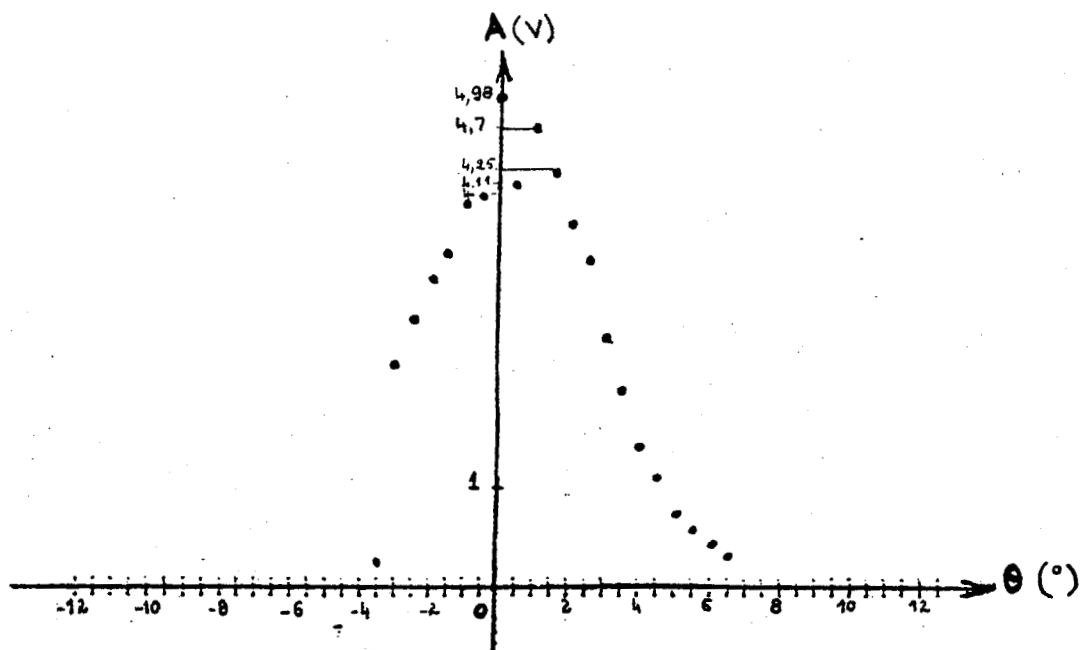


Figure IV.23 : "H(P<sub>0</sub>, P<sub>D</sub> ; N ; T1)"

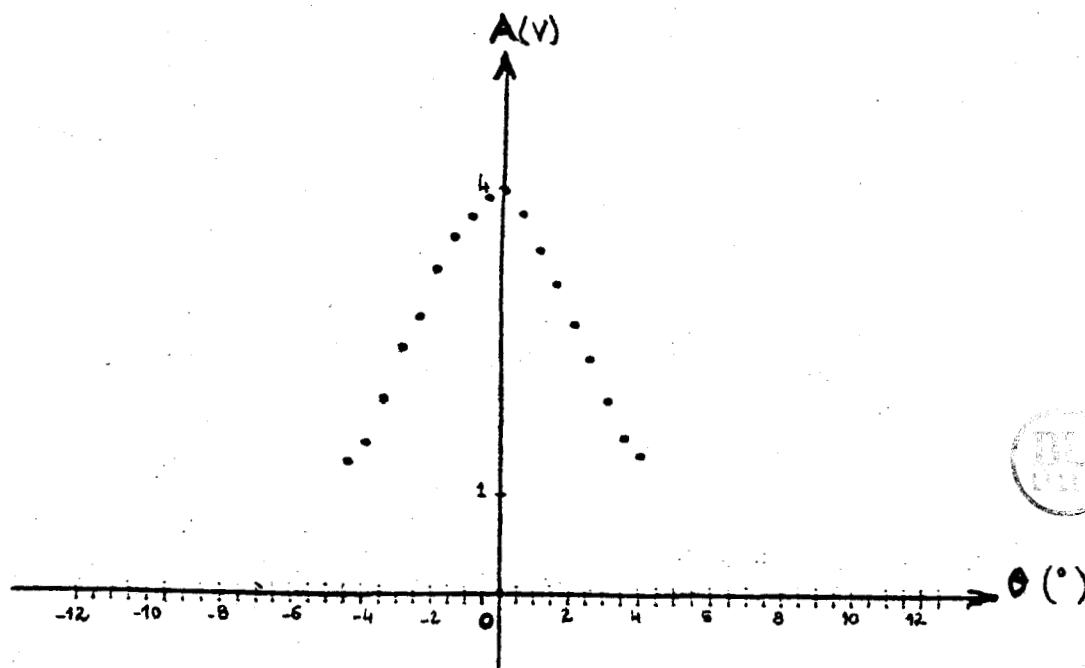


Figure IV.24 : "H(P<sub>0</sub>, P<sub>D</sub> ; N ; T2)"

D'après les valeurs numériques obtenues à l'issue de la T.F.R , nous pouvons classer les objets expérimentés en cinq classes comme c'est illustré dans le tableau 13 .

Moyennant cette répartition , nous avons élaboré un algorithme de classification se basant sur la méthode de distance minimale et dont l'organigramme est présenté dans la figure IV.25 . Nous avons ensuite implémenté cet algorithme sur le calculateur , ce qui nous a permis de vérifier la fidélité de la méthode de classification choisie .

#### IV.5 REMARQUES GENERALES

Les deux types d'essai que nous avons décrits dans ce chapitre montrent l'intérêt de l'emploi d'un capteur à ultrasons dans le domaine de la robotique en général , surtout lorsqu'il s'agit de manipuler dans un milieu sous-marin /16/ .

Certes , les résultats obtenus sont satisfaisants, mais par contre , ils ne montrent pas les difficultés d'ordre pratique rencontrées lors de la mise en oeuvre expérimentale de nos travaux . C'est pourquoi , il nous a semblé bon d'indiquer sous forme de remarques générales les défauts majeurs de cette expérimentation.

En effet, l'examen approfondi de notre technique ultrasonore prouve que ceux-ci sont principalement dus à deux raisons différentes : la première est d'origine logicielle , tandis que la seconde est d'origine matérielle .

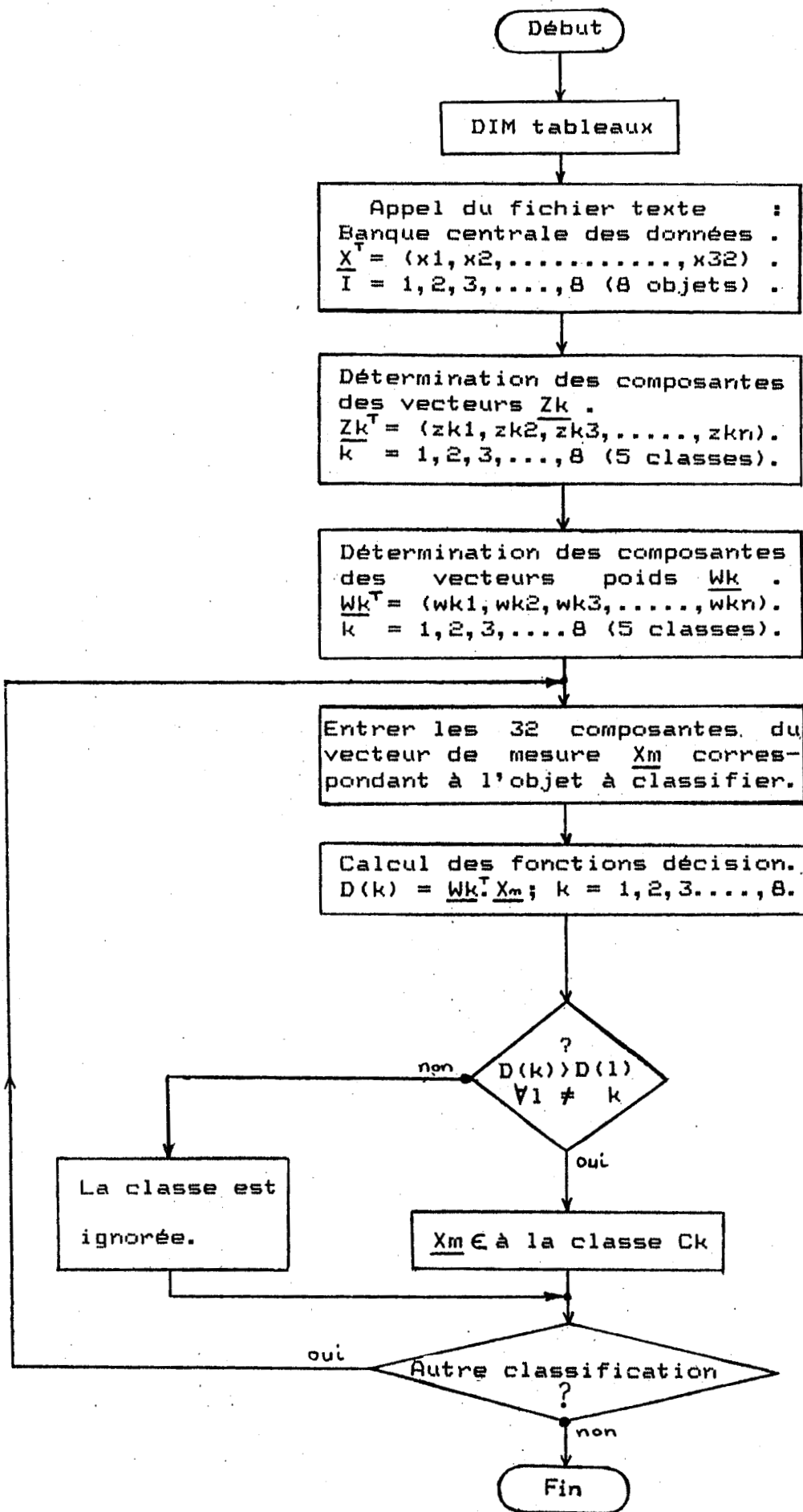


Figure IV.25 : Organigramme de classification .

Classe N°	Caractéristiques de l'objet
1	$* S ( F_D ; N )$ $* S ( F_{I^+} ; N )$ $* S ( F_{I^-} ; N )$
2	$* S ( F_D ; O_d )$
3	$* S ( C_{cx} ; N )$
4	$* S ( C_{cv} ; N )$
5	$* H ( F_D, F_D ; N ; T1 )$ $* H ( F_D, F_D ; N ; T2 )$

Tableau 13 : Classification d'objets utilisés .



#### IV.5.1 Imprécision d'origine logicielle

Le calcul du temps séparant l'émission de l'onde ultrasonore et la détection de l'écho (sortie comparateur) est établi à partir du sous-programme E.R.A (Cf. Figure IV.10). Concrètement, cela se traduit par un comptage de boucles d'attente jusqu'à l'apparition de l'écho de réception ; la valeur de la distance  $d$  calculé à partir de l'expression (4-4) est mesurée avec une incertitude  $\Delta d_t$  estimée au temps d'exécution d'une boucle d'attente :  $\Delta d_t = 8 \text{ mm}$ .

La procédure logicielle utilisée pour mettre fin au comptage des boucles peut être avantageusement remplacée par une détection par interruption, associée à une boucle rapide. Ainsi, l'imprécision d'origine logicielle pourrait être réduite.

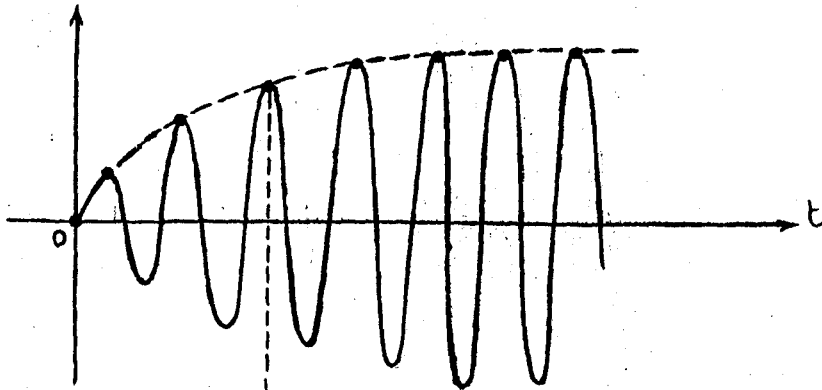
#### IV.5.2 Imprécision d'origine matérielle

Nous savons que l'arrivée de l'écho de réception est signalée grâce au comparateur (Cf. IV.2.2.7). Ce signal de réception est caractérisé par une évolution temporelle relativement lente.

Le basculement du comparateur ne se produisant qu'à partir de 0.5 V, l'écho reçu ne sera donc pris en considération qu'après un temps de retard  $t_r$ . Celui-ci est d'autant plus grand que l'amplitude du signal reçu est faible (Voir Figure IV.26).



Signal de réception



Etat du bit d'entrée (C)

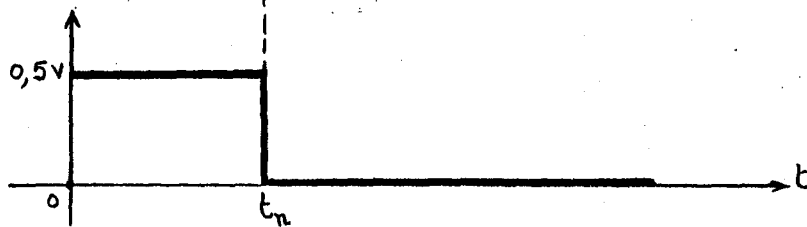


Figure IV.26 : Mise en évidence du retard  $t_r$  entre l'arrivée et la détection de l'écho ultrasonore reçu .

Deux solutions peuvent se présenter pour pallier à cette imprécision :

- ajuster l'amplitude des signaux émis à une valeur suffisante (sans que celle-ci entraîne des parasites risquant de perturber le bon fonctionnement du dispositif électronique),
- réaliser un comparateur plus sensible .

En définitive , l'incertitude  $\Delta d_m$  d'origine matérielle est estimée à une valeur moyenne approximative de 2 mm .

Ce qui nous conduit par conséquent à :

$$\Delta d (\text{total}) = \Delta d_t + \Delta d_m = 8 + 2 = 10 \text{ mm} .$$

CONCLUSION GENERALE  
\*\*\*\*\*

Les travaux exposés dans cette thèse montrent qu'en robotique , l'utilisation d'un capteur télémétrique tel qu'un transducteur ultrasonore permet d'avoir des informations sur le contexte local d'un robot sous-marin . Ces informations sensorielles sont alors exploitées par un dispositif électronique extérieur au robot afin de contrôler l'évolution de son préhenseur vis-à-vis de son contexte environnant .

Le choix de ce type de capteur est établi pour les raisons évoquées dans le chapitre III .

D'un autre côté , les expériences décrites dans le chapitre IV ont été réalisées sur un mini-robot (MINI-MOVER 5) dont le volume d'atteignabilité est relativement réduit . Cette restriction n'est pas gênante puisqu'elle n'a pas de répercussions directes sur les algorithmes élaborés.

Dans cette thèse, nous nous sommes particulièrement intéressés à deux aspects fondamentaux de la robotique : commande et perception .

En ce qui concerne la commande , nous l'avons réalisée de telle sorte que le robot puisse s'adapter à son contexte local . Parmi les modèles cités dans le chapitre I, nous avons choisi le modèle géométrique ; celui-ci s'adapte bien à la commande propre du robot et a l'avantage d'être relativement simple .

La prise en compte d'informations sensorielles dans cette commande lui attribue l'aspect boucle fermée et constitue ainsi un problème qui n'est pas très abordé dans la littérature .

Du point de vue de la perception , nous avons établi un algorithme dans un but de reconnaissance de différents objets . Pour ce faire, nous avons choisi la méthode de distance minimale entre les représentations des formes . Les informations extéroceptives du robot , issues de son capteur ultrasonore sont alors traitées par la Transformation de Fourier Rapide (T.F.R). Ceci permet une répartition fréquentielle des signaux obtenus empiriquement et par conséquent une classification d'objets correcte .

Les résultats des applications effectuées au L.A.CO.S du Havre sont satisfaisants quoiqu'entachés de quelques imprécisions. Celles-ci résultent de deux causes d'origines différentes: l'une est logicielle , l'autre est matérielle. Le dernier paragraphe du chapitre IV évoque ces problèmes et propose quelques solutions pratiques .

Par ailleurs , nous devons préciser que globalement , notre technique ultrasonore ne peut pas s'appliquer à n'importe quel objet ; elle est plutôt limitée à des formes d'objets relativement simples. Cependant , nous pensons que cet inconvénient pourrait être remédié . A cette fin , il suffit que le robot ait plusieurs capteurs appropriés en sa possession et que ceux-ci y soient judicieusement placés .

Une extension immédiate de nos travaux pourrait être effectuée à la lumière de ce que nous venons de présenter dans cette thèse . Nous pensons particulièrement à l'association perception et commande dans un environnement sous-marin .

Ensuite , nous suggérons l'installation d'un second capteur ultrasonore au robot manipulateur. Ceci permettrait d'utiliser le principe "stéréoscopique" et serait à l'origine d'une acquisition d'informations plus complète . Cette acquisition pourrait alors être mieux exploitée par des algorithmes d'identification du contexte local, de reconnaissance et de commande .

\*\*\*\*\*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES  
\*\*\*\*\*

- /1/ P. LOPEZ - J. N. FOULC  
-----  
"Introduction à la robotique : Enseignement, recherche, développement" . Editests - P.S.I , PARIS 1984 .
- /2/ P. COIFFET  
-----  
"Modélisation et commande"  
  
Tome 1 . Hermès 1981 .
- /3/ CSG. LEE & M. ZIEGLER  
-----  
"A geometric approach in solving the inverse kinematics of PUMA robots" . University of Michigan .
- /4/ THE INDUSTRIEL ROBOT  
-----  
"Kinematic equations for industrial manipulators"  
  
Septembre 1982 .
- /5/ L. BOISSIER  
-----  
"Modélisation de l'environnement et localisation du robot mobile HILARE par télémétrie Laser"  
  
Thèse de 3ème cycle , L.A.A.S de Toulouse 1985 .
- /6/ B. ESPIAU  
-----  
"Prise en compte de l'environnement local dans la commande des robots manipulateurs"  
  
Thèse d'état . Université de Rennes I , 1982 .
- /7/ L. OSMAN - J. N. FOULC - A. FAURE  
-----  
"Commande d'un manipulateur en fonction du contexte"  
  
Proc. IASTED RAI / IPAR' 1986 , RAI I , pp 279-292 .  
  
Toulouse . June 1986 .

/8/ E. BAUMGARTNER - G. SARIDIS

-----  
 "A ranging method based on triangulation for robotic control"

I.E.E.E Transactions on Automatic Control. pp 86-91. 1985.

/9/ D. J. BALEK - R. B. KELLY

-----  
 "Using gripper mounted infrared proximity sensors for robot  
 feedback control"

IEEE International conference on Robotics and Automation.  
 Saint Louis Missouri . pp 282-289 . 25 / 28 March 1985 .

/10/ M. PILLET - J. F. CHABRIER - A. JUTARD - G. LIEGEOIS

-----  
 "Robotique et théorie des petits déplacements : Application  
 au suivi de surface"

Rapport interne . I.N.S.A de Lyon . 1984 .

/11/ MICROBOT, INC

-----  
 "Mountain view , CA 94043 . 1981 .

Robotics reference and applications manual .

/12/ J. N. FOULC

-----  
 "Description et utilisation du manipulateur Mini-Mover 5:  
 Application à génération des trajectoires"

Rapport interne, L.E.A.H / A.E.I.I , Le Havre, Novembre 83.

/13/ C.A.N 1612 M1

-----  
 "Documentation Micro Informatique Diffusion"

/14/ 5030 A & 5032 A : PEAK SENSE AND HOLD ANALOG MEMORY

-----  
 "Documentation Optical Electronics Incorporated (O.E.I)"



/15/ B. ESPIAU

"Closed loop control of robots with local environment sensing : Principles and applications"

Rapport I.R.I.S.A . Rennes .

/16/ J.N.FOULC - A.FAURE

"Etude et réalisation d'un dispositif télémétrique Ultra-sonore robotisé"

Publication interne . L.A.CO.S Le Havre . Novembre 1984.

/17/ MICKAEL.K.BROWN

"Locating objects surfaces with an Ultrasonic range sensor"

IEEE International conference on robotics and automation .

Saint Louis Missouri . pp 110-115 . 25 / 28 Mars 1985 .

/18/ J.F.AFFINITS - S.S.WANG - Y.S.YEE

"Computer controlled robot with Ultrasonic sensor"

I.B.M Technical disclosure bulletin . Janvier 1976 .

/19/ Electronique applications

"Electronique médicale : Les applications des Ultra-Sons"

Numéros 1 et 2 - Printemps 1977.

/20/ P.KROCZYNSKI - J.P.MOREAU - J.B.ACTON

"The marine robot"

Robotics 8 . Conference proceedings . Application for

Tookey . Vol 1 . Détroit Michigan . 4 et 7 Juin 1984 .

/21/ A.FAURE

"Perception et reconnaissance des formes"

Editions Editests . 1985 .

/22/ JULIUS T.TOU - RAFAEL.C.GONZALEZ

-----  
 "Pattern recognition principles"

/23/ D.FEUCHT

-----  
 "Pattern recognition : Basic concepts and implementations"

Tektronix , incorporated . Beaverton , Oregon .

Computer Design / December 1977 .

/24/ J.N.FOULC - L.OSMAN - A.FAURE

-----  
 "Modélisation automatique de l'environnement d'un robot  
 sous-marin"

Proc.IASTED RAI / IPAR' 1986 , RAI II , pp 629-646 .

Toulouse . June 1986 .

/25/ S.MONCHAUD - R.PRAT - CHEN CHIN HUA

-----  
 "Platine télémétrique multisenseurs pour des applications  
 de robotique"

Conférence Capteurs .

Technologie et applications . pp 257-262 .

Paris 5 / 7 Juin 1984 .

/26/ M.BRIOT - J.C.TALOU - G.BAUZIL

-----  
 "Le système de perception du robot mobile autonome HILARE"

Reconnaissance des formes et intelligence artificielle .

Tome III . 2ème congrès AFCET . IRIA . pp 200-208 .

/27/ G.BAUZIL . M.BRIOT . P.RIBES . M.VAISSET

-----  
 "Le sous-système de navigation par Ultrason du robot mobile  
 HILARE".Reconnaissance des formes et intelligence artificielle.

3ème congrès AFCET. pp 553- 564 . Nancy 16 - 17 - 18 Sept 1981.

/28/ M.FERRER - G.BAUZIL - M.BRIOT  
-----

"Perception de l'environnement et localisation du robot  
mobile HILARE"

Productique et robotique intelligente . pp 297-308 .

Congrès Automatique . Besançon 15-17 Novembre 1983 .

/29/ R.SOBEK - R.CHATILA  
-----

"Structure décisionnelle pour un robot mobile"

Reconnaissance des formes et intelligence artificielle .

Tome III . pp 241-248 . 2ème congrès AFCET - IRIA .

Toulouse 12 - 13 - 14 Septembre 1984 .

/30/ J.C.BARDIAUX  
-----

"Implantation de capteurs extéroceptifs simples sur un  
mini-robot "

Conférence Capteurs.Technologie et applications. pp263-271

Paris . 5 - 7 Juin 1984 .

/31/ P.COIFFET - P.RIVES  
-----

"Reconnaissance des formes et saisie automatique d'objets  
par un robot manipulateur"

Reconnaissance des formes et intelligence artificielle .

Tome III . pp 233-240 . 2ème congrès AFCET . IRIA .

Toulouse 12 - 13 - 14 Septembre 1979 .

/32/ P.BARADNA  
-----

"Contribution à la réalisation d'un robot manipulant des  
objets en contact . Commande par retour d'efforts"

Thèse de 3ème cycle .

Université Paul Sabatier de Toulouse . 1981 .

/33/ P.Y.COULON

-----  
 "Association vision-commande en robotique"

Thèse de 3ème cycle . I.N.P.G . Grenoble . 1982 .

/34/ W.KHALIL

-----  
 "Contribution à la commande automatique des manipulateurs  
 avec l'aide d'un modèle mathématique des mécanismes"

Thèse d'état - U.S.T.L . Montpellier . 1976 .

/35/ P.BORREL

-----  
 "Modèle de comportement de manipulateurs:Application à l'ana-  
 lyse de leurs performances et à leur commande automatique"

Thèse de 3ème cycle . U.S.T.L . Montpellier . 1979 .

/36/ C.NGUYEN.TRUNG

-----  
 "Etude de la commande d'un robot à 5 degrés de liberté  
 fondée sur l'acquisition visuelle automatique de  
 l'environnement proche . Application : Saisie d'objets "

Mémoire C.N.A.M , L.A.CO.S Le Havre 1986 .

/37/ B.ROTH

-----  
 "Performance evaluation of manipulators from kinematic view  
 point" Cours de robotique.IRIA. Toulouse .Septembre 1976.

/38/ A.MICAELLI - J.M.DETRICHE

-----  
 "Modes d'asservissements d'un robot de soudage sur un joint  
 dans l'espace utilisant un nombre réduit d'informations  
 capteur"

Productique et robotique intelligente . pp 115-127 .

Congrès Automatique . Besançon 15 - 17 Novembre 1983 .

/39/ W.KHALIL

-----  
 "Modélisation et commande par ordinateur du manipulateur  
 MA23 . Extension à la conception par ordinateur des  
 manipulateurs"

Thèse de docteur ingénieur . U.S.T.L Montpellier 1976

/40/ L.OSMAN

-----  
 "Commande d'un manipulateur en fonction du contexte"

Rapport D.E.A . Université de Lille I . 22 Octobre 1984.

/41/ POLAROID

-----  
 "Ultrasonic ranging system"

Brochure technique ultrasonic .

Marketing division , Cambridge , MA 012139 , U.S.A .

/42/ D.DURAND

-----  
 "Etude et réalisation d'un dispositif multi-capteurs permet-  
 tant la conduite automatique d'un assemblage sous - marin"

Thèse de spécialité , U.P.S , Toulouse . Janvier 1984 .

/43/ C.ZHAO

-----  
 "Localisation absolue d'un robot mobile par télémètre Laser"

Thèse de docteur ingénieur. I.N.S.A de Rennes . Avril 1984.

/44/ R.DUDA - D.NITZAN - P.BARRETT

-----  
 "Use of range and reflectance data to find planar surface  
 regions"

I.E.E.E . Trans. pattern. Anal. Machine. Intell .

Vol PAMI - 1 numéro 3 . Juillet 1979 .

/45/ APPLE II

-----  
"Reference manual"

Apple Computer Inc . 1979 .

/46/ HIGH SPEED , FAST SETTING IC OP AMP AD509

-----  
"Data acquisition components and subsystems"

ANALOG DEVICES . pp 1-37 , 1-40 .

/47/ J.P.MERLET

-----  
"Synthèse de commande par retour d'effort en robotique .  
Application au suivi de contour"

Reconnaissance des formes et intelligence artificielle .

5ème congrès AFCET . INRIA . pp 225-236 .

Grenoble . 27 - 29 Novembre 1985 .

/48/ M.KUNT

-----  
"Traitement numérique des signaux"

Editions DUNOD . 1981 .

/49/ M.DRUMHELLER

-----  
"Mobile robot localization using sonar"

IEEE. Transactions on pattern analysis and machine  
intelligence. Vol. PAMI-9 , No 2 , pp 325-332 , March 1987.

/50/ J.L.CROWLY - J.COUTAZ

-----  
"Navigation et modélisation pour un robot mobile"

Rapport de recherche. Laboratoire d'informatique  
fondamentale et d'intelligence artificielle .

Institut I.M.A.G Grenoble , Janvier 1985 .

/51/ J.N.FOULC - A.FAURE - P.LOPEZ

-----  
"Elaboration des signaux de consigne des systèmes  
actionneurs des robots commandés par calculateurs"

Point en robotique , volume 2 .

Lavoisier , TEC & DDC , Coordonnateur : J.C PRUVOST , 1985.

/52/ B.GORLA - M.RENAUD

-----  
"Modèles des robots manipulateurs . Application à leur  
commande"

CEPADUES Editions , Toulouse , 1984 .

ANNEXE I  
\*\*\*\*\*

TRANSFORMATION DE COORDONNEES DIRECTE ET INVERSE

---



## I.1 TRANSFORMATION DE COORDONNEES DIRECTE : METHODE GENERALE

$$X(R_0) = f(\underline{\theta}, \underline{L})$$

Nous savons déjà que :

$$\underline{X06} = f(\underline{\theta}, \underline{L}) ; \quad \underline{Y06} = f(\underline{\theta}, \underline{L}) \quad \text{et} \quad \underline{Z06} = f(\underline{\theta}, \underline{L})$$

avec

$$\underline{\theta}^T = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \quad \text{et} \quad \underline{L}^T = (L_0, L_1, L_2, L_3, L_4)$$

Nous allons calculer  $E_p$  et  $R_p$  dans l'espace de la tâche. Tout d'abord, signalons qu'en ce qui concerne le MINI-MOVER 5, l'articulation poignet (Pitch et Roll) se traduit par un segment rigide de longueur nulle ( $l=0$ ) associé à la rotation Pitch et un segment rigide dont la longueur est égale à celle de la pince, associé à la rotation Roll. (Cf. Figure A1).

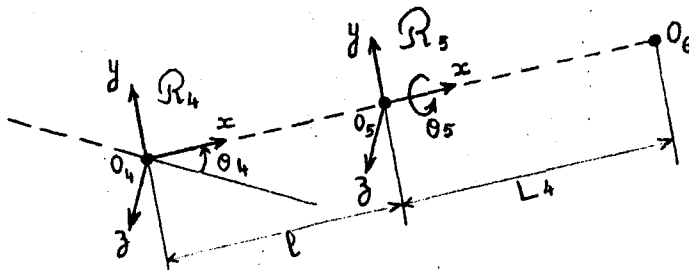


Figure A1 : Décomposition des 2 rotations poignet :  
Pitch ( $\theta_4$ ) et Roll ( $\theta_5$ ).

Introduction d'un segment rigide fictif de longueur nulle ( $O_4 O_5 = 0$ ).

- \* Soit  $\underline{ex}_5$  le vecteur unitaire suivant  $\underline{Ox}$  du repère R5 (ce qui correspond à l'axe Roll de l'articulation du poignet).
- \*\* Soit  $\underline{ez}_5$  le vecteur unitaire suivant  $\underline{Oz}$  du repère R5 (ce qui correspond à l'axe Pitch de l'articulation du poignet).

Déterminons alors les positions angulaires de  $\underline{ex}_5$  et  $\underline{ez}_5$  par rapport aux plans Oxozo, Oxoyo et Oyozo. Ces positions angulaires définissent l'orientation de la pince dans l'espace de la tâche.

Les matrices de changement de repère décrites dans II.3.2.2 permettent de déterminer l'orientation du repère R5 par rapport au repère Ro :

$$\begin{bmatrix} e_5(x_0) \\ e_5(y_0) \\ e_5(z_0) \end{bmatrix} = M_5 \cdot \begin{bmatrix} ex_5 \\ ey_5 \\ ez_5 \end{bmatrix}$$

Base  $e_5$  dans Ro

Base  $e_5$  dans R5 (Matrice unité)

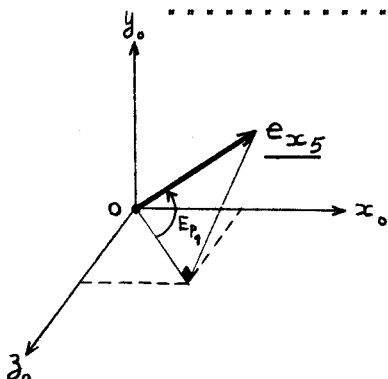
d'où :

$$M_5 = \begin{bmatrix} ex_5(x_0) & ey_5(x_0) & ez_5(x_0) \\ ex_5(y_0) & ey_5(y_0) & ez_5(y_0) \\ ex_5(z_0) & ey_5(z_0) & ez_5(z_0) \end{bmatrix}$$

### I.1.1 Calcul de l'élévation de la pince (Ep) dans l'espace de la tâche

Généralement, on peut définir 3 élévations Pince différentes:

\* Ep1 : Angle formé par le vecteur  $\underline{ex}_5$  et le plan Oxozo:



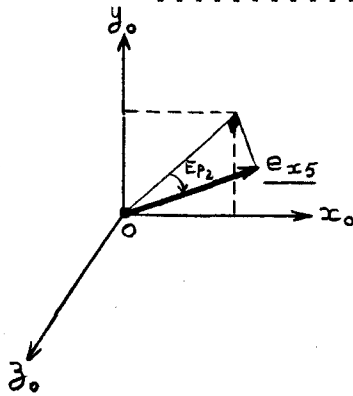
$\cos(Ep1) =$  Projection de  $\underline{ex}_5$  sur Oxozo

$$\begin{aligned} &= [ex_5^2(x_0) + ex_5^2(z_0)]^{1/2} \\ &= [(\cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2 + (-\sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2]^{1/2} \\ &= \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

d'où alors :

$$Ep1 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$$

\* Ep2: Angle formé par le vecteur  $\underline{ex_5}$  et le plan  $Ox_0y_0$ :

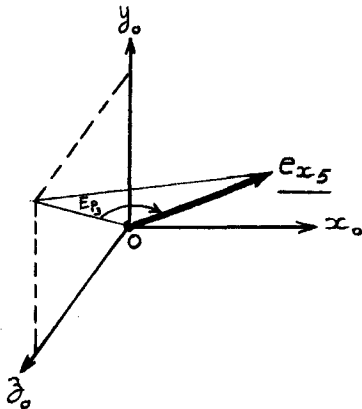


$$\begin{aligned} \cos Ep2 &= \text{Projection de } \underline{ex_5} \text{ sur } Ox_0y_0 \\ &= [ex_5^2(x_0) + ex_5^2(y_0)]^{1/2} \\ &= [\cos^2 \theta_1 \cdot \cos^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \\ &\quad (\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2]^{1/2} \end{aligned}$$

d'où :

$$Ep2 = \text{Arc Cos} [\cos^2 \theta_1 \cdot \cos^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \sin^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)]^{1/2}$$

\* Ep3: Angle formé par le vecteur  $\underline{ex_5}$  et le plan  $Oy_0z_0$



$$\begin{aligned} \cos Ep3 &= \text{Projection de } \underline{ex_5} \text{ sur } Oy_0z_0 \\ &= [ex_5^2(y_0) + ex_5^2(z_0)]^{1/2} \\ &= [\sin^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \\ &\quad (-\sin \theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2]^{1/2} \end{aligned}$$

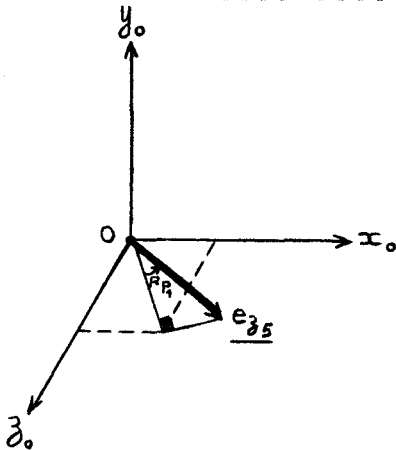
d'où :

$$Ep3 = \text{Arc Cos} [\sin^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \sin^2 \theta_1 \cdot \cos^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)]^{1/2}$$

### I.1.2 Calcul de la rotation de la pince (Rp) dans l'espace de la tâche

On peut également définir 3 rotations Pince :

\* Rp1 : Angle formé par le vecteur  $\underline{ez_5}$  et le plan Oxozo



$$\begin{aligned} \cos Rp1 &= \text{Projection de } \underline{ez_5} \text{ sur Oxozo} \\ &= [ez_5^2(x_0) + ez_5^2(z_0)]^{1/2} \\ &= [(\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad + \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_5)^2 + \\ &\quad (-\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad + \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_5)^2]^{1/2} \\ &= [\sin^2\theta_5 \cdot \sin^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos^2\theta_5]^{1/2} \end{aligned}$$

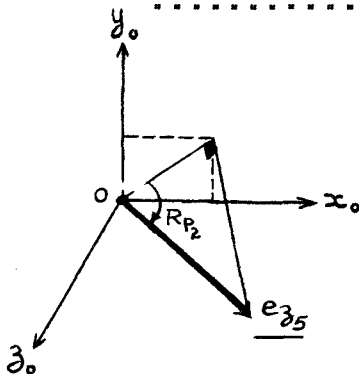
d'où :

$$Rp1 = \text{Arc Cos} [\sin^2\theta_5 \cdot \sin^2(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos^2\theta_5]^{1/2}$$

- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = 0^\circ$  alors  $Rp1 = \theta_5$

- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = +/- 90^\circ$  alors  $Rp1 = 0$

\* Rp2 : Angle formé par le vecteur  $\underline{ez_5}$  et le plan Oxoyo



$$\begin{aligned} \cos Rp2 &= \text{Projection de } \underline{ez_5} \text{ sur Oxoyo} \\ &= [ez_5^2(x_0) + ez_5^2(y_0)]^{1/2} \\ &= [(\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad + \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_5)^2 + \\ &\quad (-\sin\theta_5 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2]^{1/2} \end{aligned}$$

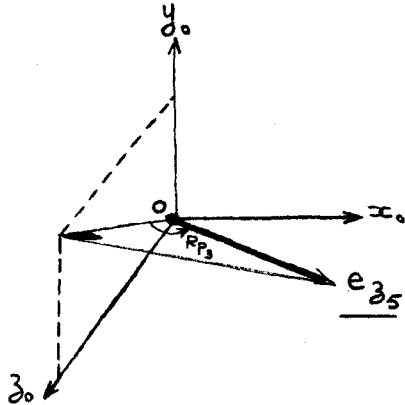
d'où :

$$Rp2 = \text{Arc Cos} [(\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_5)^2$$

$$+ (-\sin\theta_5 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2]^{1/2}$$

- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = 0$  alors  $Rp_2 = \text{Arc Cos}(\sin^2 \theta_1 \cdot \cos^2 \theta_5 + \sin^2 \theta_5)$
- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = +/- 90^\circ$  alors  $Rp_2 = \text{Arc Cos}(\sin(\theta_5 +/- \theta_1))$

\* Rp3 : Angle formé par le vecteur  $\underline{ez_5}$  et le plan Dyozo



$$\begin{aligned} \text{Cos Rp3} &= \text{Projection de } \underline{ez_5} \text{ sur Dyozo} \\ &= [ez_5^2(y_0) + ez_5^2(z_0)]^{1/2} \\ &= [(-\sin \theta_5 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2 + \\ &\quad (-\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_5)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

d'où :

$$\boxed{Rp_3 = \text{Arc Cos} [(-\sin \theta_5 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))^2 + (-\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_5 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_5)^2]^{1/2}}$$

- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = 0$  alors  $Rp_3 = \text{Arc Cos}[(\sin^2 \theta_5 + \cos^2 \theta_1 \cdot \cos^2 \theta_5)]^{1/2}$
- Si  $(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = +/- 90^\circ$  alors  $Rp_3 = \theta_1 +/- \theta_5$

Le choix de Ep et Rp dépend de l'application envisagée. Toutefois, on peut remarquer que deux de ces valeurs se présentent sous une forme simple et correspondent à une réalité pratique. Il s'agit de "Ep1" et "Rp3".

\* Ep1 est l'angle formé par l'axe Ox de la pince et le plan horizontal :

$$\boxed{Ep_1 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4}$$

\* Rp3 est l'angle formé par l'axe Oz de la pince et le plan vertical normal à Oxo lorsque la pince est verticale , et orientée vers le bas :

$$Rp3 = \theta_1 - \theta_5$$

En retenant ces deux valeurs pour définir l'orientation de la pince dans l'espace de travail, la transformation de coordonnées directe se résume par :

$$\left\{ \begin{array}{l} X06 = \text{Cos}\theta_1. L2. \text{Cos}\theta_2 + L3. \text{Cos}(\theta_2+\theta_3) + L4. \text{Cos}(\theta_2+\theta_3+\theta_4) \quad (1) \\ Y06 = L_0 + L1 + L2. \text{Sin}\theta_2 + L3. \text{Sin}(\theta_2+\theta_3) + L4. \text{Sin}(\theta_2+\theta_3 +\theta_4) \quad (2) \\ Z06 = -\text{Sin}\theta_1. L2. \text{Cos}\theta_2 + L3. \text{Cos}(\theta_2+\theta_3) + L4. \text{Cos}(\theta_2+\theta_3+\theta_4) \quad (3) \\ E_p = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (4) \\ R_p = \theta_1 - \theta_5 \quad (5) \end{array} \right.$$

## 1.2 TRANSFORMATION DE COORDONNEES INVERSE

---

$$\underline{\theta} = f^{-1}( \underline{X(R_0)} , \underline{L} )$$

La fonction  $f^{-1}$  est obtenue en résolvant les 5 équations à 5 inconnus déterminées précédemment lors du calcul de la transformation de coordonnées directe (Equations 1 à 5)

\* Equations (1) et (3)  $\longrightarrow$

$$\theta_1 = - \text{Arc tg } \frac{Z_0}{X_0}$$

\* Equation (5)  $\longrightarrow$

$$\theta_5 = \theta_1 - R_p$$

\* Equations (1) et (4)  $\longrightarrow$

$$\frac{1}{L_2} \cdot \frac{X_0}{\cos \theta_1} - L_4 \cdot \cos \epsilon_p = \cos \theta_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$(L_2 = L_3)$$

En appelant  $X^* = \frac{X_0}{\cos \theta_1} - L_4 \cdot \cos \epsilon_p$ , il vient :

$$\frac{X^*}{2 \cdot L_2} = \cos \frac{\theta_3}{2} \cdot \cos \frac{2 \cdot \theta_2 + \theta_3}{2} \quad (6)$$

\* Equation (2)  $\longrightarrow$

$$\frac{Y_0 - L_0 - L_1 - L_4 \cdot \sin \epsilon_p}{L_2} = \sin \theta_2 + \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

En appelant :  $Y^* = Y_0 - L_0 - L_1 - L_4 \cdot \sin \epsilon_p$ , il vient :

$$\frac{Y^*}{2 \cdot L_2} = \cos \frac{\theta_3}{2} \cdot \sin \frac{2 \cdot \theta_2 + \theta_3}{2} \quad (7)$$

\* Equation (6) + Equation (7)  $\longrightarrow$

$$\frac{X^{*2} + Y^{*2}}{4 \cdot L_2^2} = \cos^2 \frac{\theta_3}{2} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\theta_3}{2}} \quad \& \quad \operatorname{tg}^2 \frac{\theta_3}{2} = \frac{4 \cdot L_2^2}{X^{*2} + Y^{*2}} - 1$$

Remarque

En raison de la conception mécanique du manipulateur, la coordonnée généralisée  $\theta_3$  ne peut être que négative. D'où alors:

$$\theta_3 = -2 \cdot \text{Arc tg} \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{x^{*2} + y^{*2}} - 1}$$

\* Equation (7)  $\longrightarrow$   
Equation (6)

$$\frac{\text{Sin} \frac{2 \cdot \theta_2 + \theta_3}{2}}{\text{Cos} \frac{2 \cdot \theta_2 + \theta_3}{2}} = \text{tg} \frac{2 \cdot \theta_2 + \theta_3}{2} = \frac{y^*}{x^*} \longrightarrow$$

$$2 \cdot \theta_2 + \theta_3 = 2 \cdot \text{Arc tg} \frac{y^*}{x^*} \quad \text{D'où :}$$

$$\theta_2 = \text{Arc tg} \frac{y^*}{x^*} + \text{Arc tg} \sqrt{\frac{4 \cdot L_2^2}{x^{*2} + y^{*2}} - 1}$$

\* Equation (4)  $\longrightarrow$

$$\theta_4 = E_p - \theta_2 - \theta_3$$





ANNEXE II  
\*\*\*\*\*

LE CIRCUIT PORTE ELECTRONIQUE

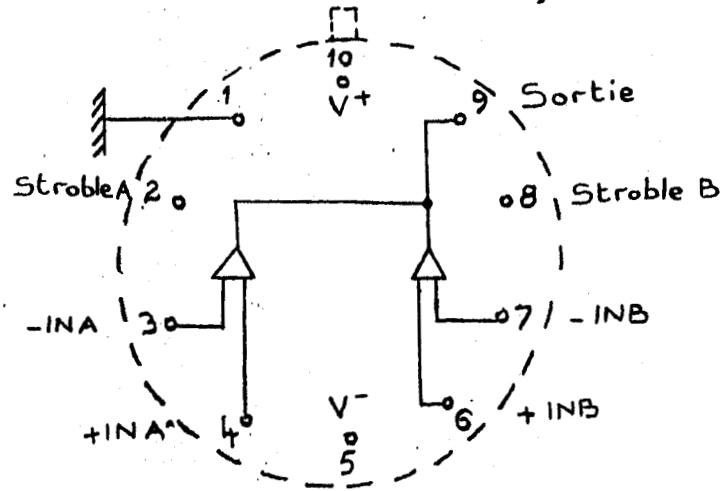
---

Le circuit Porte électronique est composé de 3 étages :

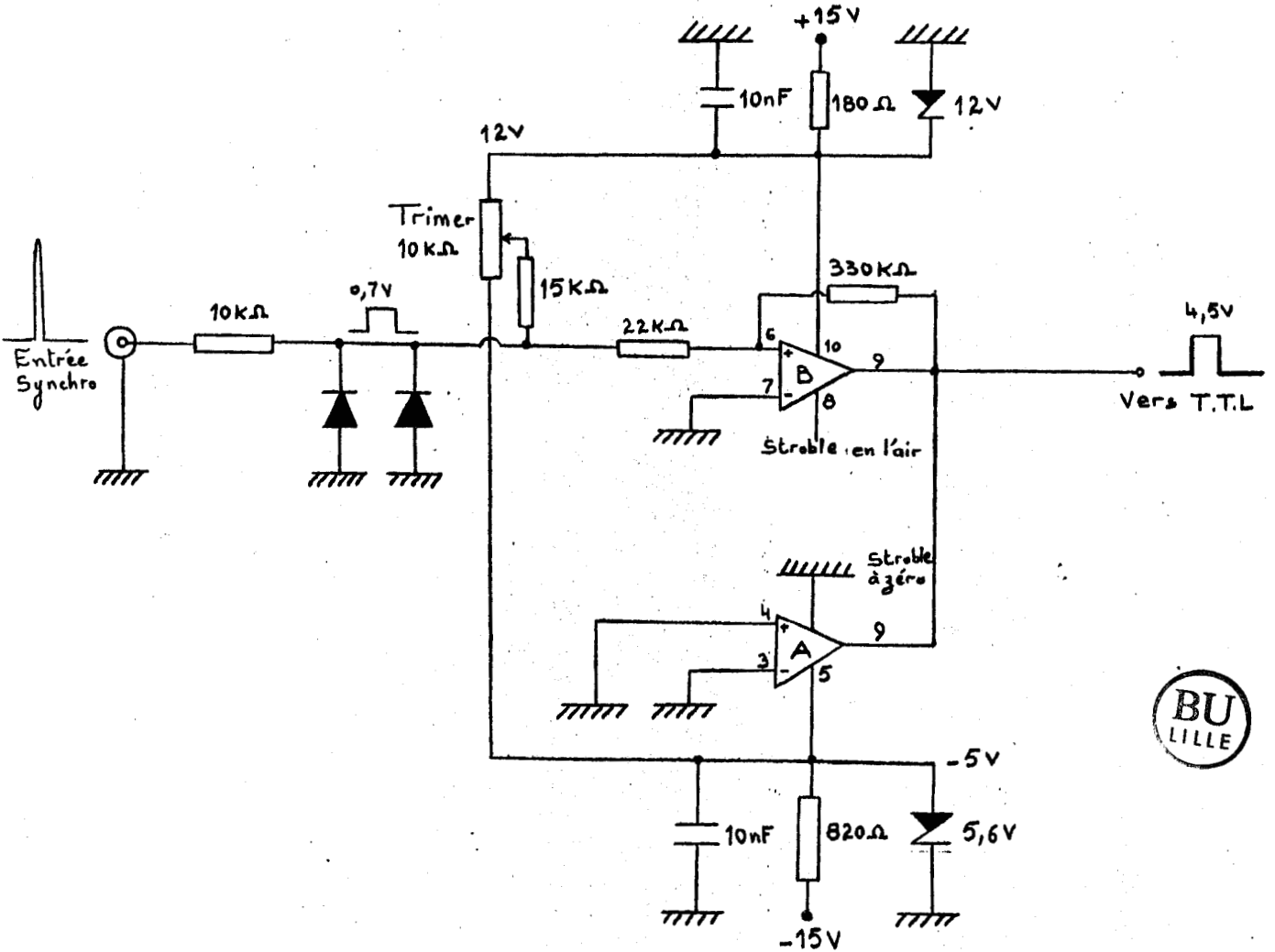
II.1 LE BUFFER D'ENTREE

Cet étage utilise surtout un double comparateur  $\mu A711$ .

Vue de dessus

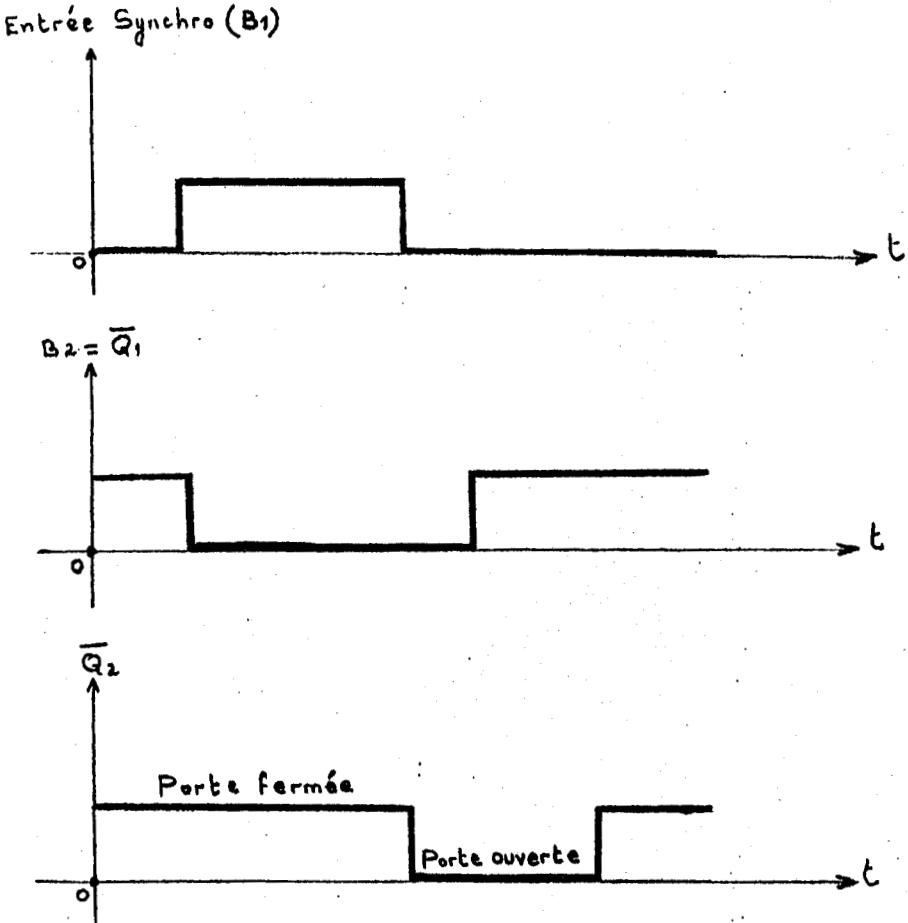
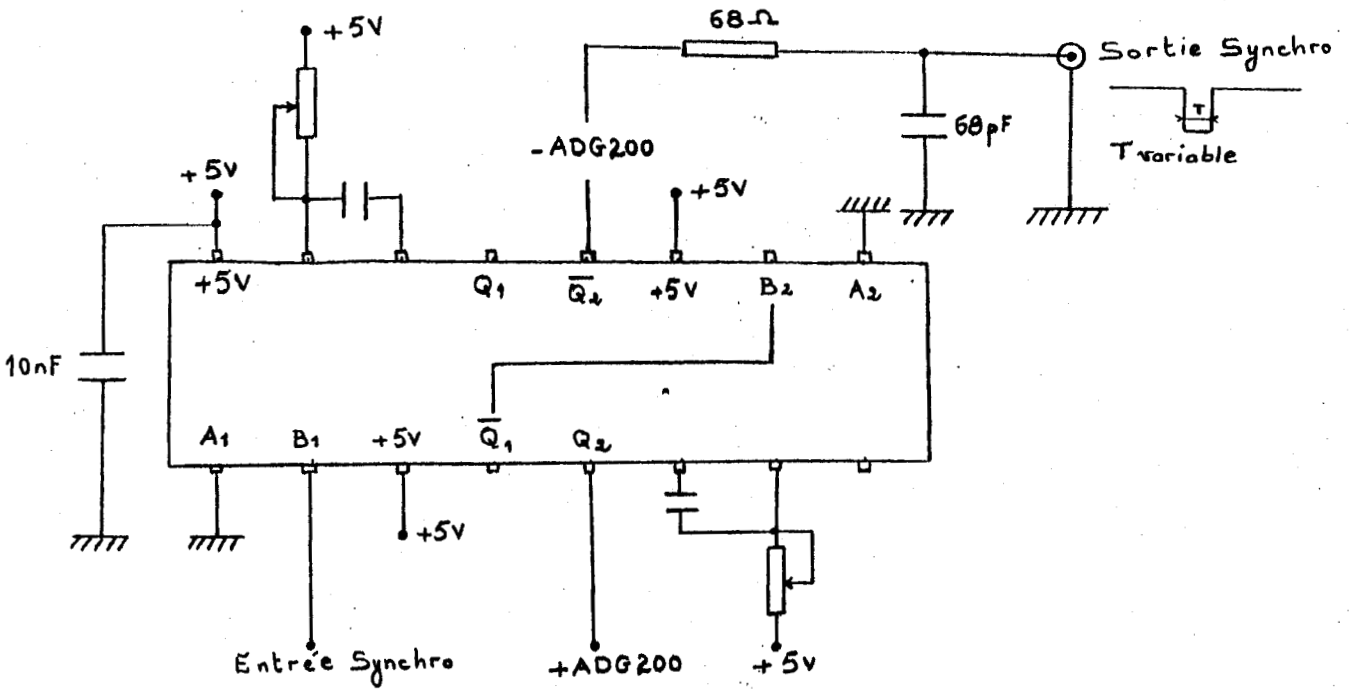


Le schéma électrique du circuit d'entrée est le suivant :

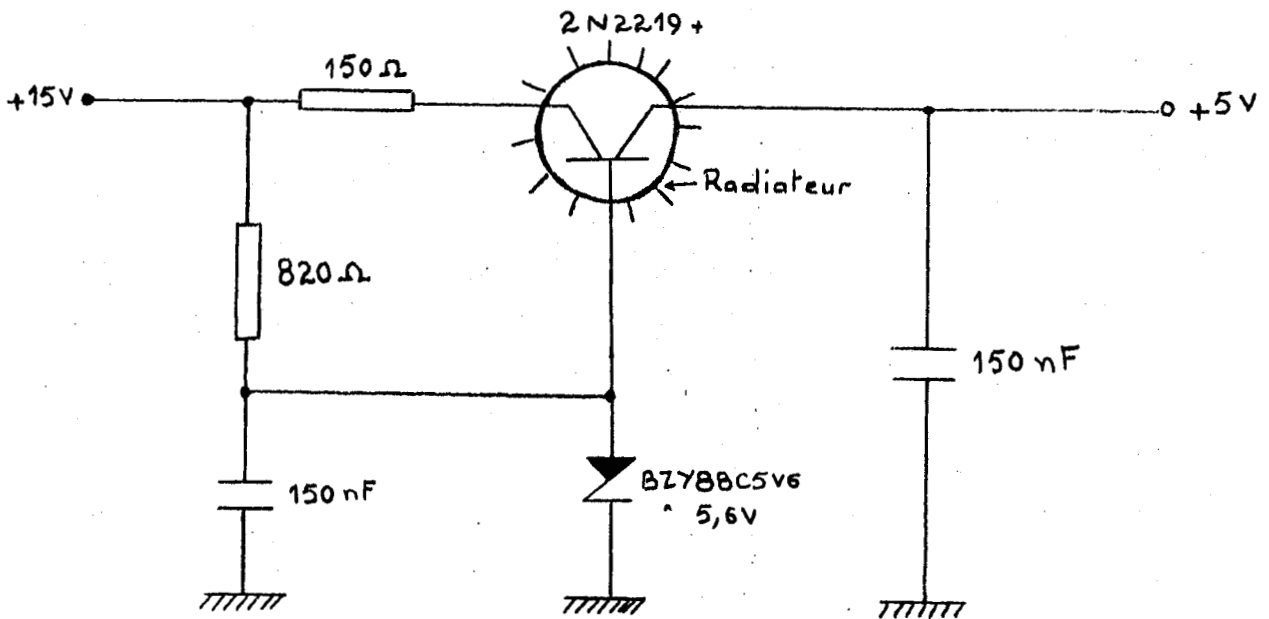


II.2 COMMANDE DE LA PORTE ELECTRONIQUE

Elle est assurée grâce à un double monostable SN 74123 fabriqué chez Texax-Instruments .

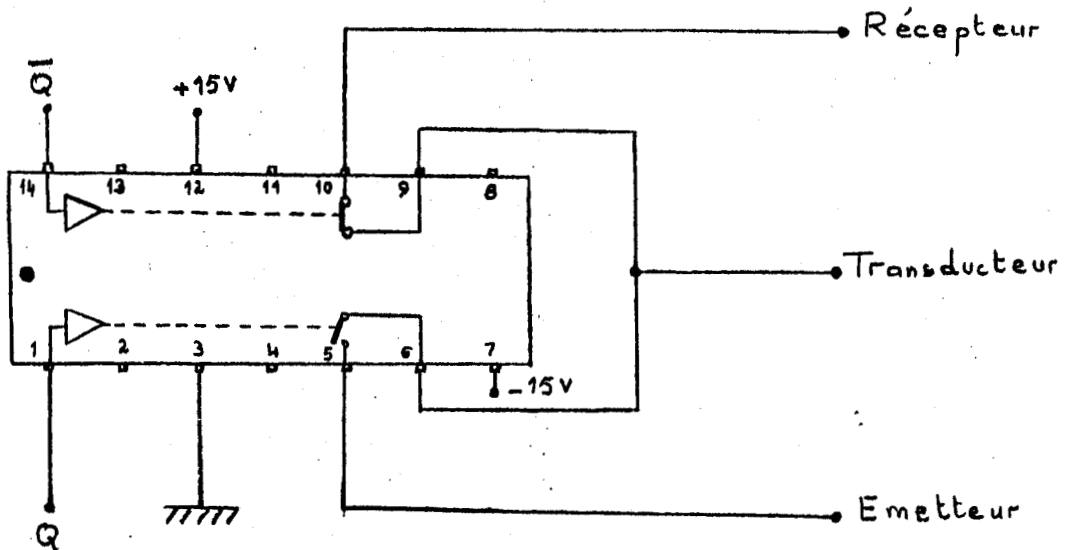


Le circuit permettant d'obtenir +5V à partir de +15V est le suivant :



II.3 LA PORTE ANALOGIQUE

Le composant est du type ADG 200 BP fabriqué par ANALOG DEVICES .



Vue de dessus



ANNEXE III  
\*\*\*\*\*

LE MINI-MOVER 5  
-----

SYSTEME DE COMMANDE & PRINCIPALES CARACTERISTIQUES  
-----

III.1 PRESENTATION DETAILLEE DES SIX INSTRUCTIONS DE  
 -----  
 COMMANDE "ARMBASIC" DU MINI-MOVER 5  
 -----

Rappelons que le langage ARMBASIC adapté pour le Mini-Mover 5 permet de le commander très facilement grâce à six instructions simples mais puissantes lui permettant ainsi de travailler dans un langage évolué qui est le BASIC. Ces instructions sont les suivantes :

@ STEP ; @ SET ; @ CLOSE ; @ RESET ; @ READ ; @ ARM

Une fois le langage ARMBASIC activé, ces six instructions de commande peuvent être utilisées dans un programme écrit en APPLESOFT, c'est-à-dire en BASIC étendu disponible sur l'APPLE .

La syntaxe employée est la suivante :

No de ligne	PRINT	"Nom de la commande"	,	Paramètres
-----	-----	-----		-----

III.1.1 La commande "@ STEP"  
 .....

Elle entraîne la rotation simultanée de chaque moteur pas-à-pas du robot ; elle est utilisée de la manière suivante :

No ?"@ STEP",D,J1,J2,J3,J4,J5,J6

- No est le numéro de la ligne du programme.
- En APPLESOFT, le symbole ? remplace l'instruction PRINT .

\* D est le paramètre vitesse, il fixe le retard R entre 2 pas :

$$R = 0.66 + 0.0127.D$$

R & D sont exprimés en ms .

### III.1.2 La commande "a SET"

.....

Elle permet de commander le Mini-Mover 5 en mode manuel par le biais de certaines touches du clavier de l'APPLE IIe (Cf. Figure A.2)

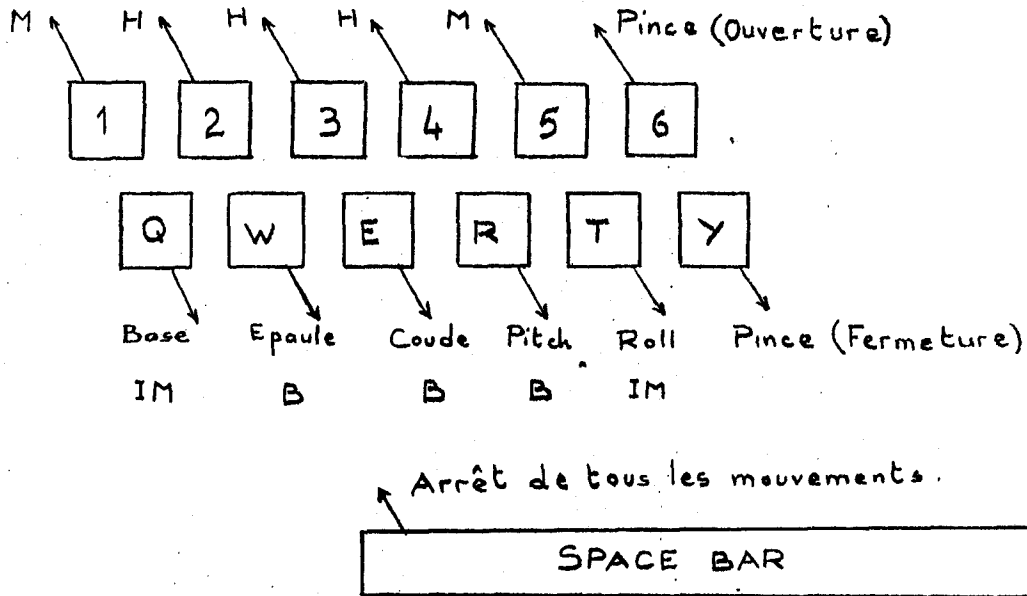


Figure A2 : Utilisation du clavier de l'APPLE II .

----- Les lettres H,B,M,IM indique le sens des déplacements.  
 H -----> vers le haut ; B -----> vers le bas .  
 M -----> sens des aiguilles d'une montre .  
 IM -----> sens inverse de M .

La syntaxe de cette commande est la suivante :

No ?"a SET", D

D étant le paramètre vitesse ( 100 < D < 300 ).

### III.1.3 La commande "a CLOSE"

.....

Elle permet la fermeture de la pince jusqu'à ce que le contact fermeture soit actionné (Interrupteur tension de câble).

(Cf. Figure II.3) . Sa syntaxe est la suivante :

No ?"a CLOSE",D

Les valeurs de D recommandées par le constructeur sont :

- 100 lorsque le robot fonctionne à vide .
- 160 lorsqu'il travaille à demi-charge .
- 300 lorsqu'il fonctionne à pleine charge .

Si dans un programme , la valeur D n'est pas précisée, une valeur de 512 lui sera attribuée par défaut .

\*  $J_i$  ( $i=1$  à 6) est un nombre entier exprimant le nombre de pas que doivent effectuer les moteurs 1 à 6.  $J_i$  peut être soit positif, soit négatif .

Lorsque tous les  $J_i$  sont positifs, les sens des mouvements sont les suivants :

- $J_1$  : Rotation de la base dans le sens des aiguilles d'une montre .
- $J_2$  : Rotation de l'épaule vers le bas .
- $J_3$  : Rotation du coude vers le haut .
- $J_4$  &  $J_5$  : Rotations du poignet telles que :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_5 - P_4}{K} \quad \& \quad R = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_4 + P_5}{K}$$

$$(K = K_4 = K_5)$$

- $J_6$  : Ouverture de la pince .

En plus de ceci, la commande @ STEP assure la coordination de différents déplacements , c'est-à-dire que toutes les articulations s'effectuent pendant le même intervalle de temps. Elle permet aussi le découplage de l'ouverture de la pince par rapport à la rotation du coude .



### III.1.4 La commande "a RESET"

.....

Le manipulateur ne comportant aucun capteur de position, sa configuration , c'est-à-dire les différentes valeurs des angles  $\alpha_i$  ainsi que l'ouverture de la pince, peut être déterminée de manière relative en comptabilisant le nombre de pas effectués par chaque moteur à partir d'une configuration initiale quelconque mais connue .

Chaque moteur est actionné à partir d'un registre de commande de 4 bits, définissant ainsi une position angulaire. La différence du contenu du registre de commande, avant et après un mouvement, correspond au nombre de pas effectués par ce moteur pendant ce mouvement .

Sachant que le nombre de pas est proportionnel à la différence de position angulaire (ceci dans le cas où un obstacle ou une charge excessive n'entraîne pas un glissement du rotor), la lecture du registre de commande de chaque moteur et son exploitation peut alors permettre une mesure de position .

La commande "a RESET" initialise à zéro les registres de commande de chaque moteur, et coupe l'alimentation de leurs enroulements. Il est par conséquent possible de modifier manuellement la configuration du manipulateur .

La syntaxe de cette comande est la suivante :

No ?"a RESET"

### III.1.5 La commande "a READ"

.....

Elle se traduit par la lecture du registre de commande de chaque moteur en assimilant le contenu de chacun d'eux à une variable de programme.

Sa syntaxe s'écrit de la manière suivante :

No ?"a READ"

No INPUT V1, V2, V3, V4, V5, V6

Vi étant des variables du programme BASIC .

### III.1.6 La commande "a ARM"

.....

Cette commande est utilisée lorsque deux robots MINI-MOVER sont sous contrôle ARMBASIC et pilotés par un même calculateur .

Elle permet alors de sélectionner le manipulateur qui devra exécuter les commandes ARMBASIC .

Sa syntaxe est :

No ?"a ARM",N

N étant un nombre valant 1 ou 2 .

### III.2 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU MINI-MOVER 5

---

Elles sont récapitulées dans le tableau A ci-dessous :

<u>GENERAL</u>			
Configuration	5 revolute axes and integral hand		
Drive	Electric stepper motors- Open loop control		
Controller	Microcomputer provided by user		
Interface	Apple II, TRS-80, or 8-Bit parallel		
Program language	ARMBASIC for Apple II and TRS-80 ( Z-80 and 6502 drivers available )		
Power requirement	12 to 14 volts, 4 amps DC		
<u>PERFORMANCE</u>			
Resolution	0.011 in (0.25 mm) maximum on each axis		
Load Capacity	16 oz (445 gm) at full extension		
Gripping force	3 lbs (13 N) maximum		
Reach	17.5 in (444 mm)		
Static load force	4 lbs (18 N) maximum		
<u>DETAILED PERFORMANCE</u>			
<u>Motion</u>	<u>Range</u>	<u>Speed (full load)</u>	<u>Speed (no load)</u>
Base	+90 deg	0.37 rad/s	0.42 rad/s
Shoulder	+144, -35 deg	0.15 rad/s	0.36 rad/s
Elbow	+0, -149 deg	0.23 rad/s	0.82 rad/s
Wrist Roll	+180 deg	1.31 rad/s	2.02 rad/s
Wrist Pitch	+90 deg	1.31 rad/s	2.02 rad/s
Hand	0-3 in (0-75 mm)	3 lb/s (13N/s)	0.80 in/s (20 mm/s)
<u>PHYSICAL CHARACTERISTICS</u>			
Arm weight	8 lbs (4 kg)		
Interface cable length	3 ft (900 mm)		

Tableau A : Caractéristiques du robot MINI-MOVER 5 .

---



Monsieur Lotfi DSMAN

\*\*\*\*\*

"Perception et description du contexte local appliquées à la commande d'un robot sous-marin"

Doctorat 3ème cycle :Automatique & Informatique Industrielle  
U.S.T de LILLE I , Mai 1987 .

## RESUME

La perception du contexte local, sa description symbolique et la commande en boucle fermée d'un robot passent nécessairement par l'acquisition d'informations obtenues à partir de son équipement sensoriel. Ceci est rendu possible grâce à un ou plusieurs capteurs choisis compte-tenu de l'application envisagée.

Le robot devant évoluer dans un milieu sous-marin, nous avons utilisé un transducteur ultrasonore porté par le préhenseur. Cette disposition lui permet de percevoir et de reconnaître son environnement, et par conséquent, de superviser l'exécution de la tâche qui lui a été assignée.

Les réalisations mises en oeuvre expérimentalement utilisent précisément ce moyen de perception comme lien entre le robot et son contexte local. Les résultats obtenus permettent de considérer chaque élément reconnu et ses caractéristiques comme des composantes d'une expression décrivant symboliquement l'environnement du robot .

MOTS CLES :COMMANDE, PERCEPTION, CONTEXTE LOCAL, DESCRIPTION  
----- SYMBOLIQUE, ROBOT SOUS-MARIN, CAPTEUR ULTRASONORE.

## ABSTRACT

The perception of local context, his symbolic description and the closed loop control of robots require the acquisition of information coming from their sensors .

Because robot must work in underwater environment, we have used an ultrasonic transducer placed on the manipulator end-effector, this sensor can provide essential information concerning his neighborhood .

The experimental results permit to consider each recognized feature as the component of a symbolic expression which describes the neighborhood of the robot .

We can used the same concept in various applications such as : Automatic control , Pattern recognition and Artificial intelligence .

KEY WORDS : CONTROL , PERCEPTION , LOCAL CONTEXT , SYMBOLIC  
----- DESCRIPTION, UNDERWATER ROBOT, ULTRASONIC SENSOR.

