

50376  
1983  
274

50376  
1983  
274

• d'ordre : 1071

*consultation  
sur  
place uniquement*

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE 1

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR 3<sup>ème</sup> CYCLE EN AUTOMATIQUE

par

Patrice AUTECHAUD

**CONTROLE HOMME-MACHINE DANS L'EXECUTION  
D'UNE TACHE EN ROBOTIQUE**



Soutenu le 8 Juillet 1983 devant la Commission d'Examen

MM.	P.	VIDAL	Président et Rapporteur
	L.	POVY	Examineur
	D.	JOLLY	Examineur
	J.L.	BEURIENE	Invité

50376  
1983  
274

50376  
1983  
274

N° d'ordre : 1071

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE 1

pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR 3ème CYCLE EN AUTOMATIQUE**

par

Patrice AUTECHAUD

**CONTROLE HOMME-MACHINE DANS L'EXECUTION  
D'UNE TACHE EN ROBOTIQUE**



Soutenue le 8 Juillet 1983 devant la Commission d'Examen

MM.	P.	VIDAL	Président et Rapporteur
	L.	POVY	Examineur
	D.	JOLLY	Examineur
	J.L.	BEURIENE	Invité

- AVANT - PROPOS -

---

Ce mémoire représente la synthèse des travaux de recherche que nous avons effectués au laboratoire d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur, Pierre VIDAL, Directeur du Centre d'Automatique, pour l'accueil qu'il m'a réservé et les moyens qu'il a mis à ma disposition pour la réalisation de ce travail.

Je le remercie très sincèrement d'avoir accepté de diriger ces recherches et de l'honneur qu'il me fait en assurant la présidence du jury.

Je remercie également Monsieur Daniel JOLLY, Directeur du Service Electronique à l'Office Technique pour l'Equipement du Territoire à Paris, pour les conseils qu'il m'a apportés pendant ces travaux.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Lucien POVY, Professeur au Centre d'Automatique, pour la confiance qu'il m'accorde en participant au jury de thèse.

Mes remerciements vont aussi à Madame Annick PIGNON et Monsieur Jean HOUZE qui ont collaboré à la réalisation de cet ouvrage, ainsi qu'à tout le personnel du Centre d'Automatique et collègues chercheurs pour leur aide amicale.

- T A B L E   D E S   M A T I E R E S -

---

. AVANT-PROPOS

. INTRODUCTION GENERALE

. PREMIERE PARTIE : **LE ROBOT**

. CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DU ROBOT-MANIPULATEUR  
DEFINITION DE SON ENVIRONNEMENT.

INTRODUCTION.....	I.1
1.1. Conception initiale du robot manipulateur.....	I.3
1.2. Mesure de paramètres caractéristiques : fréquences de coupure, vitesses limites.....	I.4
1.3. Collecte et traitement des informations sur le processus.....	I.7
1.4. Caractéristiques des capteurs infrarouges.....	I.16
1.5. Résolution des problèmes de sécurité.....	I.18
CONCLUSION.....	I.21
BIBLIOGRAPHIE.....	I.22

. CHAPITRE II : COMMANDE EN POSITION - COMMANDE EN VITESSE -  
ETUDE COMPARATIVE.

INTRODUCTION.....	II.1
2.1. Les différentes commandes.....	II.1
2.2. Mise en oeuvre des commandes envisagées.....	II.1
2.3. Etude comparative et caractéristiques des commandes en vitesse et position.....	II.2
2.4. Commande en vitesse : réalisation numérique.....	II.12
CONCLUSION.....	II.18
BIBLIOGRAPHIE.....	II.19

. DEUXIEME PARTIE : **CONDUITE SPECIFIQUE**

. CHAPITRE III : STRUCTURE DE LA COMMANDE.

INTRODUCTION.....	III.1
3.1. Présentation du mode de conduite mixte.....	III.2
3.2. Description de la manipulation : pilotage en mode semi-automatique.....	III.4
3.3. Décomposition de la commande dans une structure mode mixte.....	III.6
3.4. Avantages d'une décomposition modulaire de la structure du système.....	III.7
3.5. Inconvénients.....	III.8
3.6. Description des différents modules intervenant dans la commande homme-machine.....	III.9
3.7. Présentation des modules étudiés.....	III.11
3.8. Modélisation du robot : Introduction.....	III.12
3.9. Coordonnées opérationnelles - coordonnées généralisées.....	III.14
3.10. Notion de redondance.....	III.15
3.11. Les différents modèles associés à un robot.....	III.15
3.12. Détermination du modèle géométrique du manipulateur	III.21
3.13. Modèle variationnel, calcul de la matrice Jacobienne.....	III.28
3.14. Modèle géométrique d'une structure simplifiée du manipulateur.....	III.31
CONCLUSION.....	III.38
BIBLIOGRAPHIE.....	III.39

. CHAPITRE IV : INTEGRATION - ETUDE FONCTIONNELLE.

INTRODUCTION.....	IV.1
4.1. Mise en place de la manipulation.....	IV.1
4.2. Reconnaissance d'un objet.....	IV.2
4.3. Reconnaissance d'un objet de forme simple.....	IV.3
4.4. Essais - Résultats.....	IV.15
CONCLUSION.....	IV.21
BIBLIOGRAPHIE.....	IV.22

. CONCLUSION GENERALE

. ANNEXES.

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'introduction de la robotique dans l'automatisation industrielle répond à des besoins socio-économiques de plus en plus pressants, compte-tenu d'une part de la réduction de postes de travail répétitifs, pénibles ou dangereux, d'autre part de l'accroissement sans cesse souhaité de la productivité.

De plus, la présence humaine dans de nombreux processus industriels est parfois considérée comme un inconvénient en raison de l'irrégularité et de la faillibilité du comportement de l'homme.

Cependant, dans l'état actuel de la technologie, il est peut-être intéressant de tenir compte des capacités humaines de traitement global de l'information et d'intervention dans la commande du processus, en raison parfois de la complexité de mise en oeuvre et du coût de réalisation d'un système industriel entièrement automatique. Dans le domaine médical, avec la réalisation de télémanipulateur d'assistance aux handicapés se posent en permanence les problèmes de couplage homme-robot.

En raison de ces conditions, la participation de l'homme tend à se réduire dans ses efforts physiques et l'insertion de la robotique dans l'industrie conduit à une modification des prestations de l'opérateur humain.

Une solution envisageable est basée sur l'analyse des possibilités d'intégration de l'opérateur humain dans l'exécution d'une tâche. Toutefois, avant d'aborder ce point il convient de préciser la notion de robot et d'accepter la définition de J. GUITTET :

"C'est un automatisme adaptable à un environnement complexe, prolongeant ou remplaçant une ou plusieurs fonctions de l'homme dans son action sur l'environnement".

Les robots sont alors considérés comme des systèmes appartenant à l'ensemble des machines dont la spécificité peut-être définie à l'aide de propriétés telles que : adaptivité, autonomie, versatilité... et des caractéristiques telles que : perception, action, dialogue, décision.

En règle générale, on peut considérer que le robot est constitué par plusieurs systèmes connectés entre-eux :

- un système de perception destiné à prélever les informations issues de l'environnement, composé de capteurs et d'éléments d'analyse de ces informations.
- un système d'action, afin d'agir sur l'environnement à l'aide d'une structure de commande et d'actionneurs.
- un système de dialogue pour converser avec l'opérateur .
- un système de gestion, traitement et décision gérant l'ensemble des systèmes cités ci-dessus.

Il est également possible de décomposer la commande des "robots" en plusieurs phases :

- manuelle
- semi-automatique
- automatique.

L'intervention de l'homme dans ces différents modes de conduite prend une place plus ou moins importante et leur multiplicité permet de mieux s'adapter aux situations particulières.

Les travaux présentés dans ce mémoire se situent dans le contexte d'une commande semi-automatique qui, dans la suite de cet exposé, sera appelée "conduite mixte". La commande "mixte" consiste en une approche telle que l'opérateur ("intelligent", mais irrégulier) et la machine (répétitive, mais peu adaptable) peuvent travailler en collaboration en fonction des tâches qui sont les plus appropriées à chacun d'entre eux. Cette technique améliore par ailleurs les possibilités d'action du système qui peut ainsi atteindre des performances supérieures à celles obtenues lors d'une commande exclusivement manuelle ou d'une commande automatique.

Elle se différencie du mode de conduite semi-automatique par l'introduction de "critères" qui décident du choix de la commande : intervention de l'opérateur, évolution automatique.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une vue d'ensemble de l'environnement du robot, description et mise en place des différents éléments intervenant dans le contrôle et la commande de celui-ci.

Les possibilités de pilotage du robot par un opérateur humain sont ensuite présentées dans le deuxième chapitre au cours duquel nous faisons une étude critique et comparative des différentes commandes utilisées lors de la conduite du robot par l'homme.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du mode mixte proprement dit. Nous proposons une structure générale du système de commande mettant en évidence les problèmes de la répartition des tâches et le rôle joué par les différents modules ainsi définis. La description de l'un de ces modules fait l'objet d'une étude spécifique des modèles associés au robot manipulateur (modèle géométrique, modèle variationnel). L'objectif consiste en la définition des équations de commande d'une structure simplifiée du manipulateur permettant si besoin de piloter le robot en coordonnées cartésiennes.

Le dernier chapitre permet de vérifier la fonctionnalité des éléments de commande développés au cours des chapitres précédents. Un exemple de manipulation du type saisie d'objet est présenté. Il intègre un ensemble de fonctions telles que : le pilotage manuel, la reconnaissance d'un objet à l'aide de capteurs infrarouges l'évolution du robot en cycle automatique.

Dans ce mémoire sont abordés les problèmes liés à la définition d'une structure de commande intégrant la participation de l'homme et du robot en fonction de leur "aptitude" à réaliser la tâche. L'affectation de la commande est définie au préalable et décidée soit par l'opérateur, soit par les capteurs d'environnement du robot : c'est le mode de conduite semi-automatique.

Cette structure de commande étant mise en place, la poursuite de la recherche portera sur la réalisation d'un "superviseur" où l'introduction de critères décidera d'attribuer la tâche à l'opérateur (télémanipulation) ou au robot. C'est la spécificité du mode de conduite mixte, et dans ce contexte la machine se substitue à l'homme pour décider de l'affectation des tâches à réaliser sans répartition prédéfinie.

- PREMIERE PARTIE -

LE ROBOT

---

- C H A P I T R E I -

CARACTERISTIQUES DU ROBOT - MANIPULATEUR

---

DEFINITION DE SON ENVIRONNEMENT.

---

## I - INTRODUCTION :

Avant de définir les caractéristiques du robot-manipulateur utilisé dans cette étude, il convient d'effectuer un bref rappel sur l'évolution au cours de la dernière décennie des robots et de leurs applications.

Ancêtres des robots, les premiers manipulateurs ont été conçus, à l'origine, pour suppléer l'homme dans des travaux physiquement pénibles ou dangereux. Ils interviennent dans l'assistance à la manipulation lourde, l'industrie nucléaire, mais aussi dans d'autres environnements hostiles tels que le milieu sous-marin ou l'espace, l'industrie chimique, le travail dans les mines, etc... Ces manipulateurs sont en général de type maître-esclave commandés directement par l'homme et permettent de réaliser avec assez de facilité ces tâches /1//2/.

Depuis ces dix dernières années des progrès ont été accomplis et le terme robot prend une autre signification. Il caractérise un manipulateur automatique évolué, capable de s'adapter à l'environnement au sein duquel il agit. Pour devenir "intelligent" un robot doit être muni d'organes de perception, être capable de calculer sa trajectoire, être susceptible de coordonner ses mouvements et d'effectuer des déplacements sensés, l'objectif poursuivi étant de le rendre versatile et autonome /3/.

Afin de mieux percevoir cette évolution on a l'habitude de distinguer trois générations de robots :

### . Première génération :

Les manipulateurs de la première génération sont essentiellement commandés par un opérateur humain (télémanipulateurs). L'homme joue un rôle prépondérant dans la conduite du système, car il fait face à toutes les circonstances prévues ou imprévues et guide en permanence les mouvements du manipulateur. Le télémanipulateur est

soit un appareil amplificateur de force (manutention), soit un appareil destiné à oeuvrer dans des ambiances difficiles (nucléaire principalement).

. Deuxième génération :

Les tâches fastidieuses, soit par leur répétitivité, soit par leur sollicitation psychosensorielle, ont conduit dans certaines applications à remplacer les télémanipulateurs par des robots automatiques spécialisés travaillant, généralement, en boucle ouverte. Leurs séquences de mouvements sont enregistrées et figées dans une mémoire lors de la phase d'apprentissage ; elles sont relues et les mouvements recopiés lors de la phase de travail. Toute modification de séquence entraîne une nouvelle phase d'apprentissage /4/. Les principales applications intéressent :

- la soudure par points - la peinture - l'ébarbage - le polissage de pièces, etc...

. Troisième génération :

Il manque aux manipulateurs de la première et deuxième génération un certain nombre de fonctions sensorielles. Les robots de la troisième génération sont équipés d'organes sensoriels, ainsi que de systèmes réalisant la coordination entre les capteurs et les effecteurs. Le degré d'autonomie de ce type de robot (l'homme n'étant pas dans la boucle) caractérise son "intelligence" et il est possible de l'utiliser pour : la reconnaissance d'objet, le tri de pièces, l'assemblage. Cette évolution passe par l'application des recherches sur l'intelligence artificielle et constitue un thème important des études entreprises actuellement /5/.

Dans ces trois générations de robots manipulateurs, selon le degré d'intervention de l'homme dans le pilotage, il est possible de définir trois modes de conduite distincts :

- mode manuel :

L'opérateur intervient en permanence dans la boucle de commande en temps réel ou différé.

- mode semi-automatique :

L'opérateur intervient quelque fois au cours de l'exécution des tâches pour guider, corriger ou débloquer le système.

- mode automatique :

Dans ce cas l'opérateur n'intervient que pour initialiser le système.

Nos travaux, dans ce contexte, se sont orientés vers le mode de conduite semi-automatique où l'homme et le robot se partagent les tâches. Certaines tâches sont exécutées sous le contrôle de l'opérateur, d'autres de manière automatique par le robot. Cette complémentarité dans l'exécution des tâches permet de ce fait de s'adapter à des situations particulières en tenant compte, par exemple, de critères socio-économiques ou ergonomiques /6/.

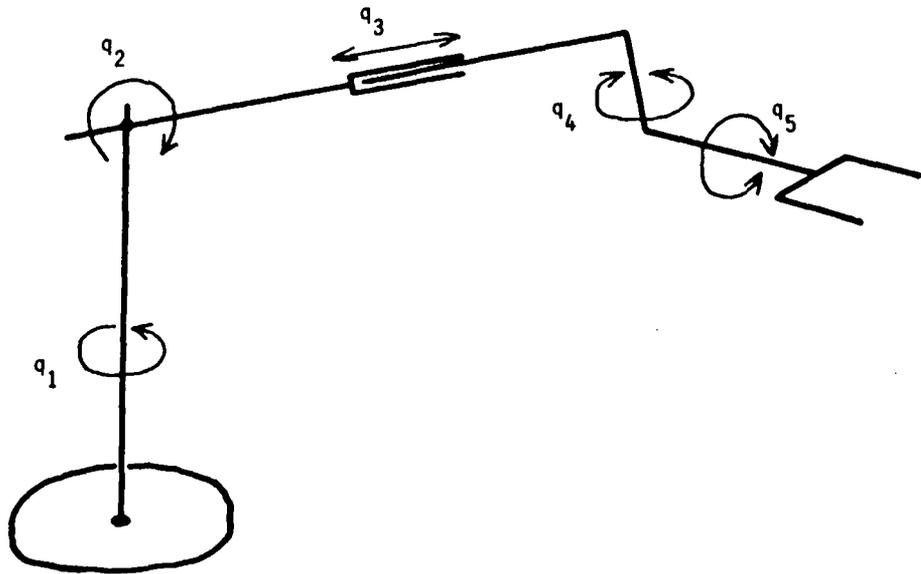
1\1. CONCEPTION INITIALE DU ROBOT MANIPULATEUR

Le manipulateur de fabrication industrielle utilisé dans cette étude faisait partie de la deuxième génération des robots. Il était conçu pour faire de la recopie de trajectoire mémorisée sur cassette. Dans cette configuration, l'opérateur doit déplacer lui-même le bras du manipulateur pendant la phase d'enregistrement d'une séquence de mouvements. L'unité de commande était analogique et le manipulateur possédait cinq degrés de liberté (quatre rotations + une translation) commandés par des actionneurs hydrauliques (fig. 1.1.).

- 3 degrés pour le bras
  - . rotation horizontale ( $q_1$ )
  - . rotation verticale ( $q_2$ )
  - . extension du bras ( $q_3$ )

- 2 degrés pour le poignet (support de l'organe terminal
  - . rotation horizontale ( $q_4$ )
  - . "torsion" du poignet ( $q_5$ )

L'extension de la structure de base et de sa commande numérique hiérarchisée va ainsi que nous allons le montrer permettre de classer ce robot dans la troisième génération.



- Figure 1.1. -

1.2. MESURE DE PARAMETRES CARACTERISTIQUES : FREQUENCES DE COUPURE, VITESSES LIMITES

Un certain nombre de signaux de tests appliqués aux actionneurs du robot ont permis :

- de visualiser sur un oscilloscope les performances des asservissements.

- d'analyser le comportement passe-bas des actionneurs du robot lorsqu'on leur impose des vitesses de déplacement élevées (la fréquence propre des oscillations du robot est plus ou moins importante selon l'inertie et la rigidité mécanique de chaque articulation).
- de calculer un certain nombre de caractéristiques propres au robot
  - \* vitesse limite des différents degrés de liberté
  - \* leur fréquence de coupure.

Parmi l'ensemble des signaux de test retenons en deux particulièrement intéressants pour déterminer quelques-unes de ses caractéristiques.

- signal sinusoïdal : détermination des fonctions de transfert et des fréquences de coupure de chaque degré de liberté.
- échelon : calcul des vitesses limites.

#### 1.2.1. Régime harmonique

##### a) Choix de la méthode

Son emploi se justifie pour les raisons suivantes :

- \* sollicitations acceptables par le système
- \* détermination des fréquences critiques du robot
- \* mise en oeuvre assez simple.

Le relevé des courbes d'amplitude et de phase en fonction de la fréquence pour chaque degré de liberté est donné en annexe 1.

##### b) Résultats

- La courbe d'amplitude et la courbe de phase (pente - 20 dB/décade, retard de 90°) nous permettent de constater que chaque degré de liberté du robot se comporte approximativement comme un intégrateur aux basses fréquences.

- La fréquence de coupure de chacun des degrés de liberté est plus ou moins élevée en fonction de l'inertie des pièces en mouvement (entre 2 et 5 Hz pour le bras, entre 20 et 30 Hz pour le poignet).

- Lorsque le produit de l'amplitude par la fréquence du signal d'entrée dépasse une certaine valeur, propre au degré considéré, la réponse est assimilable à un signal triangulaire. De toute évidence sur l'oscilloscope on constate que nous avons atteint la vitesse limite du degré de liberté étudié.

. REMARQUE :

Les valeurs des fréquences de coupure mesurées sont obtenues pour des conditions opératoires précises où interviennent la masse de l'organe terminal, ainsi que la position de l'extension du bras, car les valeurs des fréquences de coupure des degrés de liberté  $q_1$  et  $q_2$  (fig. 1.1.) y sont très sensibles. Nous avons positionné l'extension du bras à mi-course sans charge supplémentaire sur l'organe terminal. Les valeurs mesurées représentent une valeur dite "moyenne" des fréquences de coupure. Elles peuvent varier dans une fourchette comprise entre  $\pm 5$  Hz selon l'extension du bras.

1.2.2. Régime transitoire

Les courbes de réponse à un échelon de position (annexe 1) caractérisent le régime transitoire de chacun des degrés de libertés et permettent ainsi de calculer leurs "vitesses limites" (fig. 1.2.)

On constate en particulier des dépassements dûs essentiellement à l'inertie ainsi qu'au mode de transmission (flexibilité du bras manipulateur dans ses déplacements gauche-droite, comportement non linéaire de la chaîne de transmission lors de l'extension du bras). Ce sont des défauts dûs à la structure mécanique du bras.

Articulations du robot	Vitesses maxi
Rotation horizontale ( $q_1$ )	3,71 rd/s
Rotation verticale ( $q_2$ )	1,01 rd/s
Extension du bras ( $q_3$ )	1,39 m/s
Rotation horizontale poignet ( $q_4$ )	3,05 rd/s
Torsion poignet ( $q_5$ )	2,81 rd/s

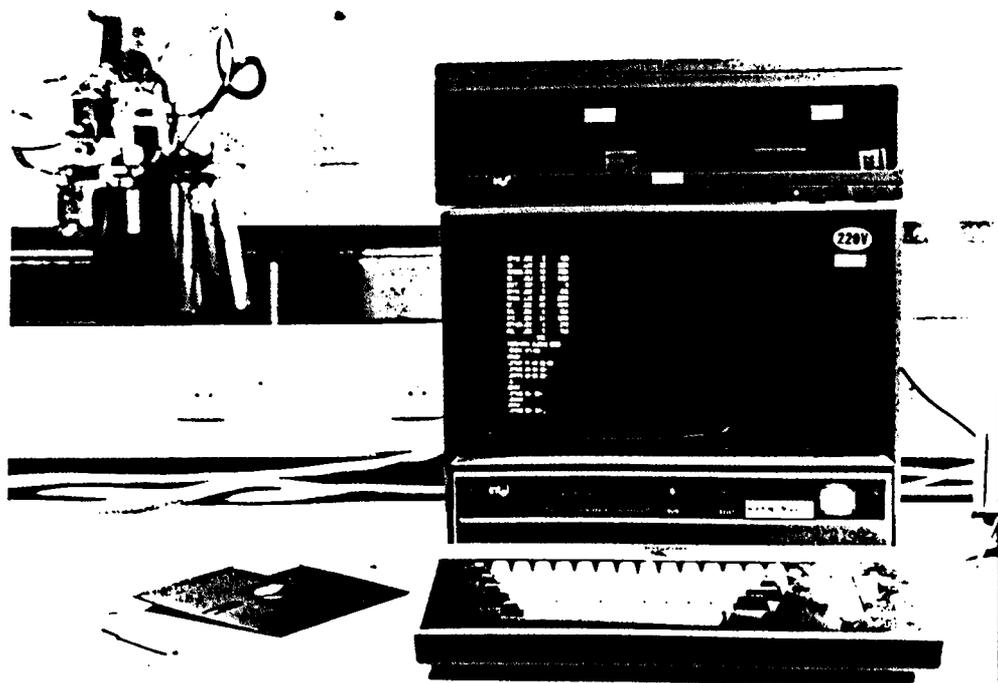
- Figure 1.2. -

### 1.3. COLLECTE ET TRAITEMENT DES INFORMATIONS SUR LE PROCESSUS

On dispose initialement pour mettre en oeuvre le programme de recherche d'un manipulateur dont la commande est constituée de circuits entièrement analogiques. Pour des questions de souplesse d'utilisation et de développement de la structure existante, il convenait de transformer la commande analogique en numérique. Le calculateur, organe central de la commande du processus, a pour tâche essentielle d'effectuer l'échange et le traitement des informations. La définition de tous les éléments matériels nécessaires à l'environnement du robot fait l'objet des prochains paragraphes.

### 1.3.1. Le calculateur

C'est un système INTEL MDS 221 permettant le développement, la mise au point des programmes et leur exécution. Il est construit autour d'un microprocesseur "maître" 8 bits 8080 INTEL, un second microprocesseur "esclave" gère et contrôle les entrées-sorties, le clavier, l'écran de visualisation et les unités de disques souples (fig. 1.3.).



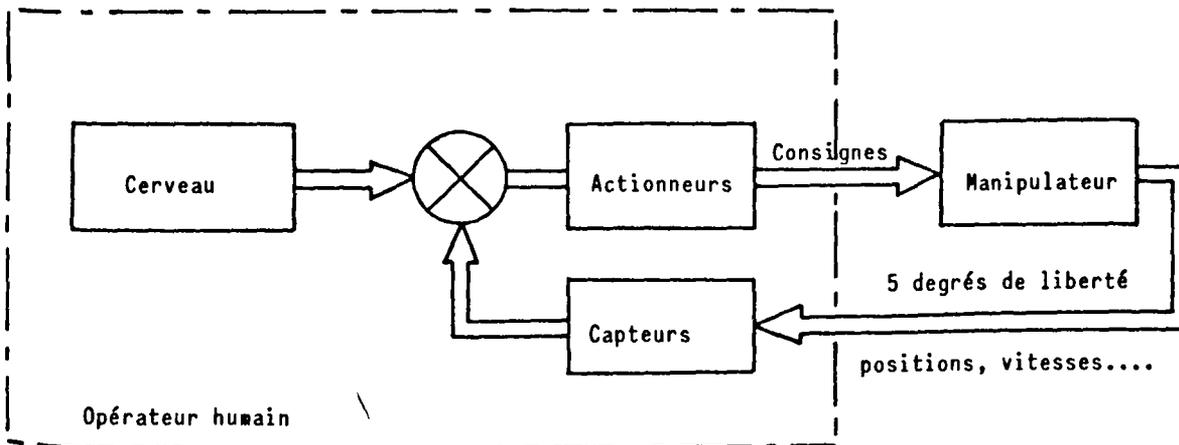
- Figure 1.3. -

Le calculateur est couplé au robot (capteurs et actionneurs) par l'intermédiaire de deux cartes spécialisées permettant la conversion analogique-numérique et numérique-analogique des informations échangées.

Le langage de programmation est en ASSEMBLEUR ou en P.L.M. Toutefois l'adjonction de langages de hauts niveaux, tels que le PASCAL ou le FORTRAN, serait intéressante.

### 1.3.2. Les moyens de commande du télémanipulateur par l'homme.

Dans le cadre d'un mode de conduite semi-automatique, l'homme intervient dans l'exécution de certaines tâches et il doit donc disposer d'interfaces adaptées, afin de commander et de faire évoluer le manipulateur. Le pilotage du télémanipulateur par un opérateur fait appel à ses capteurs et actionneurs (fig. 1.4.)



- Figure 1.4. -

Une analyse rapide des capteurs utilisés par l'homme fait apparaître que la vue est l'organe de perception le mieux adapté pour contrôler l'évolution du bras du robot, ainsi que son environnement (commande en boucle fermée par contrôle visuel).

Par contre, un choix plus important est offert pour les actionneurs : tête, membres, épaules, etc...car il s'agit en effet pour l'opérateur de générer trois commandes indépendantes (X, Y, Z) liées à la position spatiale de l'extrémité du bras manipulateur, ainsi que deux autres afin d'orienter le poignet. Nous avons retenu deux possibilités de conduite en temps réel du manipulateur.

- La commande manuelle

L'opérateur pilote le manipulateur par l'intermédiaire d'une console manuelle munie de potentiomètres du type "manche à balai", "curseur" qui agissent sur les cinq degrés de liberté.

- La commande par capteur céphalique

Les mouvements de tête de l'opérateur peuvent commander deux ou trois degrés de liberté (par exemple déplacements : droite/gauche, haut/bas, avance/recul, du bras du robot).

1.3.2.1. Couplage du capteur céphalique

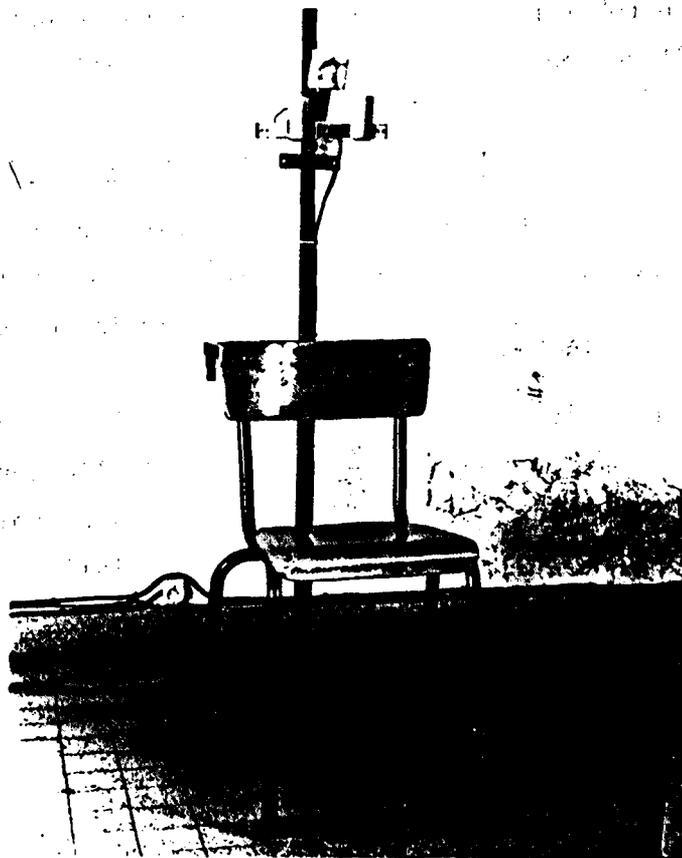
Dans le cadre du projet Spartacus, le laboratoire de Neuro-physiologie de l'Université de Lille II et le Centre d'Automatique de l'Université de Lille 1 ont été chargés d'étudier les possibilités de commander un engin à l'aide d'un capteur de mouvements de tête. Cette étude antérieure à notre projet a conduit à la réalisation d'un prototype de capteur /7/. Un protocole expérimental a été mis en place afin d'évaluer les performances du capteur dans différentes tâches de commande d'un fauteuil roulant pour handicapés physiques. Les déplacements d'un bras manipulateur peuvent s'effectuer par l'intermédiaire de ce capteur céphalique, cette commande présentant un intérêt particulier non seulement pour un opérateur humain ayant perdu l'usage de ses membres supérieurs, mais aussi lorsque l'opérateur possède toutes ses fonctions motrices mais dont les mains sont occupées pour d'autres tâches.

Description du capteur céphalique

Le fonctionnement du capteur de mouvements de tête (fig. 1.5.) est basé sur la flexion de lames élastiques dont les déformations sont captées par des jauges de contraintes délivrant deux signaux analogiques découplés :

- le premier, image d'une rotation droite - gauche (déplacement en azimut), détecté à l'aide de deux lames perpendiculaires à un appui-tête enserrant la partie postérieure de la tête.

- le deuxième, image d'un mouvement haut - bas (déplacement en site), est détecté par une troisième lame fixée à l'appui-tête, son autre extrémité restant en contact avec la tête et ceci en situation de pré-contrainte.



- Figure 1.5. -

Il est important de noter que cette commande céphalique doit respecter la correspondance entre le sens des mouvements de la tête et les déplacements du bras du robot :

- mouvement droite - gauche de la tête pour une rotation horizontale du bras du robot,
- mouvement haut - bas pour une rotation verticale du bras.

. REMARQUE :

Le capteur céphalique décrit précédemment commande seulement deux degrés de liberté sur les cinq existants. La possibilité d'utiliser un 3ème degré de liberté sur le capteur serait intéressante, afin d'obtenir une évolution du bras dans l'espace à trois dimensions, mais ce problème ne sera pas développé dans le cadre de ce mémoire.

1.3.2.2. Commande par console manuelle

La deuxième forme de conduite envisagée pour le pilotage du robot par un opérateur humain est constituée par la commande au moyen d'une console potentiométrique manuelle.

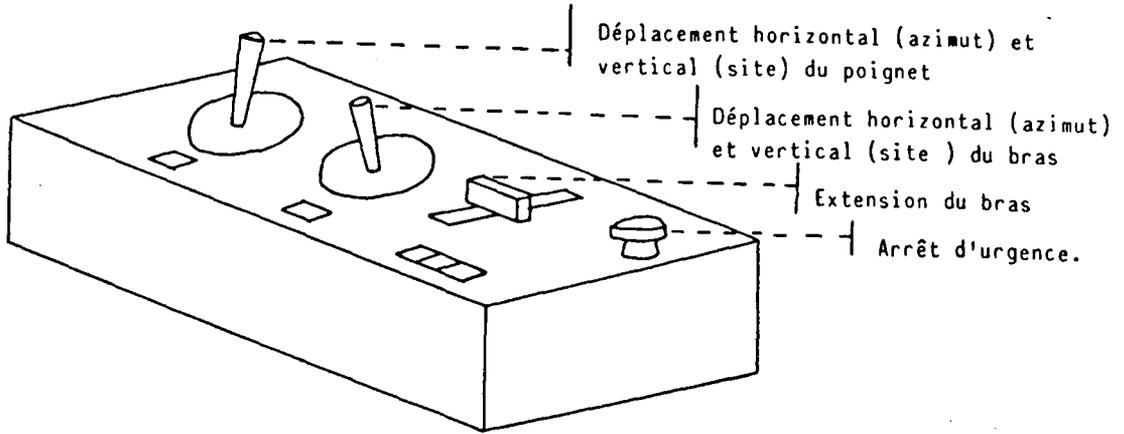
. Description de la console potentiométrique

La commande manuelle est réalisée à l'aide de capteurs potentiomètres de type "manche à balai" et "curseur" (fig. 1.6.) (fig. 1.7.).

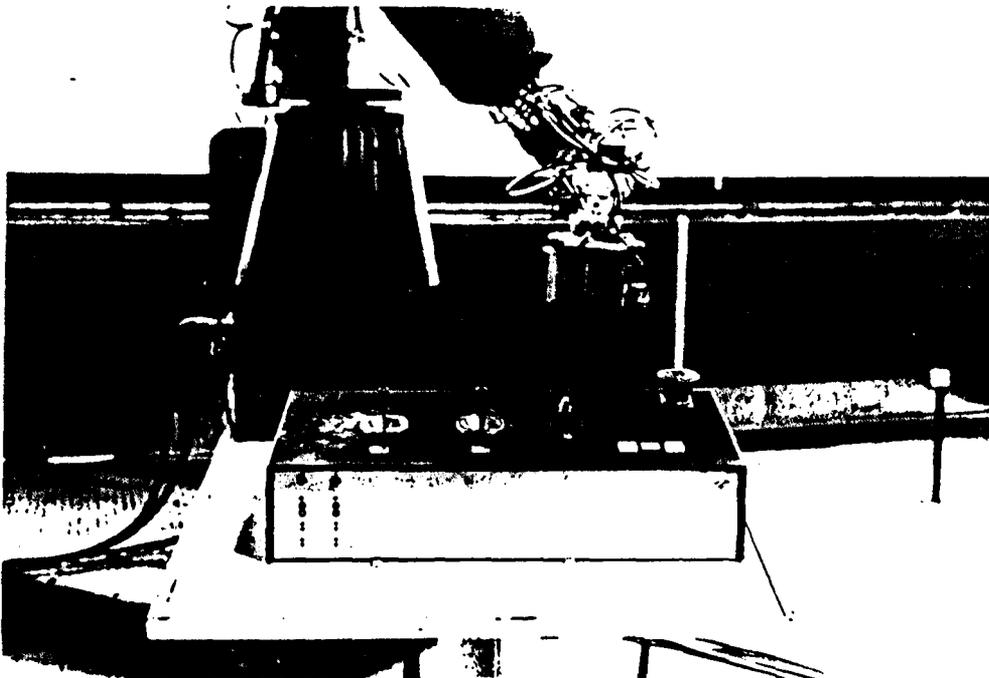
Les signaux délivrés par la console déterminent :

- les positions angulaires du bras du robot dans le sens horizontal et vertical (premier manche à balai)
- la position linéaire de l'extension du bras (curseur)
- les positions angulaires du poignet dans le sens horizontal et vertical (deuxième manche à balai)

Là encore on doit respecter la correspondance entre le sens de déplacement de la main de l'opérateur et le sens de déplacement du bras du robot.



- Figure 1.6. - Console de commande manuelle.



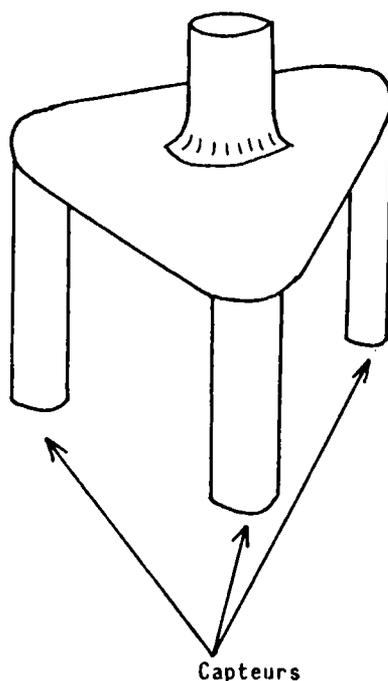
- Figure 1.7. -

### 1.3.3. Pince de saisie d'objet

L'un des objectifs de la manipulation envisagée (développé dans le chapitre expérimentation) est de réaliser la saisie d'un objet posé sur un plan support horizontal, les déplacements automatiques de la pince étant guidés et contrôlés par des capteurs infrarouges intégrés aux doigts de la pince.

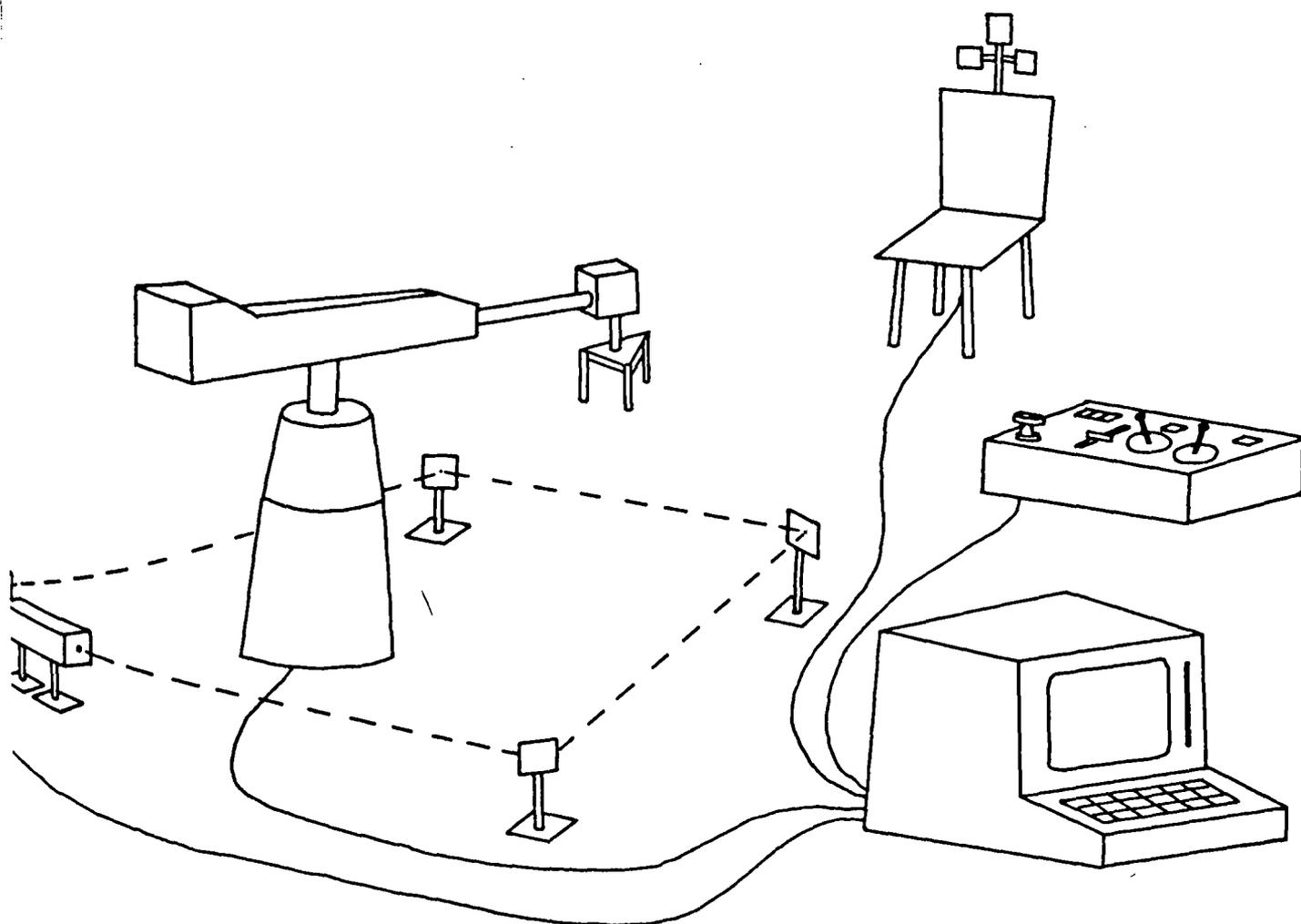
Nous pouvons imaginer des pinces de formes très diverses en fonction d'une part de la technologie employée (actionneurs : hydraulique, pneumatique, électrique) et d'autre part des exigences imposées par la nature et l'environnement de l'objet à saisir /8/.

Une solution technologique consiste à concevoir une pince dont la commande de serrage de chaque doigt est indépendante, afin de faciliter la saisie d'objets de formes quelconques. Le prototype utilisé pour l'expérimentation ne possédait pas d'actionneurs permettant le serrage des doigts (fig. 1.8.) car le laboratoire d'Automatique, en collaboration avec la Société BERTIN, participait à la réalisation d'une pince munie d'actionneurs. Celle-ci, par suite de difficultés techniques, n'a pu être mise en oeuvre dès le début de nos travaux et ce d'autant plus que les essais effectués ont permis de définir les caractéristiques définitives de la nouvelle pince (disposition et nombre de capteurs).



- Figure 1.8. -

La figure 1.9. représente schématiquement une vue d'ensemble des éléments décrits précédemment. On remarque, en particulier, la présence d'une barrière de sécurité optique qui empêche le personnel d'évoluer dans la zone d'action du robot ; les problèmes de sécurité feront l'objet d'une étude spécifique dans un prochain paragraphe.



- Figure 1.9. -

#### 1.4. CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS INFRAROUGES

Nous avons retenu deux modèles de capteurs, les critères de choix étant :

- un faible encombrement
- une distance de détection en proximité optique acceptable (environ 100 mm)
- la possibilité de détecter des objets de couleurs et de formes différentes sans modification importante de la distance de détection.

. Désignation :

- capteur "OPTEL"  $\varnothing$  18 x 87 mm
- capteur "VISOLUX" 47 x 32 x 17 mm

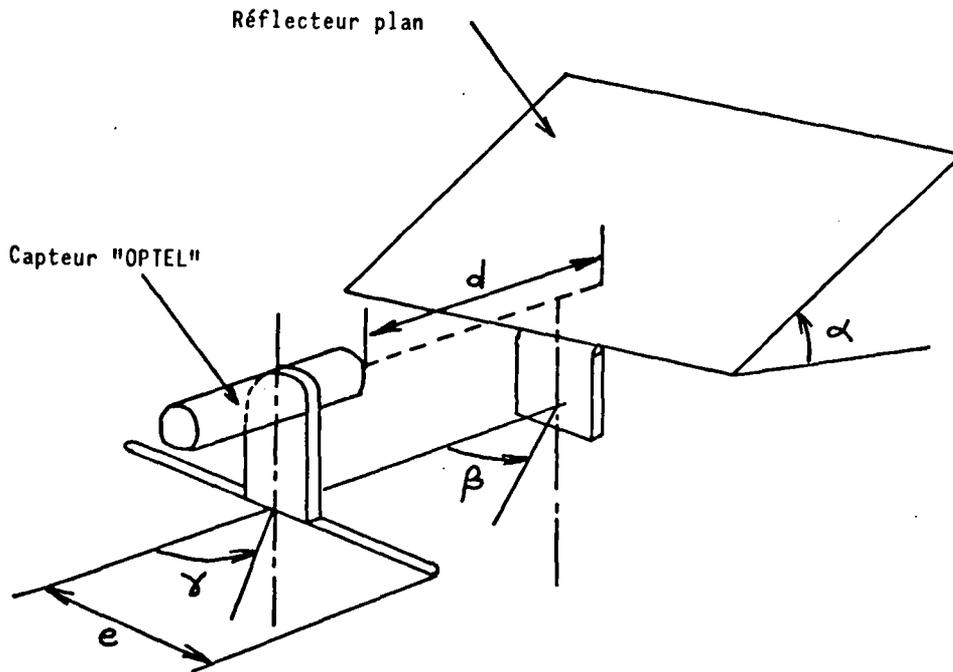
Le faisceau émetteur est du type infrarouge modulé (non sensible à la lumière ambiante), le récepteur est intégré dans le même boîtier. Ces capteurs fonctionnent en "tout ou rien" (détection ou non détection).

Pour contrôler la validité de l'information délivrée par les capteurs et connaître leurs caractéristiques propres telle que la distance de détection en fonction : de l'angle d'incidence sur l'objet, de la couleur de cet objet, nous avons effectué une série de mesures dans des conditions opératoires précises.

A cet effet le capteur est placé sur un support mobile et le réflecteur orientable caractérise l'objet à détecter (fig. 1.10.).

. Paramètres caractéristiques :

- $\gamma$  : rotation du capteur dans le plan horizontal
- e : déplacement latéral du capteur
- $\beta$  : rotation du réflecteur dans le plan horizontal
- $\alpha$  : rotation du réflecteur dans le plan vertical
- d : distance de détection (portée)



- Figure 1.10. -

Le relevé des différentes courbes citées ci-dessous est en annexe 2.

$$d = f(\gamma) \text{ pour } \neq \alpha \text{ (OPTEL)}$$

$$d = f(\alpha) \text{ pour } \neq \beta \text{ (OPTEL)}$$

$$e = f(\beta) \text{ } \alpha \text{ indifférent (OPTEL)}$$

Le réflecteur ou objet à détecter est matérialisé par une feuille de papier blanc mat.

Nous avons également relevé la caractéristique  $d = f(\gamma)$  (VISOLUX) pour différentes couleurs de réflecteur.

- Pour le commentaire sur les mesures voir annexe 2.

### 1.5. PROBLEMES DE SECURITE

On constate, au niveau de l'étude des problèmes de sécurité, une différence importante entre les robots manipulateurs et les machines automatiques classiques.

En effet avec les robots, contrairement aux machines classiques, nous sommes en présence d'engins dont les mouvements peuvent être de grande amplitude et à priori non connus à l'avance. De plus, lors d'un mode de conduite semi-automatique, l'opérateur peut-être proche de la zone de travail du robot et de ce fait sa sécurité doit être assurée.

Ces problèmes n'ont eu, jusqu'à présent, que peu d'écho dans la littérature scientifique et nous proposons dans ce paragraphe d'énumérer les solutions mises en oeuvre lors de notre étude. Ces problèmes concernent à la fois la sécurité des personnes évoluant à proximité du robot, mais aussi la protection du matériel.

La sécurité doit intervenir à différents stades de la commande, au niveau :

- de la puissance (générateur hydraulique)
- des asservissements
- des algorithmes d'évolution du robot.

Elle se caractérise par deux décisions distinctes :

#### . Décision réflexe

Ce sont des décisions non réfléchies, donc évolutives dans le temps, de façon unilatérale et autonome, en particulier lorsque la sécurité du matériel ou des personnes est en jeu. Il est évident et même recommandé de rendre prioritaire les décisions issues de ce niveau sur celles de l'homme ou du niveau réfléchi.

#### . Décision réfléchie

Ces décisions tiennent compte en temps réel de l'ensemble de l'environnement et sont donc évolutives dans le temps ; elles n'apparaissent que pendant la phase d'évolution automatique.

Ce niveau de décision réfléchi est tel que par exemple il :

- découple l'homme ou lui "rend la main"
- donne des paramètres pour aller d'un point à un autre
- appelle les différents algorithmes selon une stratégie préétablie.

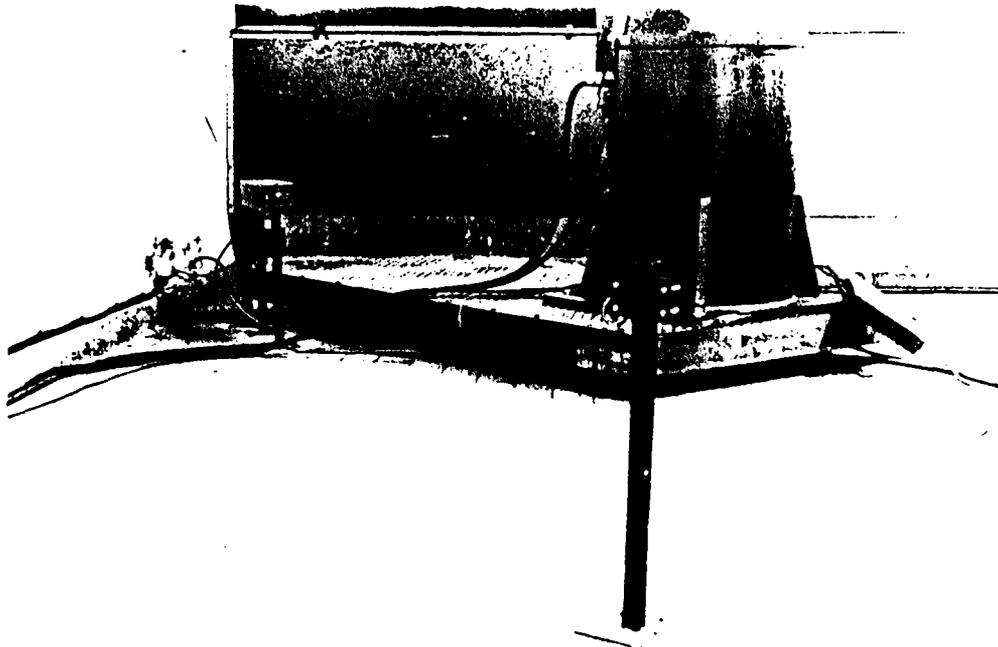
Les priorités concernant la sécurité peuvent se répartir dans cet ordre.

Sécurité N° 1 : C'est une sécurité primaire, elle stoppe toute évolution du bras du robot par l'arrêt du générateur hydraulique.

- rayon laser :

Une barrière optique avec réflexion du faisceau sur des miroirs entoure la zone d'action du bras du robot (fig. 1.9.) (fig. 1.11.).

Toute personne voulant atteindre la zone protégée coupe le faisceau laser et par conséquent arrête le générateur hydraulique.

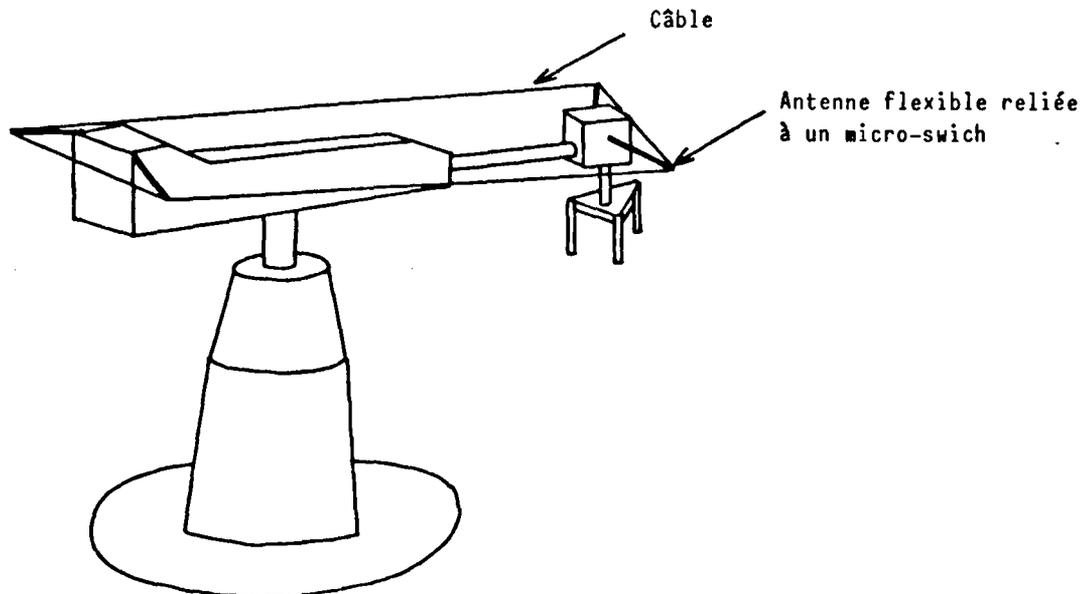


- Figure 1.11. -

Il existe sur le marché des capteurs à cellules photoélectriques du type barrage avec réflexion dont le prix moyen est inférieur à celui d'un laser, mais cette solution n'est pas facile à mettre en oeuvre lorsque l'on veut réaliser une barrière optique fermée. L'émission d'un faisceau laser de faible puissance (0,1 W) permet une couverture de plusieurs dizaines de mètres, mais néanmoins à cause de la diffraction de la lumière incidente sur les miroirs successifs, il est préférable de limiter le nombre de miroirs à 4 (ou 6 maximum), afin que la détection sur le récepteur terminal soit suffisante et sûre.

- câble de sécurité :

Implanté autour du bras du robot, cette sécurité joue le même rôle que le rayon laser et est matérialisée par un câble qui entoure, dans un plan horizontal, le bras du robot. Malheureusement cette sécurité ne peut prétendre protéger le robot que lorsqu'il y a collision latérale (fig. 1.12.). Les zones non protégées par le câble (déplacement vertical du bras) seront détectées par la sécurité n° 2.



- Figure 1.12. -

- arrêt d'urgence (type "coup de poing") :

Placé sur la console de commande manuelle, l'opérateur peut également à tout moment arrêter le processus en cas de danger immédiat (fig. 1.6.).

Sécurité N° 2 : Cette sécurité agit au niveau des asservissements. Elle immobilise le robot tout en laissant le groupe hydraulique en fonction.

- arrêt local (demandé par l'opérateur)
- arrêt par détection capteur (par exemple les capteurs infrarouges).

Sécurité N° 3 :

- remise à zéro programmée (trajectoire type vers position d'attente). Nous n'avons pas introduit ce type de sécurité au cours de nos manipulations.

. CONCLUSION :

Cette étude, bien qu'essentiellement, technologique nous a permis de définir les problèmes posés par la mise en place de la structure de commande sous son aspect matériel. L'environnement du robot étant précisé, nous allons maintenant étudier et comparer les différents types de commandes utilisées lors du pilotage du robot par un opérateur.

Nous tiendrons compte des résultats de cette analyse pour mettre en oeuvre, sous l'aspect, logiciel la commande la mieux adaptée.

- B I B L I O G R A P H I E -

/1/ E. CATIER

"La nouvelle robotique industrielle"

Automatique et Informatique Industrielle - N° 81 - novembre 1979.

/2/ M. FERRETTI

"Le dossier de la robotique industrielle"

Le Nouvel Automatismes - sept.-oct. 1978.

/3/ J. GUITTET

"Robotique industrielle et médicale"

Bulletin de liaison de l'I.R.I.A., octobre 1975.

/4/ D. PRONO

"Méthodes de programmation des robots industriels RENAULT-ACMA"

Séminaire I.R.I.A. Rocquencourt, France - juin 1979.

/5/ J.C. LATOMBE, A. LUX

"Intelligence artificielle et robotique industrielle"

Le Nouvel Automatismes, mai 1979 - juin-juillet 1979.

/6/ WOODSON, CONOVE

"Guide de l'Ergonomie"

Les Editions de l'Organisation.

/7/ J. GUILBERT

"Etude des mouvements céphaliques. Application à la commande d'engin"

Thèse de 3ème Cycle en Automatique - Université des Sciences et  
Techniques de Lille 1 - mai 1979.

/8/ G. LUNDSTROM

"Industrial robots gripper review"

Fluid Technology Laboratory, Aeronautical Research Institute of Sweden.

- C H A P I T R E I I -

COMMANDE EN POSITION - COMMANDE EN VITESSE

---

ETUDE COMPARATIVE.

## I - INTRODUCTION :

Nous avons défini au cours du chapitre précédent deux possibilités de conduite en temps réel du robot lorsque celui-ci est utilisé en télémanipulateur par l'intermédiaire :

- du capteur céphalique
- de la console manuelle

Ces capteurs actionnés par l'homme génèrent des signaux dont on peut extraire plusieurs types de commande.

### 2.1. LES DIFFERENTES COMMANDES

L'opérateur contrôle à chaque instant le processus commandé grâce à l'émission de signaux provenant des capteurs. La nature du paramètre de commande vis à vis de la variable commandée nous permet, en particulier, de définir deux types distincts de commande.

#### - La commande en position

L'opérateur agit directement sur la valeur de la variable à commander.

#### - La commande en vitesse

L'opérateur agit sur la valeur de la dérivée par rapport au temps de la variable à commander. La valeur de celle-ci est obtenue par intégration.

Nous allons étudier ces deux types de commande et définir leurs caractéristiques propres.

### 2.2. MISE EN OEUVRE DES COMMANDES ENVISAGEES

La liaison calculateur-robot était en cours de réalisation (en particulier la mise en place des entrées-sorties) au moment de cette étude, les différents types de commande (en vitesse, en position) ont été effectués à l'aide de circuits analogiques. Ces circuits provisoires

ont permis d'étudier le comportement de l'opérateur soumis aux différentes commandes et ont été remplacés ultérieurement par une commande numérique.

### 2.3. ETUDE COMPARATIVE ET CARACTERISTIQUES DES COMMANDES EN VITESSE ET POSITION

L'expérience est destinée à caractériser les propriétés propres de chaque type de commande et à analyser le comportement de l'opérateur vis à vis de celle-ci.

Deux approches à priori peuvent être envisagées /1/ :

#### - Evaluation quantitative des performances

La méthode repose sur un protocole expérimental caractérisé par une série de tests permettant de chiffrer les performances de l'opérateur soumis à chaque commande. Les tâches peuvent être par exemple du type pointage suivi de contour, etc. L'évaluation des performances consiste soit à mesurer l'erreur de positionnement sur un point cible (pointage), soit à comparer une trajectoire sujet par rapport à une trajectoire programme (suivi de contour).

#### - Etude statistique qualitative

On observe le comportement de 10 sujets soumis à chaque commande et en fonction de plusieurs critères on définira, statistiquement, la commande la mieux adaptée au pilotage d'un bras manipulateur.

Ces deux approches sont complémentaires, mais il est, dès à présent, intéressant de noter que l'étude statistique qualitative est plus appropriée à la définition des caractéristiques propres à chaque commande. En effet, il convient d'analyser l'aptitude de l'opérateur à réaliser une tâche, sans contrainte ni fatigue, dans un minimum de temps et de répondre aux exigences de l'expérimentation développée au cours du chapitre 4. A contrario l'étude quantitative renseigne essentiellement sur les qualités propres des matériels utilisés (capteurs, manipulateur) et c'est dans cet esprit qu'avaient été réalisés les travaux de J. GUILBERT sur le capteur céphalique (/7/ - Chapitre I).

2.3.1. Expérimentation

L'expérience consiste d'une part à déplacer le bras manipulateur dans son espace de travail (contournement d'obstacle matérialisé par des cubes) et d'autre part, à "pointer" une succession de carrés cible (5 mm de côté) répartis dans cet espace. L'environnement du manipulateur pendant l'expérience doit se rapprocher au mieux de son environnement réel, pour ce faire nous avons réparti dans l'espace (et non uniquement sur un plan) trois cubes "obstacles" ( $O_1, O_2, O_3$ ). Le bras manipulateur contourne les obstacles selon l'itinéraire suivant :

Départ, contournement d' $O_1$ , contournement d' $O_2$ , contournement d' $O_3$ , Arrivée :

voir l'itinéraire en pointillé (fig. 2.1.)

Ensuite, au cours d'une nouvelle manipulation, l'opérateur pointe avec l'extrémité d'un des doigts de la pince une cible carrée placée sur chaque cube, le pointage se fait alors dans l'ordre suivant :

Départ, pointage  $C_1$ , pointage  $C_2$ , pointage  $C_3$ , Arrivée.

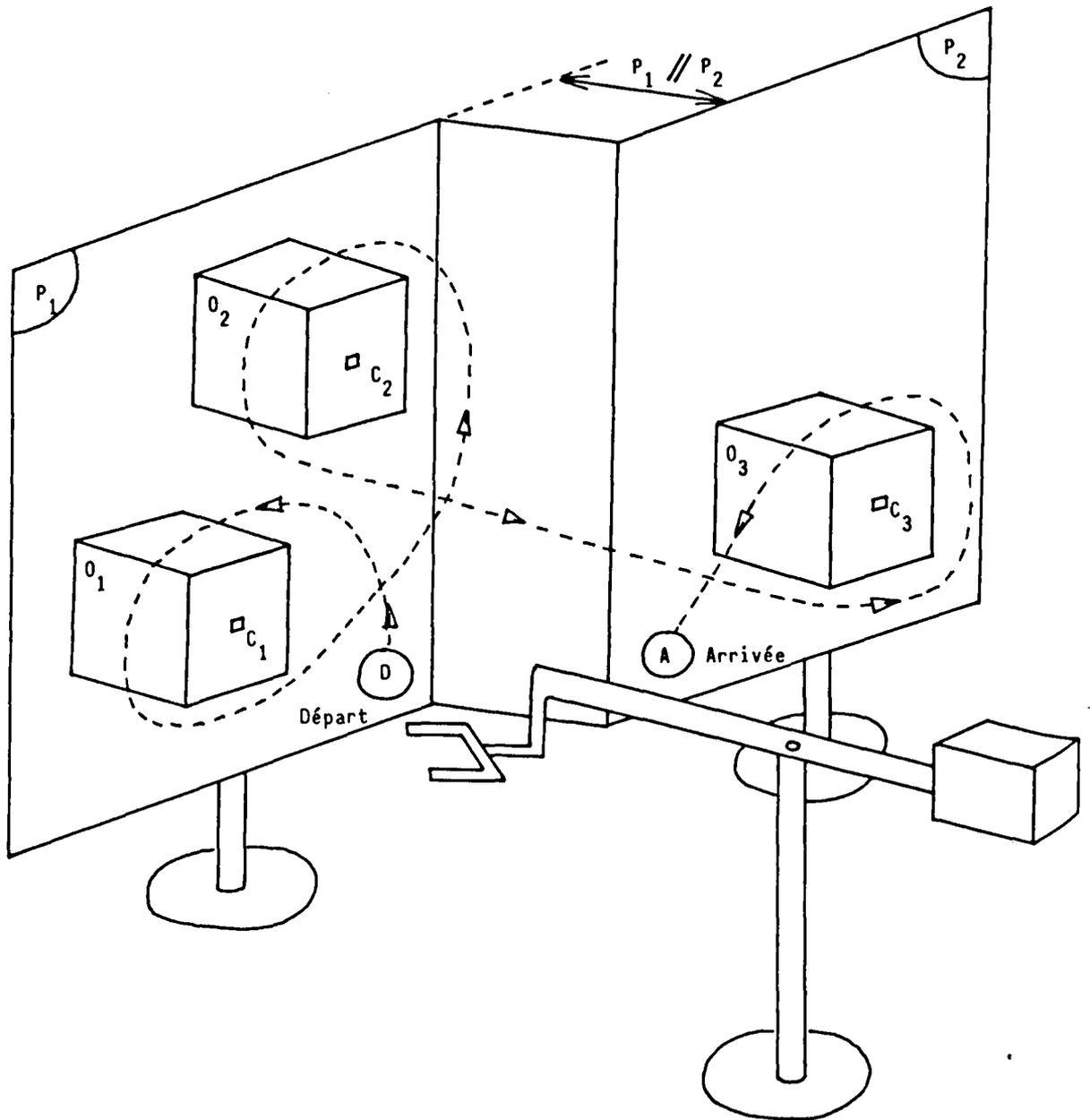
Chaque cible pointée déclenche un signal lumineux et indique à l'opérateur qu'il peut passer à la cible suivante.

Les manipulations sont effectuées par 10 sujets et pour un bras commandé en position, puis commandé en vitesse soit par l'intermédiaire d'une console manuelle, soit par un capteur céphalique.

Chacun des sujets manipule donc quatre fois.

- Grâce à la console manuelle, l'opérateur agit sur les cinq degrés de liberté, mais néanmoins les deux degrés de liberté du poignet robot sont peu sollicités.

- Pour le capteur céphalique deux degrés de liberté seulement sont disponibles (déplacement haut/bas et droite/gauche), un troisième degré de liberté étant nécessaire pour évoluer dans l'espace, on est contraint d'utiliser une commande manuelle afin de commander l'extension du bras manipulateur.



- Figure 2.1. -



2.3.2. Définition des critères de comparaison

Au cours de ces expériences nous avons utilisé trois critères qualitatifs caractéristiques :

- la maniabilité locale (environnement restreint)
- la souplesse d'utilisation des commandes (environnement plus large)
- la fatigue de l'opérateur.

Pour éviter toute ambiguïté dans la définition des critères et pour des questions de commodité, le critère maniabilité est associé aux manipulations dans un environnement restreint ; par opposition le critère souplesse est utilisé dans un environnement plus large.

Bien que qualitatifs ces critères doivent être quantifiables et objectifs, ce qui est réalisé par l'utilisation du paramètre "temps".

A) Critère : maniabilité locale

L'opérateur pointe successivement les trois carrés cibles  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , le temps étant comptabilisé depuis le point de départ D jusqu'au point d'arrivée A. Lorsque la commande utilisée par l'opérateur (vitesse, position) pour un capteur donné (céphalique, manuel) conduit à une maniabilité suffisante le doigt de la pince du manipulateur est positionné, sans difficultés, sur la cible (déplacement de part et d'autre de la cible). Par contre, lorsque la maniabilité est insuffisante plusieurs tentatives sont nécessaires avant de se positionner correctement. Le temps est donc un bon élément de mesure.

B) Critère : souplesse

La souplesse des commandes ne peut être évaluée que lors de déplacements de grandes amplitudes du bras manipulateur. L'opérateur déplace le bras de façon à contourner les cubes obstacles  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ . Le temps d'exécution de la tâche est d'autant plus court que les commandes du manipulateur sont exécutées avec aisance et souplesse. Cette notion de

souplesse difficile à définir dans l'absolu est néanmoins liée au temps d'exécution de la tâche par l'opérateur.

**C) Fatigue de l'opérateur**

Le critère fatigue peut être mesuré au moyen de la mesure du rythme cardiaque, d'un relevé électro-encéphalographique....Toutefois, ces mesures sont difficiles à effectuer dans l'environnement que nous nous sommes fixés. Nous nous en tiendrons donc également au paramètre temps au cours duquel l'opérateur doit renouveler n fois le pointage des cibles et le contournement des obstacles ( 5 cycles successifs pointage, puis 5 cycles de contournement). Il est évident que les quatre manipulations (commande en vitesse capteur céphalique ; commande en vitesse console manuelle ; commande en position capteur céphalique ; commande en position console manuelle) sont effectuées opérateur calme et reposé, sinon l'évaluation du critère fatigue n'aurait plus de sens et serait lié à l'ordre d'exécution des manipulations.

**2.3.3. Mesures**

Une évaluation temporelle des critères : maniabilité locale, souplesse, fatigue, est effectuée par les quatre types de commande sur l'ensemble des sujets expérimentés.

Manipulations / Critères	Vitesse console manuelle	Position console manuelle	Vitesse capteur céphalique	Position capteur céphalique
Maniabilité locale	$M_{VM}(t)$	$M_{PM}(t)$	$M_{VC}(t)$	$M_{PC}(t)$
Souplesse	$S_{VM}(t)$	$S_{PM}(t)$	$S_{VC}(t)$	$S_{PC}(t)$
Fatigue	$F_{VM}$	$F_{PM}$	$F_{VC}$	$F_{PC}$

- Figure 2.2. -

Exemple : \*  $M_{VM}(t) = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{10} m_{iVM}(t)$  : Maniabilité

$m_{iVM}(t)$  : temps d'exécution (en seconde) de la manipulation "maniabilité" ; commande en Vitesse console Manuelle par le sujet i.

$n_s$  : nombre de sujets soumis à chaque type de commande (10)

\*  $S_{VM}(t) = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{10} s_{iVM}(t)$  : Souplesse

avec  $s_{iVM}(t)$  : temps d'exécution (en seconde) de la manipulation "souplesse" en Vitesse console Manuelle par le sujet i.

\*  $F_{VM} = \frac{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{10} f_{iVM}(t)}{5 |M_{VM}(t) + S_{VM}(t)|}$  : Coefficient Fatigue.

avec  $f_{iVM}(t) = |m_{iVM}(t) + S_{iVM}(t)|$  : temps (en seconde) d'exécution

de 5 cycles de "pointage" successifs suivis de 5 cycles "contournement d'obstacles" par le sujet i.

La définition des autres paramètres du tableau précédent relève de la même procédure et conduisent aux résultats suivants :

Manipulations Critères	Vitesse console manuelle	Position console manuelle	Vitesse capteur céphalique	Position capteur céphalique
Maniabilité locale	36 s	27 s	45 s	33 s
Souplesse	18 s	22 s	20 s	26 s
Fatigue	1,04	1,06	1,10	1,14

- Figure 2.3. -

#### 2.3.4. Commentaires

##### Commande en vitesse par console manuelle

Elle est classée en première position pour la souplesse et la moindre fatigue respectivement  $S_{VM}(t) = 18$  s,  $F_{VM} = 1,04$ . C'est une commande adaptée pour les déplacements de grandes amplitudes nécessitant peu de précision. L'opérateur ressent très peu de fatigue après une utilisation prolongée de cette commande.

##### Commande en position par console manuelle

Cette commande doit être utilisée pour les manipulations où le bras du robot se déplace dans une zone restreinte. La maniabilité locale avec commande en position est plus importante qu'avec une commande



en vitesse ( $M_{PM}(t) = 27$  s), et par conséquent l'opérateur atteint rapidement la cible sans déplacements alternatifs du bras manipulateur de part et d'autre de la cible.

La souplesse est moindre qu'avec une commande en vitesse ( $S_{PM}(t) = 22$  s), les grands déplacements sont moins bien contrôlés.

#### Commande en vitesse par capteur céphalique

On retrouve avec le capteur céphalique les propriétés de la commande en vitesse manuelle. Cette commande vient en deuxième position pour la souplesse ( $S_{VC}(t) = 20$  s) après la commande en vitesse par la console ( $S_{VM}(t) = 18$  s). Elle est donc bien adaptée pour les déplacements d'une zone à une autre sans contrainte particulière de précision, par exemple contournement d'obstacles.

La fatigue engendrée par la commande avec le capteur céphalique est néanmoins plus importante que lors de l'utilisation de la console manuelle ( $F_{VC} = 1,10$ ) mais reste néanmoins acceptable si on la compare à la commande en position.

#### Commande en position par capteur céphalique

La maniabilité locale est la caractéristique la plus intéressante de ce type de commande ( $M_{PC}(t) = 33$  s). Elle est proche des résultats obtenus lors de la commande en position par console manuelle ( $M_{PM}(t) = 27$  s), mais cette commande est mal supportée par l'opérateur. Au niveau de la fatigue les résultats sont révélateurs ( $F_{PC} = 1,14$ ).

Le principe d'une commande en position s'adapte peu à l'utilisation du capteur céphalique, non pas du point de vue performance, mais de celui du "confort" d'utilisation par un opérateur. En effet, l'opérateur doit maintenir en permanence la tête en contact avec les coussinets du capteur fixés sur les lames élastiques, afin de guider le bras manipulateur. Si l'opérateur dégage la tête du capteur, les lames retrouvent leur position initiale et le bras manipulateur prend la configuration correspondant à la position de repos du capteur céphalique.

Lors d'une commande céphalique en vitesse cette contrainte n'existe pas, le bras se déplaçant uniquement lorsque les lames du capteur (support des coussinets) sont actionnées.

L'opérateur dans ces conditions n'est pas sollicité en permanence afin de maintenir la position du bras manipulateur et par conséquent, la fatigue engendrée pendant une manipulation prolongée est beaucoup moins importante.

2.3.5. Conclusion

Cette étude comparative a permis d'analyser d'un point de vue général les avantages et les inconvénients des deux sortes de commande (vitesse, position) pour deux types de capteur de commande (manuel, céphalique).

Si l'on se reporte au tableau de la fig. 2.4., on peut mettre en évidence les propriétés suivantes :

1. La commande en vitesse est souple
2. La commande en position maniable
3. Les performances pour une moindre fatigue sont globalement meilleures avec la console manuelle.

Classement / Critères	1	2	3	4	
Maniabilité locale	$M_{PM}(t)$ 27s	$M_{PC}(t)$ 33s	$M_{VM}(t)$ 36s	$M_{VC}(t)$ 45s	← Position
Souplesse	$S_{VM}(t)$ 18s	$S_{VC}(t)$ 20s	$S_{PM}(t)$ 22s	$S_{PC}(t)$ 26s	← Vitesse
Fatigue	$F_{VM}$ 1,04	$F_{PM}$ 1,06	$F_{VC}$ 1,10	$F_{PC}$ 1,14	← Manuel

↑  
Vitesse manuelle
↑  
Position céphalique

- Figure 2.4. -

. Notons que nous avons constaté au cours des manipulations un phénomène non perceptible sur les mesures, mais néanmoins gênant pour l'opérateur et la protection du matériel : la commande en position par son principe de fonctionnement joue le rôle d'un amplificateur de force et de mouvement.

La moindre action effectuée sur les capteurs (en particulier sur les trois degrés principaux : gauche/droite, haut/bas, extension) engendre un mouvement de plus grande amplitude sur le bras du robot. Si l'opérateur n'y prend pas garde, il peut sans résistance imposer un déplacement très rapide du bras à la limite de ses possibilités et soumettre la structure mécanique à de fortes contraintes dues à l'inertie.

Avec ce type de commande l'opérateur se doit donc d'agir avec mesure sur les capteurs, afin de ne pas obtenir des déplacements saccadés du bras manipulateur.

La commande en vitesse, de ce point de vue, donne des résultats plus satisfaisants, le bras manipulateur évoluant toujours en souplesse. Si on envisage de piloter le robot avec une commande en vitesse à vitesse variable, la vitesse de déplacement de chaque articulation est proportionnelle à l'écart imposé par l'opérateur sur le capteur correspondant (manche à balai ou capteur céphalique) par rapport à sa position de repos, quelle que soit l'habileté de l'opérateur les mouvements d'ensemble du robot sont "lissés".

. Choix de la commande à utiliser :

L'opérateur dans les conditions réelles d'utilisation guide le bras manipulateur vers l'objet à saisir (phase d'approche), ensuite la pince munie de ses capteurs évolue automatiquement sur l'objet, sans intervention de l'opérateur. Dans ces conditions la commande en vitesse sera mieux adaptée car elle présente les avantages suivants :

- La maniabilité locale n'est pas primordiale, le pilotage du robot par l'opérateur intervenant pendant la phase d'approche (conduite à distance).

- Grâce à la souplesse d'utilisation de la commande en vitesse, l'opérateur manipule aisément le bras du robot, rapidement et sans contrainte, pour évoluer entre les obstacles de son environnement (en particulier avec le capteur céphalique).

- De par son principe de fonctionnement, on peut obtenir des vitesses de déplacement importantes sans jamais atteindre les vitesses conduisant à endommager le robot ou son environnement.

Nous réalisons numériquement sur le calculateur cette commande en vitesse pour une console manuelle et pour le capteur céphalique.

## 2.4. COMMANDE EN VITESSE : REALISATION NUMERIQUE

### 2.4.1. Console manuelle

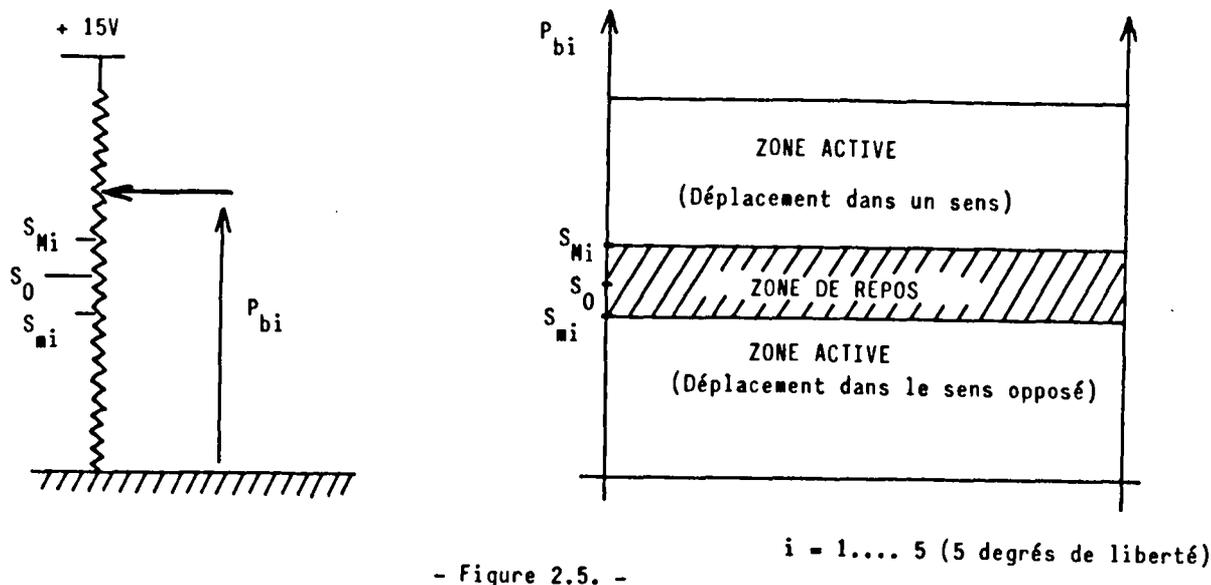
Lorsqu'il s'agit d'une commande en position, à chaque position des manches à balai de la console correspond une position dans l'espace des cinq degrés de liberté du robot. Lors d'une commande en vitesse, la position centrale des manches à balai (position de repos) n'engendre aucune consigne sur les actionneurs. La vitesse de déplacement des articulations du robot est proportionnelle à l'écart des manches à balais de leur position de repos.

#### . REMARQUE :

La position centrale (au repos) des capteurs "manche à balai" et curseur est obtenue à l'aide de ressorts de rappel.

#### a) Principe et réalisation pratique

Si  $P_{bi}$  représente la valeur lue sur l'un des potentiomètres de la console manuelle, cette information est exploitée de la manière suivante sur chacun des 5 capteurs :



- Figure 2.5. -

$A_i$  : valeur de la consigne sur les actionneurs

$$S_{Mi} > P_{bi} > S_{mi} \quad : \quad A_{i(n+1)} = A_{i(n)}$$

$$P_{bi} < S_{mi} \quad : \quad A_{i(n+1)} = A_{i(n)} - k_i d_i$$

$$P_{bi} > S_{Mi} \quad : \quad A_{i(n+1)} = A_{i(n)} + k_i d_i$$

$d_i = P_{bi} - S_0$  étant la valeur du pas.

Chaque valeur des potentiomètres est lue cycliquement. En fonction de la valeur  $P_{bi}$  le calculateur crée une consigne  $A_i$  sur les actionneurs.

La mise en oeuvre de cette commande est décrite sur l'organigramme suivant (fig. 2.6.).

. REMARQUES :

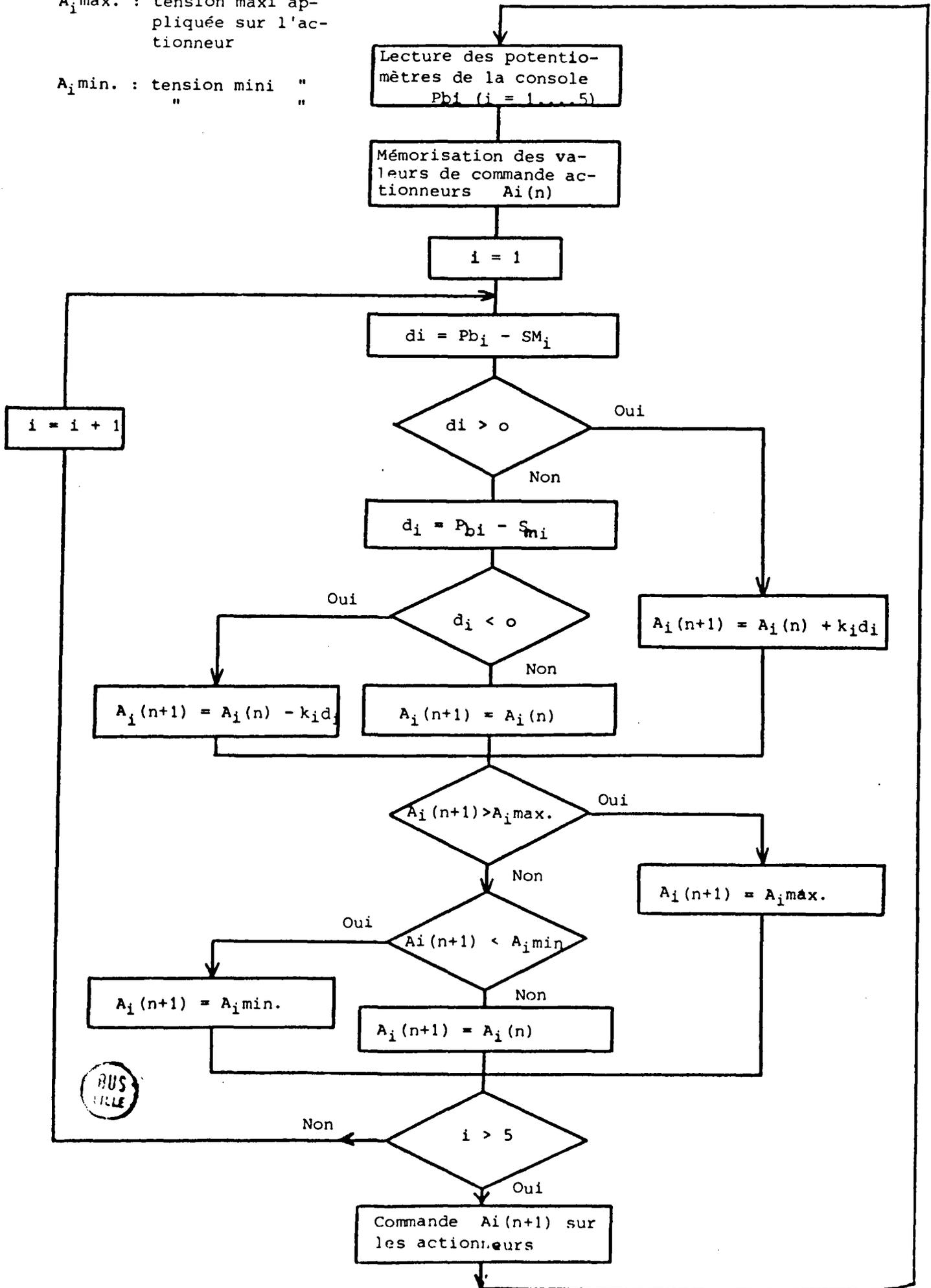
Indépendamment de l'action de l'opérateur pour moduler la vitesse de déplacement des articulations du robot, cette dernière est liée à deux paramètres au niveau de la programmation.

- \* le coefficient  $k_i$  (action sur la valeur du pas  $d_i$ )
- \* le temps d'exécution du programme (détermine la cadence d'envoi des nouvelles consignes sur les actionneurs).

Pour simplifier la programmation, nous avons utilisé des valeurs  $k_i$ ,  $S_{Mi}$ ,  $S_{mi}$  identiques pour les 5 degrés de liberté. Le programme est "appelé" en permanence par calculateur pendant la commande en vitesse. La durée d'exécution de celui-ci est un paramètre important, et pour rendre ce programme particulièrement efficient, nous avons utilisé l'ASSEMBLEUR comme langage de programmation.

$A_i \text{ max.}$  : tension maxi appliquée sur l'actionneur

$A_i \text{ min.}$  : tension mini " "



b) Initialisation du robot lors d'une commande en vitesse.

A l'arrêt, (les actionneurs ne sont plus sous pression hydraulique) sous son propre poids le bras du robot s'immobilise en position basse. Il n'y a plus correspondance entre les consignes  $A_i$  sur les actionneurs et la position du bras dans l'espace. Pour résoudre ce problème, nous utilisons une procédure d'initialisation. Elle consiste à générer sur chaque électrovalve une consigne  $A_i$  correspondant à la position des articulations de chaque degré de liberté. Ainsi à la mise sous pression hydraulique, les consignes étant équivalentes aux positions des articulations à l'arrêt (hydraulique coupée), il n'y a pas de déplacement incontrôlé du bras du robot.

La procédure employée est la suivante :

- lecture des potentiomètres de position couplés à chaque degré de liberté du robot.
- conversion de ces valeurs en consignes actionneurs (correspondance entre la consigne actionneur et la position de l'articulation).
- passage sous contrôle de la console de commande en vitesse.

Le robot peut alors être mis sous pression hydraulique. Toutefois, il est à noter que l'opérateur ne doit en aucun cas agir sur la console avant la mise sous pression du groupe.

. REMARQUE :

Le passage d'une phase d'évolution automatique à une phase manuelle (couplage sur la console par exemple) ne pose aucun problème de correspondance spatiale, la console agit à partir des dernières consignes  $A_i$  précédant le découplage.

Il y a un problème dans le cas d'une commande en position, en effet lors de la "reprise en main" du robot par l'opérateur il existe un écart entre la consigne donnée par les manches à balais et la position du manipulateur à cet instant.

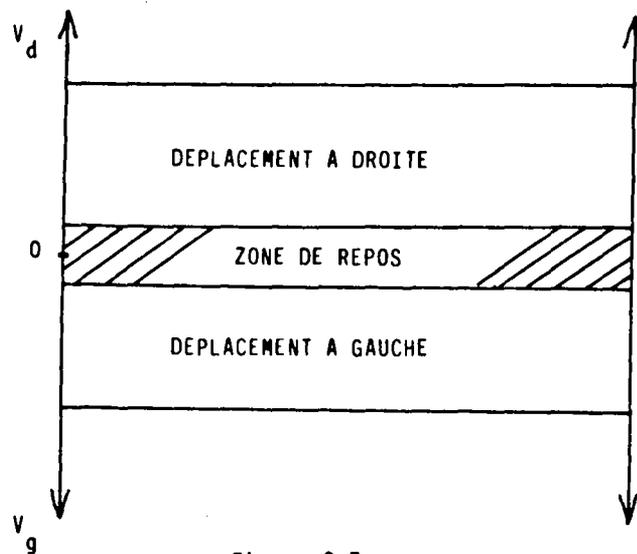
Pour résoudre ce problème, trois solutions ont été envisagées :

- déplacer le robot en douceur vers la consigne donnée par les manches à balais.
- motoriser les manches à balais de la console pour qu'ils suivent les évolutions du robot pendant la phase automatique.
- établir un dialogue d'interaction homme-robot permettant d'annuler l'écart par une action manuelle sur les manches à balais contrôlée par le calculateur.

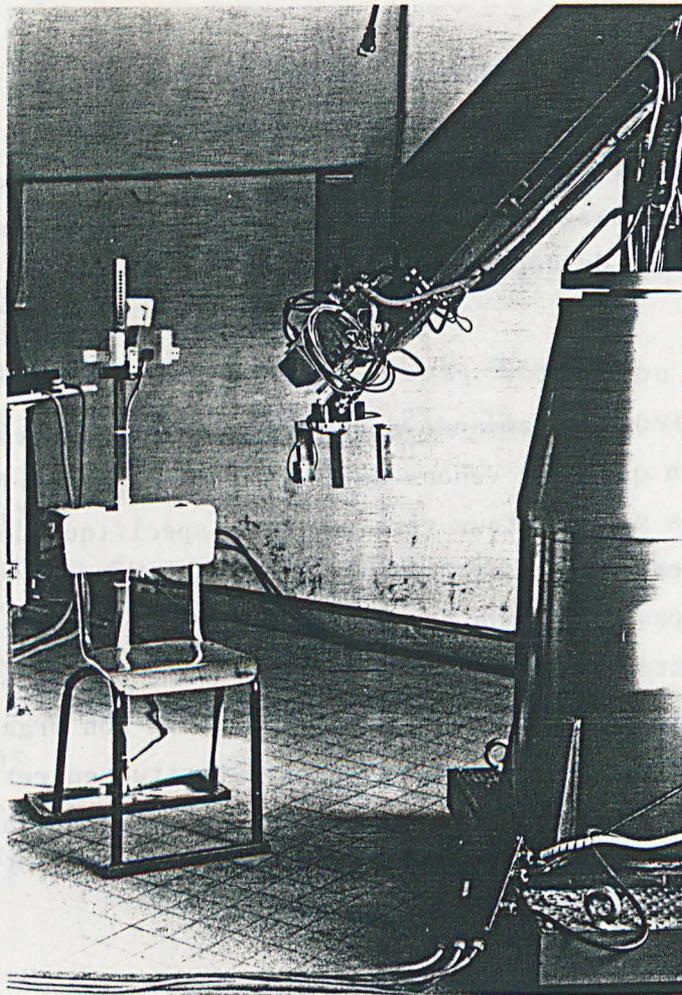
A. HABCHI /2/ développant le principe d'une commande en position dans sa thèse, utilise cette troisième solution.

#### 2.4.2. Capteur céphalique

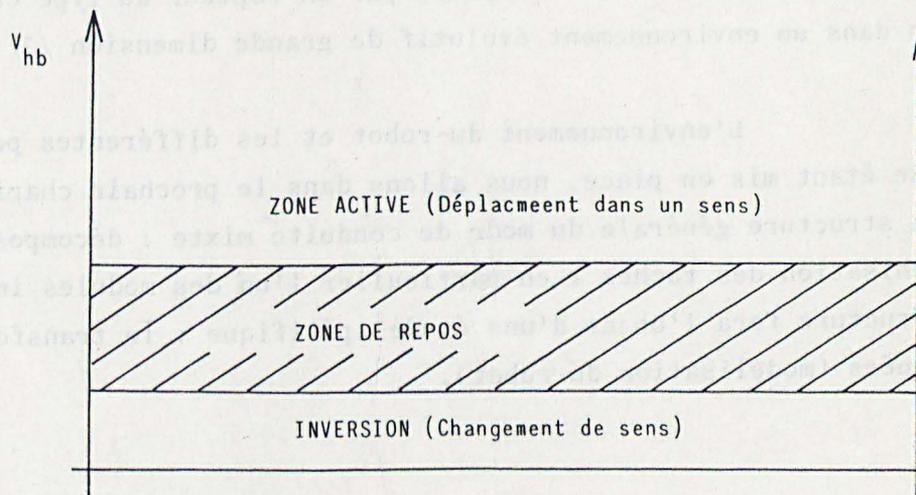
Du point de vue logiciel, le principe de la commande en vitesse développé pour la console manuelle est identique à celui développé pour le capteur céphalique (fig. 2.6.). L'exploitation des signaux délivrés par les deux jauges de contraintes ( $V_g$  et  $V_d$ ) est néanmoins différente (fig. 2.7.).



- Figure 2.7. -



- Figure 2.8. -



$V_{hb}$  : tension délivrée par le capteur haut-bas.

- Figure 2.9. -

La commande haut-bas du bras du robot présente une particularité liée au fait que l'on ne dispose que d'une seule jauge pour guider à la fois les déplacements vers le haut et vers le bas du bras (fig. 2.8.). Au passage en position repos de la jauge, un codage permet d'inverser le sens de déplacement du bras (fig. 2.9.).

. CONCLUSION :

La commande soit en position, soit en vitesse par un opérateur humain que nous venons de décrire s'adapte parfaitement au pilotage du bras manipulateur vers une zone spécifique de travail. Nous pouvons assimiler ce mode de conduite à une approche en boucle ouverte. Le robot n'est pas pourvu de "sens" à ce stade de la manipulation (capteurs implantés sur la pince), c'est l'homme qui se substitue au robot et permet le bouclage de la commande à l'aide de son organe de vision. L'opérateur, pour des raisons de sécurité, est situé en retrait de la zone de saisie d'un objet et il peut parfois se poser des problèmes de visibilité, d'où l'intérêt de la phase automatique dont le but est de soustraire l'homme à cette opération délicate.

La commande en vitesse du robot par l'homme pendant la phase de conduite à distance permet de guider rapidement l'organe de saisie vers la zone de travail, car l'opérateur peut appréhender les situations imprévues et éviter les obstacles, ce qui est difficilement réalisable lorsque celui-ci est remplacé par un capteur du type caméra de télévision dans un environnement évolutif de grande dimension /3/.

L'environnement du robot et les différentes possibilités de commande étant mis en place, nous allons dans le prochain chapitre définir la structure générale du mode de conduite mixte : décomposition et hiérarchisation des tâches : en particulier l'un des modules intégré à cette structure fera l'objet d'une étude spécifique : le transformateur de coordonnées (modélisation du robot).

- B I B L I O G R A P H I E -

-----

/1/ M. PERUCHON

"Performances des manipulateurs, hommes ou robots"  
Journées Spartacus (IRIA) - 21, 22, 23 novembre 1977.

/2/ A. HABCHI

"Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur  
humain"  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Lille 1, mai 1981.

/3/ J.F. CROS

"Les sens du robot"  
Mesure-Régulation-Automatisme, mai 1979.

**- DEUXIEME PARTIE -**

CONDUITE SPECIFIQUE

---

- C H A P I T R E I I I -

STRUCTURE DE LA COMMANDE

---

I -- INTRODUCTION :

Réaliser un système de commande entièrement automatique pour le pilotage du robot ou à l'opposé utiliser celui-ci comme un simple télémanipulateur présente selon les conditions d'utilisation des avantages et des inconvénients.

Nous allons développer un système intégrant les deux possibilités de commande, avec supervision, et où la symbiose homme-robot permet d'utiliser les qualités spécifiques de l'homme et de la machine en fonction des tâches à réaliser.

Cette démarche se justifie pour les raisons suivantes :

- contraintes de réalisabilité et de coût de mise en oeuvre d'un robot entièrement autonome,
- manque de fiabilité de l'opérateur dans l'exécution de tâches complexes et répétitives,
- présence d'un environnement hostile ou dangereux,
- utilisation optimale des possibilités de l'opérateur et de la machine.

Le mode de conduite semi-automatique défini dans le premier chapitre se présente sous deux aspects :

- semi-automatique au sens de la commande,
- "mixte" au sens dilemme dans le partage des tâches entre l'opérateur et le robot.

Ce modèle de conduite où l'on introduit la notion de dilemme dans le partage des tâches sera appelé dans la suite du mémoire : "mode de conduite mixte". De par la complexité des problèmes qu'il entraîne le mode mixte sera décrit dans le contexte d'une structure hiérarchisée et sa mise en oeuvre effectuée par niveau de difficultés croissantes.

3.1. PRESENTATION DU MODE DE CONDUITE MIXTE

La structure de commande adoptée est une structure maître-maître, dans laquelle le dilemme homme-robot est résolu par le calculateur en fonction de critères spécifiques, tels que la nature de la tâche, l'ergonomie, l'environnement.... Les critères sont élaborés en tenant compte des possibilités de l'opérateur et de la machine de façon à ce que la résolution du dilemme permette d'attribuer l'exécution des tâches à l'une ou l'autre des deux composantes.

L'introduction de tels facteurs dans la prise de décision est inhérente au principe de conduite en mode mixte (fig. 3.1.). Le partage du travail dans le mode semi-automatique étant par centre défini arbitrairement en tenant uniquement compte de l'aspect technologique.

. REMARQUE :

Dans le contrôle homme-machine, pour commander le processus, l'homme se compose de deux fonctions distinctes comme :

- Homme Capteur (HC)
- Homme Superviseur (HS)

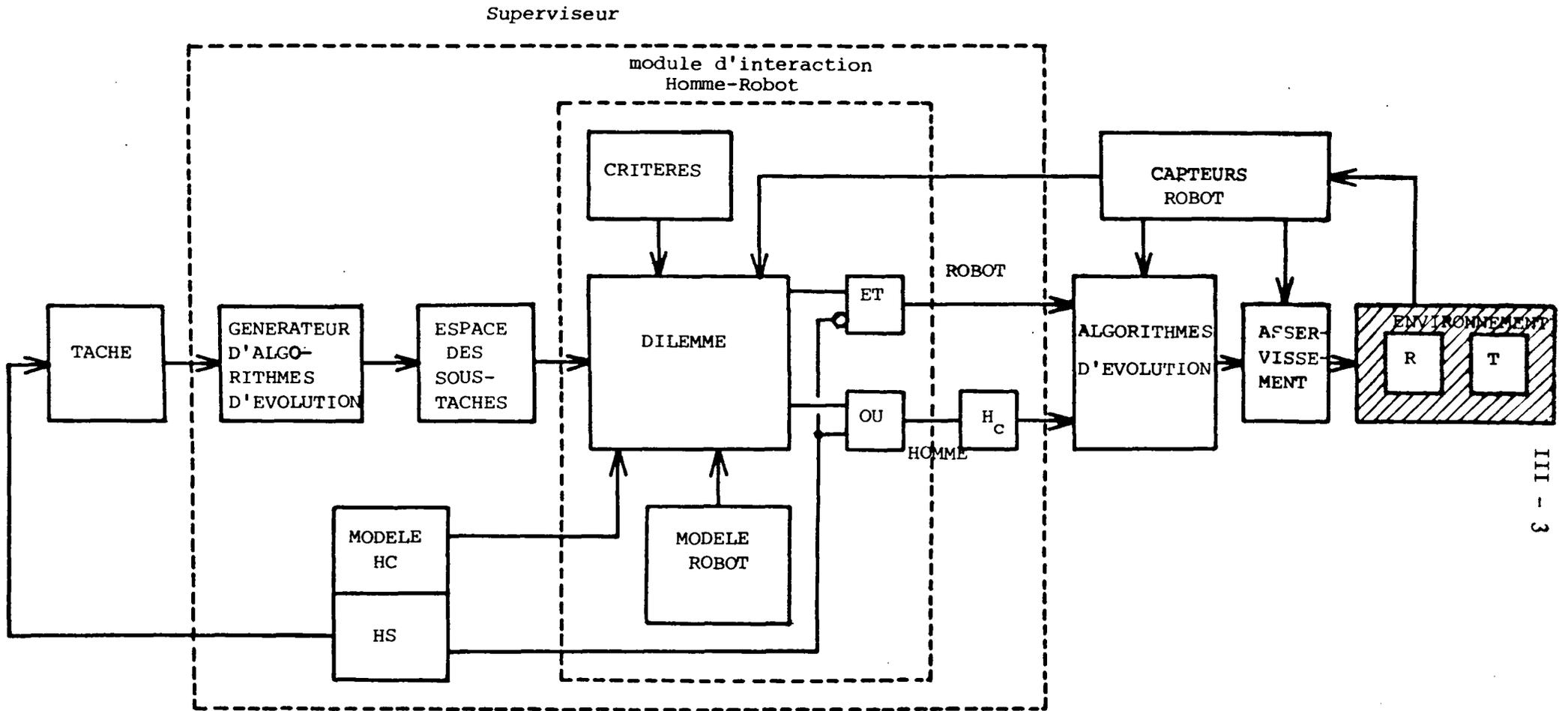
. "L'Homme Capteur" symbolise l'ensemble des capacités motrices et sensorielles nécessaires au pilotage du robot dans son environnement (par l'intermédiaire d'une console de commande manuelle par exemple).

. "L'Homme Superviseur" symbolise l'ensemble des facultés intellectuelles lui permettant de contribuer à la prise de décision dans la commande du processus.

La définition des critères en vue de la résolution du dilemme homme-machine, permettant le découplage et le passage d'un mode de conduite à un autre, a été étudiée et développée dans la thèse de A. HABCHI /1/.



Figure 3.1. : Mode mixte



Dans ce mémoire on s'attache à définir le système sous l'aspect commande dans une structure "mode mixte". Néanmoins dans la partie étude fonctionnelle, on réalise une manipulation en mode semi-automatique, ensuite la définition des critères par A. HABCHI permettra d'étendre les possibilités du système et d'utiliser le robot en mode mixte.

### 3.2. DESCRIPTION DE LA MANIPULATION : PILOTAGE EN MODE SEMI-AUTOMATIQUE

C'est à partir d'une combinaison d'informations issues de capteurs d'environnement (capteurs classiques ou sens de l'homme) et de l'état du système homme-machine que les algorithmes d'évolution peuvent être élaborés. Les grands mouvements, les contournements d'obstacles sont essentiellement exécutés manuellement et les tâches ne nécessitant que des informations capteurs issues d'une zone restreinte sont ensuite exécutées automatiquement. La prise d'un objet se résume ainsi en une approche grossière et guidée par l'homme vers cet objet jusqu'au moment où divers capteurs de proximité situés au niveau de la pince du manipulateur "voient" l'objectif et permettent au robot d'effectuer une saisie /2/.

L'approche faite par l'homme se conçoit comme une génération de plans d'action à distance comme nous pourrions le faire à l'aide de capteurs à grands rayons d'action. L'intervention humaine ne pénalise pas nécessairement la durée d'exécution de la tâche, mais simplifie dans bien des cas la technologie de l'ensemble.

L'introduction de l'homme dans la structure de commande amène à considérer deux phases principales de conduite du manipulateur :

- phase de conduite à distance.
- phase de conduite locale.

#### 3.2.1. Phase de conduite à distance

La conduite à distance est réalisée au moyen d'un opérateur humain à l'aide d'une commande en vitesse, il s'agit d'une approche vers la zone de travail. Le pilotage par l'homme est effectué par l'intermédiaire de la console manuelle ou du capteur céphalique (chapitre 2) et ceci sous la supervision du calculateur utilisant les

informations issues des capteurs du robot, de sécurité ou d'obstacles.

### 3.2.2. Phase de conduite locale

Pendant la phase de conduite locales les informations sont issues des capteurs de proximité. Le traitement de ces informations permet de localiser puis saisir l'objet dans un espace limité à la zone d'action des capteurs (capteurs extéroceptifs\*).

La position et l'orientation du poignet sont données par les capteurs du robot (capteurs proprioceptifs\*\*).

La fonction déplacement du bras est assurée soit :

- directement en coordonnées robot par la commande des actionneurs,
- soit par l'intermédiaire d'un module transformateur de coordonnées. Cette commande en coordonnées cartésiennes nécessite la connaissance du modèle géométrique ou variationnel du robot (voir chapitre 3.8.).

#### . REMARQUE :

La présence de l'opérateur humain étant requise pendant la phase de conduite à distance, il y a peut-être des situations où celui-ci serait plus performant que le robot dans la phase de conduite locale, c'est le problème de la répartition des tâches (résolution du dilemme en mode mixte /3/).

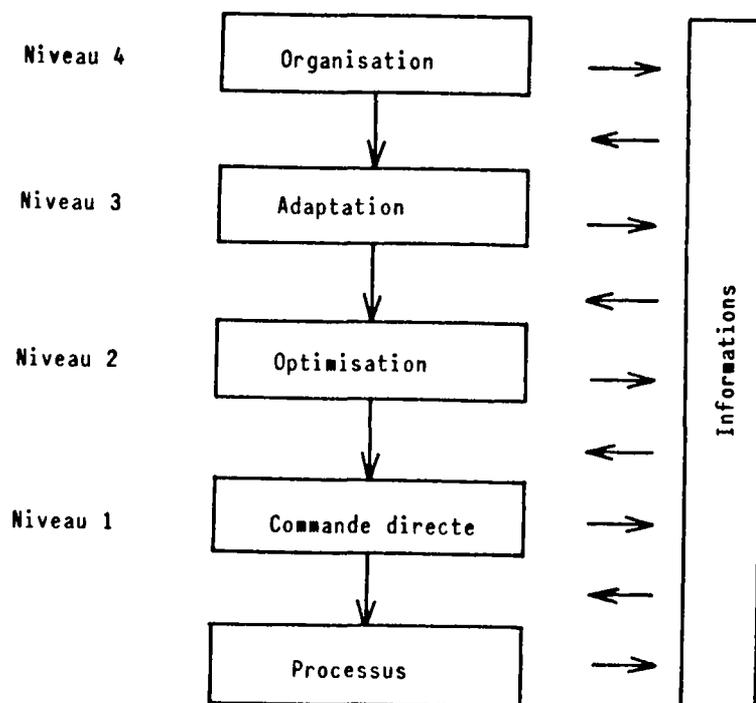
\* capteurs extéroceptifs : Ce sont les capteurs externes au robot, ils saisissent des informations concernant l'environnement : capteurs de proximité infrarouges par exemple.

\*\* capteurs proprioceptifs : Ce sont les capteurs propres au robot, ils définissent la configuration des diverses articulations : capteurs de position potentiométriques par exemple.

3.3. DECOMPOSITION DE LA COMMANDE DANS UNE STRUCTURE  
MODE MIXTE

Pour mieux rendre compte de la structure réelle du système et afin d'avoir une vision globale des problèmes que pose la commande, une présentation synthétique du rôle des différents modules est nécessaire /4/ /5/.

Considérer les problèmes comme un tout, envisager une stratégie globale, incluant tous les problèmes de commande qu'il s'agisse des asservissements classiques, de l'identification, des problèmes de sécurité, du changement de mode de conduite devient très difficile de par la complexité de la tâche. L'idée de base consiste au contraire à résoudre le problème en le divisant en sous-problèmes plus simples, c'est-à-dire en commandant le système par niveaux de complexités croissants. Dans ce sens on commence par identifier, comme c'est généralement le cas pour les systèmes complexes, les niveaux fonctionnels de commande (fig. 3.2.).



- Figure 3.2. -

- Le niveau supérieur est un niveau d'organisation, il définit la stratégie globale en fonction d'objectifs généraux. C'est à ce niveau que le choix des modes de fonctionnement est effectué et que sont définis les algorithmes utilisés aux niveaux inférieurs.

- Le troisième niveau est un niveau d'adaptation et d'identification. Il détermine les paramètres utilisés par le second niveau ; adapte ceux-ci en fonction des conditions de fonctionnement ; effectue la transition d'un mode de fonctionnement à un autre et détermine les procédures d'urgence pour la sécurité du matériel.

- Le deuxième niveau a pour but de préciser le problème que le premier niveau doit résoudre. Il est chargé de calculer les valeurs des points de consigne. Ces points de consigne seront en général déterminés de façon à optimiser les trajectoires de mouvement sur la base d'un modèle du processus.

- Le premier niveau est en général directement connecté au processus c'est en fait l'interface entre ce système et celui de commande. Le premier niveau est chargé par exemple d'actualiser les sorties pertinentes à certaines valeurs de consigne et ce au rythme correspondant à la dynamique propre du processus (le robot).

Parallèlement à cette tâche de commande directe il joue un rôle important dans la collecte de l'information au niveau des variables du processus ; ces grandeurs pouvant être de tout ordre : informations propres au robot, informations capteurs, sécurités.

#### 3.4. AVANTAGES D'UNE DECOMPOSITION MODULAIRE DE LA STRUCTURE DU SYSTEME

La seule considération des niveaux de commande permet une approche plus rationnelle et une meilleure analyse des problèmes. Cette reconnaissance des diverses fonctions est importante dans la mesure où elle contribue à l'efficacité du système global.

#### Adaptabilité

Cette approche modulaire a pour conséquence une meilleure adaptabilité du système de commande à des conditions changeantes, et facilite la modification éventuelle d'un module.

#### Extension

Il est important que le système puisse être extensible et ainsi évoluer sans remettre en cause la structure générale. Aussi cette approche (structure modulaire) permet une mise en route progressive par étapes du système de commande.

#### Meilleure conception du software

Les niveaux inférieurs, en particulier le premier niveau, exigent à cause de la rapidité d'exécution des consignes une programmation particulièrement efficace (proche du langage machine). On a affaire à des opérations simples mais pouvant être très nombreuses (collecte d'informations, commande des actionneurs, etc).

Aux niveaux supérieurs, les algorithmes sont plus complexes (langages de plus ou moins haut niveau), et dépendent beaucoup plus du processus particulier, ce qui conduit à choisir des langages de programmation appropriés à chaque fonction (assembleur, PLM, Pascal).

### 3.5. INCONVENIENTS

Au cours du paragraphe précédent nous avons mis en évidence le fait qu'une décomposition modulaire de la structure du système est une approche rationnelle du problème. Si les avantages signalés (meilleure compréhension du problème, adaptabilité, mise en route progressive par étapes, meilleure conception du software) sont intéressants, il ne faut pas néanmoins négliger des problèmes importants tels que le transfert d'informations et la coordination des divers niveaux.

- Nous devons disposer pour les échanges entre niveaux, d'informations présentées sous la forme la plus efficace possible (condensées) et les niveaux supérieurs, en particulier ne doivent avoir qu'une vue synthétique des niveaux inférieurs.

- La coordination est également impérative, afin que les fonctions exercées aux divers niveaux soient exécutées en synchronisme.

### 3.6. DESCRIPTION DES DIFFERENTS MODULES INTERVENANT DANS LA COMMANDE HOMME-MACHINE

La structure de commande lors d'un mode de conduite mixte proposée par A. HABCHI /1/ va dans le sens d'une décomposition de la commande en niveaux semblables à ceux décrits dans le paragraphe précédent. Le développement de cette structure, en particulier au niveau du superviseur, ainsi que des problèmes posés à propos du dilemme homme-robot, se retrouve dans ses travaux.

On peut distinguer trois niveaux hiérarchiques principaux (les niveaux 4 et 3 : organisation et adaptation sont associés dans la structure proposée).

- Superviseur
- Algorithmique
- Asservissements

Ces niveaux sont indiqués figure 3.3. et peuvent être comparés à la structure générale proposée précédemment.

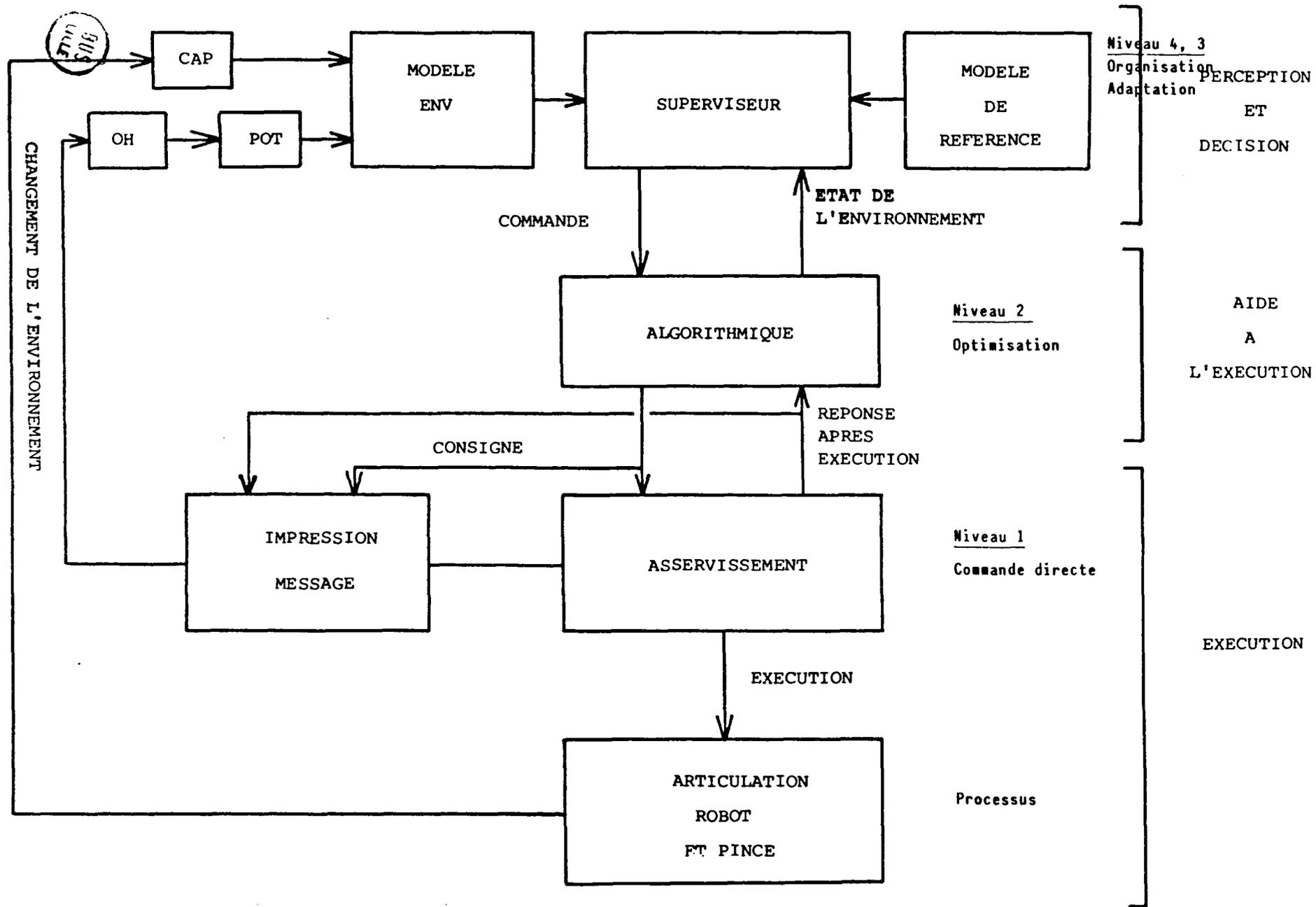
#### Superviseur

Il doit tenir compte du modèle de l'environnement, du modèle de référence et des décisions de l'homme pour élaborer les directives principales nécessaires aux niveaux inférieurs. C'est à ce niveau que sont définis le séquençement et la répartition des tâches (résolution du dilemme homme-robot : décision multi-critères /1/).

#### Algorithmique

Ce niveau est constitué par un ensemble de programmes traitant les données générées par le modèle de l'environnement et calculant les consignes directement exécutables par les actionneurs.

Ces programmes sont par exemple : la commande en position ; la commande en vitesse ; le transformateur de coordonnées ; l'évolution automatique du bras du robot.



- Figure 3.3. -

NIVEAUX DE HIERARCHISATION

Asservissements

C'est à ce stade que sont mises en oeuvre les commandes proprement dites, interface entre le système de commande et le processus.

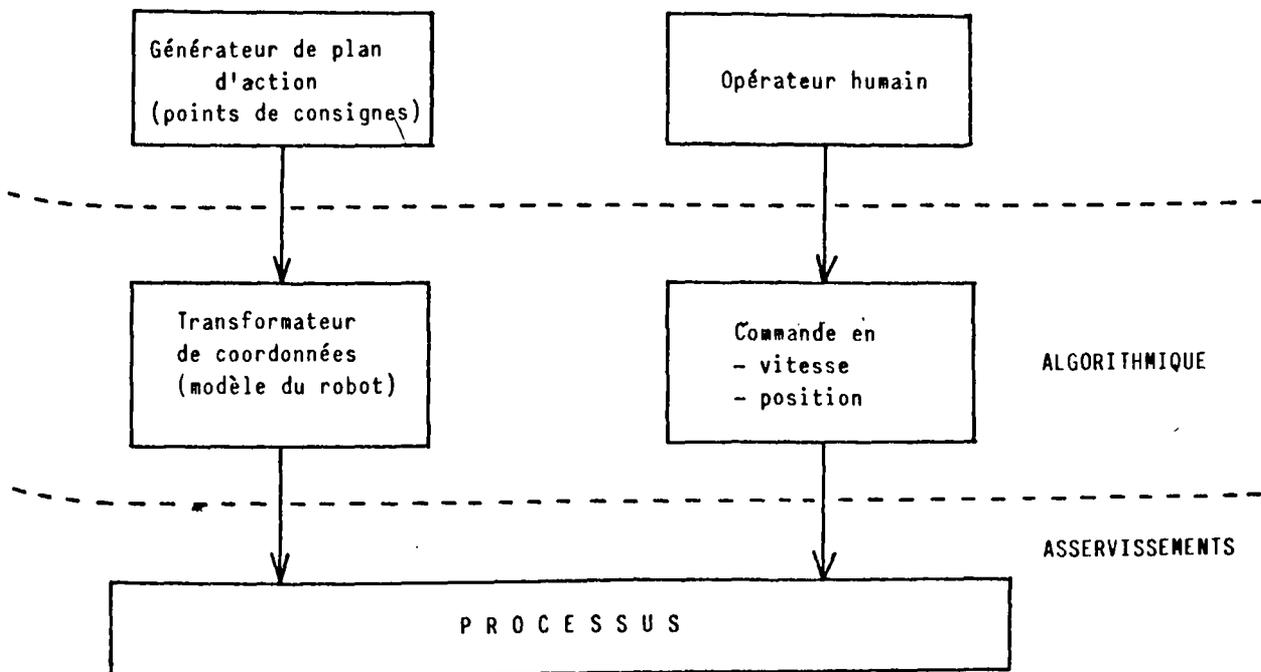
Notre étude dans ce domaine porte essentiellement sur la résolution des problèmes posés aux niveaux algorithmiques et asservissements.

3.7. PRESENTATION DES MODULES ETUDIES

Le niveau algorithmique se décompose en deux modules distincts :

1 - évolution automatique du robot dans son propre système de coordonnées, ou en coordonnées cartésiennes (transformateur de coordonnées).

2 - évolution du robot par l'intermédiaire de l'opérateur humain (commande en vitesse, commande en position des actionneurs).



- Figure 3.4. -

La commande du bras manipulateur par un opérateur humain a été étudié au chapitre 2 et l'étude comparative des différentes possibilités de commande a mis en évidence la commande la mieux adaptée en fonction du contexte d'utilisation. Pour ces expériences nous avons donc réalisés et mis au point les algorithmes de commande en vitesse et A. HABCHI /1/ dans son mémoire a développé les algorithmes de commande en position.

L'évolution automatique du manipulateur est soumise aux points de consignes du générateur de trajectoire/6/. Généralement ces éléments de trajectoires sont définis dans un repère fixe ou repère de travail du robot. Il est donc nécessaire d'établir les relations existantes entre les coordonnées de l'espace et les coordonnées robot (actionneurs). Ces relations caractérisent le modèle du robot et permettent ainsi la réalisation du transformateur de coordonnées.

Les fonctions décrites ci-dessus appartenant au niveau 2 algorithmique, sont exécutées au niveau 1 de la structure de commande par les asservissements analogiques reliés aux actionneurs.

A ce niveau transitent également les informations nécessaires au contrôle de l'évolution de l'environnement du robot. Les "routines" de lecture et transfert des informations ont été pour l'essentiel étudiés lors du développement des algorithmes de commande en vitesse.

L'objet des paragraphes suivants sera donc d'intégrer au niveau 2 de la structure "mode mixte", le modèle géométrique ou variationnel du robot aboutissant à la réalisation d'un transformateur de coordonnées.

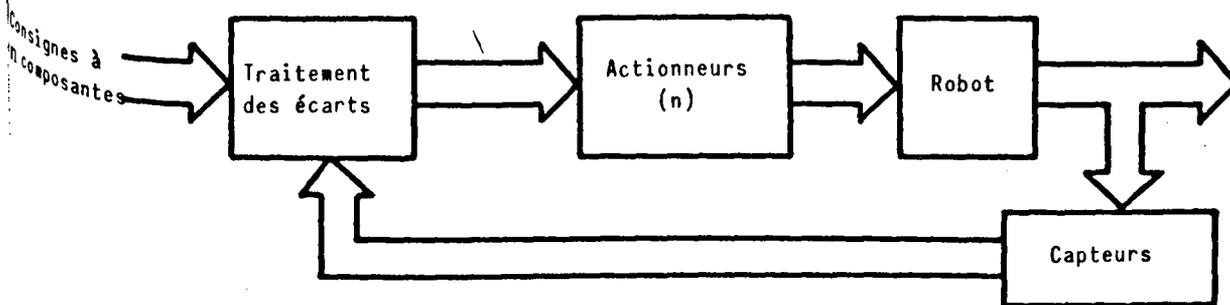
### 3.8. MODELISATION DU ROBOT. INTRODUCTION

Dans le cas général, un système mécanique articulé est constitué d'un certain nombre de corps supposés rigides liés entre eux par des articulations (le plus souvent des translations et des rotations). Elles n'ont qu'un seul degré de liberté, dont la commande est technologiquement simple /7/ (actionneurs de différents types : hydraulique, électrique, pneumatique).

Pour positionner et orienter dans l'espace un organe de préhension, il est nécessaire de contrôler la position et l'orientation de l'organe terminal.

A une position donnée dans l'espace de travail (repérée par des coordonnées que nous appellerons coordonnées opérationnelles) correspond un vecteur de dimension  $n$ , dont les  $n$  composantes sont les valeurs de chacun des degrés de liberté (angles et longueurs) de cette position. Ces composantes qui déterminent la configuration du manipulateur tout entier sont appelées coordonnées généralisées /8/. A chaque degré de liberté est liée une coordonnée généralisée représentant le mouvement relatif du corps auquel elle est associée par rapport au corps précédent, elle a une position d'origine définie arbitrairement.

Si l'on considère un système de commande hiérarchisée le niveau le plus bas joue un rôle d'effecteur, il commande les asservissements de chacun des  $n$  degrés de liberté par rapport à des consignes signifiant directement la valeur qu'ils doivent prendre :



- Figure 3.5. -

Un certain nombre de considérations, développées ci-dessous, nous a conduits à élaborer un module convertisseur de coordonnées

. Considérations liées au couple homme-robot

Dans le cas d'une intervention humaine, il est intéressant de s'adapter à l'opérateur afin de définir des positions dans l'espace. Le langage naturel est basé sur les termes haut/bas, gauche/droite, avant/arrière qui en fait, définissent implicitement les trois composantes cartésiennes d'une position dans l'espace /9/.

. Considérations technologiques

Les capteurs fournissent des informations liées à des notions cartésiennes : capteurs de distance, caméras (image = projection sur un plan) etc...

. Considérations mathématiques

On a coutume de décomposer les trajectoires en éléments simples souvent exprimées dans un contexte cartésien : droite, cercle, parabole. L'objectif de ce chapitre est d'établir les expressions des coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées généralisées et vice-versa.

3.9. COORDONNÉES OPÉRATIONNELLES - COORDONNÉES GÉNÉRALISÉES

Les coordonnées opérationnelles du manipulateur sont des quantités scalaires, elles déterminent la position et l'orientation de l'organe terminal.

La position d'un solide dans l'espace peut-être définie par 6 paramètres :

- 3 coordonnées de position d'un point particulier du solide.
- 3 paramètres définissant l'orientation du solide par rapport à ce point (par exemple les angles d'EULER).

Généralement la trajectoire du manipulateur est décrite dans l'espace  $X$ , alors que les actionneurs du manipulateur sont commandés dans l'espace  $Q$ . Le système doit être capable de passer du repère de travail au repère des actionneurs.

-  $\underline{X}$  : vecteur à  $m$  composantes appartenant à l'espace euclidien  $E_m$  dont les coordonnées représentent les grandeurs indépendantes à faire évoluer (coordonnées opérationnelles).

-  $\underline{Q}$  : vecteur de l'espace euclidien à  $n$  dimensions  $E_n$  dont les composantes regroupent les degrés de liberté du système (coordonnées généralisées).

### 3.10. NOTION DE REDONDANCE

Il est intéressant afin d'obtenir une grande souplesse d'utilisation de développer des manipulateurs possédant un grand nombre de degrés de liberté. Toutefois la difficulté principale réside dans la réduction du taux d'information nécessaire au pilotage.

Pour un manipulateur possédant  $n$  degrés de liberté par rapport à une tâche consistant à faire évoluer  $m$  grandeurs indépendantes, fonction de la position du manipulateur, on appelle degré de redondance la quantité  $n - m$ .

En fait un manipulateur peut être redondant pour une tâche simple donnée, par exemple positionnement d'un élément dans l'espace et ne plus l'être pour une tâche compliquée, par exemple positionnement et orientation d'un organe terminal dans l'espace /10/.

### 3.11. LES DIFFÉRENTS MODELES ASSOCIES A UN ROBOT

Les caractéristiques mécaniques des robots permettent d'obtenir les équations générales de leurs mouvements. Elles constituent le modèle du robot nécessaire au calculateur pour déterminer les points de consignes de trajectoire. Le modèle doit être aussi simple que possible tout en conservant une bonne représentation du processus. Le modèle cinématique et le modèle dynamique sont les deux classes de modèles réalisables /11/ et nous allons les étudier.

3.11.1. Commande cinématique

- Le premier modèle cinématique utilise un contrôle de position, il repose sur la transformation des coordonnées d'un référentiel fixe X en un référentiel Q et inversement.

$$\underline{X} = \underline{F} (\underline{Q}) \quad (3.1.)$$

Le problème consiste à calculer les valeurs des variables du manipulateur (coordonnées généralisées) qui situent l'organe terminal en position et orientation désirées dans l'espace de travail et par conséquent à inverser la fonction F.

$$\underline{Q} = \underline{F}^{-1} (\underline{X}) \quad (3.2.)$$

$\underline{X}$  : définit la configuration du manipulateur dans le système de référence fixe (coordonnées opérationnelles).

$\underline{Q}$  : les variables des différents actionneurs constituant les degrés de liberté du manipulateur (coordonnées généralisées). C'est la partie observable.

Lorsque  $\underline{X}$  et  $\underline{Q}$  ont la même dimension c'est-à-dire que  $\underline{F}^{-1}$  existe et est unique, la commande est alors appelée "commande en position".

La difficulté vient du fait que F(Q) est en général une fonction non linéaire (elle contient des sinus et des cosinus de coordonnées généralisées) ce qui rend le calcul de  $\underline{F}^{-1}$  souvent difficile. Seuls les manipulateurs possédant des propriétés géométriques particulières, telles que l'intersection ou le parallélisme de plusieurs axes permettent d'obtenir une solution simple.

- Le second modèle cinématique utilise un contrôle de vitesse, il est obtenu par les équations :

$$\underline{X}' = \underline{J} (\underline{Q}) \underline{Q}' \quad (3.3.)$$

$$\text{avec } \underline{J} (\underline{Q}) = \frac{\partial \underline{F} (\underline{Q})}{\partial \underline{Q}} \quad (3.4.) :$$

matrice des incréments linéaires.

ou encore J : matrice Jacobienne du système /12/.

J est une matrice carrée si  $\underline{X}$  est correctement choisi. Chaque composante de J est obtenue par le calcul des dérivées partielles des composantes de F(Q). La matrice J étant fonction des degrés de liberté, cette méthode tient compte de la cinématique exacte du manipulateur, bien que le système ait été linéarisé ; à la condition que les accroissements  $\Delta X$  ne soient pas trop importants.

Pour un manipulateur non redondant et en dehors des positions singulières telles que  $\det J(Q) = 0$  :

$$\dot{Q} = J^{-1}(Q) \dot{X} \quad (3.5.)$$

Dans cette commande intervient le paramètre temps, au vecteur Q (t) correspond le vecteur X (t).

Q (t) se calcule par échantillonnage de l'intervalle de temps (0,  $t_f$ ) avec une période T.

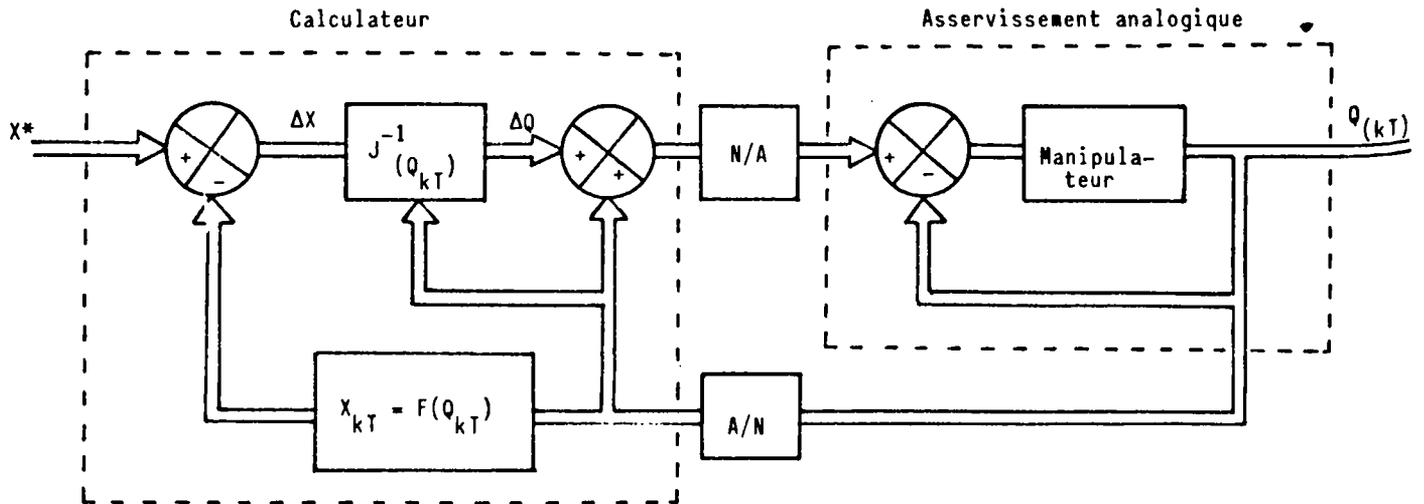
$$\dot{Q}(kT) = \frac{Q(kT) - Q(k-1)T}{T} = \frac{\Delta Q(kT)}{T} \quad (3.6.)$$

$$\dot{X}(kT) = \frac{X(kT) - X(k-1)T}{T} = \frac{\Delta X(kT)}{T} \quad (3.7.)$$

donc

$$\Delta Q(kT) = J^{-1}[Q(kT)] \cdot \Delta X(kT) \quad (3.8)$$

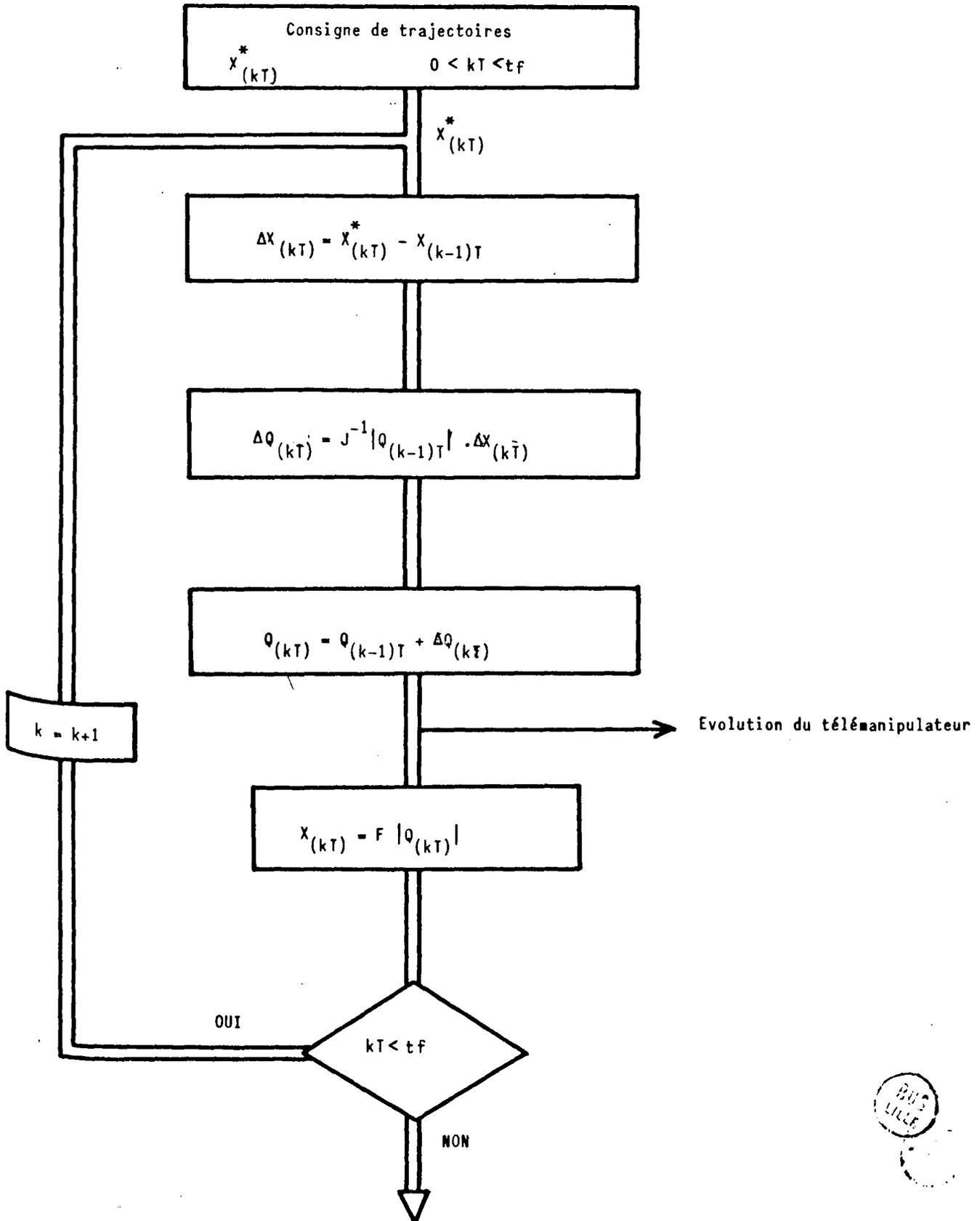
Illustré sous la forme d'un schéma bloc :



- Figure 3.6. -

$X^*$  représente la valeur imposée dans l'espace de travail à l'instant  $kT$ . L'organigramme du calcul de  $Q_{(kT)}$  est le suivant (fig. 3.7.).





- Figure 3.7. -

3.11.2. Commande dynamique

Dans le paragraphe précédent nous avons développé les méthodes de synthèse d'une commande cinématique en négligeant la dynamique du manipulateur.

La commande dynamique est pourtant intéressante en présence d'évolutions rapides du manipulateur, car elle tient compte des vitesses et des accélérations instantanées sur chaque actionneur. Cette méthode nécessite la mise en équation des mécanismes articulés et différentes théories ont été développées afin d'obtenir les équations du mouvement /13/.

- Newton-Euler
- Lagrange
- D'Alembert
- Gibbs-Appel

La majorité des solutions présentées dans la littérature utilisent le formalisme de Lagrange car les équations de Lagrange présentent l'avantage par rapport aux équations de Newton-Euler de ne pas nécessiter l'élimination des forces et couples de contraintes.

Les équations de Lagrange se présentent généralement sous la forme suivante /14/ :

$$[A] [\ddot{Q}] + [B] [\dot{Q} \cdot \dot{Q}] + [C] [Q \cdot \dot{Q}^2] = [M_d] + [G] + [H] \quad (3.9)$$

Q : est le vecteur colonne ayant pour composantes les n coordonnées généralisées du mécanisme.

La dérivée par rapport au temps t est notée par le point (·) avec :

- [A] : matrice de l'énergie cinétique
- [B] : matrice des coefficients des forces de Coriolis
- [C] : matrice des coefficients des forces centrifuges
- [G] : matrice des dérivées partielles de l'énergie potentielle (forces dérivant de la fonction potentielle V due à la pesanteur)
- [H] : force dérivant de la fonction potentielle W connue
- [M<sub>d</sub>] : couples ou forces produites par les moteurs sur les articulations.

La détermination de la matrice d'énergie cinétique est présentée dans les travaux de RENAUD et ITURRALDE /10/ /14/.

La substitution des valeurs  $Q''$ ,  $Q'$  et  $Q$  dans l'équation matricielle (3-9) permet le calcul des couples et/ou des forces applicables à chaque articulation et de mettre en évidence la contribution à ces couples ou à ces forces de chacun des termes de l'équation.

Inversement si on considère comme entrées du système les forces forces et/ou les couples en fonction du temps pour chaque articulation, on peut étudier et simuler l'évolution du mécanisme dans l'espace.

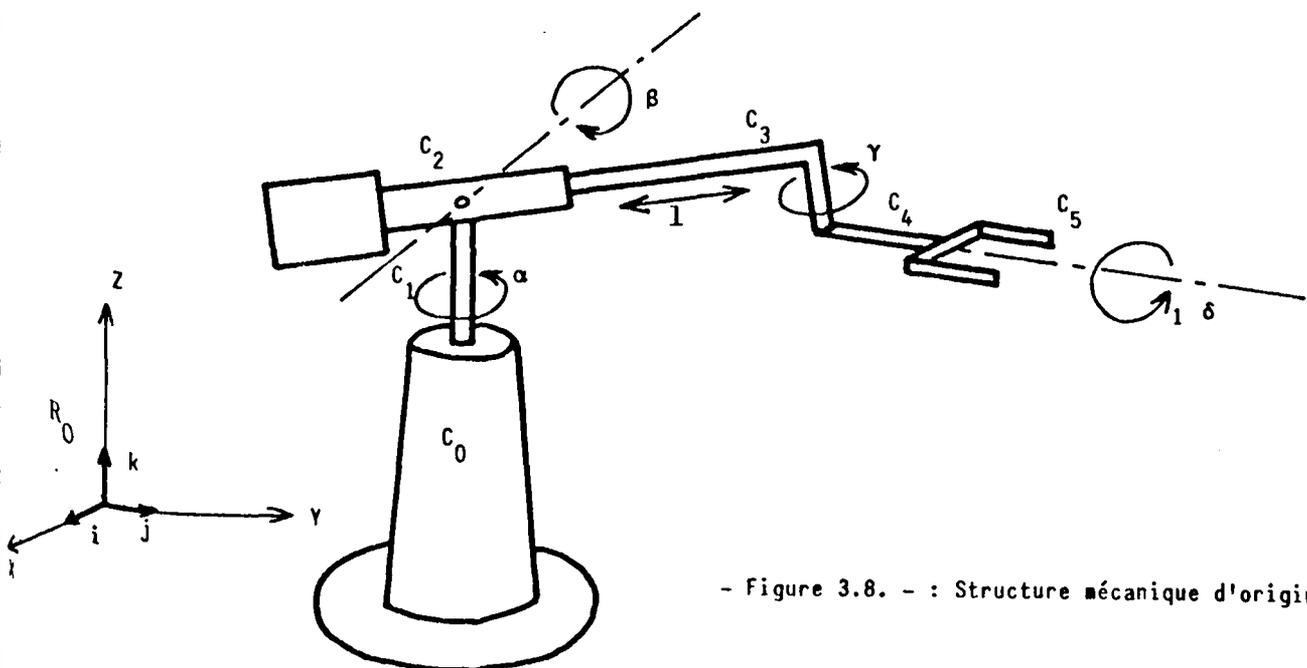
### 3.12. DETERMINATION DU MODELE GEOMETRIQUE DU MANIPULATEUR

La première étape avant d'effectuer la synthèse de la commande coordonnée consiste à établir la relation entre les composantes de  $X$  qui définissent la position et l'orientation de l'organe de préhension et celles qui spécifient la valeur des différents degrés de liberté  $q_i \in Q$ . Cette relation est représentée par la fonction vectorielle  $F$ .

$$\underline{X} = \underline{F} (\underline{Q})$$

Appelons (voir fig. 3.8)

- $\alpha, \beta, l$  respectivement les deux rotations et la translation du bras
- $\gamma, \delta$  les deux rotations du poignet.



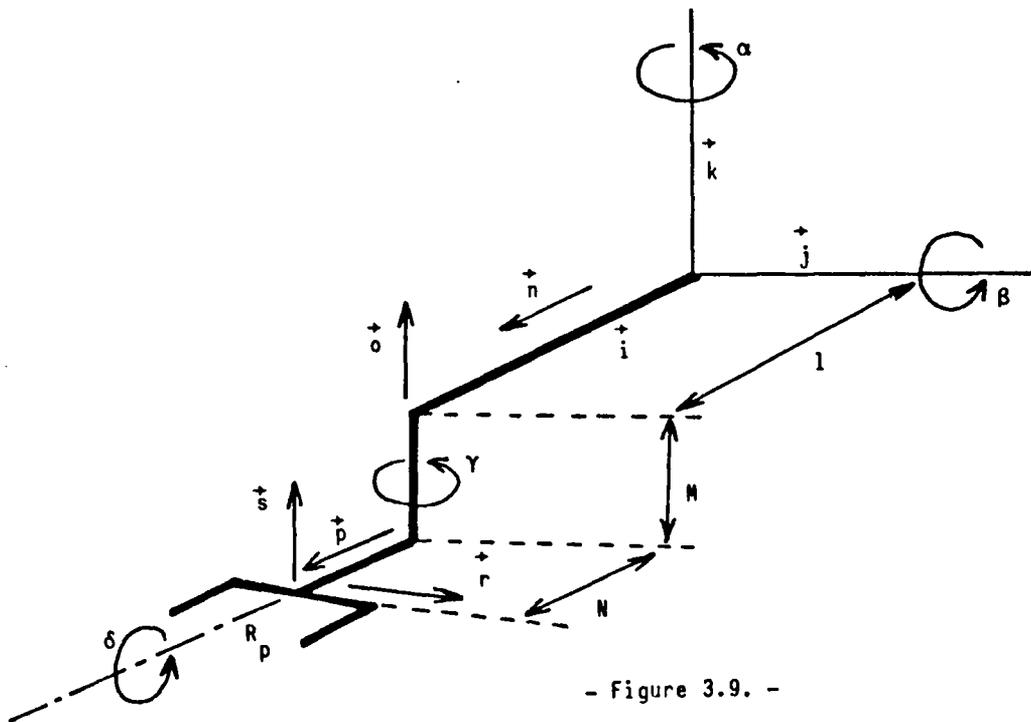
- Figure 3.8. - : Structure mécanique d'origine

Le manipulateur choisi étant constitué de 5 corps solides articulés, le premier corps  $C_1$  de la chaîne  $C_i$  ( $i = 1,5$ ) est articulé sur le bâti fixe  $C_0$  contenant le repère de référence  $R_0 (\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ .

A chaque corps  $C_i$  du manipulateur on peut lier un repère orthonormé  $R_i$  et l'écriture des matrices de changement de base permet d'obtenir  $R_i$  à partir de  $R_{i-1}$ . Cette méthode d'obtention du modèle géométrique, étant systématique et générale, elle peut être programmée /15/ /16/.

Dans cette étude nous avons retenu un nombre limité de paramètres caractéristiques du modèle, ceci nous permet d'une part une détermination rapide du modèle géométrique et d'autre part une simplification des résultats.

Une représentation schématique du manipulateur (fig. 3.9.) fait apparaître les différentes variables nécessaires à l'écriture des équations : les paramètres fixes  $M$  et  $N$  sont caractéristiques de la longueur du corps  $C_4$  et le paramètre  $l$  : variable extension du bras représente un degré de liberté.



- Figure 3.9. -

3.12.1. Détermination de la position de l'organe terminal

L'organe terminal dans la structure initial du robot est constitué par une pince à deux doigts. Pour définir sa position la solution la plus naturelle consiste à choisir comme point de repère le centre de la pince :  $R_p$  (le repère peut être fictif).  $R_p$  caractérise la position de l'organe terminal déterminée en coordonnées cartésiennes.

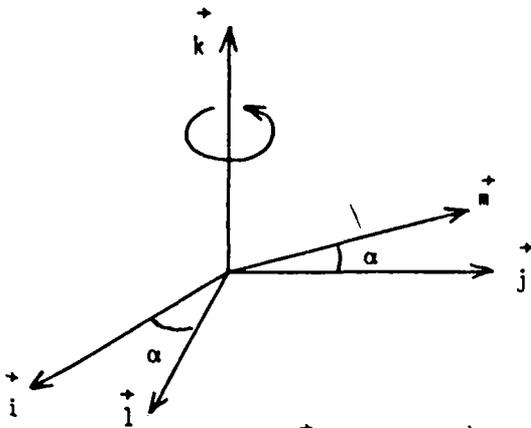
$\vec{n}$ ,  $\vec{o}$ ,  $\vec{p}$  étant des vecteurs unitaires, nous pouvons écrire la relation :

$$X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k} = l \vec{n} - M \vec{o} + N \vec{p} \quad (3.10)$$

X, Y et Z représentent les coordonnées de position (coordonnées opérationnelles) de l'organe terminal.

La détermination des vecteurs  $\vec{n}$ ,  $\vec{o}$ ,  $\vec{p}$  par rapport au repère fixe R permettent d'identifier les termes de l'équation (3.10.).

Le repère  $[\vec{l}, \vec{m}, \vec{k}]$  est lié au corps  $c_1$ . Une rotation du corps  $c_1$  par rapport au corps  $c_0$  (repère fixe de base) permet d'écrire :



$$\vec{l} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}$$

$$\vec{m} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}$$

$$\vec{l} = \cos \alpha \vec{i} + \sin \alpha \vec{j}$$

$$\vec{m} = -\sin \alpha \vec{i} + \cos \alpha \vec{j}$$

Afin de simplifier l'écriture on utilisera dans la suite de ce chapitre les notations suivantes :

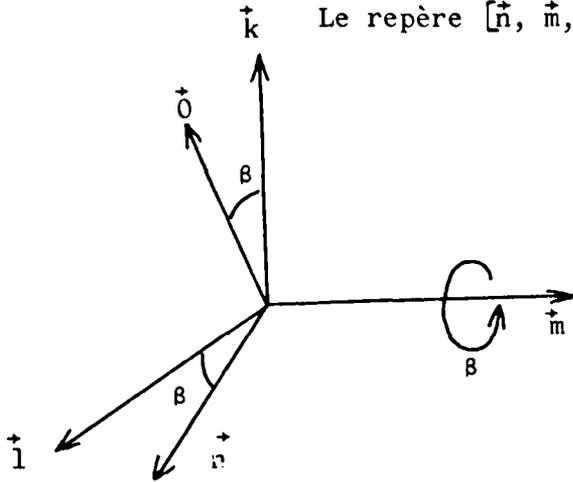
$$\begin{array}{ll} A = \sin \alpha & \bar{A} = \cos \alpha \\ B = \sin \beta & \bar{B} = \cos \beta \\ C = \sin \gamma & \bar{C} = \cos \gamma \\ D = \sin \delta & \bar{D} = \cos \delta \end{array} \quad (3.11.)$$

donc :

$$\begin{aligned} \vec{l} &= A \vec{i} + A \vec{j} \\ \vec{m} &= -A \vec{i} + \bar{A} \vec{j} \end{aligned} \quad (3.12.)$$

- Rotation  $\beta$  du corps  $c_2$  par rapport au corps  $c_1$ .

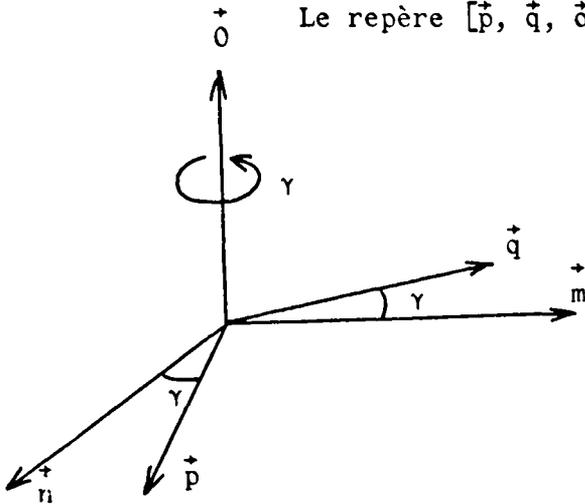
Le repère  $[\vec{n}, \vec{m}, \vec{o}]$  est lié au corps  $c_2$



$$\begin{aligned} \vec{n} &= \bar{B} \vec{i} - B \vec{k} \\ \vec{o} &= B \vec{i} + \bar{B} \vec{k} \end{aligned} \quad (3.13.)$$

- Rotation  $\gamma$  du corps  $c_4$  par rapport au corps  $c_3$ .

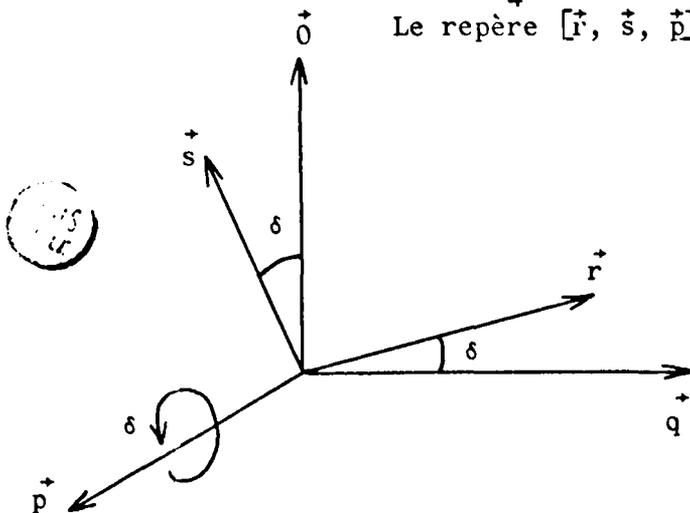
Le repère  $[\vec{p}, \vec{q}, \vec{o}]$  est lié au corps  $c_4$



$$\begin{aligned} \vec{p} &= \bar{c} \vec{n} + c \vec{m} \\ \vec{q} &= -c \vec{n} + \bar{c} \vec{m} \end{aligned} \quad (3.14.)$$

- Rotation  $\delta$  du corps  $c_5$  (organe terminal) par rapport au corps  $c_4$ .

Le repère  $[\vec{r}, \vec{s}, \vec{p}]$  est lié au corps  $c_5$



$$\begin{aligned} \vec{r} &= \bar{D} \vec{q} + D \vec{o} \\ \vec{s} &= -D \vec{q} + \bar{D} \vec{o} \end{aligned} \quad (3.15.)$$

On obtient les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 l \vec{n} &= \begin{pmatrix} \bar{A} \bar{B} 1 \\ A \bar{B} 1 \\ - B 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{matrix} &
 M \vec{o} &= \begin{pmatrix} \bar{A} B M \\ A B M \\ \bar{B} M \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{j} \end{matrix} &
 N \vec{p} &= \begin{pmatrix} N \bar{A} \bar{B} \bar{C} - N A C \\ N A \bar{B} \bar{C} + N \bar{A} C \\ - N B \bar{C} \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{matrix}
 \end{aligned}$$

La position de l'organe terminal exprimée dans l'espace de travail en fonction des coordonnées généralisées s'écrit :

$$\begin{aligned}
 X &= \bar{A} \bar{B} 1 - \bar{A} B M + N \bar{A} \bar{B} \bar{C} - N A C \\
 Y &= A \bar{B} 1 - A B M + N A \bar{B} \bar{C} + N \bar{A} C \\
 Z &= - B 1 - \bar{B} M - N B \bar{C}
 \end{aligned} \tag{3.16.}$$

### 3.12.2. Détermination de l'orientation de l'organe terminal

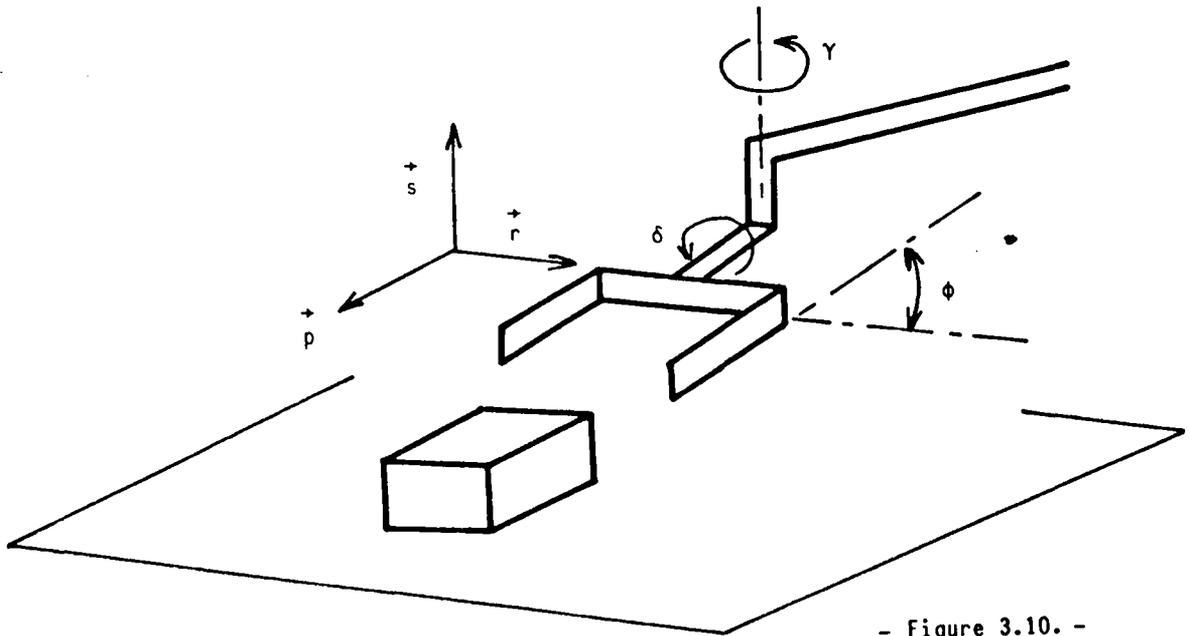
Si la définition de la position de la pince semble logique, l'orientation de celle-ci peut s'exprimer de différentes manières.

Pour préciser cette notion d'orientation il est nécessaire de lier à la pince le repère  $[\vec{p}, \vec{r}, \vec{s}]$ . L'orientation de ce repère par rapport au repère fixe  $R_0 (\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  peut être défini grâce aux cosinus directeurs des vecteurs  $\vec{p}, \vec{r}, \vec{s}$ .

Il est intéressant de retenir le vecteur unitaire  $\vec{r}$  pour caractériser l'orientation de la pince.

La remarque suivante justifie ce choix :

Le manipulateur possédant cinq degrés de liberté, il est impossible dans ces conditions d'atteindre toutes les positions de l'espace avec l'orientation voulue, toutefois l'un des objectifs de cette étude étant de faire de la saisie d'objet posé sur un plan horizontal, il est toujours possible d'orienter convenablement la pince sur l'objet en agissant sur  $\gamma$  et  $\delta$  (fig. 3.10.) et d'imposer que l'extrémité des doigts de la pince reste parallèle au plan support de l'objet.



- Figure 3.10. -

Néanmoins nous ne sommes pas maître de l'angle  $\phi$ , angle existant entre le plan support et les doigts de la pince. La valeur de cet angle est variable en fonction de la configuration prise par le manipulateur pour saisir l'objet dans la bonne orientation.

Les cosinus directeurs des vecteurs  $\vec{p}$ ,  $\vec{r}$ ,  $\vec{s}$  sont en fait les composantes de ces trois vecteurs unitaires dans le repère de référence  $R_0 [\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}]$ .

$$\begin{aligned} \vec{p} &= [p_X, p_Y, p_Z]^T \\ \vec{r} &= [r_X, r_Y, r_Z]^T \\ \vec{s} &= [s_X, s_Y, s_Z]^T \end{aligned} \quad (3.17)$$

9 grandeurs caractérisent l'orientation de la pince, le vecteur  $\vec{r}$  est défini par les 3 composantes  $r_X, r_Y, r_Z$ .

$$\text{posons : } \psi = \text{Arctg} \frac{r_X}{r_Y} \quad (3.18)$$

L'angle  $\psi$  est donc une caractéristique d'orientation de la pince par rapport au référentiel.

Et pour que l'extrémité des doigts de la pince reste parallèle au plan support, la condition  $r_z = 0$  est suffisante.

. Détermination des constantes du vecteur  $\vec{r}$

Nous avons exprimé  $\vec{r}$  précédemment par la relation (3.15.)

$$\vec{r} = \bar{D} \vec{q} + D \vec{o}$$

On en déduit :

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} -\bar{A} \bar{B} C \bar{D} - A \bar{C} \bar{D} + \bar{A} B D \\ -A \bar{B} C \bar{D} + \bar{A} \bar{C} \bar{D} + A B D \\ B C \bar{D} + \bar{B} D \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{matrix} \quad (3.19)$$

par conséquent :

$$\psi = \text{Arctg} \frac{-\bar{A} \bar{B} C \bar{D} - A \bar{C} \bar{D} + \bar{A} B D}{-A \bar{B} C \bar{D} + \bar{A} \bar{C} \bar{D} + A B D} \quad (3.20)$$

Nous appellerons  $r$  la composant  $r_z$  du vecteur  $\vec{r}$

$$r = B C \bar{D} + \bar{B} D \quad (3.21.)$$

La fonction vectorielle  $F$  du modèle géométrique

$$\underline{X} = \underline{F}(\underline{Q})$$

avec  $X, Y, Z, \psi, r$  : coordonnées opérationnelles

$\alpha, \beta, l, \gamma, \delta$  : coordonnées généralisées

s'écrit :

$$\begin{aligned}
 X &= 1 \bar{A} \bar{B} - M \bar{A} B + N \bar{A} \bar{B} \bar{C} - N A C \\
 Y &= 1 A \bar{B} - M A B + N A \bar{B} \bar{C} + N \bar{A} C \\
 Z &= -1 B - M \bar{B} - N B \bar{C} \\
 \psi &= \text{Arctg} \frac{\bar{A} \bar{B} C \bar{D} + A \bar{C} \bar{D} - \bar{A} B D}{-A \bar{B} C \bar{D} + \bar{A} C \bar{D} + A B D} \\
 r &= B C \bar{D} + \bar{B} D
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Cette description comporte un minimum de 5 variables indépendantes.

Les équations précédentes représentent le modèle géométrique non linéaire direct.

Par contre, si l'on veut calculer  $\underline{Q}$  à partir de  $\underline{X}$  connu, il faut inverser le modèle c'est-à-dire résoudre l'équation :

$$\underline{Q} = \underline{F}^{-1}(\underline{X})$$

$\underline{F}^{-1}$  représente le modèle géométrique non linéaire inverse. Son calcul est très difficile du fait des non linéarités qui apparaissent dans les équations précédentes. Compte-tenu de ces difficultés nous allons développer le second modèle cinématique (contrôle de vitesse) ; la recherche des solutions étant plus aisée, car le système est linéarisé.

$$\underline{X}' = J(Q) \underline{Q}'$$

Nous l'appellerons modèle variationnel.

### 3.13. MODELE VARIATIONNEL, CALCUL DE LA MATRICE JACOBIENNE

En se reportant aux relations (3.3.) et (3.4.) du paragraphe 3.11.1., l'expression de la fonction reliant les variations sur les coordonnées opérationnelles avec les variations sur les coordonnées généralisées (matrice Jacobienne) s'écrit :

$$\begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{l}
 X^{\cdot} \\
 Y^{\cdot} \\
 Z^{\cdot} \\
 \psi^{\cdot} \\
 r^{\cdot}
 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{ccccc}
 \frac{\partial X}{\partial \alpha} & \frac{\partial X}{\partial \beta} & \frac{\partial X}{\partial \gamma} & \frac{\partial X}{\partial \delta} & \frac{\partial X}{\partial l} \\
 X & X & X & X & X \\
 X & X & X & X & X \\
 X & X & X & X & X \\
 \frac{\partial r}{\partial \alpha} & X & X & X & \frac{\partial r}{\partial l}
 \end{array} \right| \begin{array}{l}
 \alpha^{\cdot} \\
 \beta^{\cdot} \\
 \gamma^{\cdot} \\
 \delta^{\cdot} \\
 l^{\cdot}
 \end{array}
 \end{array} \quad (3.23.)$$

Calcul des dérivées partielles :

$$* \frac{\partial X}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [1 \bar{A} \bar{B} - M \bar{A} B + N \bar{A} \bar{B} \bar{C} - N A C]$$

avec  $A = \sin \alpha$ ,  $B = \sin \beta \dots$  etc

$$\frac{\partial X}{\partial \alpha} = -1 \bar{A} B - M \bar{A} \bar{B} - N \bar{A} B \bar{C} = -Y$$

$$\frac{\partial X}{\partial \beta} = -1 \bar{A} B - M \bar{A} \bar{B} - N \bar{A} B \bar{C} = \bar{A} Z$$

$$\frac{\partial X}{\partial \gamma} = -N \bar{A} \bar{B} C - N A \bar{C}$$

$$\frac{\partial X}{\partial \delta} = 0$$

$$\frac{\partial X}{\partial l} = \bar{A} \bar{B}$$

$$* \frac{\partial Y}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [1 A \bar{B} - M A B + N A \bar{B} \bar{C} + N \bar{A} C]$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \alpha} = 1 \bar{A} \bar{B} - M \bar{A} B + N \bar{A} \bar{B} \bar{C} - N A C = X$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \beta} = -1 A B - M A \bar{B} - N A B \bar{C} = A Z$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \gamma} = -N A \bar{B} C + N \bar{A} \bar{C}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \delta} = 0$$

$$\frac{\partial Y}{\partial l} = A \bar{B}$$



$$* \frac{\partial Z}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [-1 B - M \bar{B} - N B \bar{C}]$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha} = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \beta} = -1 \bar{B} + M B - N \bar{B} \bar{C} = -\sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \gamma} = N B C$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \delta} = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial l} = -B$$

$$* \frac{\partial \Psi}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ \text{Arctg} \cdot \frac{\bar{A} \bar{B} C D + A \bar{C} \bar{D} - \bar{A} B D}{-A \bar{B} C \bar{D} + A \bar{C} \bar{D} + A B D} \right]$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \alpha} = 1$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \beta} = -\bar{C} \bar{D} \frac{r}{1-r^2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \gamma} = \frac{\bar{B} \bar{D} - B C D}{1-r^2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \delta} = -\frac{B \bar{C}}{1-r^2}$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial l} = 0$$

$$* \frac{\partial r}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [B C \bar{D} + \bar{B} D]$$

$$\frac{\partial r}{\partial \alpha} = 0$$

$$\frac{\partial r}{\partial \beta} = \bar{B} C \bar{D} - B D$$

$$\frac{\partial r}{\partial \gamma} = B \bar{C} \bar{D}$$

$$\frac{\partial r}{\partial \delta} = -B C D + \bar{B} \bar{D}$$

$$\frac{\partial r}{\partial l} = 0$$



Nous pouvons donc exprimer les termes de la matrice Jacobienne.

$$\begin{array}{c}
 \left| \begin{array}{c} X^* \\ Y^* \\ Z^* \\ \psi^* \\ r^* \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cccccc}
 -Y & \bar{A} Z & (-N \bar{A} \bar{B} C - N \bar{A} \bar{C}) & 0 & \bar{A} \bar{B} & \alpha^* \\
 X & A Z & (-N A \bar{B} C + N \bar{A} \bar{C}) & 0 & A \bar{B} & \beta^* \\
 0 & -\sqrt{X^2 + Y^2} & N B C & 0 & -B & \gamma^* \\
 1 & \frac{-\bar{C} \bar{D} r}{1 - r^2} & \frac{\bar{D}(\bar{B} \bar{D} - B C D)}{1 - r^2} & \frac{-B \bar{C}}{1 - r^2} & 0 & \delta^* \\
 0 & (\bar{B} C \bar{D} - B D) & B \bar{C} \bar{D} & (-B C D + \bar{B} \bar{D}) & 0 & 1^*
 \end{array} \right| \quad (3.24.)
 \end{array}$$

REMARQUE :

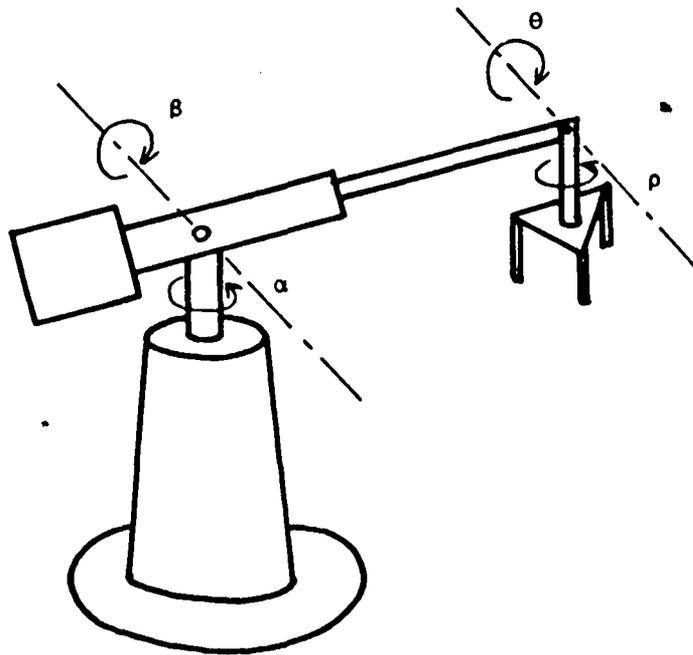
Les paramètres A, B, C, D des termes de la matrice sont mesurés par les capteurs de position du robot. La disposition physique des capteurs sur le robot nous oblige à introduire de nouvelles constantes pour exploiter la valeur mesurée de ces paramètres (voir Annexe 3).

Les méthodes développées pour inverser le système dépendent du rang de la matrice Jacobienne. Le cas régulier, où le nombre de composantes X\* est égal au nombre de composantes Q\* ne présente pas de difficultés théoriques. Le choix de l'algorithme d'inversion dépend du temps de calcul alloué et de la précision requise.

3.14. MODELE GEOMETRIQUE D'UNE STRUCTURE SIMPLIFIEE DU MANIPULATEUR

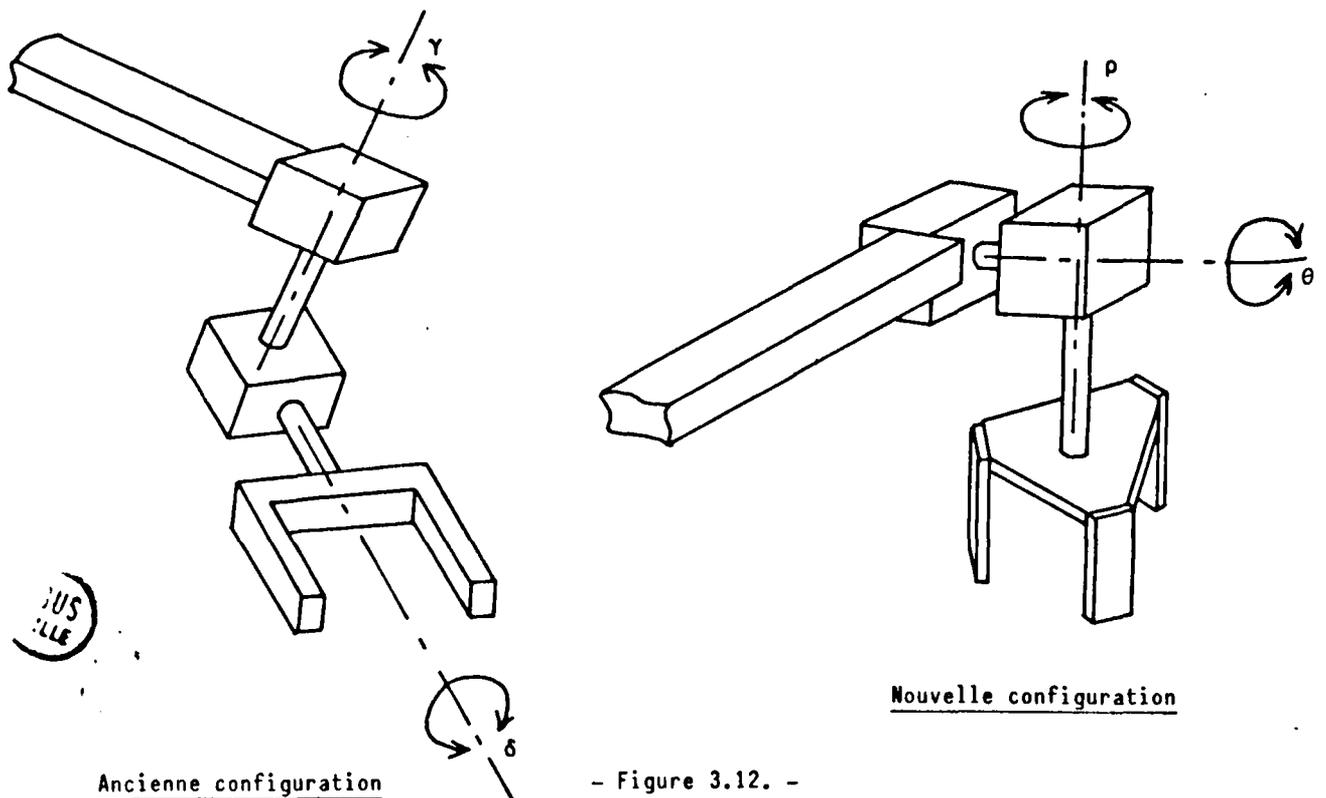
Nous recherchons une structure mécanique du manipulateur adaptée à la saisie de pièce sur un plan horizontal et permettant une utilisation aisée de capteurs du type infrarouge montés sur les doigts de la pince.

La nouvelle morphologie du manipulateur pourvu de son organe de saisie est la suivante :



- Figure 3.11.

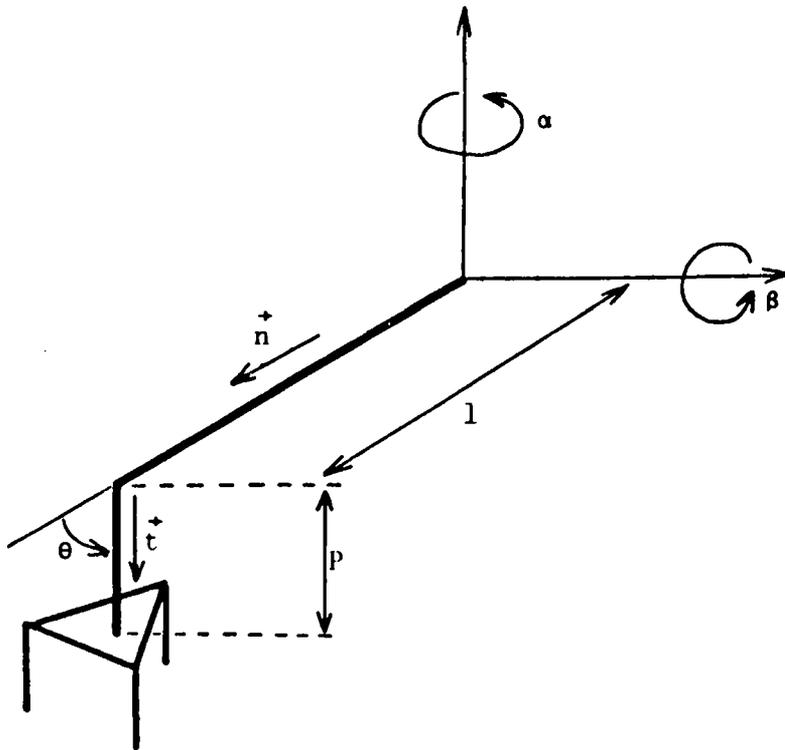
La modification intervient au niveau du poignet.



Ancienne configuration

Nouvelle configuration

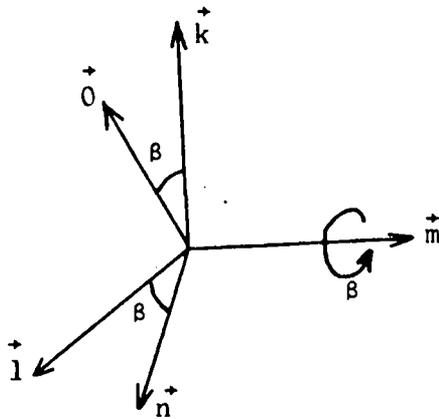
- Figure 3.12. -



sur le même principe développé précédemment nous pouvons écrire :

$$X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k} = l \vec{n} + P \vec{t} \quad (3.25.)$$

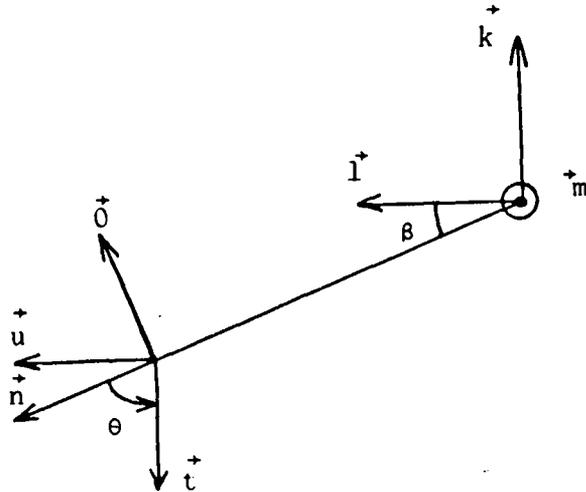
Rappel :



$$\vec{n} = \beta \vec{i} - \beta \vec{k}$$

$$\vec{o} = \beta \vec{i} + \beta \vec{k}$$





$$\begin{aligned} \vec{t} &= \bar{T} \vec{n} - T \vec{o} \\ \vec{u} &= T \vec{n} + \bar{T} \vec{o} \end{aligned} \quad (3.26.)$$

$$\begin{aligned} T &= \sin \theta \\ \bar{T} &= \cos \theta \end{aligned} \quad (3.27.)$$

$$l\vec{n} = \begin{pmatrix} \bar{A} \bar{B} 1 \\ A \bar{B} 1 \\ -B 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{matrix} \quad P\vec{t} = \begin{pmatrix} P \bar{T} \bar{B} \bar{A} - P T B \bar{A} \\ P \bar{T} \bar{B} A - P T B A \\ -P \bar{T} B - P T \bar{B} \end{pmatrix} \begin{matrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{matrix}$$

donc :

$$\begin{aligned} X &= \bar{A} \bar{B} 1 + P \bar{T} \bar{B} \bar{A} - P T B \bar{A} \\ Y &= A \bar{B} 1 + P \bar{T} \bar{B} A - P T B A \\ Z &= -B 1 - P \bar{T} B - P T \bar{B} \end{aligned} \quad (3.28.)$$

L'intégration des capteurs infrarouges dans les doigts de la pince impose que celle-ci reste verticale afin de détecter convenablement les objets, quelle que soit la configuration du manipulateur. Donc que le vecteur  $\vec{t}$  reste parallèle au vecteur  $\vec{k}$  appartenant au repère fixe.



Une relation évidente apparaît entre  $\beta$  et  $\theta$ .

$$\beta + \theta = \frac{\pi}{2} \quad (3.29)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \beta$$

$$\cos \theta = \sin \beta + \bar{T} = B \quad (3.30)$$

$$\sin \theta = \cos \beta + T = \bar{B} \quad (3.31)$$

Si on introduit (3.30) et (3.31) dans les relations (3.28).

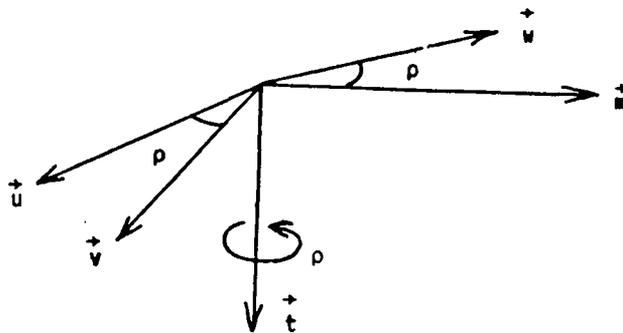
$$\begin{aligned} X &= \bar{A} \bar{B} l \\ Y &= A \bar{B} l \\ Z &= -B l - P \end{aligned} \quad (3.32)$$

Nous constatons que la condition (3.29) (pince verticale) simplifie beaucoup les relations du modèle géométrique.

Orientation de l'organe terminal

Appelons  $\vec{v}$  le vecteur caractéristique de l'orientation de la pince.

$\psi$  : l'angle existant entre le vecteur  $\vec{v}$  et le vecteur  $\vec{i}$  du référentiel.



$$\Psi = \alpha + \rho$$

$\alpha, \beta, l, \theta, \rho$  = coordonnées généralisées

$X, Y, Z, \Psi$  = coordonnées opérationnelles

avec :

$$\begin{aligned} X &= \bar{A} \bar{B} l \\ Y &= A \bar{B} l \\ Z &= -B l - P \\ \Psi &= \alpha + \rho \end{aligned} \tag{3.33.}$$

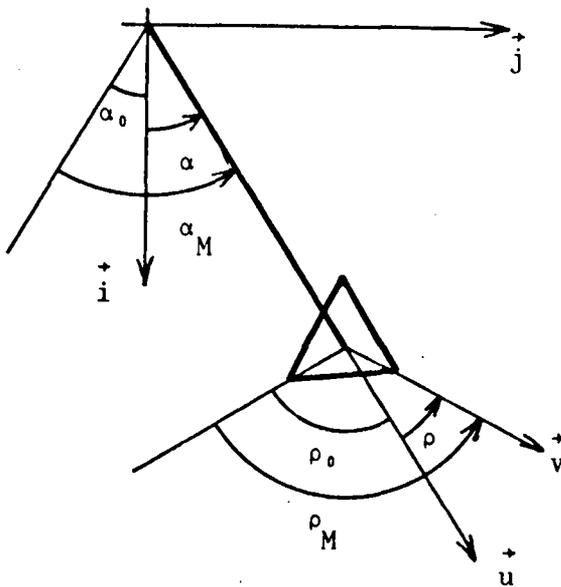
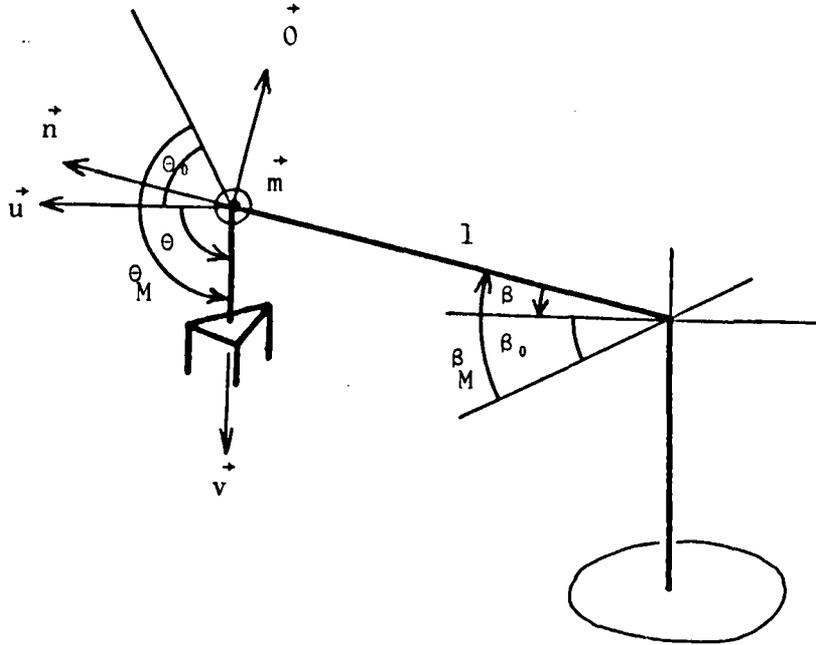
Les expressions (3.33.) du modèle direct étant relativement simples, la recherche du modèle géométrique inverse est envisageable.

On obtient :

$$\begin{aligned} A &= \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ B &= \frac{\sqrt{Z^2 + P^2 + 2PZ}}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2 + P^2 + 2PZ}} \\ l &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2 + P^2 + 2PZ} \\ \theta &= \frac{\pi}{2} - \beta \\ \rho &= \Psi - \alpha \end{aligned} \tag{3.34.}$$

US  
L

avec :



$$* \alpha = \alpha_M - \alpha_0$$

$$\alpha_0 = 39^{\circ}, 13$$

$$* \rho = \rho_M - \rho_0$$

$$\rho_0 = 90^{\circ}$$

$$* \beta = \beta_0 - \beta_M$$

$$\beta_0 = 45^{\circ}, 85$$

$$* \theta = \theta_M - \theta_0$$

$$\theta_0 = 65^{\circ}$$

$$* l = l_0 + l_M$$

$$l_0 = 103 \text{ cm}$$

$$* P = 15 \text{ cm}$$



. CONCLUSION :

Une présentation synthétique des différents niveaux de commande du mode mixte a permis de dégager les problèmes liés à la réalisation de chaque module.

La structure réelle est répartie en trois niveaux (Superviseur, Algorithmique, Asservissements) et au cours de cette étude nos efforts ont porté sur la résolution des problèmes posés au premier et deuxième niveaux (Pilotage du robot par l'homme, pilotage automatique, transfert des informations).

De l'étude spécifique du transformateur de coordonnées nous retiendrons un modèle tenant compte de l'aspect temps réel de la commande (temps de calcul), une solution est proposée dans le cas d'une structure simplifiée du robot (pince verticale).

L'adjonction de langages de haut niveau tels le PASCAL ou le FORTRAN sera nécessaire en particulier pour la mise en place du niveau superviseur et aussi au niveau algorithmique pour le calcul des fonctions trigonométriques du transformateur de coordonnées.

L'intégration et l'étude fonctionnelle des différents modules présentés dans le chapitre suivant n'incluent pas la commande du robot par l'intermédiaire du transformateur de coordonnées pour les raisons citées ci-dessus (langage) mais aussi à cause de la précision (seulement 8 bits) et du temps de calcul pour une commande en temps réelle.

L'évolution automatique du robot se fera donc dans ses propres coordonnées, ce qui ne représente pas un inconvénient majeur à ce stade de la mise en place du système.

L'objectif de cette manipulation (en mode semi-automatique) est de vérifier le bon fonctionnement des différents éléments, en particulier la commande du robot par l'intermédiaire des capteurs infrarouges, ainsi que la phase de reconnaissance d'un objet.

- B I B L I O G R A P H I E -

- ne
- /1/ A. HABCHI  
"Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain"  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Lille 1, mai 1981.
- le
- /2/ P. VIDAL, D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI  
"Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain"  
Rapport scientifique final - A.T.P. - C.N.R.S. - 1980.
- /3/ P. VIDAL, D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI, M. EDEL  
"Hierarchical control and man-robot structure"  
3° Congresso Brasileiro de Automatica - RIO de JANEIRO -  
16 a 19 setembro 1980.
- st
- /4/ A.J. BARBERA, J.S. ALBUS, M.L. FITZGERALD  
National Bureau of Standards (U.S.A.)  
"Hierarchical control of robots using micro-computers"  
9<sup>e</sup> Symposium International of Robotique Industriel - WASHINGTON (USA) 1979.
- /5/ KENNETHM, FEGLEY, PATRICK, PERRY  
"Hierarchical control of a multiarea power grid"  
I.E.E.E. Transaction on system, man, and Cybernetics, july 1977.
- /6/ T. LIEGE  
"Prédétermination de la tâche en robotique par programmation semi-  
automatique, représentation et analyse temporelle de la trajectoire"  
Thèse de Docteur-Ingénieur - Montpellier, décembre 1980.
- /7/ J. LOTTERIE  
"Mécanismes, mobilité, isostaticité, réalisation"  
Séminaire de Carcassonne, 12, 13 février 1974.

/8/ O. KHATIB

"Commande dynamique dans l'espace opérationnel de robots manipulateurs en présence d'obstacle".

Thèse Docteur-Ingénieur, Université des Sciences de Toulouse, 1980.

/9/ "Computer controlled industrial robot for painting"

8th International Symposium on Industrial Robots,  
STUTTGART, 1978, pp. 689-700.

/10/ M. RENAUD

"Contribution à l'étude de la modélisation et de la commande des systèmes mécaniques articulés"

Thèse de Docteur-Ingénieur, Université P. Sabatier, Toulouse, Déc. 1975.

/11/ P. COIFFET, J.M. DUMAS, P. MOLINIER, J. VERTUT

"Real time problems in computer control of robots"

7th International Symposium on industrial robots, TOKYO 1977, pp. 145-152.

/12/ D.E. WHITNEY

"The solved motion rate control of manipulators and human prostheses"  
I.E.E.E. Transactions on M.M.S., vol. 10, N° 2, June 1969, pp. 47-53.

/13/ O. KHATIB, M. LLIBRE, R. MAMPEY

"Fonction décision-commande d'un robot industriel"

Rapport scientifique D.G.R.S.T. - C.E.R.T., Toulouse Juillet 1978.

/14/ J. ZABALA, ITURRALDE

"Commande des robots manipulateurs à partir de la modélisation de leur dynamique" - Thèse de Docteur de spécialité E.E.A.,  
Université P. Sabatier, Toulouse, juillet 1978.

/15/ J. DENAVIT, R.S. HARTENBERG

"A kinematic notation for lower pair mechanisms based matrices"  
Journal of applied mechanisms, June 1955, pp. 215-221.

/16/ A. FOURNIER

"Génération de mouvements en robotique - Applications des inverses généralisées et des pseudo-inverses"

Thèse d'Etat, Univ. des Sciences et Techn. de Montpellier, Avril 1980.

- C H A P I T R E I V -

INTEGRATION - ETUDE FONCTIONNELLE

---

I - INTRODUCTION :

Jusqu'à présent nous avons analysé le comportement du robot essentiellement sous l'aspect de la télémanipulation, c'est-à-dire de la conduite par l'intermédiaire d'un opérateur humain.

La définition de la structure de commande intègre d'une part cette phase de télémanipulation et d'autre part la phase d'évolution automatique.

L'étude fonctionnelle développée dans ce chapitre permet de réunir ces deux phases de conduite sous la forme d'une manipulation en mode dit semi-automatique.

La phase télémanipulation ayant été décrite au cours des expériences du chapitre 2, nous traiterons ici plus particulièrement la phase évolution automatique du robot. Ce mode de conduite répond donc à deux objectifs : d'une part étudier les évolutions du robot lorsque celui-ci utilise uniquement les paramètres d'environnement fournis par les capteurs de la pince /1/ (capteurs extéroceptifs) et d'autre part, examiner la possibilité de reconnaître un objet de forme simple en vue de le saisir.

L'étude fonctionnelle permet, dans un premier temps, d'analyser les résultats obtenus à l'aide de la pince actuelle et donc de définir dans un deuxième temps les caractéristiques d'une pince plus élaborée effectuant la saisie d'objets de formes complexes.

4.1. MISE EN PLACE DE LA MANIPULATION

L'objet que l'on doit reconnaître et manipuler est placé sur une table dont le revêtement est de couleur noire mate, afin que les capteurs ne soient pas sensibles au plan support de l'objet.

Le robot initialement au repos est positionné en dehors de la zone de travail. Dans une première phase (phase de conduite à distance) l'opérateur est sollicité pour guider le bras manipulateur vers l'objet à saisir par l'intermédiaire de la console manuelle. Il peut ainsi diriger rapidement en commande en vitesse la pince vers l'objet tout en évitant les obstacles. L'opérateur ne contrôle pas les mouvements du poignet, la pince reste verticale et la rotation de la pince sur elle-même est figée. Lorsque l'objet est détecté par l'un quelconque des capteurs infrarouges, l'opérateur n'intervient plus dans la commande du bras, il y a découplage et le robot devient autonome (phase automatique) ; le robot évolue maintenant dans une zone restreinte, guidé par les informations des capteurs. Une procédure de reconnaissance identifie l'objet, et l'opération de centrage (voir /2/) permet la saisie.

#### 4.2. RECONNAISSANCE D'UN OBJET

Les capteurs du type caméra offrent d'importants avantages, car ils travaillent souvent à distance et permettent d'obtenir une vue globale et détaillée des situations. Toutefois leur utilisation présente des difficultés.

- Les opérations effectuées par le robot sont parfois peu précises par suite des tolérances et des erreurs résiduelles dues aux seuils, trainages, aux actionneurs, etc...L'univers du robot peut également évoluer sous l'effet de contraintes extérieures ce qui, généralement, donne lieu à des incidents tels que le mauvais positionnement sur une pièce /3/. Il est nécessaire de tenir compte de ces aléas et de prévoir la détection et le traitement des incidents qu'ils peuvent causer.

- Les capteurs fournissent de grandes quantités de données pas très bien structurées, compte-tenu de ce que l'on cherche à extraire. L'identification de pièces minces posées sur une surface plane à partir d'une vue de dessus peut-être considérée comme un problème de vision à deux dimensions /4/. Toutefois l'analyse de scènes à trois dimensions est extrêmement importante pour calculer la trajectoire du manipulateur, déterminer les prises des objets et vérifier que les opérations

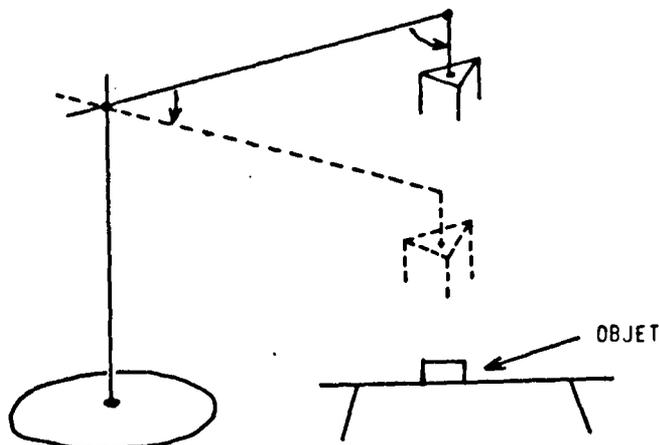
commandées sont correctemnet exécutées ce qui requiert une complexité accrue du système. De plus lors de la mise en oeuvre expérimentale, ce type de système de vision faisait à peine son apparition sur le marché, aussi nous avons utilisé des capteurs moins sophistiqués : les détecteurs infrarouges. Leur utilisation permet de résoudre, avec une certaine simplification, les problèmes développés précédemment dans le cas d'une reconnaissance d'objets de formes simples (bloc polyédriques), puis de leur prise.

#### 4.3. RECONNAISSANCE D'UN OBJET DE FORMES SIMPLES

Considérons le cas d'objet de formes polyédriques, telle qu'une vue de dessus les représente sous formes de carrés, triangles, polygônes, etc...

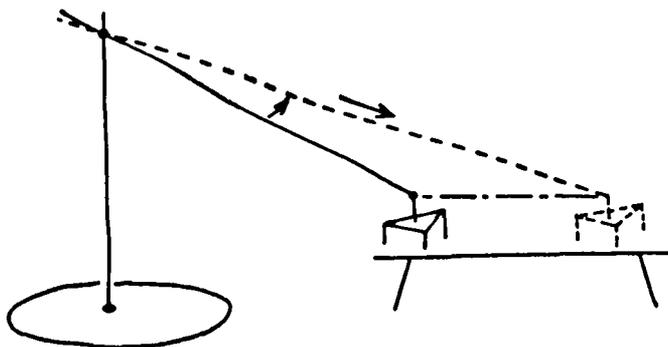
L'exploitation d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques de l'objet permet d'envisager une procédure de classement de celui-ci car si plusieurs objets sont disposés sur une table, l'un des objets à saisir sera préalablement reconnu puis rangé dans un endroit déterminé à l'avance.

Tout d'abord nous devons faire plusieurs remarques sur le déplacement du bras et de la pince lors de cette reconnaissance. L'objet est placé sur un plan horizontal, tous les déplacements haut/bas du bras supportant la pince supposent que celle-ci reste perpendiculaire au plan support de l'objet (fig. 4.1.).



- Figure 4.1. -

De même lorsqu'il y a extension du bras, l'extrémité de la pince doit rester à la même altitude par rapport au plan support de l'objet (fig. 4.2.).

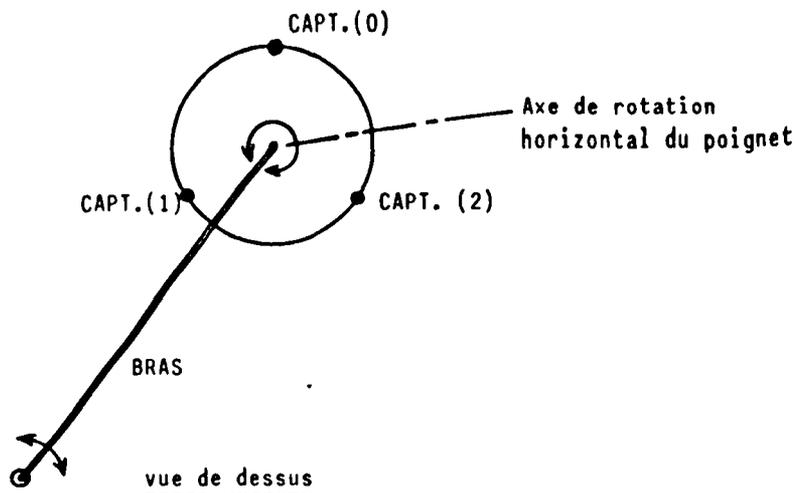


- Figure 4.2. -

Ces différents problèmes (dans l'attente de la mise en service du transformateur de coordonnées présenté chapitre 3) ont été résolus grâce à des algorithmes spécifiques. Les valeurs des fonctions trigonométriques employées pour le calcul des points de consignes sont mémorisées dans des tables et les valeurs intermédiaires sont calculées par extrapolation linéaire. Le développement de ces programmes réalisés avec la collaboration de A. HABCHI figurent dans /2/.

. Principe de la reconnaissance :

La figure suivante montre la disposition des capteurs infrarouges fixés sur l'extrémité des doigts de la pince.



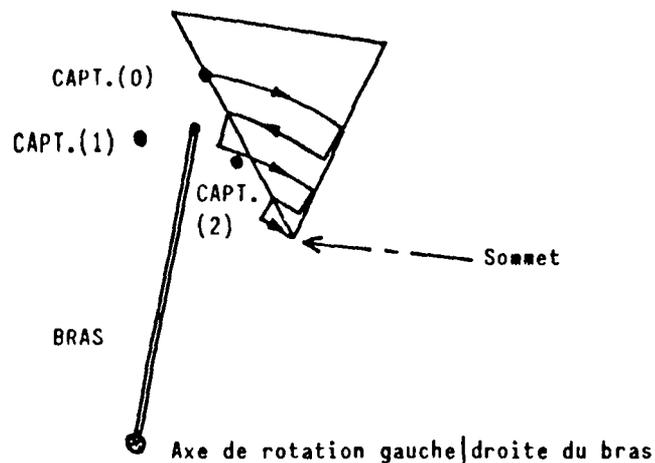
- Figure 4.3. -

#### IV - 5

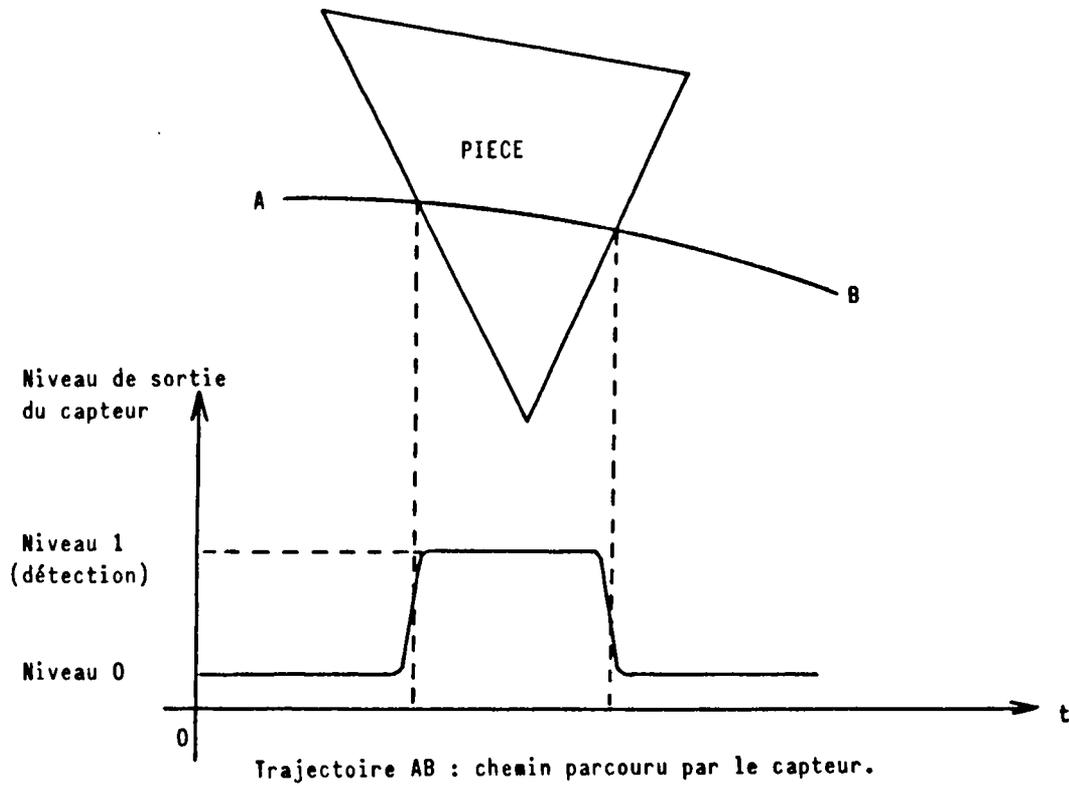
Le principe de la reconnaissance va être développé à l'aide d'un exemple où la pièce vue de dessus est représentée par un triangle. La procédure consiste à ce que le premier capteur (0) se positionne sur le sommet du triangle le plus rapproché de l'axe de rotation gauche/droite du bras (fig. 4.4.).

Afin de simplifier la présentation on suppose que l'objet ne peut avoir une arête (côtés du triangle) tangente à l'arc de cercle décrit par la rotation gauche/droite du bras.

Grâce aux "effets de bord" (détection ou non détection de la pièce, lorsque le capteur est à proximité du contour fig. 4.5.), les informations binaires du capteur commandent le déplacement du bras qui effectue un balayage de la pièce jusqu'à l'obtention du sommet.



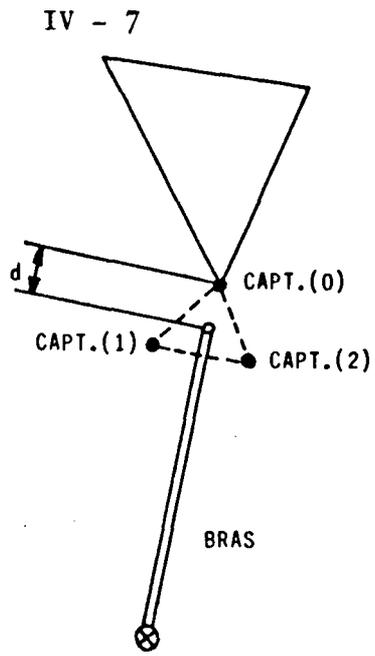
- Figure 4.4. -



- Figure 4.5. -

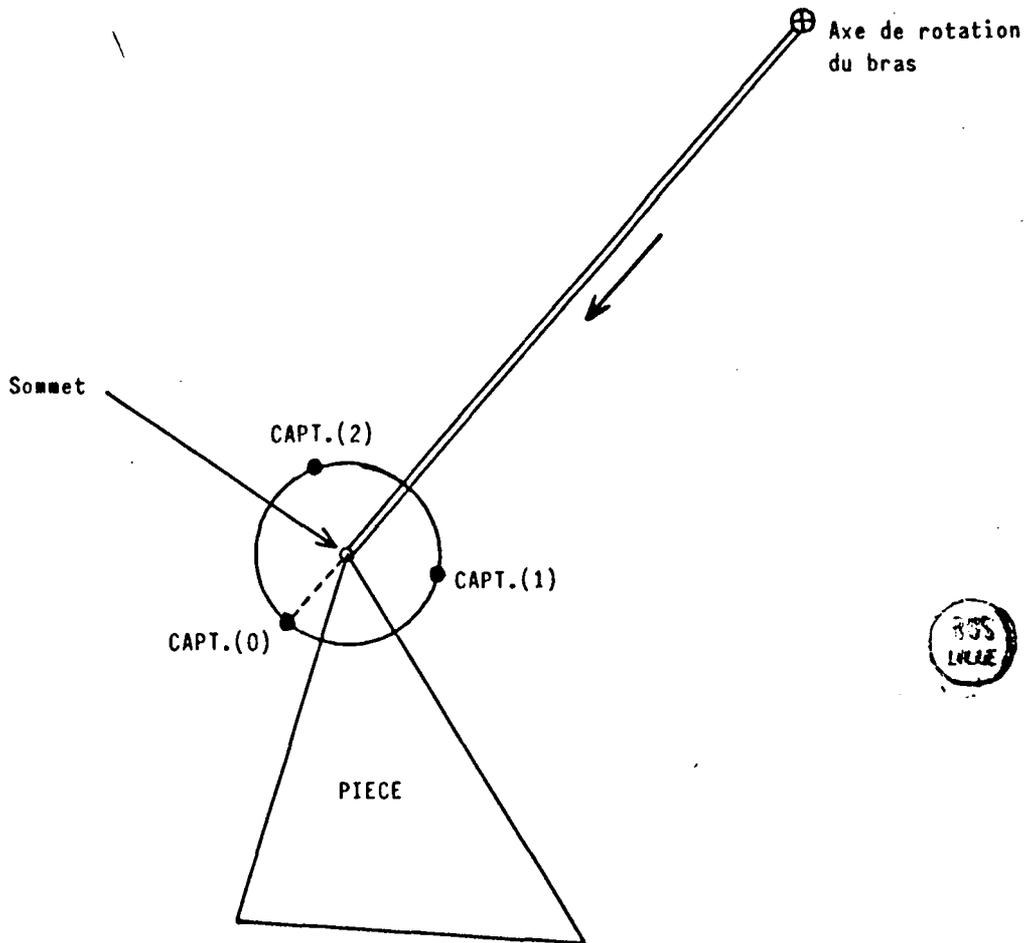
Pendant l'opération de balayage, le capteur (0) reste dans l'alignement du bras, c'est-à-dire que la rotation horizontale du poignet est "figée".





- Figure 4.6. -

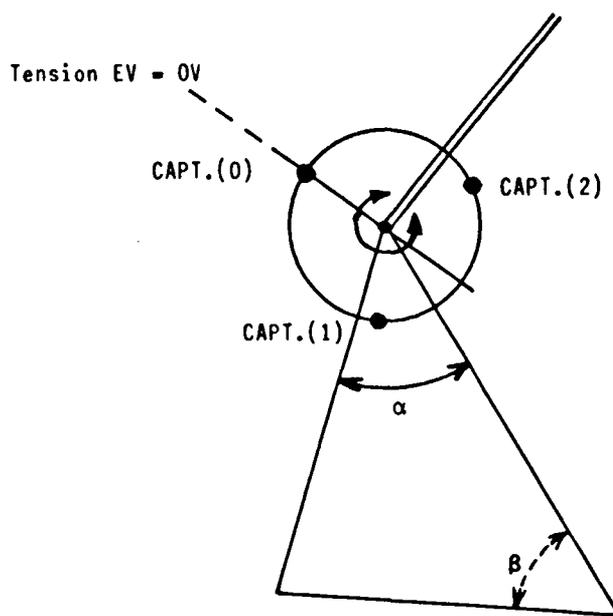
Lorsque le capteur (0) atteint le sommet (fig. 4.6.), l'extension du bras permet le déplacement "d", ainsi l'axe de rotation horizontal du poignet coïncide avec le sommet (fig. 4.7.).



- Figure 4.7. -



Une rotation horizontale du poignet jusqu'en butée (tension sur l'électrovalve = 0V) positionne le capteur (0) en dehors de l'angle à mesurer (fig. 4.8). Ensuite une rotation continue du poignet, dans le sens opposé sur l'angle du sommet, permet à l'aide du capteur (0) de mesurer la valeur de l'angle ( $\alpha$ ) : paramètre caractéristique de la pièce.



- Figure 4.8 -

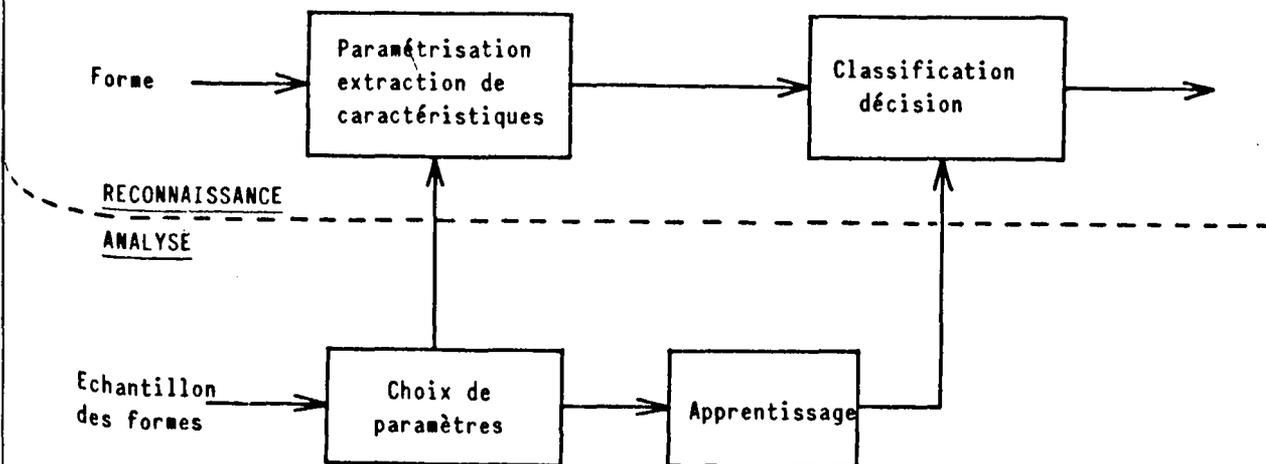
Cette définition angulaire du paramètre permet de différencier des pièces de formes simples entre-elles. Dans des situations plus complexes, la mesure d'un deuxième angle peut être nécessaire. Dans ce cas, un balayage de la pièce vers le sommet le plus éloigné de l'axe de rotation du bras du robot permet, par exemple, la mesure de l'angle  $\beta$ . La procédure de reconnaissance reste la même.

Les paramètres caractéristiques des différents objets sont préalablement mis en mémoire. Le paramètre mesuré par les capteurs pendant la phase de reconnaissance est ensuite comparé aux paramètres mémorisés. L'objet avant l'opération de saisie est ainsi reconnu.

Une généralisation de la méthode sur l'exemple qui vient d'être développé peut se résumer ainsi :

La reconnaissance automatique se décompose en trois phases, la paramétrisation, l'apprentissage et la classification (reconnaissance, décision).

- La paramétrisation consiste à choisir un faible nombre de paramètres jugés pertinents pour les formes.
- L'apprentissage est la phase de modélisation des classes des formes.
- La classification est essentiellement un problème de reconnaissance qui consiste à mesurer une "distance" entre la forme à classifier et les modèles des classes (fig. 4.9.).



- Figure 4.9. -

Les diagrammes suivants décrivent l'évolution des opérations permettant la mesure d'un angle : paramètre caractéristique de la pièce à reconnaître.

- diagramme figure 4.11. :

Description de la procédure de balayage sur la pièce, avec positionnement de l'axe de rotation horizontal du poignet sur le sommet de l'angle à mesurer.

\* 3 cas sont envisagés, détection initiale à partir du :

capteur (0) : fig. 4.12.

capteur (1) : fig. 4.13.

capteur (2) : fig. 4.14.

- diagramme figure 4.15. :

Mesure de l'angle proprement dit.

\* angle  $\alpha$  le plus rapproché de l'axe de rotation gauche/droite du bras par rotation du poignet.

. REMARQUES :

Capt. (0) = 1 : le capteur (0) détecte la présence d'un objet

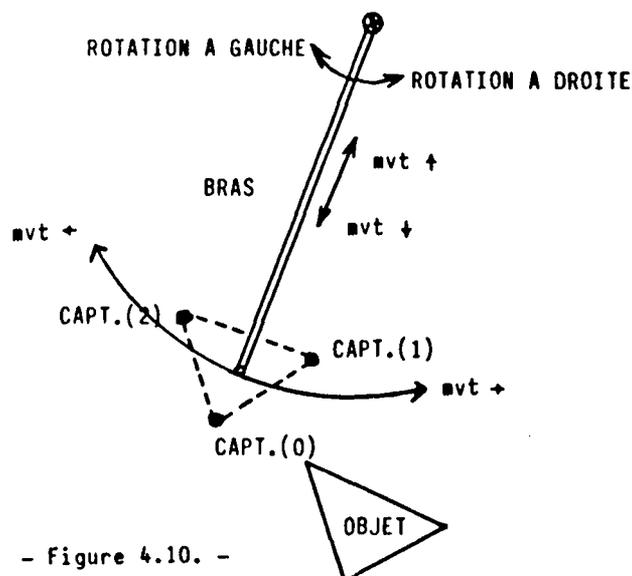
mvt  $\uparrow$  : le bras se rétracte.

mvt  $\downarrow$  : extension du bras.

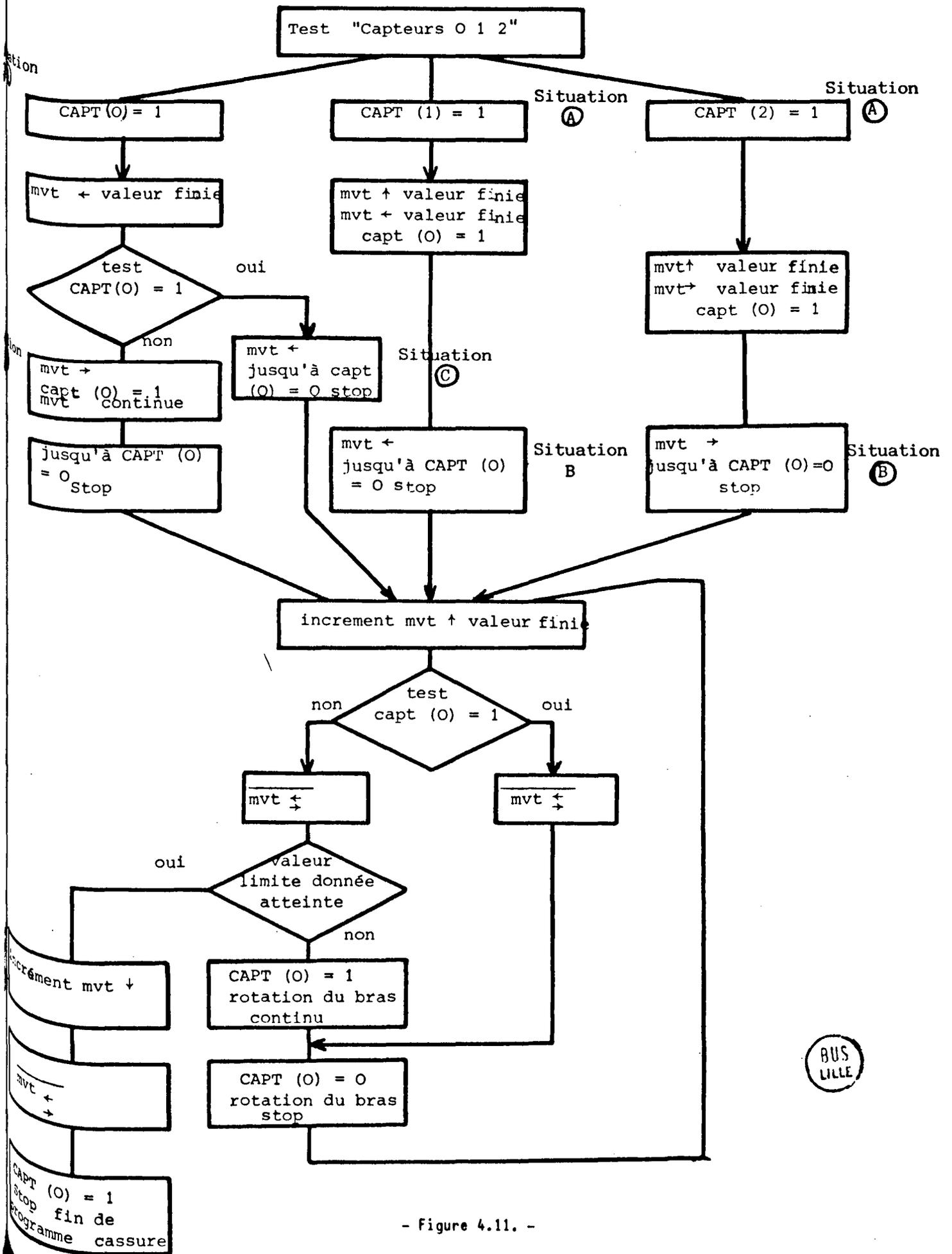
mvt  $\rightarrow$  : rotation à droite du bras.

mvt  $\leftarrow$  : rotation à gauche du bras.

mvt  $\pm$  : rotation gauche ou droite, inversée par rapport au mouvement précédent.

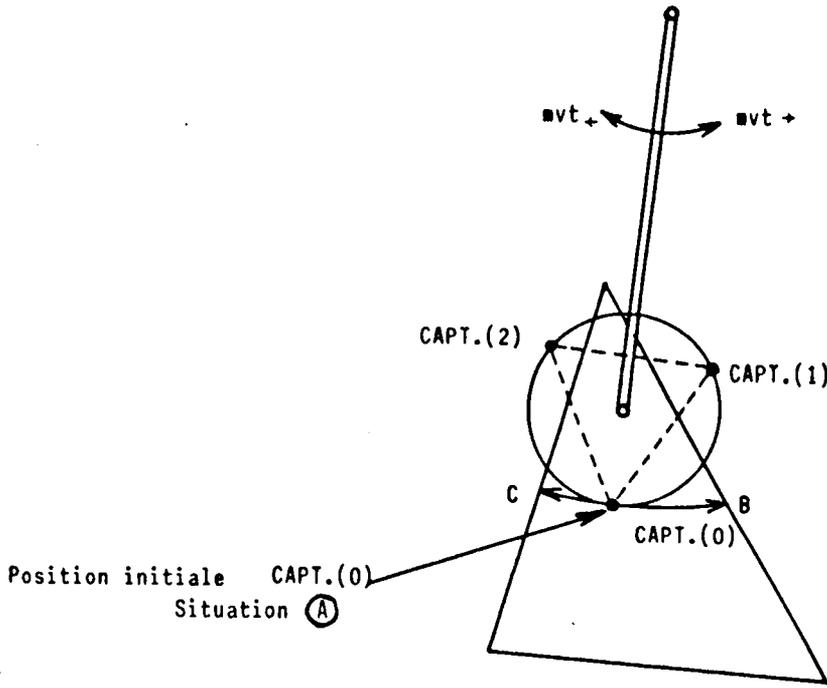


- Figure 4.10. -

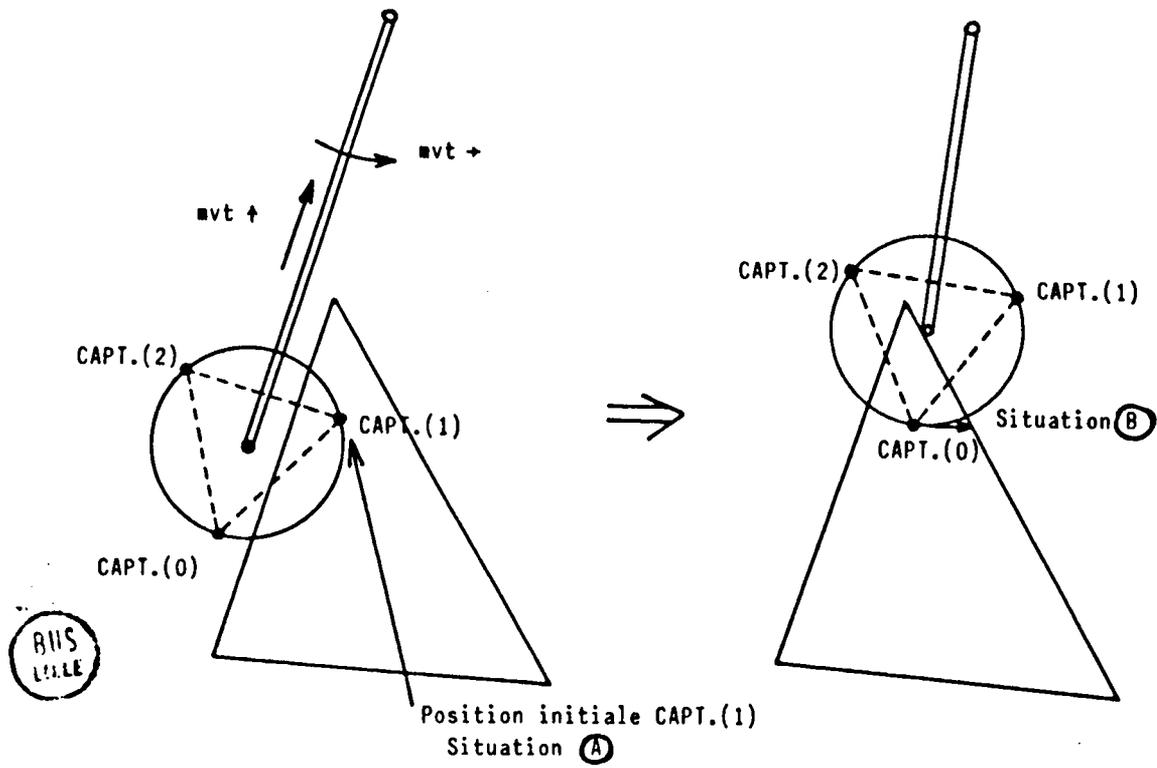


BUS LILLE

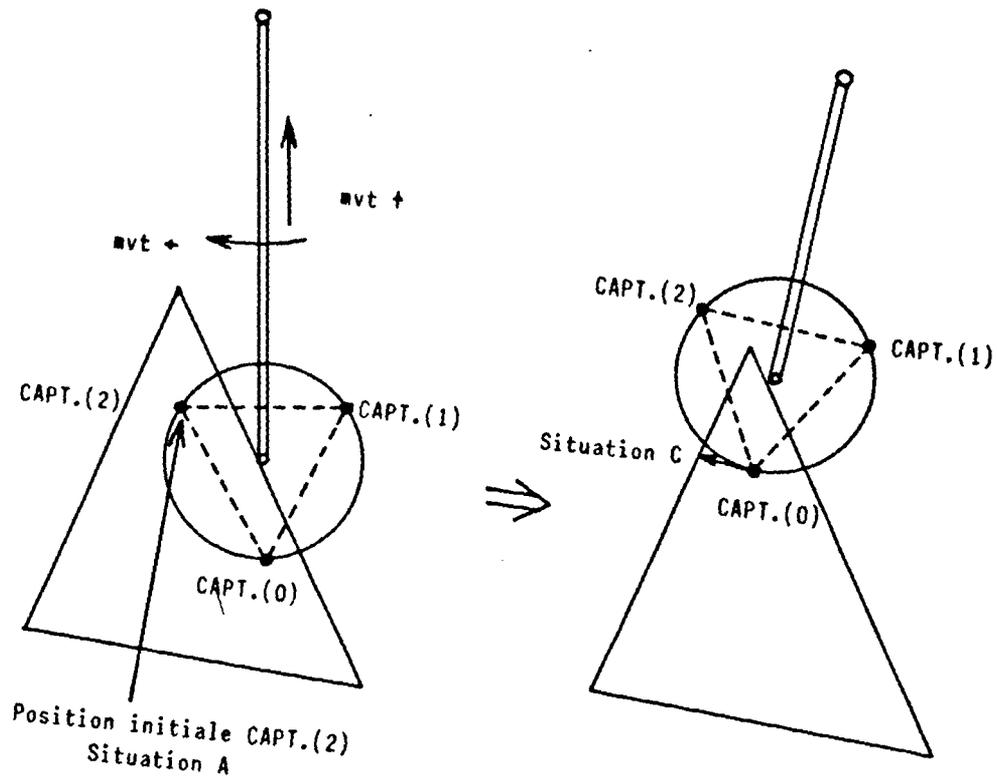
- Figure 4.11. -



- Figure 4.12. -

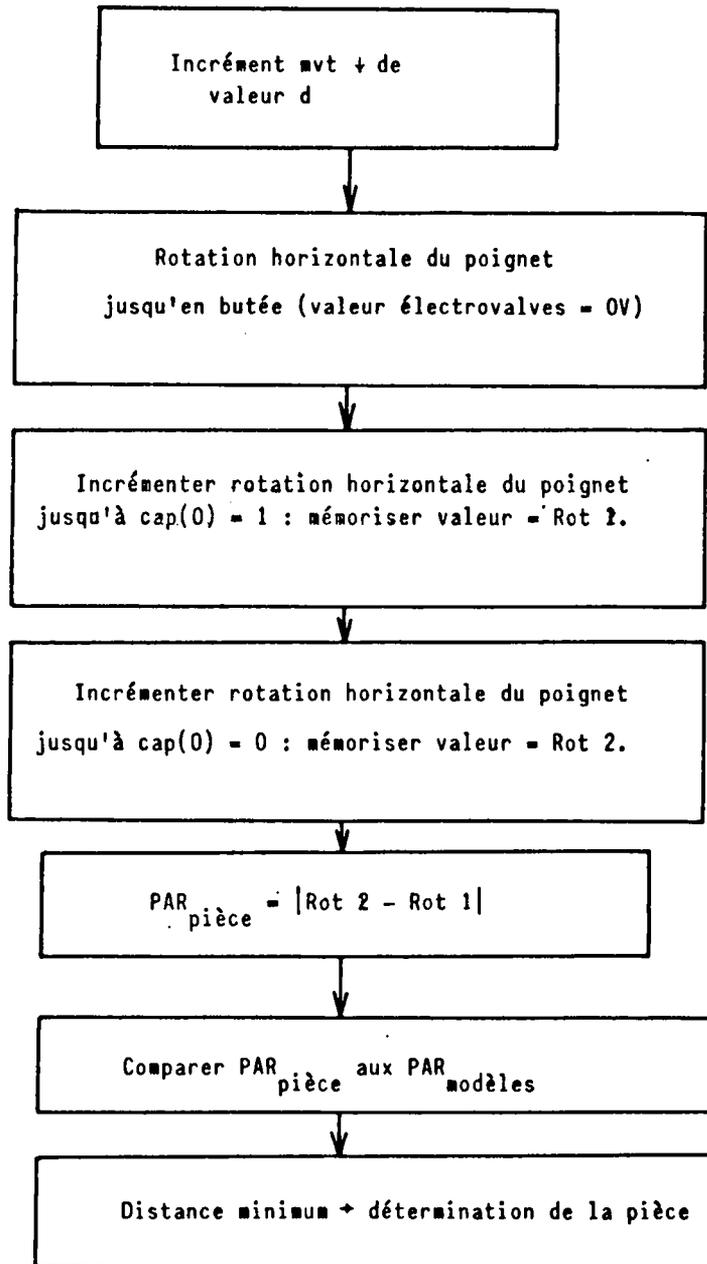


- Figure 4.13. -



- Figure 4.14. -





- Figure 4.15. - Phase de reconnaissance - décision.



#### 4.4. ESSAIS - RESULTATS

Les essais effectués sur le principe de reconnaissance décrit précédemment permettent de vérifier la validité de cette procédure et de quantifier les performances de la manipulation. .

Le tableau de la figure 4.16. présente les valeurs des paramètres caractéristiques mesurés par les capteurs infrarouges pendant la phase d'apprentissage.

L'objet dont on extrait les paramètres est de forme triangulaire avec les caractéristiques utiles suivantes :

angle A =  $30^\circ$  ; angle B =  $50^\circ$  ; angle C =  $100^\circ$ .

Par analogie à l'exemple précédent, nous avons conservé le triangle, mais lors d'essais avec d'autres pièces polyédriques, on obtient des résultats semblables.

Avant de commenter les valeurs mesurées par les capteurs, il est nécessaire de préciser les conditions opératoires.

La valeur du "pas"  $P_1$  (voir fig. 4.17.) imposée, après chaque déplacement latéral du bras pour atteindre le sommet point de cassure, influence le temps d'exécution de l'opération de balayage ainsi que la précision de détection du sommet. On constate sur la fig. 4.17. qu'il est nécessaire de revenir un ou plusieurs pas en arrière afin d'atteindre le sommet A avec précision (la valeur des pas de retour  $P_2$  dépend de la précision demandée).

Les mesures des paramètres (fig. 4.16.) ont été effectuées avec un pas de retour  $P_2$  identique à  $P_1 = 17,5$  mm.

Dans ces conditions l'erreur sur les angles mesurés peut atteindre près de  $9^\circ$  (exemple : angle A =  $38,75$ ) avec une durée de phase de reconnaissance de l'ordre de 6 secondes.

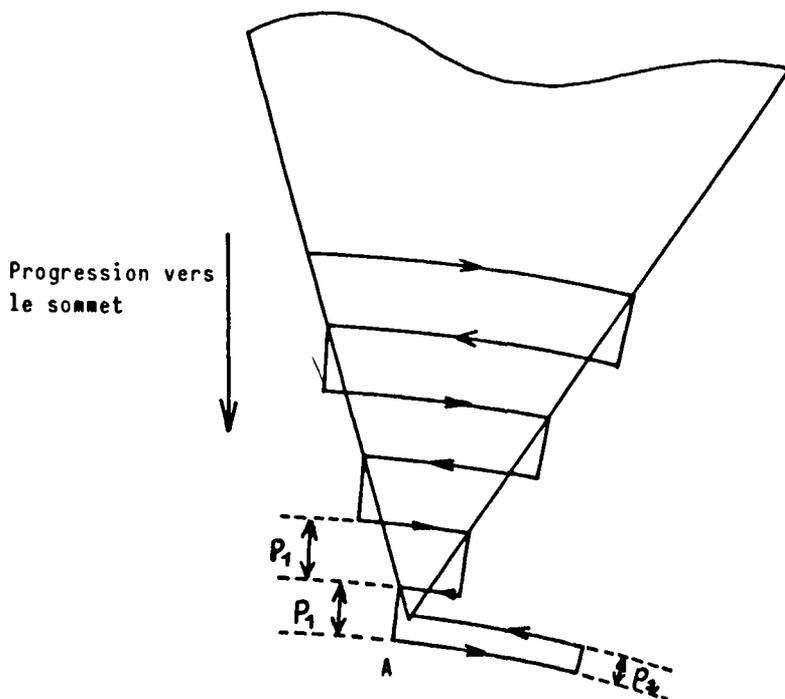
ANGLES	A	B	C
VALEURS EN DEGRES RELEVEES APRES 5 ESSAIS SUCCESSIFS	31,49	49,59	106,46
	30,86	51,62	103,24
	38,75	48,04	96,13
	25,88	49,23	101,68
	26,92	48,66	98,46

- Figure 4.16. - Valeurs mesurées sur chaque angle de la pièce.



La précision sur les mesures est améliorée pour un pas de retour  $P_2$  plus faible ( $P_2 = 8 \text{ mm}$  : erreur maxi =  $4^\circ$ ). Une discrimination des paramètres "angles"  $> 10^\circ$  et une fourchette sur la valeur des paramètres modèle =  $\pm 5^\circ$ , permettent dans tous les cas de reconnaître l'objet.

Afin d'améliorer les performances, on constate qu'il n'y a pas de solution idéale et qu'un compromis doit être fait entre la précision demandée et le temps alloué pour réaliser la reconnaissance de l'objet.



- Figure 4.17. -

. REMARQUES :

- Le temps consacré au balayage sur l'objet par la pince est fonction de la position initiale du capteur par rapport au moment du découplage.

- La vitesse de déplacement du bras sur l'objet est assez limitée à cause de la flexibilité du bras du robot et les résultats obtenus dans ces conditions limitent les performances de l'ensemble.

Ces essais néanmoins ont permis de vérifier qu'il était possible de reconnaître des pièces de formes simples à partir d'un faible nombre de capteurs infrarouges (du type détection, non détection) fig. 4.18. et donc d'un traitement rapide des informations.

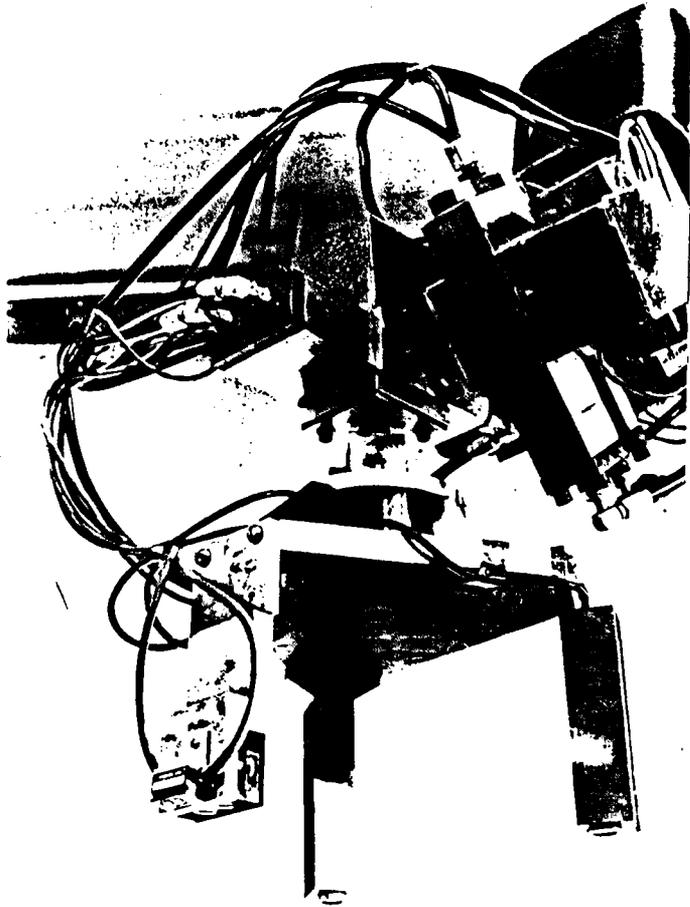
Naturellement l'utilisation d'un tel système de reconnaissance oblige le robot à se déplacer pour reconnaître la pièce et augmente nécessairement le temps d'exécution de cette procédure de reconnaissance.

Dans un environnement d'objets moins spécifiques, les capteurs de la pince pourront donc être utilisés plus particulièrement pour le positionnement correct de la pince sur l'objet à saisir, tandis que le choix des objets sera préalablement effectué par l'opérateur. C'est à partir de ces conclusions que seront définies les caractéristiques de la pince articulée en cours de développement au laboratoire et qui aura pour fonction essentielle la saisie d'objet de formes quelconques.

La réalisation pratique de l'ensemble de la manipulation proposée, avec participation de l'opérateur, a nécessité le développement d'un certain nombre de programmes :

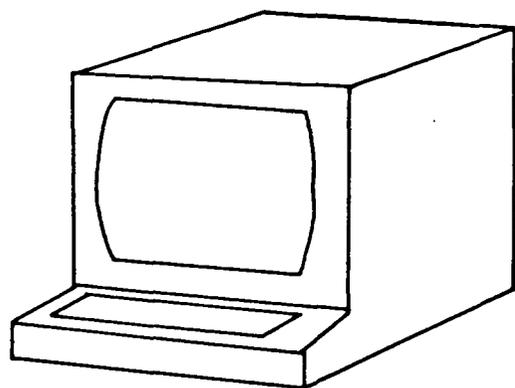
- lecture des positions des potentiomètres du robot et des organes de commande (console par exemple).
- initialisation des commandes actionneurs du robot
- passage sous le contrôle de l'opérateur des commandes en vitesse ou position.

( programme dialogue d'interaction homme-robot pour le cas de la commande en position /2/ ).

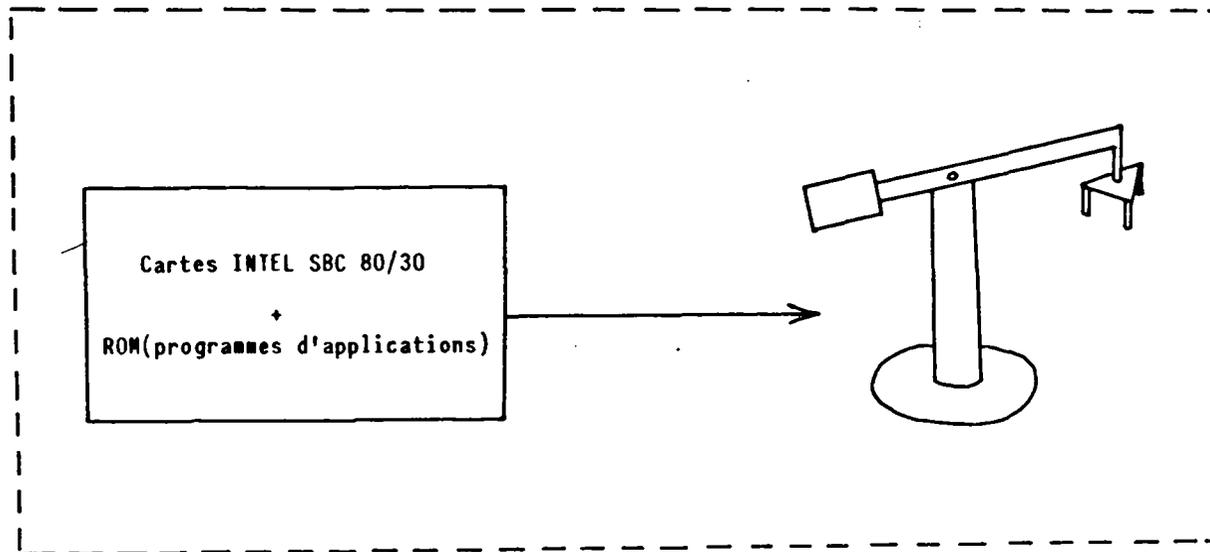


- Figure 4.18. -





Système de développement MDS 221



Système de commande décentralisé

ROBOT

- Figure 4.19. -



- découplage : passage du mode manuel au mode automatique
- évolution automatique à partir des informations capteurs
- phase de reconnaissance
- opération de centrage : saisie de l'objet /2/.

Les programmes de l'expérimentation en cours sont mis au point et exécutés par le système de développement MDS 221, mais il nous est apparu souhaitable en vue d'une utilisation plus rationnelle des équipements de faire exécuter les programmes opérationnels par un système décentralisé, composé de cartes d'applications à microprocesseur et mémoires intégrées (fig. 4.19.).

. CONCLUSION :

Les essais effectués dans le cadre de cette manipulation ont permis d'aborder et de clarifier les problèmes qui devront faire l'objet d'une recherche plus approfondie. La phase d'évolution automatique et de reconnaissance d'un objet décrites sur l'exemple précédent, bien que concluante, montre l'ampleur et la complexité des tâches à réaliser dans un cas plus général /5/.

L'importance que revêt la prise d'information des capteurs et leur espace d'influence sont déterminants pour éviter des mouvements incontrôlés du robot pendant son évolution. La seule utilisation des capteurs du type infrarouge (détection simple) est insuffisante lors de manipulation complexe et il est impératif de développer des capteurs capables de mesurer la distance par rapport à l'objet détecté quelque soit la nature de l'objet. L'utilisation de capteurs à ultrason et à jet d'air montés sur les doigts de la pince devrait apporter des solutions intéressantes dans ce domaine (projet de pince BERTIN).

- B I B L I O G R A P H I E -

-----

/1/ P. COIFFET

"Les robots - Interaction avec l'environnement"  
Tome 2, chapitre 5, juin 1981.

/2/ A. HABCHI

"Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain"  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Université des Sciences et Techniques de  
Lille 1 - mai 1981.

/3/ J.C. LATOMBE, A. LUX

"Intelligence artificielle et robotique industrielle"  
Le Nouvel Automatismes, mai 1979 - pp. 37-44.

/4/ P. VILLERS

"Present industrial use of vision sensors for robot guidance"  
Automatic Inc, U.S.A.  
12th International Symposium on industrial robots - Paris, juin 1982.

/5/ G. BERGER, R. HAVAS, R. PRAJOUX

"Survey of the state of the art in robotics and artificial intelligence"  
MATRA ESPACE and LAAS Toulouse - Volume 1, août 1981.

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre des recherches entreprises par le laboratoire d'Automatique sur le thème de la liaison homme-machine.

Dès l'origine de cette recherche, après avoir analysé les besoins et les diverses orientations prises dans le domaine de la robotique, nous avons constaté qu'il serait intéressant d'intégrer les possibilités d'un opérateur humain dans la réalisation des tâches.

Cette idée ne va pas dans le sens de la plupart des études entreprises actuellement, consistant à automatiser au maximum les systèmes de production industrielle, mais nous pensons que la symbiose homme-robot développée dans le mode de conduite mixte est parfaitement justifiée dans de nombreux domaines où l'intervention humaine est encore nécessaire.

Nous avons, à ce titre, étudié deux modes de conduite de commande des manipulateurs avec supervision de l'homme : le mode semi-automatique et le mode mixte.

Les multiples problèmes posés ne nous ont pas permis de réaliser concrètement un système de commande en mode mixte. Nous avons, néanmoins, étudié la structure générale de cette commande et l'utilisation des critères mis au point par A. HABCHI permettra, ultérieurement, et ce au niveau du superviseur, de résoudre le dilemme homme-robot.

L'étude expérimentale nous a conduit à mettre en place les premiers modules de la structure de commande en mode mixte et d'analyser les possibilités de pilotage d'un robot à partir des informations capteurs, dans le cas d'une commande en mode semi-automatique.

C'est une première étape et nous pensons qu'il est utile de poursuivre ces travaux dans l'objectif d'une conduite spécifique en mode mixte. Cette voie permettra d'étendre les possibilités des robots, de simplifier les algorithmes de commande et d'atteindre de meilleurs performances temporelles.

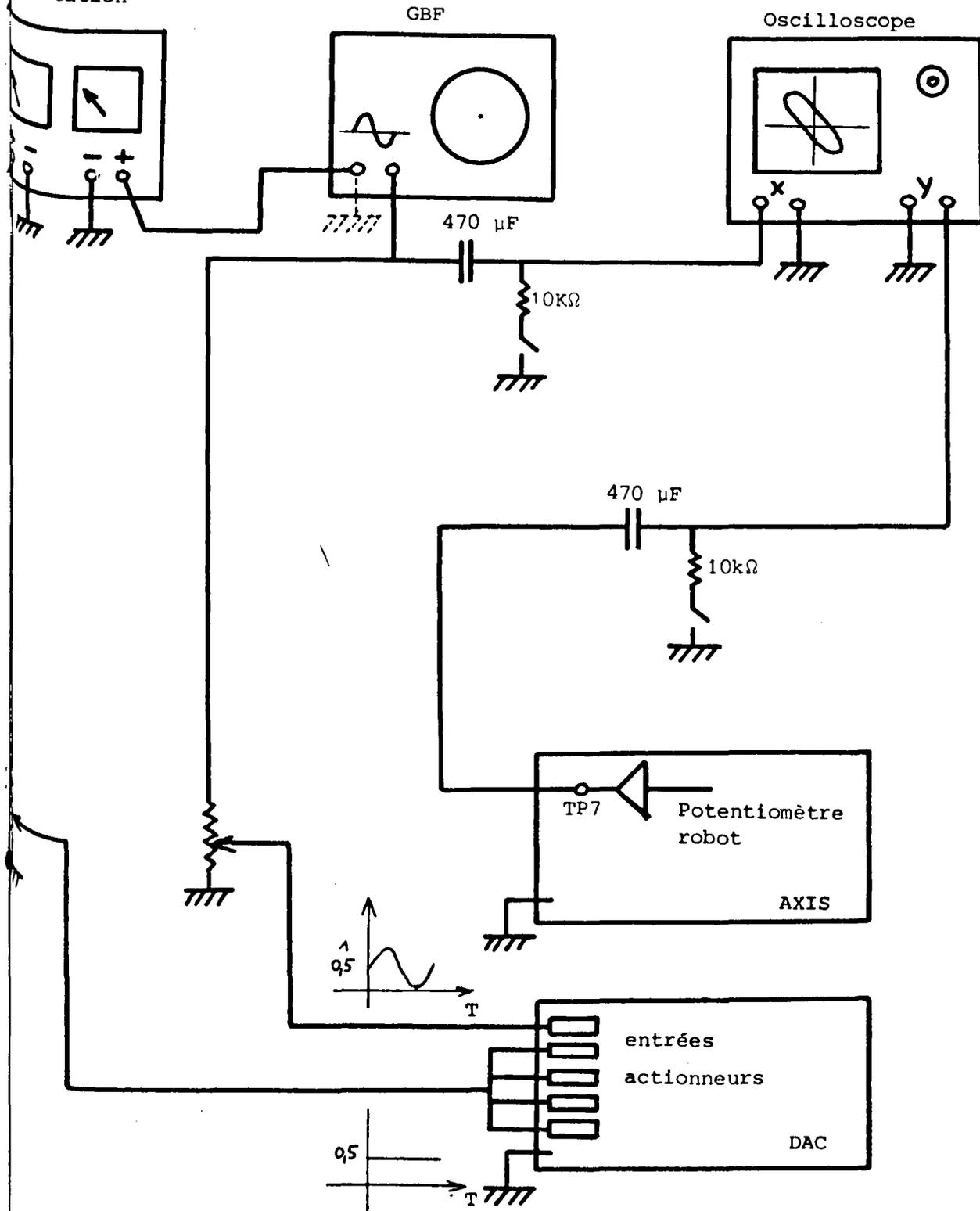
- ANNEXE I -

---

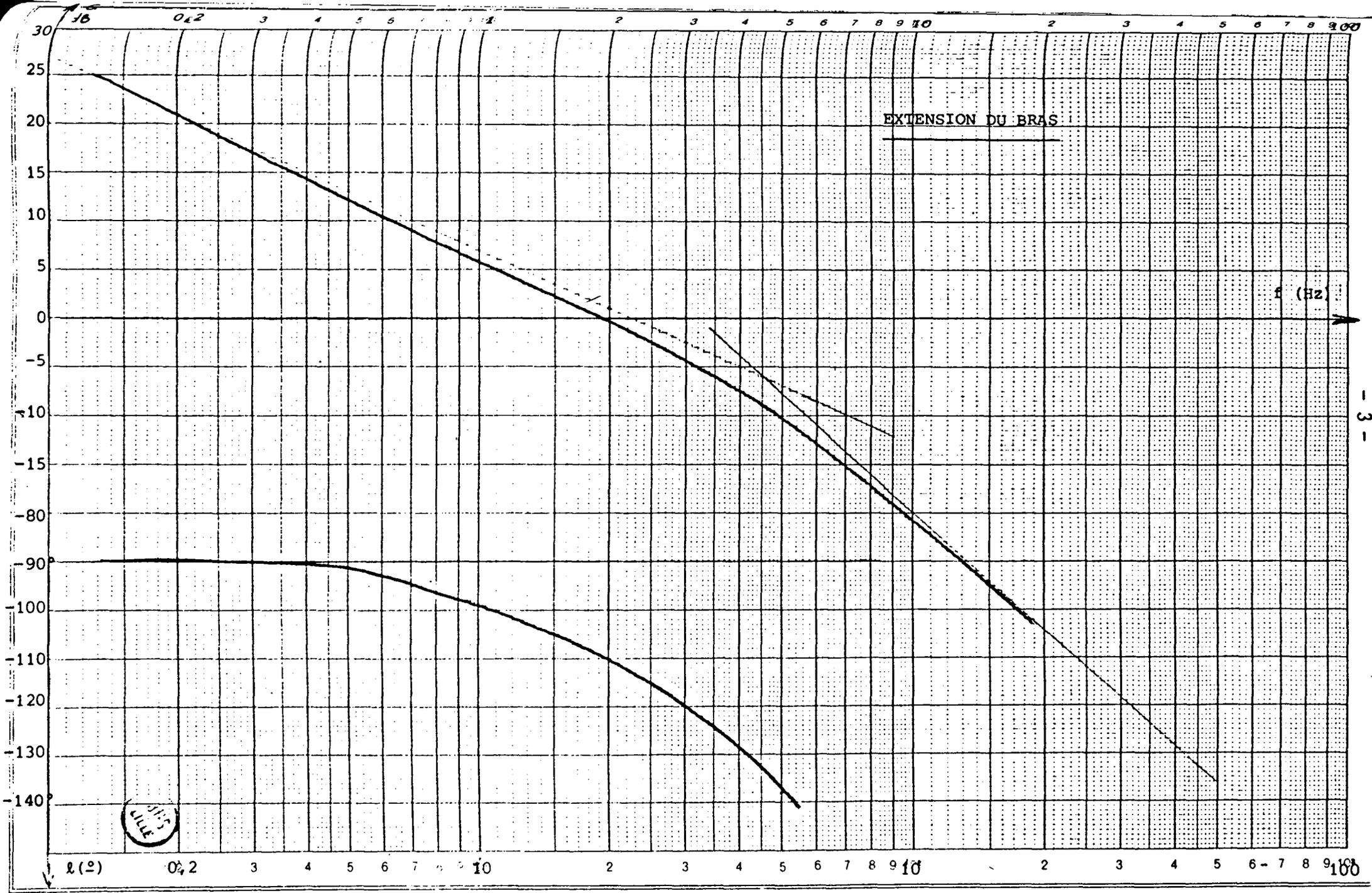
SCHEMA DE DETERMINATION DE LA TRANSMITTANCE

ISOCHRONONE D'UN DEGRE DE LIBERTE

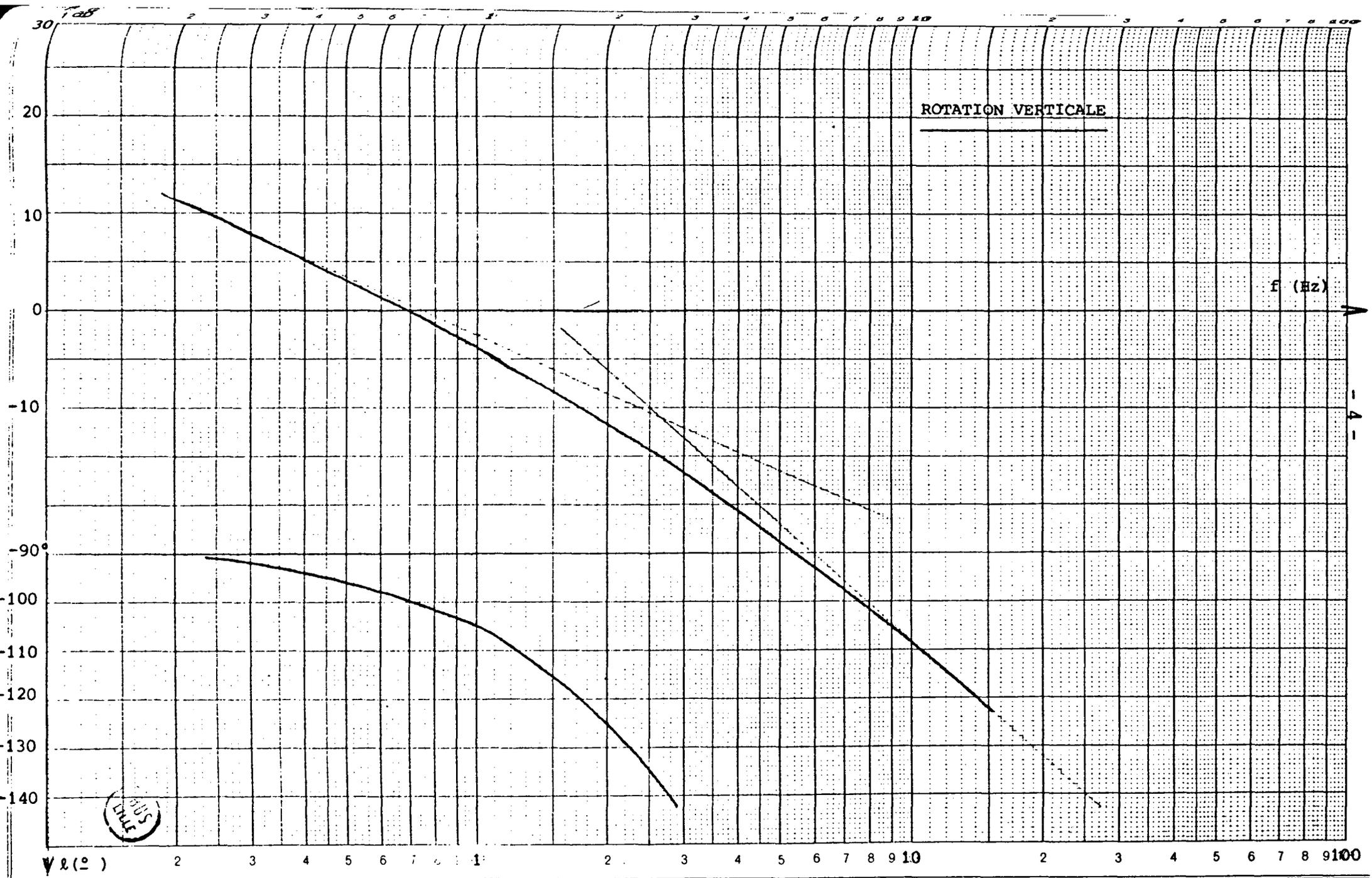
Alimentation =



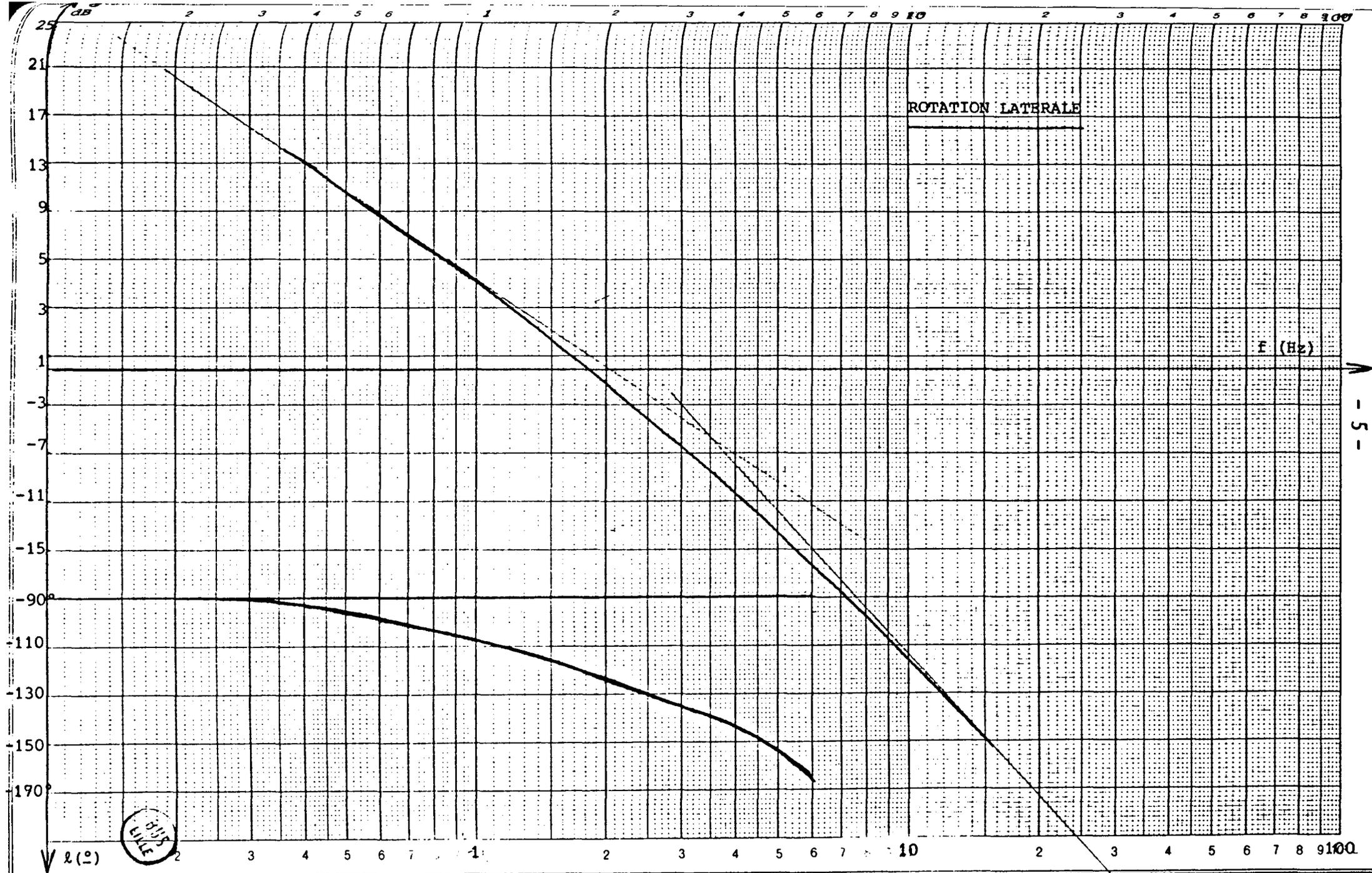
UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

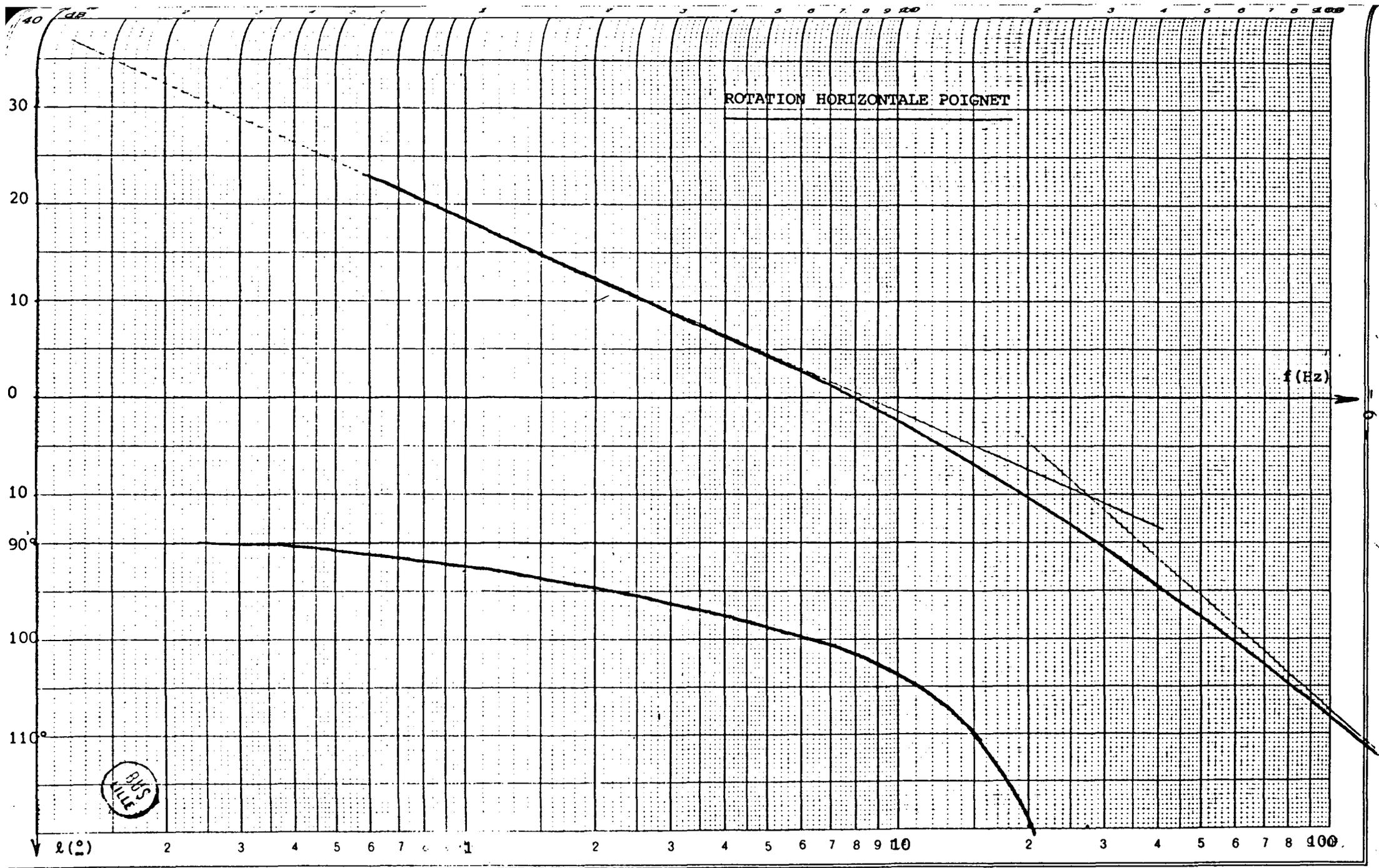


Logar. Teilung } 1 - 1000 Einheit } 90 mm  
 Division } Unité }

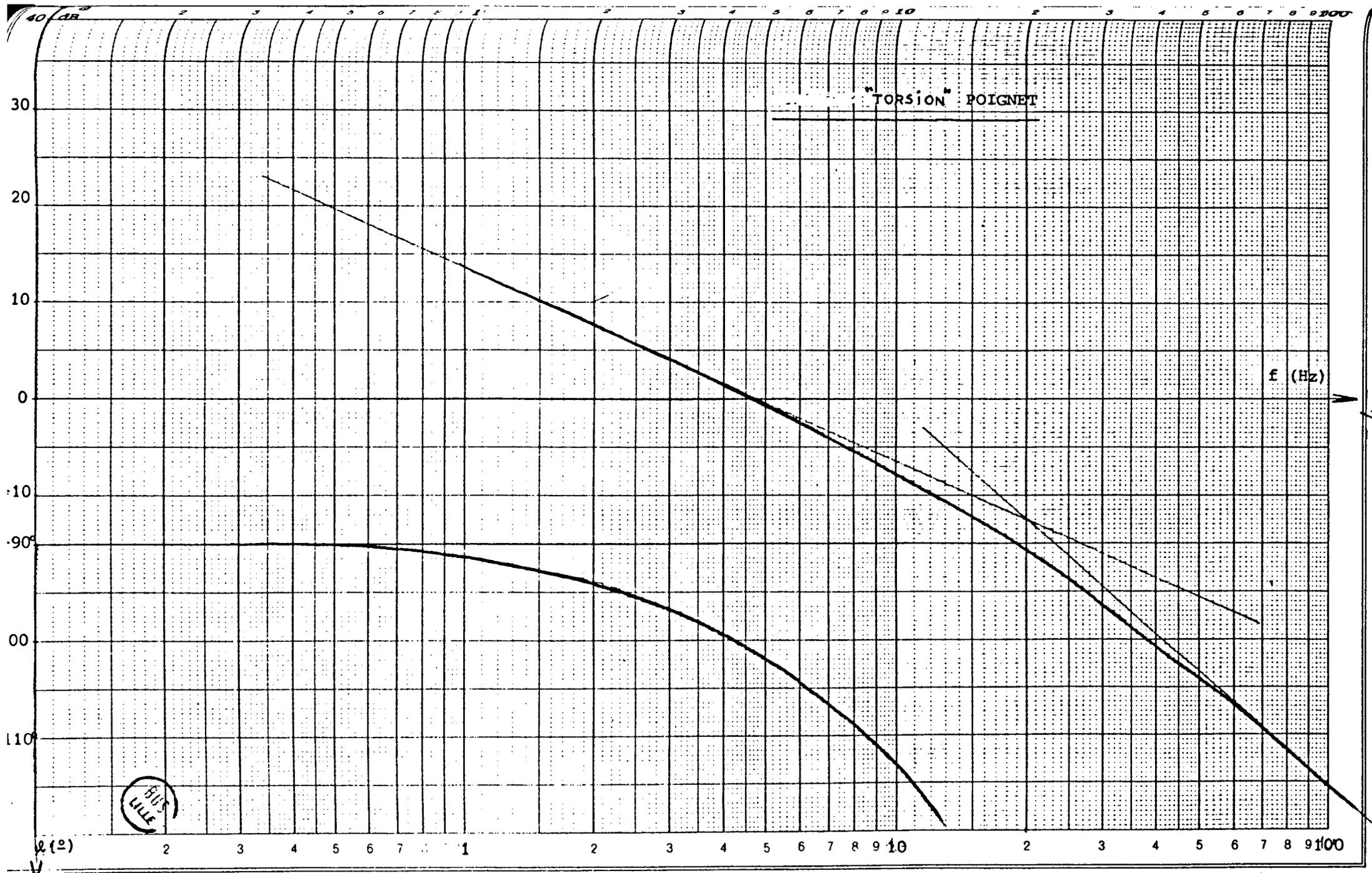


Logar. Teilung | 1 - 1000 Einheit | 90 mm  
 Division | Unité |

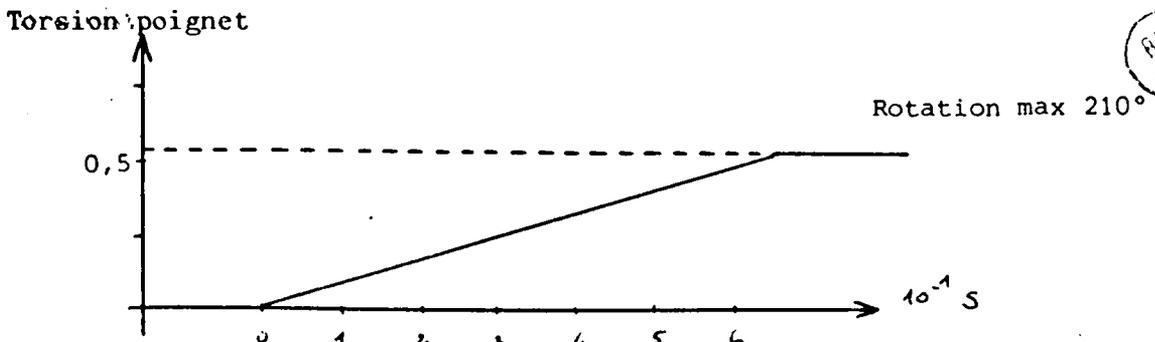
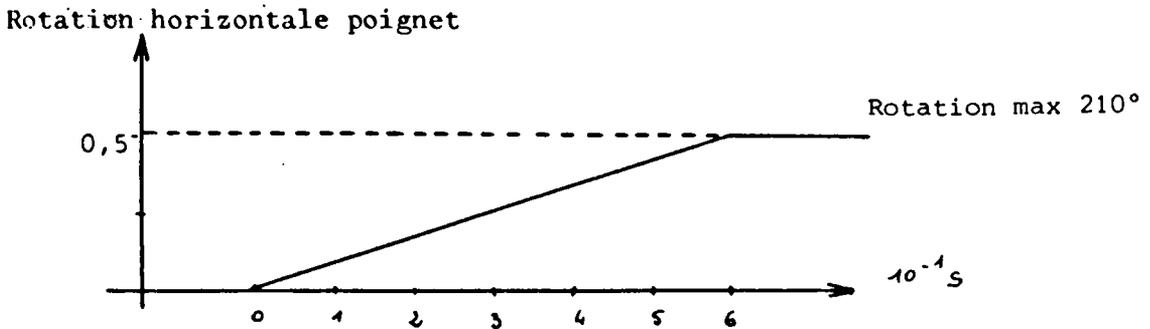
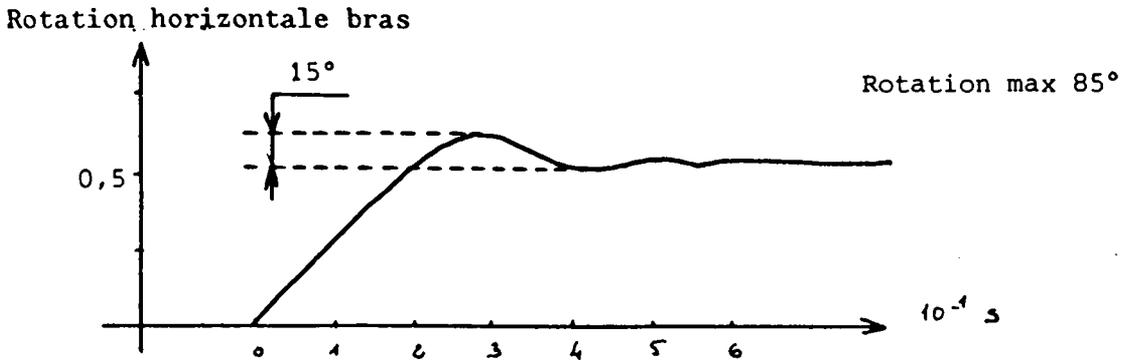
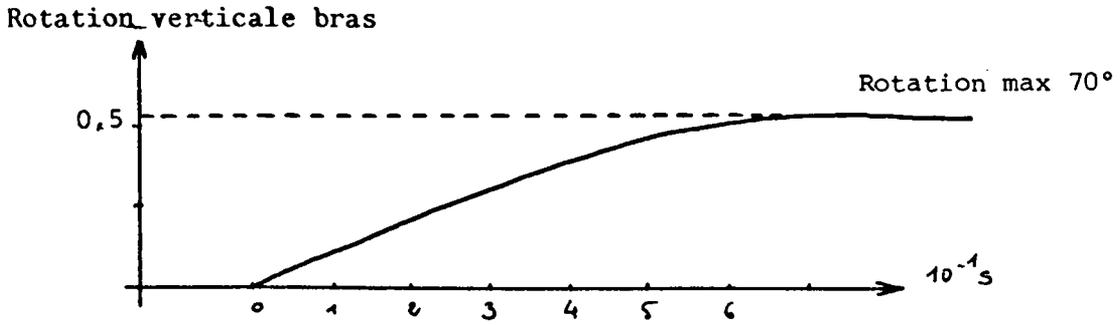
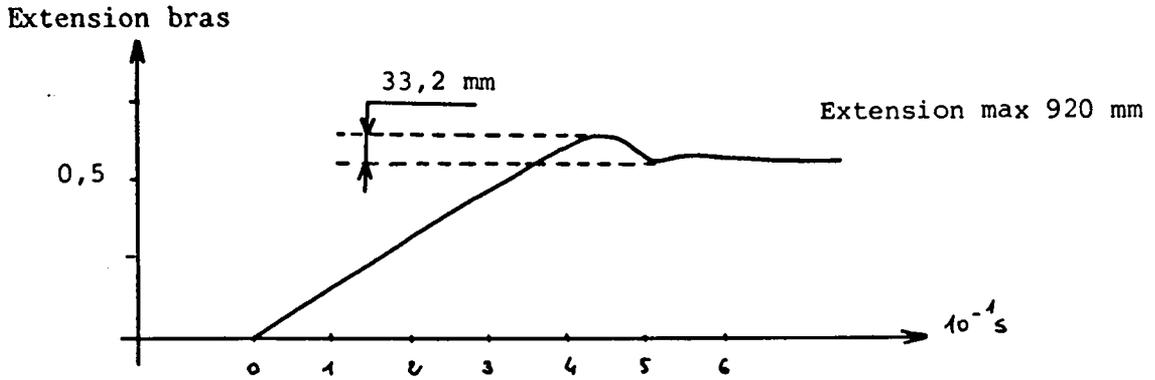
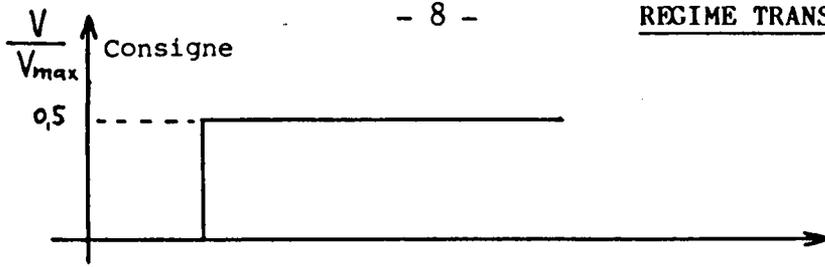




Logar. Teilung } 1 - 1000 Einheit } 90 mm  
 Division f } Unité }



Logar. Teilung } 1 - 1000 Einheit } 90 mm  
 Division } Unité }



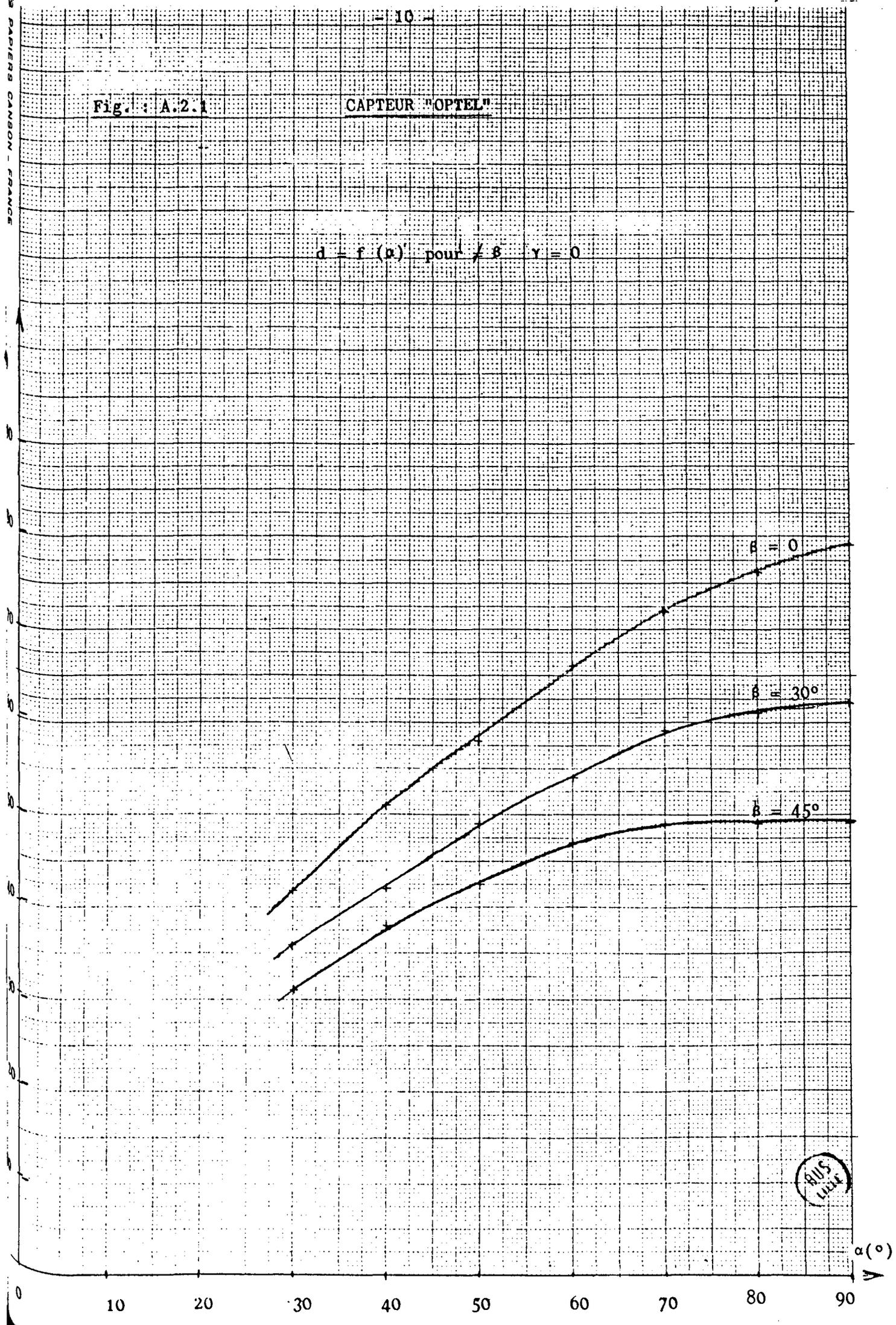
- ANNEXE II -

---

Fig. : A.2.1

CAPTEUR "OPTEL"

$d = f(\alpha)$  pour  $\beta = 0$   $\gamma = 0$



$\alpha$  (°)

Fig. : A.2.2.

CAPTEUR "OPTEL"

$d = f(\gamma)$  pour  $\alpha \neq 0$   $\beta = 0$

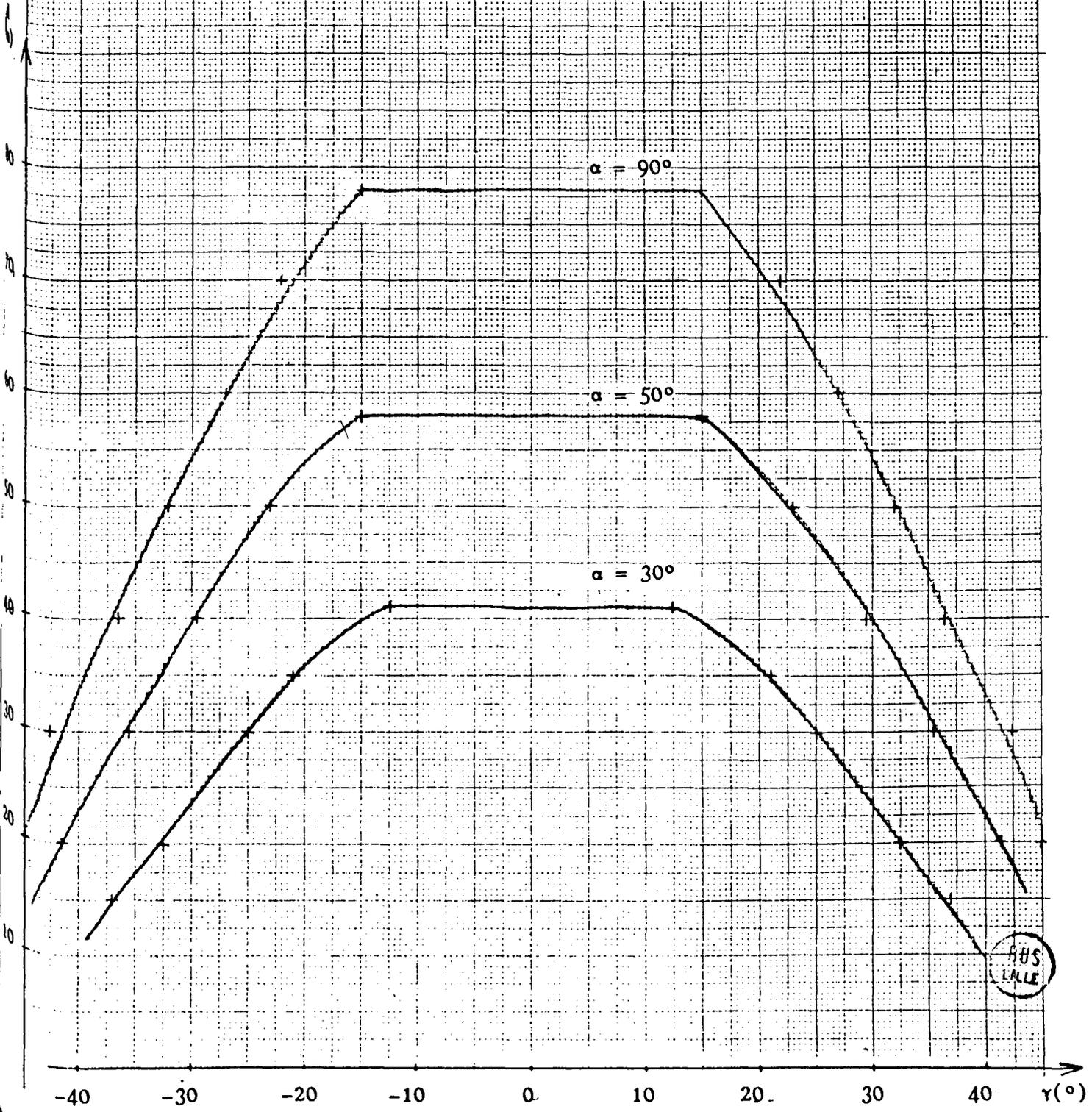
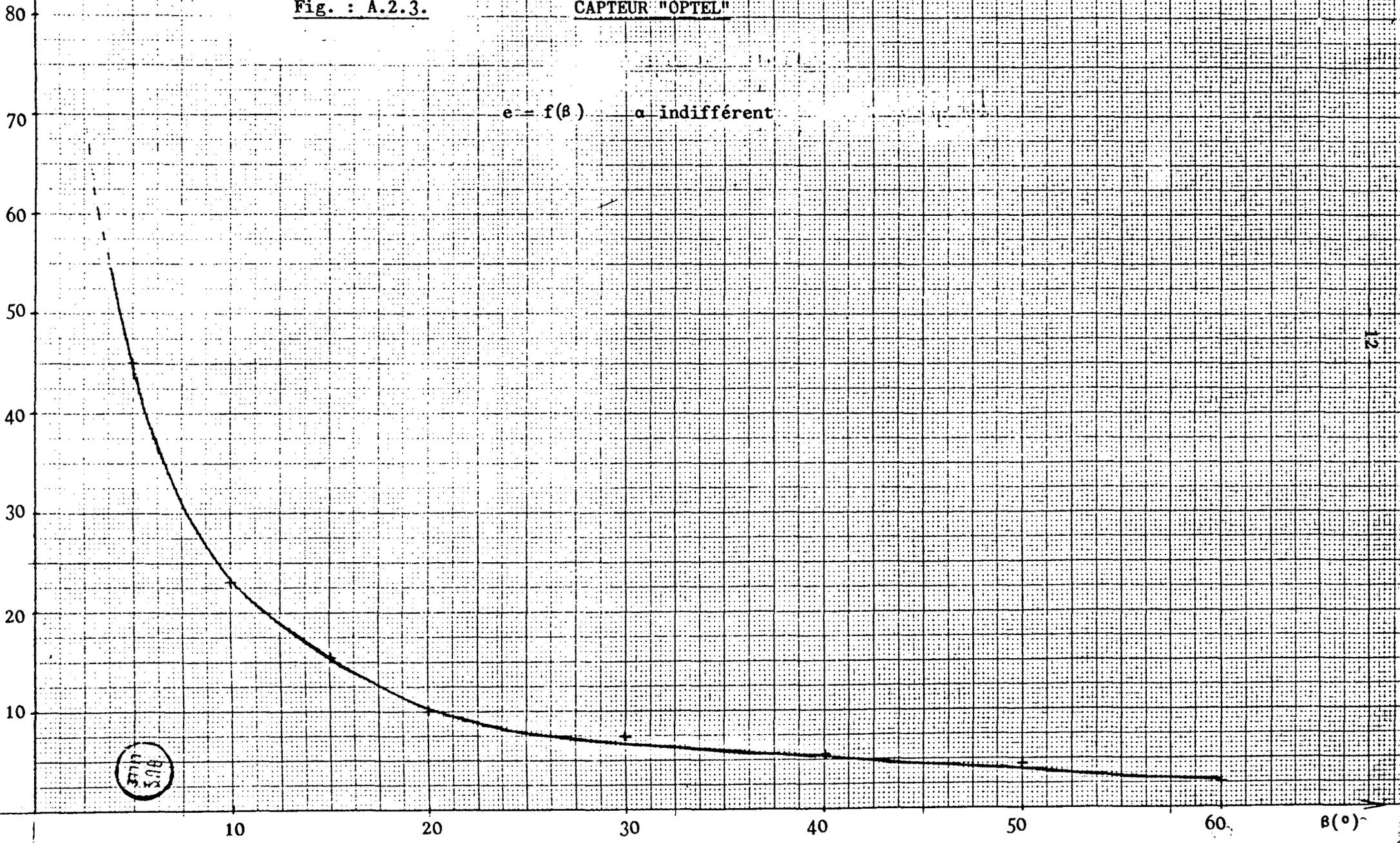


Fig. : A.2.3.

CAPTEUR "OPTEL"

$e = f(\beta)$   $\alpha$  indifférent



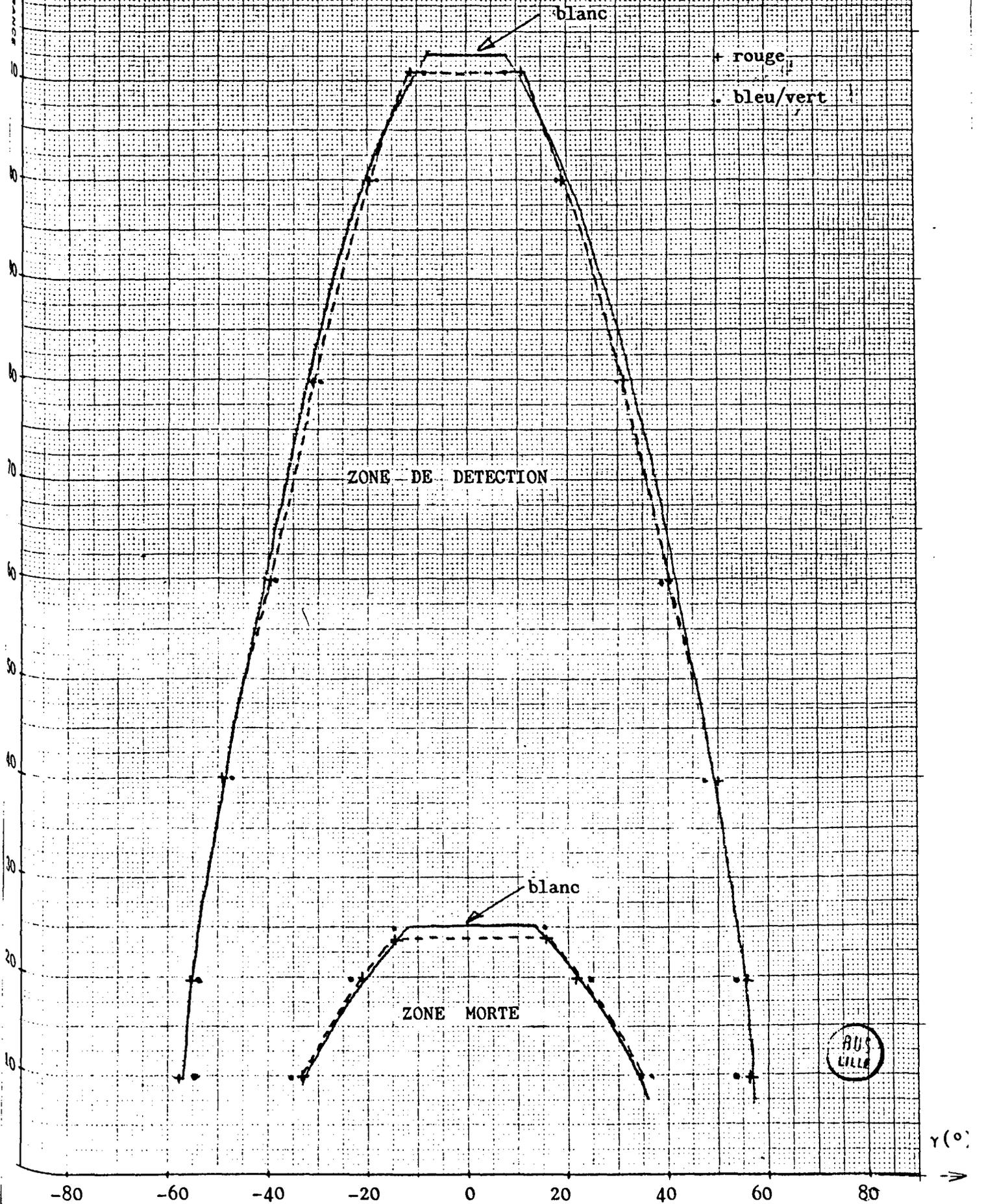
3711  
BUS  
508

12

Fig. : A.2.4.

CAPTEUR "VISOLUX"

$d = f(\gamma)$      $\alpha = 90^\circ$  pour / couleurs



- ANNEXE III -

. COMMENTAIRES SUR LES MESURES :

- La portée des capteurs infrarouges OPTTEL pour des conditions de détection idéales ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ) est de 78 mm (fig. A.2.1.). Dans un cas plus défavorable ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ )  $d = 31$  mm.

- On remarque également sur la figure A.2.2. qu'une variation de l'angle d'incidence (rotation d'un angle  $\gamma$  du capteur) n'entraîne pas une diminution de la distance de détection pour une valeur maximum  $\gamma = 15^\circ$  ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ). La portée du capteur reste acceptable pour des angles  $\gamma$  plus importants.

- La caractéristique  $e = f(\beta)$  : figure A.2.3. nous permet d'évaluer jusqu'à quelle distance  $e$  il est permis de déplacer latéralement le capteur sans perte d'information lorsque le réflecteur (objet) est incliné d'un certain angle  $\beta$ .

exemple pour  $\beta = 20^\circ$  :  $e = 10$  mm

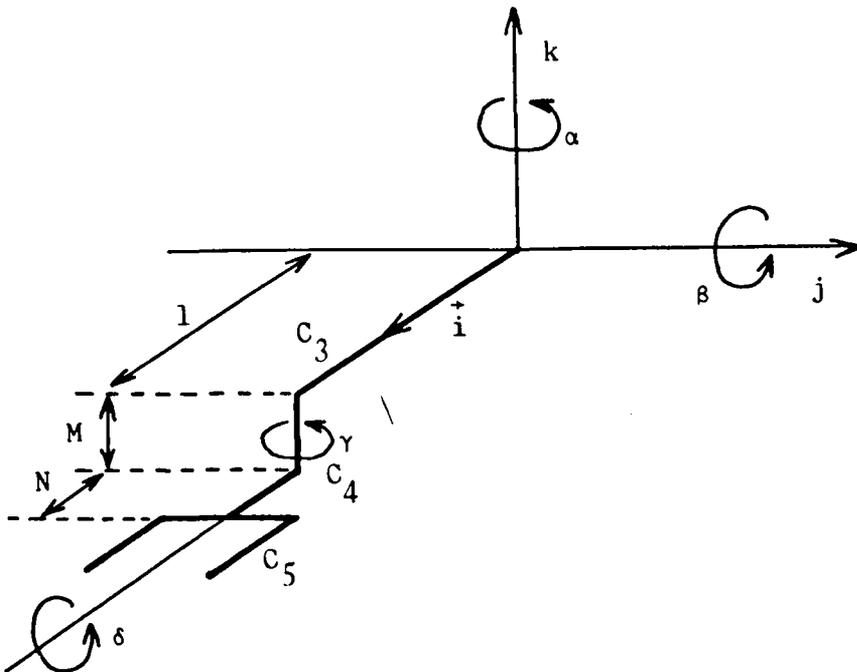
- Les caractéristiques du capteur VISOLUX (fig. A.2.4.) sont équivalentes au capteur OPTTEL avec une portée légèrement supérieure ( $d_{\max} = 110$  mm), mais pour des distances faibles ( $d < 25$  mm) il existe pour ce capteur une zone morte où la détection de l'objet ne se fait plus malgré sa présence. Le phénomène s'explique par la disposition mécanique de l'émetteur et du récepteur dans le boîtier du capteur. Il est important de tenir compte de cet inconvénient lors de l'utilisation de ce type de capteur pour commander le bras du robot.

D'après le relevé des courbes, les distances de détection restent suffisantes pour des angles d'incidence très variables, cela autorise une certaine souplesse dans les déplacements de la pince sur l'objet sans perte d'information des capteurs.

Les essais effectués avec différentes couleurs du réflecteur (rouge, bleu, vert) n'apportent pas de différence sensible au niveau de la distance de détection (figure A.2.4.), seules les couleurs sombres (noir par exemple) ne sont pas détectées par le capteur.

Les valeurs des coordonnées généralisées utilisées dans notre exposé sont calculés à partir de positions de référence définies arbitrairement, mais choisies de façon judicieuse. Sur le site ces références sont liées à la position mécanique de chaque capteur du robot. Pour cela nous devons faire une correspondance entre les valeurs mesurées sur les capteurs et les valeurs des coordonnées opérationnelles utilisées précédemment.

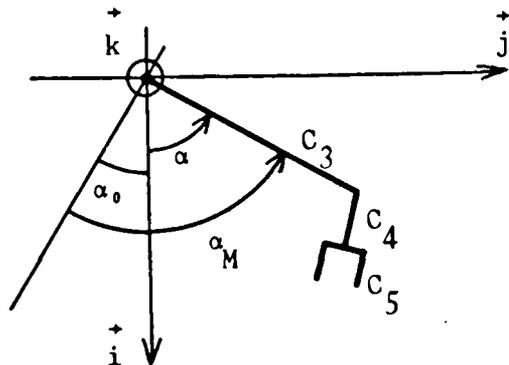
Les nouveaux paramètres utilisés (paramètres "site" mesurés par les capteurs :  $\alpha_M, \beta_M, \dots$  etc) sont introduits comme suit :



$$\begin{aligned} A &= \sin \alpha \\ B &= \sin \beta \\ C &= \sin \gamma \\ D &= \sin \delta \end{aligned}$$

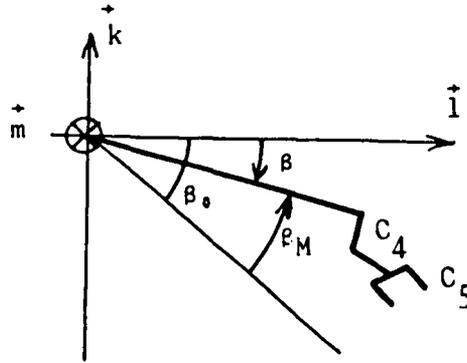
$$\begin{aligned} M &= 12 \text{ cm} \\ N &= 15 \text{ cm} \\ l &= l_0 + l_M \\ l_0 &= 103 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * \alpha &= \alpha_M - \alpha_0 \\ \text{avec } \alpha_0 &= 39^\circ, 13 \end{aligned}$$



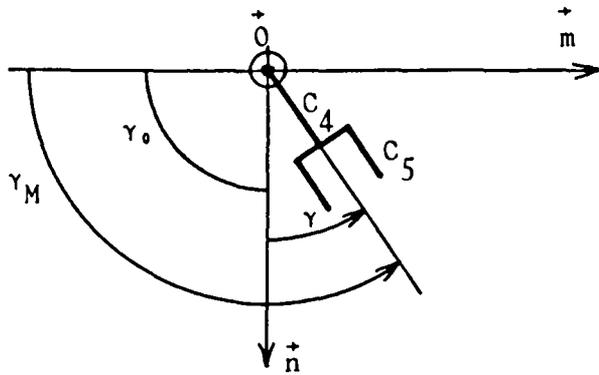
\*  $\beta = \beta_0 - \beta_M$

$\beta_0 = 45^{\circ},85$



\*  $\gamma = \gamma_M - \gamma_0$

$\gamma_0 = 30^{\circ}$



\*  $\delta = \delta_M$

