

50376  
1987  
97

50376  
1987  
97

# THESE

N° d'ordre 122

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le titre de

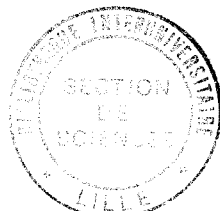
**DOCTEUR**

Spécialité : Automatique

par

**Mohamed Koni BEN GAYED**

Maître ès-Sciences & DESS



## **CONTROLE-COMMANDE-SECURITE D'UN MICROTELEMANIPULATEUR A USAGE CHIRURGICAL**

Soutenue le 15 Juin 1987 devant la Commission d'Examen

Messieurs:

P. VIDAL  
J.C. HACHE  
N. MALVACHE  
L. POVY  
C. MARREAUD

Président et Rapporteur  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur

## AVANT - PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire est le résultat d'une collaboration suivie entre le centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois et le Centre Hospitalier Régional de Lille.

Avant d'exposer cette étude, je tiens à exprimer ma profonde gratitude 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.

Monsieur le Professeur Jean Claude HACHE, Directeur du service d'exploration de la vision du C.H.R. de Lille est rapporteur de cette thèse. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma reconnaissance pour les conseils prodigués tout au long de l'étude.

Je remercie Monsieur le Professeur Noël MALVACHE, Président de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrasis d'avoir accepté d'être rapporteur de ces travaux et pour sa présence parmi les membres du jury.

Que Monsieur Lucien POVY, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois soit remercié d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie Monsieur Christian MARREAUD, Directeur du Département de Recherche et Nouveaux Développements de la Société SANTERNE à ARRAS, pour son soutien à ce projet et pour les nombreuses discussions que nous avons eues avec lui personnellement et avec ses services.

De même, je remercie Monsieur FRULEUX, ingénieur chez SANTERNE, pour les discussions utiles que nous avons eues ensemble et pour sa sympathie.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Bernard LEPERS, Chercheur au Centre pour les longues discussions que nous avons eues ensemble et l'aide qu'il m'a apportée.

Que Monsieur Saïd HAYAT, Chercheur au Centre d'Automatique soit remercié pour son aide.

Mes remerciements s'adressent enfin au personnel et collègues chercheurs qui m'ont accueilli et de près ou de loin m'ont soutenu tout au long de ce travail, notamment à Mesdames Pignon, Aïcha, Anne et à Messieurs He Bing, Daniel, Philippe, Ceurstemont, Pollard et Houzé, qui ont su créer une ambiance agréable.

*A MES PARENTS*

*A LYDIE*



## PLAN GENERAL

### INTRODUCTION GENERALE

=====

#### CHAPITRE I

##### ETUDE ET SYNTHESE SUR LES MODES DE COMMUNICATION HOMME/MACHINE ET PRESENTATION DU MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL

I- <u>INTRODUCTION</u>	..... p.I.1
II- <u>RAPPELS:ROBOT-TELEMANIPULATEUR</u>	..... p.I.3
III- <u>MODES DE CONDUITE DES ROBOTS-TELEMANIPULATEURS</u>	.....p.I.5
IV- <u>CONCEPT DE LA TELEOPERATION AVANCEE</u>	.....,..... p.I.10
V- <u>PRESENTATION DU MICROTELEMANIPULATEUR</u>	.....p.I.12
VI- <u>PERSPECTIVES D'APPLICATIONS</u>	.....p.I.18
VII- <u>CONCLUSION</u>	.....p.I.21

=====

#### CHAPITRE II

##### COMMANDE DU PROTOTYPE "MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL"

I- <u>INTRODUCTION</u>	..... p.II.1
II- <u>INTERFACE DE COMMANDE</u>	.....p.II.3



* <u>CAHIER DES CHARGES</u> .....	p.II.3
* <u>COMMANDE EN VITESSE (P----&gt;V)</u> .....	p.II.12
* <u>COMMANDE EN POSITION (P----&gt;P)</u> .....	p.II.20
III- <u>CONCLUSION</u> .....	p.II.35

=====

### CHAPITRE III

#### ETUDE EXPERIMENTALE DE CARACTERISATION DU MICROTELEMANIPULATEUR EN VUE DE LA DEFINITION D'UNE NOUVELLE STRUCTURE DE COMMANDE POUR LE PROTOTYPE PRE- INDUSTRIEL

I- <u>INTRODUCTION</u> .....	p.III.1
II- <u>COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR A L'AIDE DU BRAS MAITRE MA23</u> .....	p.III.2
III- <u>COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR PAR LA PAROLE</u> .....	p.III.11
IV - <u>ELABORATION DE LA STRUCTURE FINALE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE</u> .....	p.III.19
V- <u>CONCLUSION</u> .....	p.III.31

=====



## CHAPITRE IV

### UTILISATION DES PROXIMETRES OPTO-ELECTRONIQUES POUR L'ELABORATION D'UN MODULE DE CONTROLE/SECURITE ET D'AIDE A LA MICROTELEMANIPULATION

I- <u>POSITION DU PROBLEME</u>	.....p.IV.1
II- <u>ROLE DES PROXIMETRES</u>	.....p.IV.2
III- <u>FONCTIONS DE BASE ET ALGORITHMES CORRESPONDANTS</u>	.....p.IV.15
IV- <u>DISPOSITIF EXPERIMENTAL</u>	.....p.IV.22
V- <u>CONCLUSION</u>	.....p.IV.32

=====

<u>CONCLUSION GENERALE</u>	.....p.V.1
----------------------------	------------

=====

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	.....p.VI.1
----------------------	-------------

=====

<u>ANNEXES</u>	.....p.VII.1
----------------	--------------



## INTRODUCTION GENERALE

Le thème englobant ces recherches entre dans le cadre de la téléopération qui est un sous-ensemble de la robotique. Elle concerne l'étude des télésystèmes et leur adaptativité aux perturbations du milieu qui est généralement méconnu. L'objectif visé est d'obtenir une exploitation optimale des ressources de l'Homme et de la machine d'une part, et d'accroître la capacité du système à devenir plus adaptatif à son environnement afin d'être plus efficace dans la réalisation de certaines tâches qui ne peuvent être complètement décrites à l'avance.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet "microtélém manipulateur chirurgical" entrepris conjointement par le centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois et les laboratoires d'ophtalmologie et d'exploration du champ visuel du Centre Régional Hospitalier de Lille.

Ce microtélém manipulateur est destiné à assister le chirurgien dans l'exécution des tâches nécessitant une très grande précision et demandant une certaine dextérité de l'intervenant. Les domaines d'applications envisagés sont nombreux: la vitrectomie oculaire, la kératotomie radiaire, la stéréotaxie (implantation d'électrodes radioactives dans le crane),... et même des applications non médicales tel que la fabrication des circuits électroniques ou la télémanipulation des cellules biologiques.

Les travaux décrits dans cette thèse portent sur la commande de ce prototype de microtélém manipulateur chirurgical. L'effort est axé sur deux points:

1) La mise en oeuvre de la commande du système de microtélém manipulation: conception de l'aspect matériel et informatique; à ce stade il s'agit de rechercher parmi les moyens technologiques offerts, le système qui permet un pilotage souple et adapté aux gestes manuels habituels du chirurgien.

2) L'étude et la définition d'un dispositif de sécurité actif nécessaire pour le bon déroulement des opérations de télémanipulation où le patient est l'Homme. Ce dispositif est constitué d'un système de perception destiné à prélever les informations issues de l'environnement et d'unités d'analyse de ces informations.

Le premier chapitre de ce mémoire présente le contexte global du domaine de la téléopération et ses spécificités par rapport à la robotique classique notamment en ce qui concerne les modes de communication Homme/Machine.

Le deuxième volet de ce chapitre présente la partie opérative du prototype "microtélém manipulateur chirurgical" et précise son domaine d'application.



L'étude de la commande du microtélémanipulateur est ensuite développée dans le deuxième chapitre au cours duquel nous expliquons les raisons qui nous ont conduits à choisir la réalisation des deux types de commandes exposés (commande en vitesse et commande en position à l'aide d'un joystick).

Le troisième chapitre décrit des expériences de caractérisation de la commande du microtélémanipulateur présentée dans le chapitre précédent; ce qui nous a permis d'établir le cahier des charges de la nouvelle configuration matérielle de la commande du prototype pré-industriel et de préciser l'état d'avancement du projet.

Le dernier chapitre aborde l'étude d'un système de sécurité basé sur un module de perception proximétrique. Après avoir exposé le rôle de la perception locale et son application en ce qui nous concerne et avoir justifié le choix des proximètres à fibres optiques, nous effectuerons une étude algorithmique et expérimentale de détection d'obstacle, d'estimation de distance, et de suivi de trajectoires sous divers modes de conduite.

Dans ce mémoire, sont également abordés les problèmes liés à l'interaction Homme/Machine dans le contexte de la télémanipulation (présentation de l'information, dialogue, choix du mode de fonctionnement...).

## **CHAPITRE I**

**ETUDE ET SYNTHESE SUR LES MODES DE COMMUNICATION**

**HOMME/MACHINE ET PRESENTATION DU MICROTELE-**

**MANIPULATEUR CHIRURGICAL**



## CHAPITRE I

### ETUDE ET SYNTHESE SUR LES MODES DE COMMUNICATION HOMME/MACHINE ET PRESENTATION DU MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL

I- <u>INTRODUCTION</u>	p.1
II- <u>RAPPELS:ROBOT-TELEMANIPULATEUR</u>	p.3
1- DEFINITION D'UN ROBOT	p.3
2- DEFINITION D'UN TELEMANIPULATEUR	p.4
III- <u>MODES DE CONDUITE DES ROBOTS TELEMANIPULATEURS</u>	p.5
1- DIFFERENTS MODES DE COMMUNICATION H/M (Mod H/M)	p.6
2- MOD H/M EN LANGAGE NATUREL	p.7
3- MOD H/M EN LANGAGE ECRIT	p.9
4- PROGRAMMATION PAR LANGAGE DE HAUT NIVEAU	p.9
IV- <u>CONCEPT DE LA TELEOPERATION AVANCEE</u>	p.10
V- <u>PRESENTATION DU MICROTELEMANIPULATEUR</u>	p.12
1- ORIGINE DU PROTOTYPE: OPERATION DE VITRECTOMIE	p.12
2- ARCHITECTURE DU MICROTELEMANIPULATEUR	p.13
2-1 LE POIGNET	p.13
2-2 LE PORTEUR OU LE POSITIONNEUR	p.17
3- MOTORISATION	p.17
3-1 ACTIONNEURS	p.17



3-2 *VITESSES* .....p.18

VI AUTRES PERSPECTIVES D'APPLICATIONS .....p.18

1- *LA KERATOTOMIE RADIAIRE* .....p.18

2- *LA NEUROCHIRURGIE* .....p.19

VII- CONCLUSION .....p.21

ETUDE ET SYNTHESE SUR LES MODES DE COMMUNICATION  
HOMME/MACHINE ET PRESENTATION DU MICROTELE-  
MANIPULATEUR CHIRURGICAL

I - INTRODUCTION

La chronologie des problèmes liés à la commande des robots-télémanipulateurs, nous amène à effectuer un rappel historique sur l'évolution des télémanipulateurs et de leurs applications.

Dès l'apparition des outils, certains d'entre eux se sont placés dans la voie du prolongement de l'Homme pour effectuer des tâches à distance et agir dans des environnements hostiles ou difficiles d'accès.

Le télémanipulateur a pris forme dès 1947 et a permis de réaliser des tâches de laboratoire en recherche nucléaire, commandé avec la seule force mécanique de son utilisateur. Le télémanipulateur motorisé, commandé par boutons, a suivi de peu et a permis la manipulation lourde.

Parallèlement, le télémanipulateur à asservissement bilatéral, synthèse des deux précédents, est apparu, ouvrant un champ de travail à distance quasi-illimité: il intervient dans l'assistance à la manipulation lourde, l'industrie nucléaire, mais aussi dans d'autres environnements hostiles et dangereux tels que le milieu sous-marin ou l'espace, l'industrie chimique, le travail dans les mines etc...

Ces télémanipulateurs sont en général du type maître-esclave, commandés directement par l'opérateur /CATI 79/, /FERR 78/, ( figure 1).

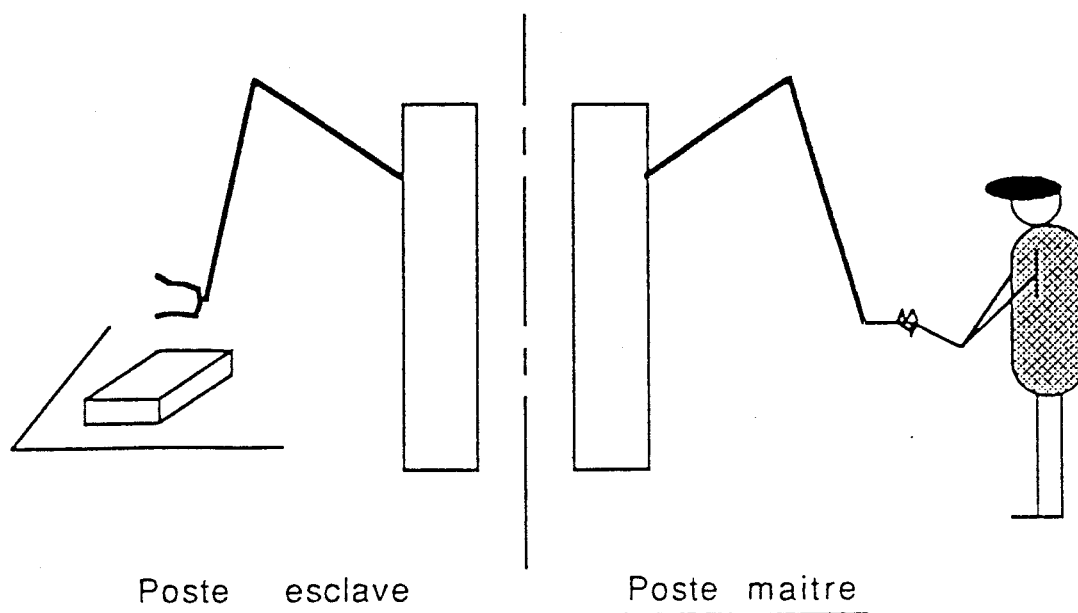


Figure /I-1/ : Commande bilatérale  
Symétrique maître-esclave

Dans le domaine médical, la téléopération est utilisée:

- pour la réduction des mouvements :  
microtélémanipulateur de la première génération en microscopie notamment,
- pour l'aide aux handicapés : prothèses, téléthèses; qui depuis SPARTACUS /SPAR 82/, sont parvenus au niveau de la deuxième génération.

La troisième et actuelle génération est marquée par l'introduction progressive de la robotique en milieu médical.

Parmi les rares travaux rencontrés dans ce domaine, on peut citer:

- le télémanipulateur de /ZEISS 79/. C'est un manipulateur à asservissement électrique, piloté en coordonnées sphériques pour instruments de vitrectomie avec un organe de commande pour imprimer le mouvement dans une direction quelconque du système de coordonnées.

A notre connaissance, un seul prototype est apparu sur le marché.

- Une équipe de recherche de l'Université de " SOUTHERN CALIFORNIA " a présenté dans un article de la revue " ROBOTICS AGE " de juin 1985, un télémanipulateur stéréotaxique expérimental applicable en neurochirurgie /KWOH 85/.



- Les travaux de /GRAN 86/ où il étudie la possibilité d'automatisation des opérations de la chirurgie pré-cancéreuse au laser CO<sub>2</sub>; en particulier la réalisation de la conisation du col utérin.

Il est donc encore prématuré de parler de robotique chirurgicale, mais l'assistance au chirurgien par des automatismes a prouvé qu'elle pouvait être d'un grand intérêt dans ce domaine.

Nous allons rappeler dans ce qui suit, la définition d'un robot et d'un télémanipulateur, et montrer ce qui les différencie, notamment en ce qui concerne les modes de commande et de communication.

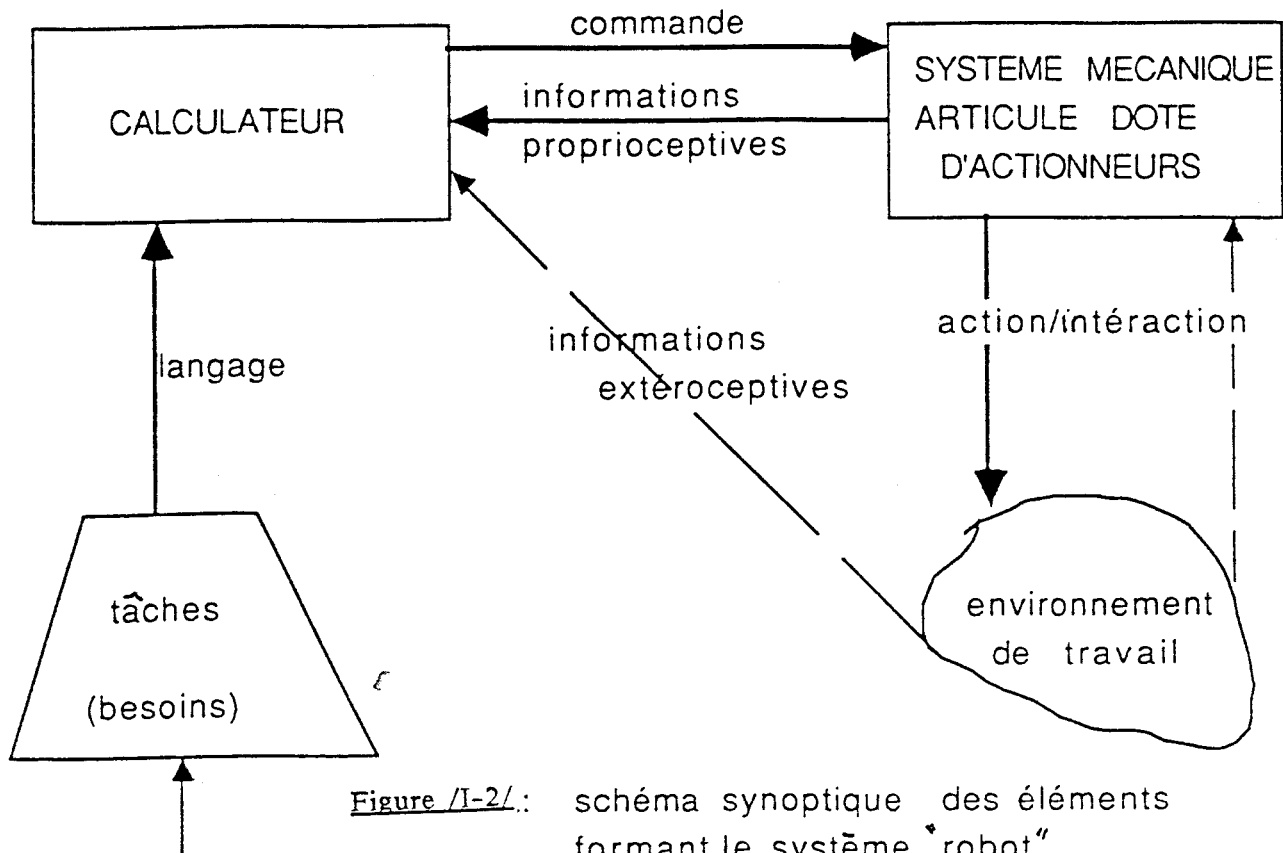
## II- RAPPELS: ROBOT, TELEMANIPULATEUR

### 1- DEFINITION D'UN ROBOT

Le robot est considéré en général comme une machine artificielle caractérisée par les deux propriétés suivantes /COIF 81/:

- Versatilité: c'est à dire la potentialité mécanique à exercer des actions physiques diverses dans l'espace réel. Cette versatilité oblige le robot à posséder une structure mécanique à géométrie variable.
- Autoadaptativité à l'environnement: c'est à dire possibilité d'automodification de son comportement afin d'atteindre l'objectif visé malgré des perturbations dans l'environnement, en cours d'exécution de la tâche impartie.

Le schéma symbolique de la figure /2/ décrit l'ensemble des éléments interconnectés formant le système robot.



## 2- DEFINITION D'UN TELEMANIPULATEUR

Dans certains domaines, la nécessité d'opérations à distance dans un environnement non structuré demande au système opératif plus de versatilité et donc plus d'aide d'un opérateur humain irremplaçable pour la dextérité, la capacité de décision et la stratégie imaginative. La recherche avancée en technique des télésystèmes conduit à un système complexe appelé TELEMANIPULATEUR AVANCE, ou robot de coopération /VERT 83/.

Comme en robotique, trois "métafonctions" principales sont présentes dans un système de téléopération: Perception, Décision et Action. La différence principale provient du fait que ces fonctions doivent être réparties entre l'homme (ou les hommes) et la machine (ou les machines).

Jean VERTUT établi dans /VERT 83/, le schéma de la figure /3/ où les robots sont situés de part et d'autre de l'axe d'automatisme. Au dessus de cet axe, se trouvent les robots de substitution et en dessous, les robots de coopération. La zone (W) est la zone idéale où les téléopérateurs et les robots "intelligents" se rejoignent.

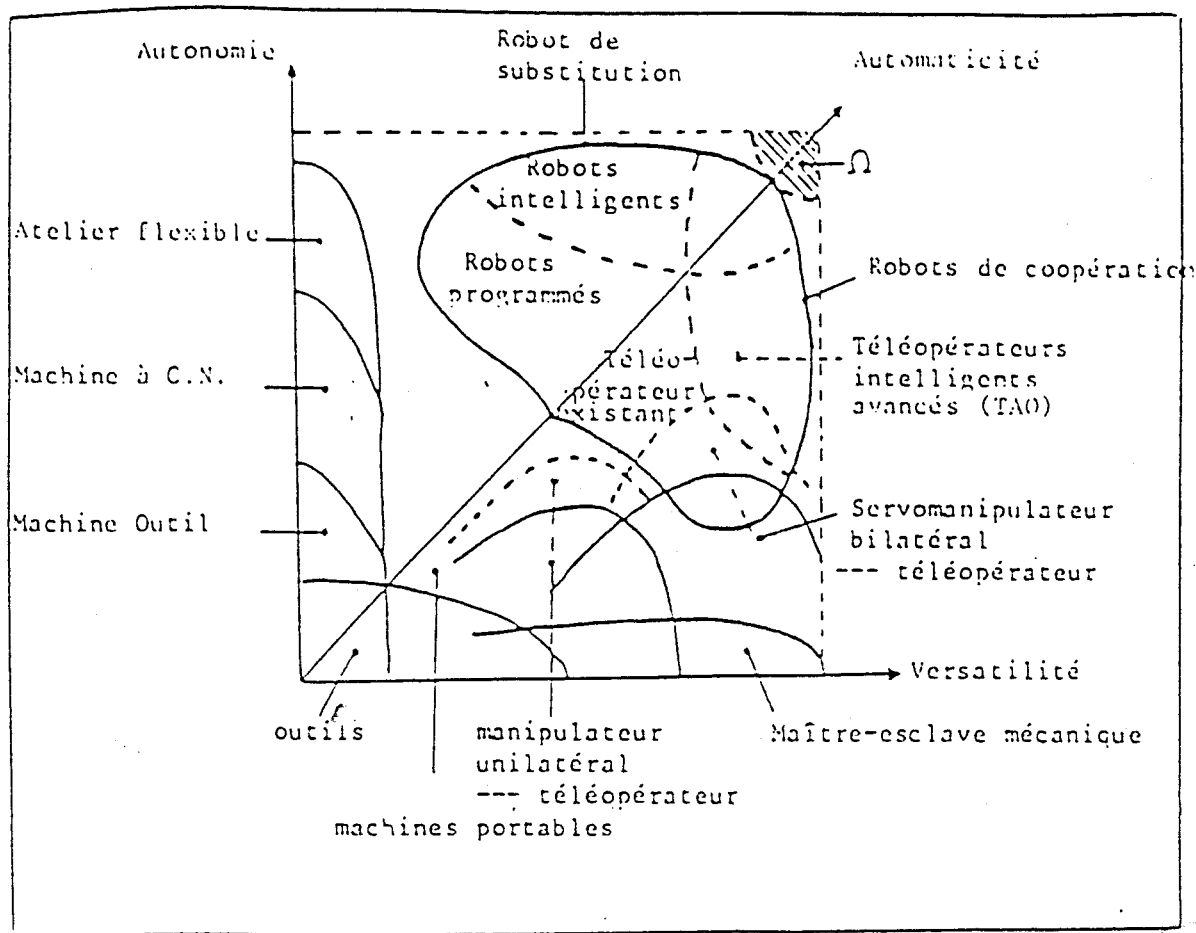


Figure /I-3/ : Niveau d'automatisme des systèmes  
Robots/télemanipulateurs

### III- MODE DE CONDUITE DES ROBOTS TELEMANIPULATEURS

Lorsqu'un opérateur humain désire confier un travail à un robot, il doit non seulement lui indiquer la tâche à accomplir, mais également la façon d'opérer. En mode robot, l'opérateur doit dans un premier temps déterminer la séquence des différentes actions élémentaires que le robot devra effectuer pour atteindre l'objectif: c'est la phase de programmation de la tâche. Dans un deuxième temps, l'opérateur communique au robot le programme établi en utilisant un mode de communication H/M approprié. Des travaux de recherche concernant l'analyse des tâches en robotique commencent à apparaître à l'heure actuelle, mais la fonction planification est encore en grande partie assurée par l'homme.

Avant de présenter les différentes méthodes de programmation, nous allons d'abord développer les principaux modes de communication H/M (Mod H/M) rencontrés dans les littératures.



### 1-DIFFERENTS MODES DE COMMUNICATION H/M (MOD H/M)

L'interface de communication H/M permet d'assurer les deux fonctions principales suivantes:

- Transférer de l'homme vers le système opérateur, les informations relatives à la planification et à l'exécution de la tâche.
- Retourner à l'opérateur un compte-rendu sur l'état du déroulement des opérations demandées (affichage, alarmes; ...).

La figure /4/ montre que matériellement, une interface H/M est composée essentiellement de deux unités principales:

- Unité d'entrée, qui peut être:
  - un clavier,
  - une interface vocale,
  - un syntaxeur ou bras-maitre,
  - une souris.
- Unité de sortie, qui peut être:
  - un écran d'affichage (textuel, graphique),
  - une synthèse vocale,
  - une image vidéo,
  - un retour synthétique.

Lors de la réalisation d'une telle interface, le concepteur doit penser à des contraintes ergonomiques concernant l'utilisation de cette interface, en particulier:

- la souplesse d'utilisation,
- la facilité de ses différents réglages,
- la protection contre les fausses manoeuvres.

A titre d'exemple, nous signalons l'étude de Molard /MOLA 84 /, concernant la connaissance de l'espace d'activité d'un opérateur humain assis: figure /5/. Il mesure les possibilités d'atteintes optimales d'un individu et tente d'en dégager une liste des tâches représentatives de la gestuelle.

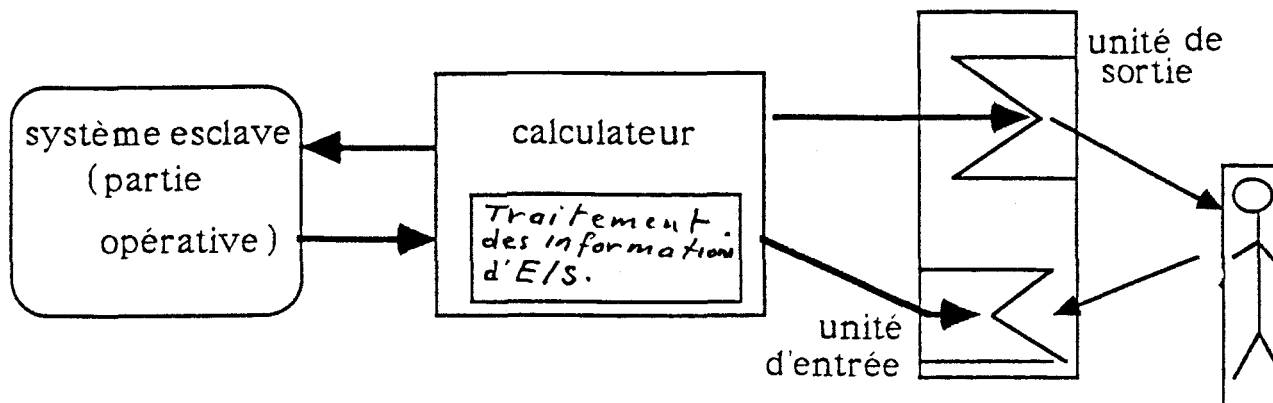


Figure /I-4/ : Relation E/S et Communication H/M

## 2-MOD H/M EN LANGAGE NATUREL

C'est le mode de communication le plus simple pour l'homme (paroles humaines). Les résultats obtenus dans le domaine de la reconnaissance de la parole tant en France qu'à l'étranger sont devenus intéressants, mais il est encore vrai que la mise en oeuvre d'une communication H/M en langage naturel nécessite un matériel informatique important difficilement compatible avec les contraintes économiques imposées par les cahiers des charges des systèmes industriels /FOUL 81/ (coût d'investissement et d'exploitation).

L'interface vocale permet un dialogue bidirectionnel en langage naturel. La forme et le contenu des messages échangés répondent à une syntaxe bien définie pour faciliter la communication. Les mots employés sont choisis parmi ceux figurant dans un dictionnaire pré-établi pendant la phase d'apprentissage.

Notre contribution à ce type de communication H/M a porté sur le niveau logiciel et sera exposée au chapitre III. L'étude de la fiabilité de ce type d'interface est actuellement menée par Mme Guerrouad /GUER 87/ qui fait partie de l'équipe de recherche en téléopération de Lille.

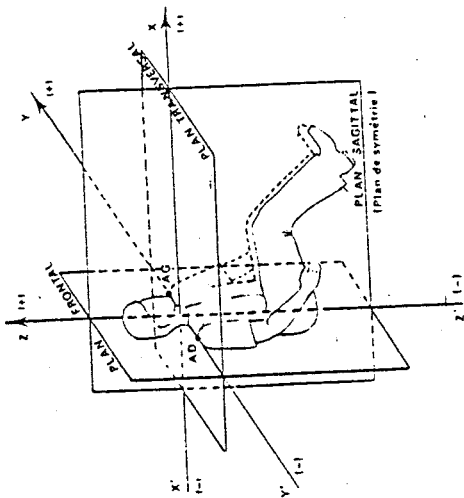
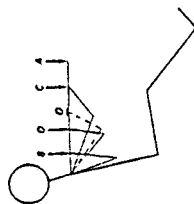


Figure n°1 - Situation relative de l'opérateur et des axes servant de référence aux séries de plans :

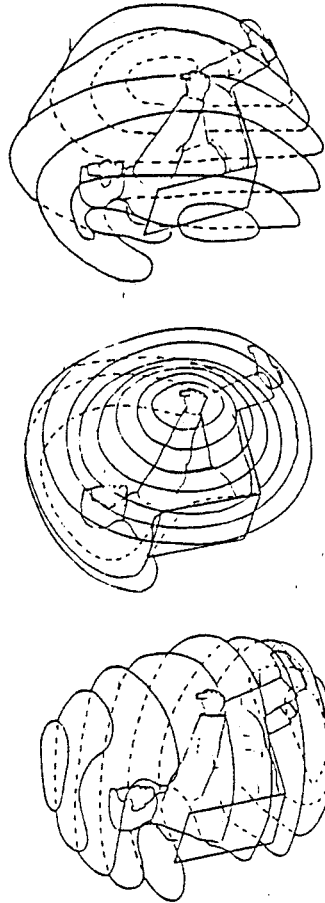
- transversaux,
- sagittaux,
- frontaux.

(AD = Accrétion Droit - AG = Accrétion Gauche).

Figure n°2



- A point maximal (Enveloppe d'at-
- B point minimal (teinte maximale).
- C point maximal (Enveloppe d'at-
- D point minimal (teinte fonction-
- O Zone optimale.



Plans transversaux horizontaux

Plans sagittaux verticaux

Plans frontaux verticaux

Figure n°2 - Subdivision tridimensionnelle de l'espace de travail de la main droite sur une poignée verticale, d'une personne assise.

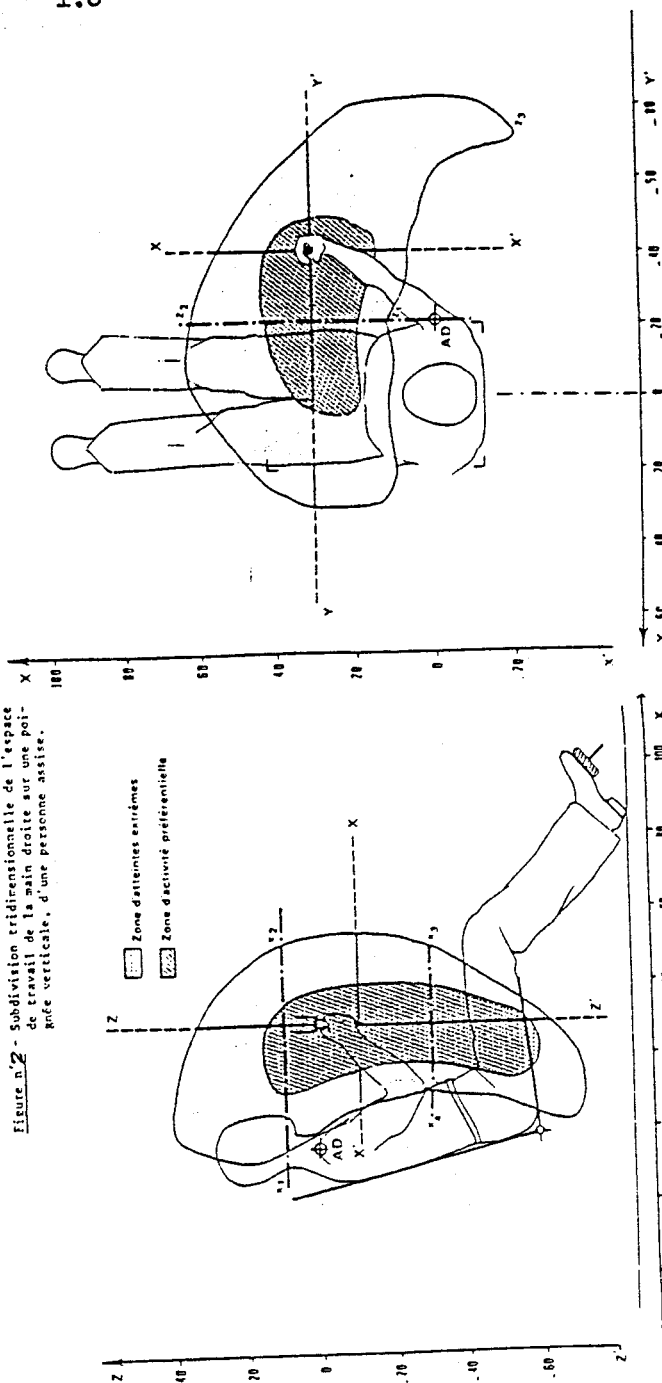


Figure n°3 - Zones d'atteintes extrêmes et d'activité préférentielle passant par un plan sagittal situé à 10 cm. du plan de symétrie.

Figure /I-5/ : Espace d'Activité d'un Opérateur Assis (Etude de /MOLA 84/ : "ergonomie de travail").



### 3-MOD/H/M EN LANGAGE ECRIT

La communication H/M en langage écrit est encore le mode le plus répandu: le texte (programme de description de la tâche) est écrit soit à partir d'un terminal d'ordinateur (télétype, console et écran graphique), soit par l'intermédiaire d'un syntaxeur.

En règle générale, le choix du mode de communication H/M dépend étroitement du mode de fonctionnement du robot-manipulateur. Pour ceux qui fonctionnent en mode automatique (robot), la communication H/M n'intervient que pour définir et programmer la tâche: ce mode est largement utilisé en milieu industriel (dans les chaînes de montage, soudure,...). Pour les robots de coopération fonctionnant en mode semi-automatique (cas de la télémanipulation), la communication H/M, correspond aux modes de couplage/découplage de l'opérateur de la boucle de commande.

#### 3-1 PROGRAMMATION PAR LANGAGE DE HAUT NIVEAU

La programmation des robots-télémanipulateurs modernes s'effectue à l'aide des langages de haut niveau, dont la syntaxe se rapproche du "parler" de l'utilisateur. dans ce cas, le programmeur raisonne comme suit:

"Aller vers le point M à la vitesse V";  
"Avancer jusqu'à ce que la force F soit  $> 0.5$ ";  
"Aller vers le point H2 via le point M1".

Parmi ces langages, nous citons le langage WAVE /PAUL 77/, développé à l'université de Stanford, et qui est classé niveau effecteur.

D'autres langages tels que SIGLA (Olivetti), EMILY (IBM), LM (IMAG), VAL (Unimation), sont hiérarchiquement classés dans la référence /FALE 79/.

A un niveau plus élevé, on trouve des langages très proches de la tâche, qui traitent directement des actions à effectuer sur des objets. Le programmeur formule son besoin de la façon suivante:

"Dévisser le boulon n°1",  
"Insérer l'axe K dans le piston".

Parmi les réalisations de ce type de langage, nous pouvons citer LAMA (Mit), /LOZA 77/. Ce niveau de programmation nécessite des moyens de calcul importants.



Le dernier niveau relève du domaine de l'intelligence artificielle, il est constitué de programmes dits "générateurs de plans" et relève encore actuellement du domaine de la recherche.

#### REMARQUES:

La programmation en langage de haut niveau nécessite la résolution de nombreux problèmes:

- Difficulté d'appréhender qualitativement l'univers du robot-manipulateur;
- Imprécisions relatives à la connaissance des actions et de l'environnement du système (imprécision dans le déplacement de l'organe terminal du robot, tolérance d'usinage des pièces,...)
- Mise en oeuvre d'une procédure de prévention des collisions.

#### IV- CONCEPT DE LA TELEOPERATION AVANCEE

Le pilotage d'un télémanipulateur moderne se fait toujours sous contrôle d'un ordinateur. En effet, l'évolution rapide de la technologie des microprocesseurs a profondément bouleversé les structures traditionnelles informatiques de commande en temps réel. Parallèlement, les logiciels ont fait d'énormes progrès; de nouveaux logiciels sont apparus:

- Logiciel "temps réel": enchaînement des tâches;
- Logiciels de développement ou d'aide à la mise au point.

Les orientations actuelles concernant la commande des "robots-manipulateurs" de coopération (Projet ARA de téléopération avancée /ARA 86/ tentent de procéder à un partage dynamique des tâches entre l'opérateur et le calculateur de commande afin de prolonger l'opérateur non seulement physiquement et sensoriellement, mais également dans ses possibilités décisionnelles (notion de téléprésence: autonomie et transparence).

La téléopération assistée par ordinateur (T.A.O) est alors un nouveau concept de la télémanipulation (figure 6). L'homme se trouve de plus en plus assisté dans la tâche de décision grâce au calculateur de commande qui gère en temps réel les informations de diverses origines (consignes, capteurs ...).

L'effort fourni par l'équipe de téléopération du laboratoire dans le cadre de l'étude des télésystèmes et des modes de communication H/M, a conduit à la réalisation effective d'un premier prototype de micromanipulateur chirurgical, destiné à des opérations d'ophtalmologie (vitrectomie, kératotomie), et dont la commande fait l'objet du chapitre II. Mais auparavant, nous allons présenter ce prototype et expliquer ses fonctions.

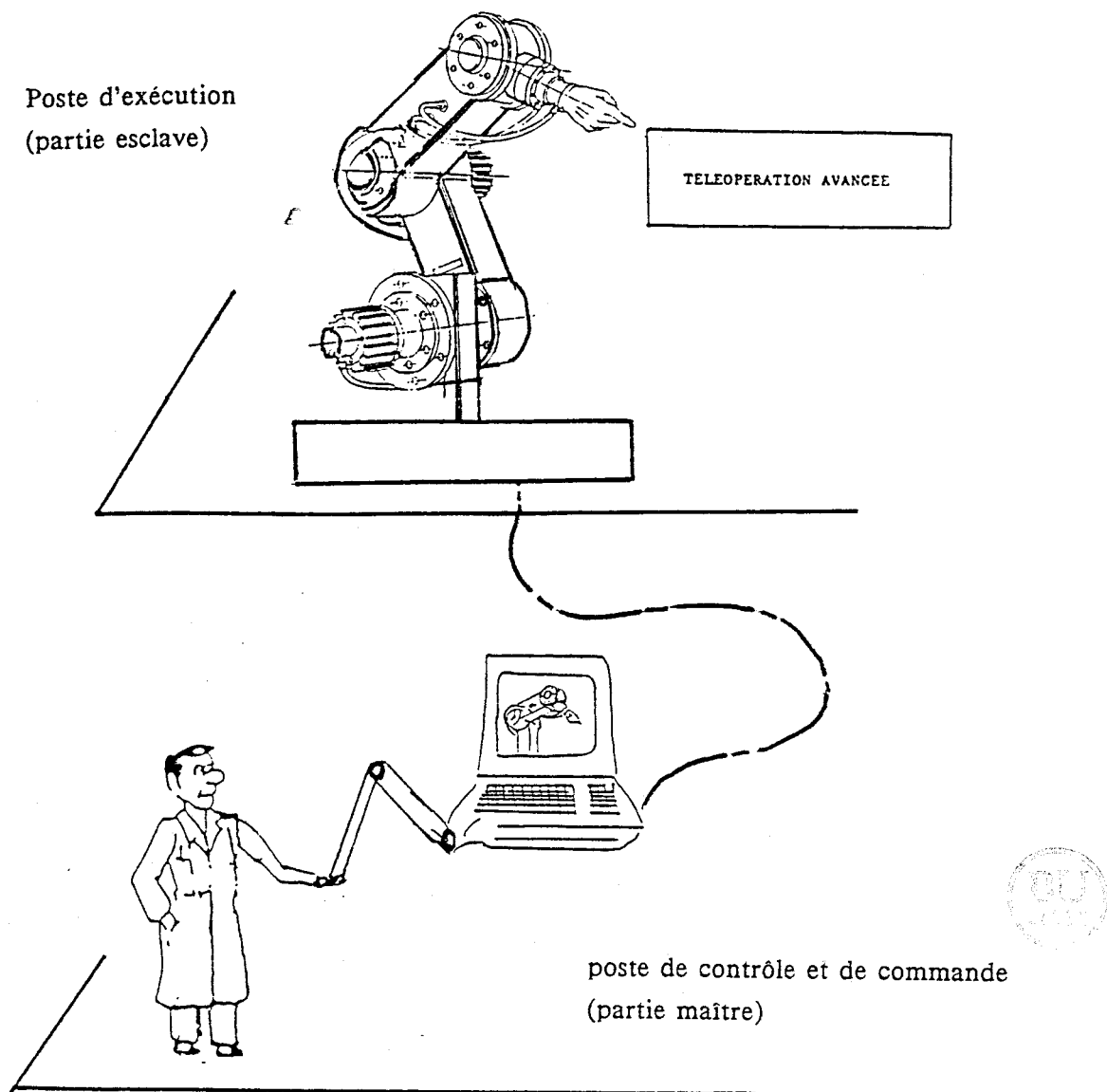


Figure /I-6/ : Site schématique de Téléopération  
Assisté par Ordinateur(T.A.O.)

## V- PRESENTATION DU MICROTELEMANIPULATEUR

### 1-ORIGINE DU PROTOTYPE: OPERATION DE VITRECTOMIE

A l'origine, ce microtélémanipulateur a été conçu pour des opérations de vitrectomie. Son architecture mécanique a été inspirée des gestes et des mouvements de la main du chirurgien lors de l'exécution de cette tâche.

Les opérations de vitrectomie oculaire sont effectuées sous microscope opératoire et consistent à faire pénétrer l'aiguille d'un vitréotome (instrument chirurgical utilisé en ophtalmologie) à l'intérieur de l'oeil en le faisant passer par un orifice pratiqué à sa surface, puis à diriger la pointe vers la zone d'intervention pour nettoyer la région affectée du vitrée (Figure 7). La perte de volume est compensée par une injection contrôlée de sérum physiologique, effectuée par la même porte d'entrée que celle utilisée par le vitréotome.

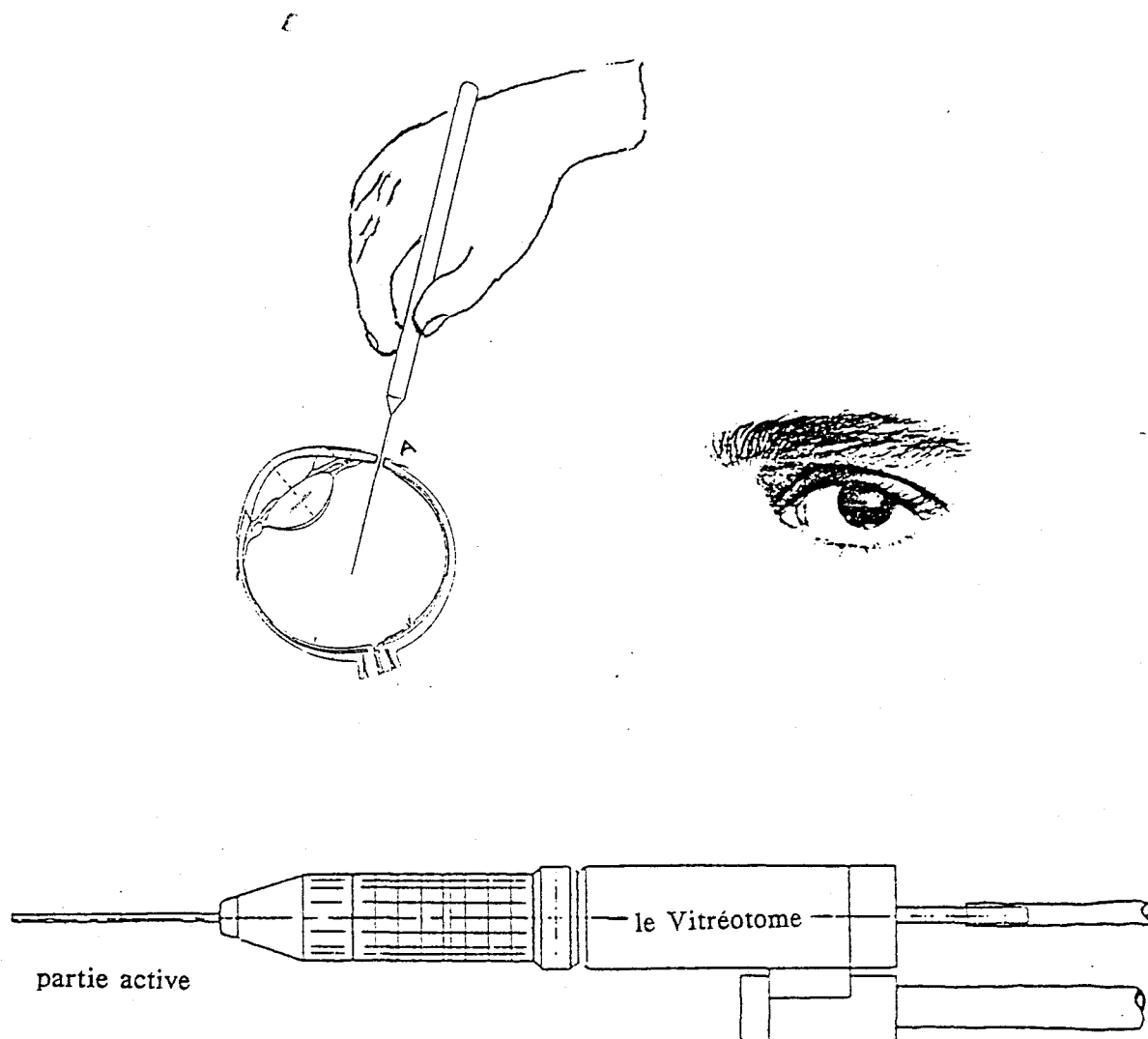


Figure /I-7/ : Intervention sur le globe Oculaire  
(Opération de Vitrectomie: Nettoyage du vitré)

La contrainte principale dans cette opération est de maintenir le corps de l'aiguille centré sur la porte d'entrée pour ne pas provoquer de lésions sclérotiques /GUFF 83/.

Cette contrainte est assez difficile à respecter (phénomène de tremblement de la main humaine en particulier), d'où l'idée d'assister le chirurgien dans sa tâche à l'aide d'un microtélémanipulateur commandé par ordinateur.

Nous terminons cette étude du contexte par le microscope opératoire dont les déplacements sont commandés par l'intervenant et qui donne l'agrandissement nécessaire à un travail précis. Une source de lumière, sous forme de lampe à fente extérieure à l'oeil, ou un éclairage interne par fibre optique, complète l'environnement de l'intervention.

Il est à souligner que pendant toute la durée de l'intervention, l'oeil est maintenu fixé par rapport à la tête; celle-ci étant elle-même immobilisée par un support.

Le pilotage de cet environnement est actuellement commandé par le pied du chirurgien au cours de l'intervention, ce qui la complique davantage.

L'outil de l'intervention en vitrectomie oculaire est appelé: Microstripper ou Vitrophage ou Ocutome/GUFF 83/.

## 2- ARCHITECTURE DU MICROTELEMANIPULATEUR

Le prototype réalisé comporte deux parties (Figure 8):

### 2-1 LE POIGNET

Le travail qui consiste à "brouter" des zones à l'intérieur de l'oeil, est réalisé en coordonnées sphériques ( $\theta, \phi, \rho$ ), à partir d'un repère orthonormé attaché à la porte d'entrée A.

Les mécanismes engendrant ces mouvements qui constituent l'acte essentiel de l'intervention de vitrectomie, représentent la partie poignet du microtélémanipulateur. Le degré de liberté ( $\chi$ ) correspond à la rotation propre de l'outil.



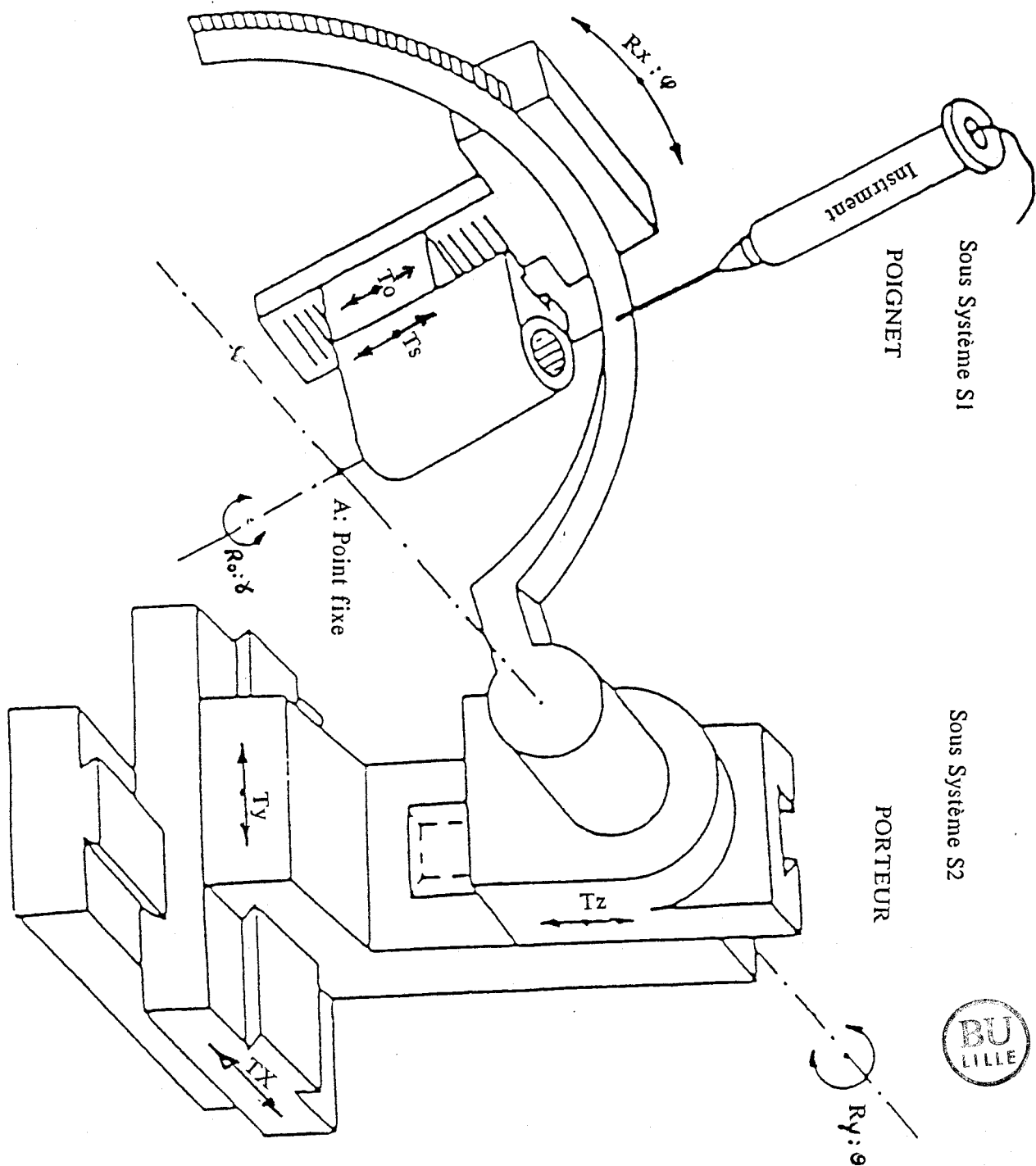


Figure /I-8a/: Architecture mécanique du  
Microtélémanipulateur chirurgical

Les actionneurs du poignet (sous système S1) engendrent un mouvement sphérique par rapport a point A.

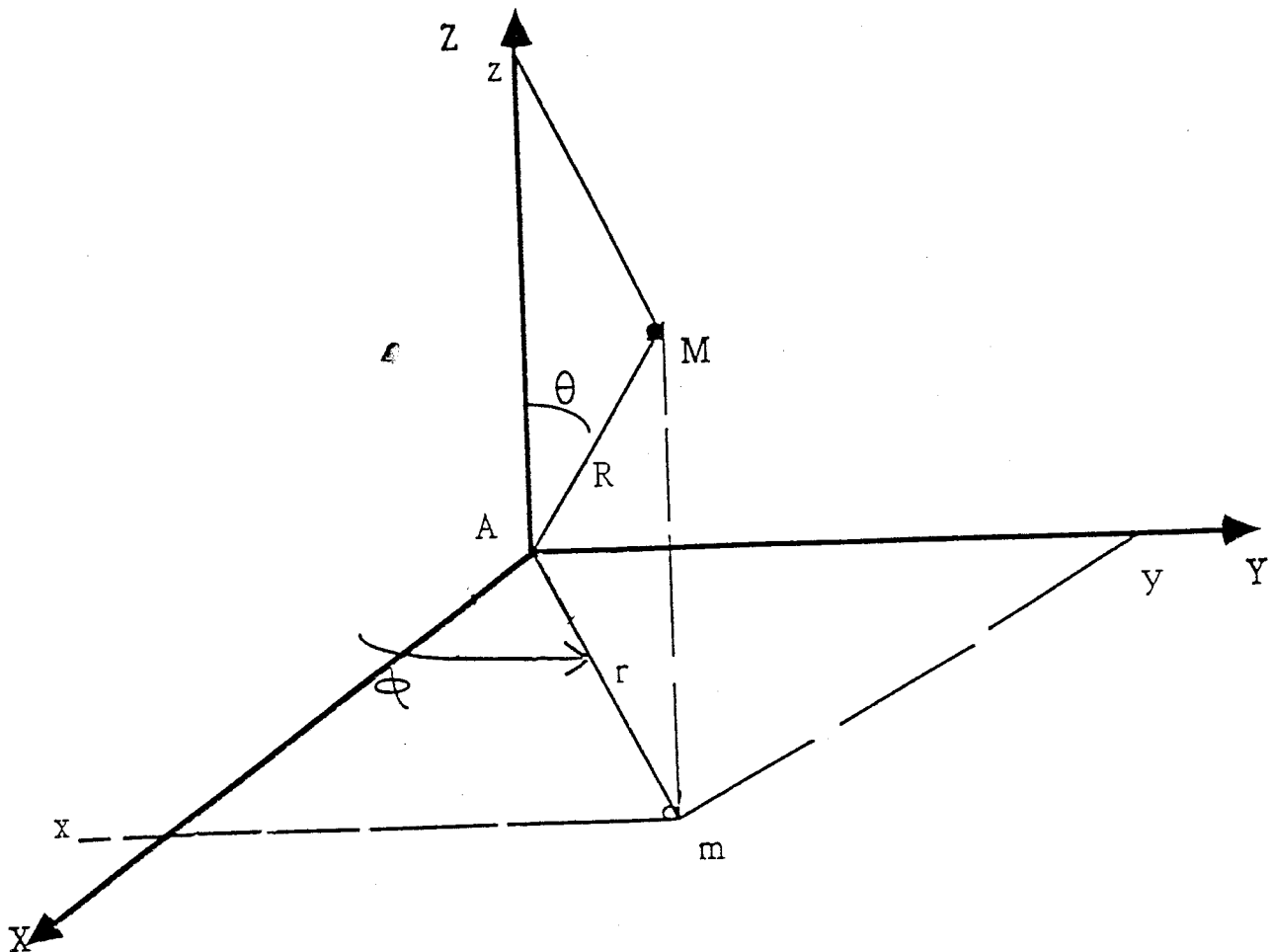


Figure /I-8b/ : Repère lié à la porte d'entrée  
de l'oeil ( point A )

$$X = R.\sin(\Theta) . \cos(\Phi)$$

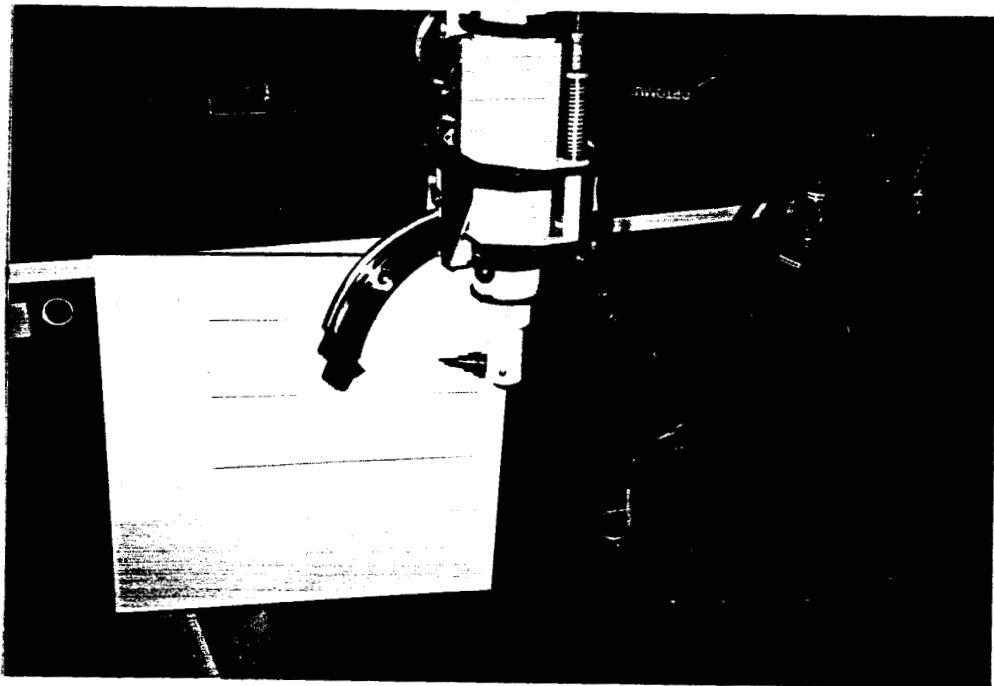
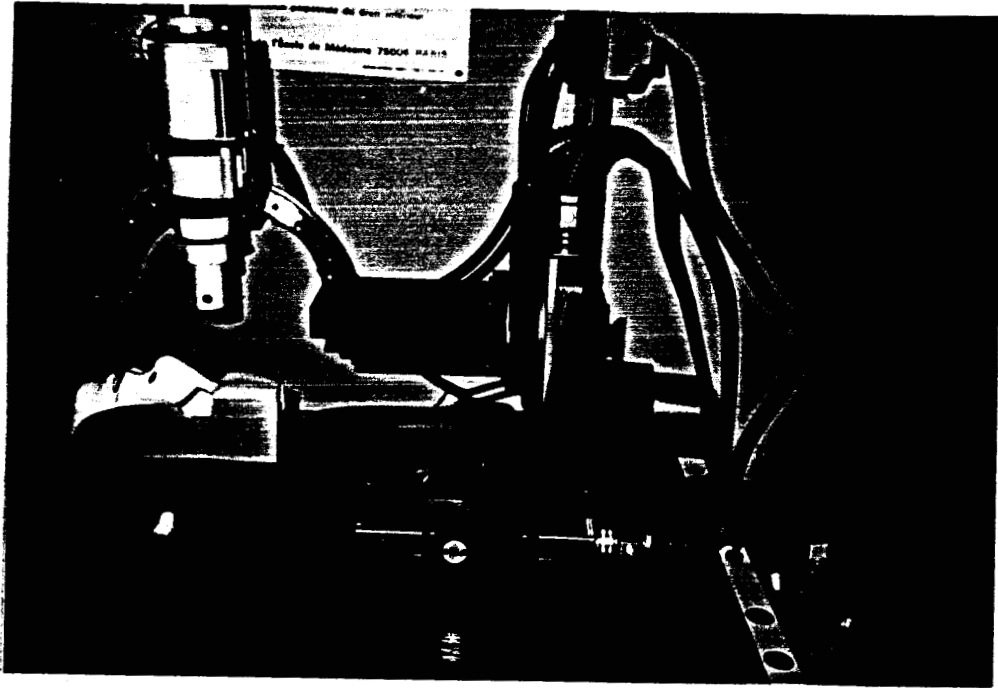
$$Y = R.\sin(\Theta) . \sin(\Phi)$$

$$Z = R.\cos(\Theta)$$





Photo. du Microtélémanipulateur  
dans l'environnement du laboratoire



## 2-2 LE PORTEUR OU POSITIONNEUR

Le positionnement spatial du repère Ra est obtenu par un module translateur à trois mobilités prismatiques qui assure la mise en correspondance du point invariant (A) de la structure du microtélémanipulateur avec la porte d'entrée A au début de l'intervention (Figure 9). Cet ensemble jouant le rôle du bras de l'opérateur est appelé "porteur" du microtélémanipulateur ou "positionneur" de l'instrument.

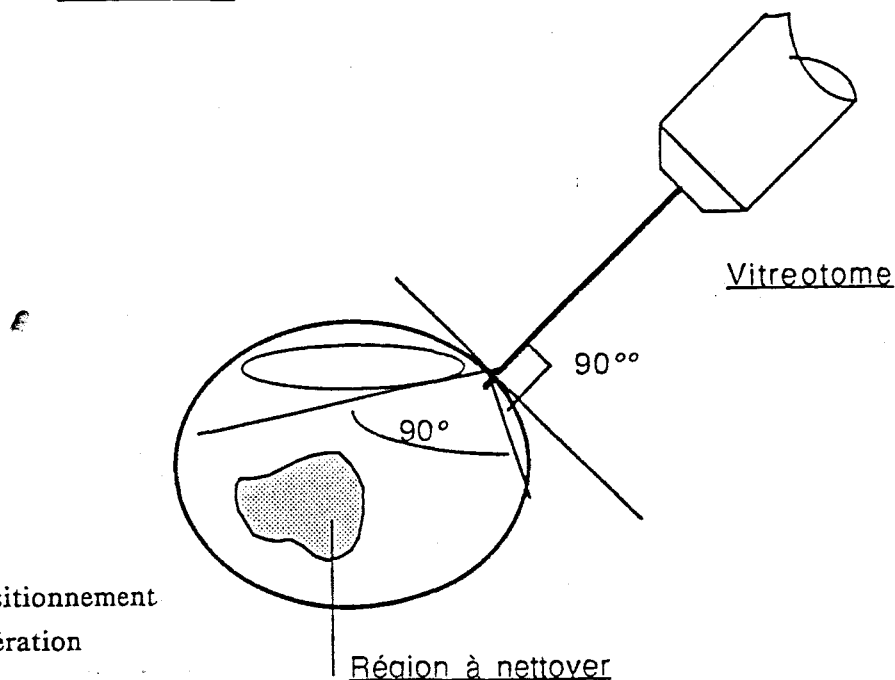


Figure /I-9/ : Phase de positionnement en début d'opération

L'étude concernant le choix technologique de chaque organe du microtélémanipulateur et le chiffrage de la fiabilité mécanique est donnée dans /DIAZ 85/.

Les actionneurs du poignet engendrent un mouvement sphérique par rapport au point A, comme l'indique le schéma de la figure /8b/.

## 3 -MOTORISATION

### 3-1 ACTIONNEURS

L'environnement chirurgical impose tout naturellement une technologie électrique, les avantages étant nombreux: propreté, précision, facilité de transport et aisance d'interfaçage avec un environnement informatique.

### 3-2 Vitesses

Compte-tenu du volume de la zone d'intervention, les vitesses maximales adoptées sont:

- Actionneur du porteur (positionnement du poignet)

(Tx, Ty, Tz): 10 mm/s

- Orientation du poignet

( $\theta$ ,  $\phi$ ): 12°/s

- Translation axiale de l'outil

( $\ell$ ): 1mm/s

- Rotation axiale de l'instrument

( $\gamma$ ): 60°/s

Les caractéristiques des actionneurs sont données en annexe.

## VI- AUTRES PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

### 1- LA KERATOTOMIE RADIAIRE

La kératotomie radiaire consiste à pratiquer 4 ou 8 incisions sur la calotte de la cornée, dont la profondeur souhaitée correspond à 95 % de l'épaisseur cornéenne centrale afin de corriger les fortes miopies (figure 10).

L'intervention de kératotomie radiaire est précédée par une phase de mesure de l'épaisseur de la cornée à l'aide d'un pachymètre (instrument précis de mesure d'épaisseur). La moyenne des épaisseurs cornéennes humaines est de 800  $\mu$ m au centre et de 1000  $\mu$ m aux périphéries.

Les contraintes principales ici sont doubles:

- La profondeur de l'incision ne doit pas dépasser la limite fixée pour une bonne opération, soit 95 % de l'épaisseur;
- Le couteau (scalpel) doit rester perpendiculaire à la courbure cornéenne.



L'approche utilisée pour palier à ces contraintes est d'une part d'utiliser le microtélémanipulateur pour effectuer des mouvements fins et précis et d'autre part, à l'aide d'un système de capteurs à fibres optiques, de déterminer approximativement la forme extérieure de la calotte cornéenne. Cette enveloppe sert alors de modèle approché de la cornée et ainsi d'effectuer l'asservissement correspondant pour respecter les deux contraintes citées précédemment. La recherche de l'application du microtélémanipulateur et des expérimentations nécessaires à ce type d'intervention est actuellement à l'étude dans notre groupe de recherche et constitue l'application de nos travaux.

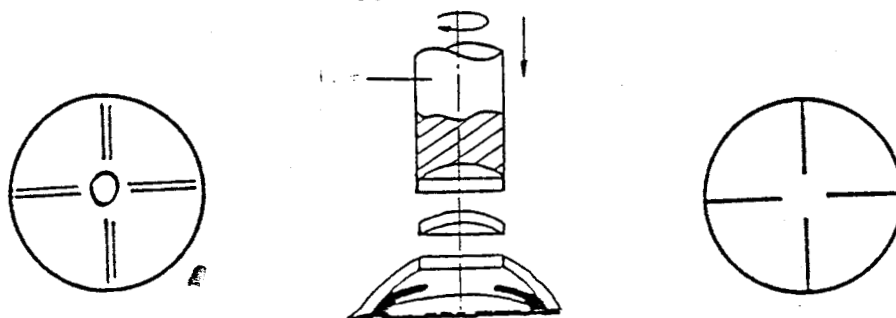


Figure /I-10/ : Différentes incisions cornéennes  
(Corrections des fortes miopies)

## 2- LA NEUROCHIRURGIE

La scanographie et la stéréotaxie permettent de donner un bilan complet sur une cartographie du crâne à opérer, /BOUR 84/. Cette analyse pré-intervention, permet de localiser le tissu tumoral à soigner. L'intervention consiste à implanter au sein de la masse tumorale, des électrodes radioactives pour la détruire (figure 11).

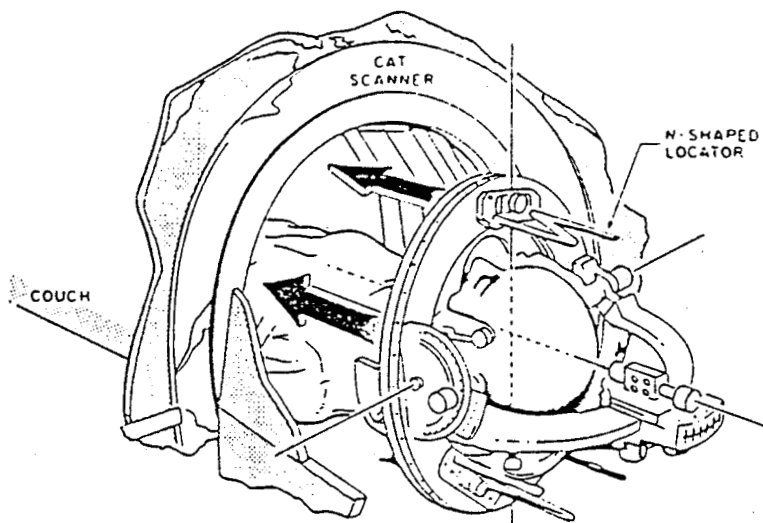


Figure /I-11/ : Système de Stéréotaxique pour la tête  
(d'après /KWOH 85/ ).

La difficulté ici est de bien se positionner perpendiculairement à la surface d'attaque avant l'introduction des électrodes et d'éviter certaines zones de cellules saines (ou certains vaisseaux sanguins importants), au cours de la manipulation.

L'apport du microtélémanipulateur dans ces opérations se situe en deux points:

- Permettre d'effectuer des manipulations contrôlées;
- permettre d'adapter des nouveaux outils tels le Laser.

Par exemple, le Laser CO<sub>2</sub>, utilisé comme bistouri hémostatique est un instrument de coupe de plus en plus utilisé par les chirurgiens. Néanmoins, les conditions d'utilisation de ce nouvel outil peuvent être grandement améliorées, grâce aux ressources apportées par les systèmes d'automatisation. Ainsi, certaines interventions, peu complexes et relativement stéréotypées, peuvent bénéficier des apports de la télémanipulation.

Nous n'avons cité ici que des applications en microchirurgie, mais des interventions fines de ce type existent dans d'autres domaines:

- Industriel: fabrication de circuits électriques.
- Biologique: manipulation de cellules.

Pour terminer, rappelons que la structure mécanique de cet instrument est réalisée de façon modulaire, il est extensible tant sur le plan mécanique que du point de vue commande.

## VII- CONCLUSION

Nous avons dans ce chapitre deux parties:

- La première, essentiellement bibliographique, nous a permis de situer le contexte de notre travail et de présenter les divers modes de communication Homme/Machine dans le cadre des télésystèmes. Ainsi nous avons pu introduire les grands concepts de la télémanipulation avancée (T.A.O.).

- La deuxième, essentiellement technologique, a porté sur la présentation du prototype microtélémanipulateur chirurgical conçu au laboratoire pour des opérations d'ophtalmologie.

Cette étude nous a permis de définir les problèmes posés par la mise en place de la structure de commande du microtélémanipulateur sous son aspect matériel.

Les applications du microtélémanipulateur étant précisées, nous allons maintenant étudier et mettre en oeuvre la commande de ce prototype.

## CHAPITRE II

COMMANDE DU PROTOTYPE

" MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL "



## C H A P I T R E   I I

### COMMANDE DU PROTOTYPE "MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL"

I- <u>INTRODUCTION</u>	p.1
II- <u>INTERFACE DE COMMANDE</u>	p.3
1- CAHIER DES CHARGES	p.3
2- ETUDE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE	p.4
2-1 DESCRIPTION THEORIQUE DE L'AUTOMATISME	p.4
2-2 CONDITIONS D'EVOLUTION ET EQUATIONS DE SORTIE	p.8
3- IMPLANTATION DU SYSTEME DE COMMANDE DU PROTOTYPE	p.8
3-1 OBJECTIFS	p.8
3-2 CONDITIONS TECHNOLOGIQUES	p.8
3-2-1 CONTRAINTES ECONOMIQUES	p.8
3-2-2 CONTRAINTES ERGONOMIQUES	p.8
3-3 CHOIX DE L'ORGANE MAITRE	p.9
3-4 ARCHITECTURE MATERIELLE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE	p.11
3-5 ROLE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS	p.12
4- COMMANDE EN VITESSE (P---->V)	p. 12
4-1 TRANSFORMATION DES COORDONNEES	p.14
4-2 ARBRE DE PROGRAMMATION	p.16



4-3 LANGAGE DE PROGRAMMATION .....	p.17
5- EVALUATION DES PERFORMANCES DU MICROTELE- MANIPULATEUR COMMANDE EN VITESSE A L'AIDE D'UN JOYSTICK .....	p.19
5-1 CONTEXTE DES ESSAIS .....	p.19
5-2 PRINCIPAUX RESULTATS .....	p.19
6- COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR EN POSITION EN FONCTION DES POSITIONS DE L'ORGANE MAITRE .....	p.20
6-1 PARTIE A COMMANDER EN POSITION .....	p.20
6-2 LES TACHES CONCERNEES PAR LA COMMANDE LOCALE DE POSITION .....	p.21
6-3 PRINCIPE DE LA COMMANDE EN POSITION EN FONCTION DES POSITIONS DU JOYSTICK .....	p.21
6-4 TRANSFORMATION DES PARAMETRES AU NIVEAU DE L'ORGANE MAITRE .....	p.22
6-4-1 DEFINITION DES PARAMETRES AU NIVEAU DE L'ORGANE MAITRE .....	p.22
6-4-2 CALCUL DES ECARTS ENTRE LES POSITIONS DU JOYSTICK ET CELLES DE L'INSTRUMENT .....	p.23
6-5 ROLE DU CALCULATEUR .....	p.23
7- PROGRAMMATION .....	p.23
8- EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA COMMANDE EN POSITION .....	p.27
8-1 PREMIER TYPE D'ESSAI .....	p.27
8-2 DEUXIEME TYPE D'ESSAI .....	p.32
III- <u>CONCLUSION</u> .....	p.35

## COMMANDE DU PROTOTYPE DE MICROTELEMANIPULATEUR CHIRURGICAL

### I - INTRODUCTION

Il existe peu de procédures intégrant l'ensemble du processus de développement complet d'un projet en partant du cahier des charges, pour aboutir à la réalisation logicielle et matérielle.

Cependant la réalisation d'un projet passe par différentes étapes /DUPO 86/ (Figure 1) de développement auxquelles peuvent être associés divers outils et/ou méthodes d'analyse.

Le projet "Robot" de microchirurgie est le fruit d'une collaboration étroite entre l'équipe de recherche du laboratoire et diverses personnalités de spécialités variées (chirurgiens, ingénieurs, industriels...).

L'automatisation d'un tel processus où l'homme intervient en ligne est une tâche complexe. L'équipe de recherche conceptrice a été amenée, face aux cahiers des charges assez lourds et aux fonctions complexes à réaliser (précision, sécurité...), à faire des choix aussi bien matériels que logiciels lors de la conception de ce prototype de système de microtélémanipulation avancée.

Au cours de ce chapitre, nous traiterons les problèmes liés à la conception du système de contrôle/commande du microtélémanipulateur chirurgical.

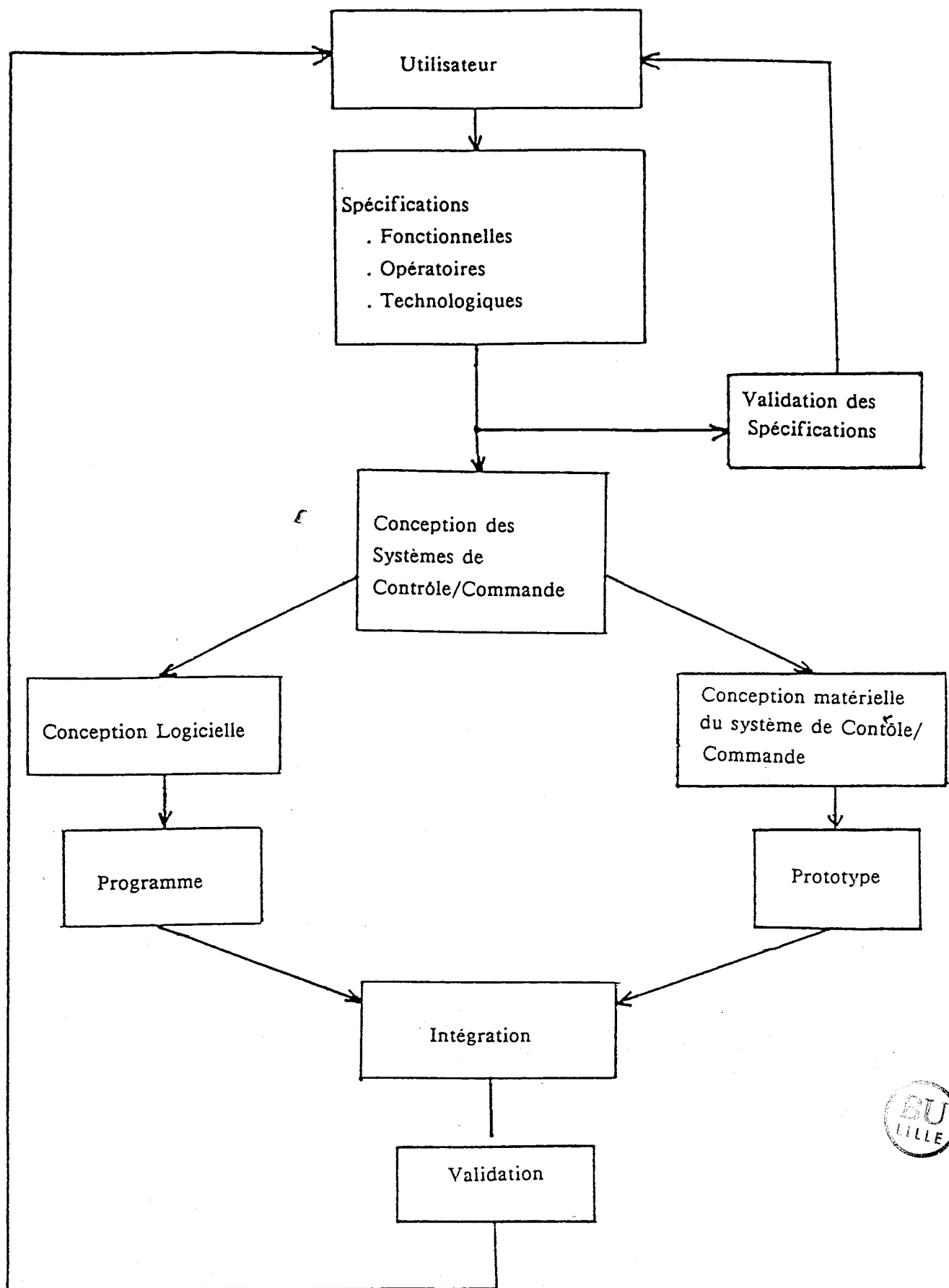


Figure /II-1/ : Différentes étapes de développement pour la réalisation d'un projet.





## II - INTERFACE DE COMMANDE

### 1 - CAHIER DES CHARGES

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le microtélémanipulateur et précisé son domaine d'application. Ainsi les grandes lignes du cahier des charges de la commande du microtélémanipulateur se dessinent, à savoir:

- Le microtélémanipulateur doit travailler principalement en mode téléopération, et être piloté par un opérateur humain à l'aide d'un organe maître.
- Le système doit être précis: en vitrectomie par exemple, la précision demandée est de 1/10 mm.
- L'aspect sécurité est primordial.
- Le prototype doit être modulaire sur le plan logiciel et matériel informatique afin de subir des ajouts ou modifications ultérieurement.

La commande d'un tel processus où la composante Homme est présente, est qualifiée par les ergonomes de commande complexe /ERGO 83/. Pour simplifier l'analyse, il convient de distinguer trois différents modes de fonctionnement:

\* Mode automatique: La tâche à accomplir est définie de façon suffisamment précise et peut se dérouler sans intervention humaine "en ligne", après une phase initiale d'apprentissage ou de description géométrique et dynamique de la tâche en langage de haut niveau. Dans ce mode de fonctionnement, l'opérateur garde uniquement le rôle de supervision globale.

\* Mode télémanipulé: Ce mode de fonctionnement est caractérisé par les divers retours d'informations disponibles et leur importance dans l'accomplissement de la tâche (pondération éventuelle). Il y a ici partage partiel du travail; l'opérateur s'occupe de la décision et l'ordinateur de la gestion du réflexe et de l'imprévu (sécurité).

\* Mode mixte: Selon VIDAL/HABCHI /HABC 83/, le mode mixte correspond à un partage véritable des tâches à accomplir entre opérateur et ordinateur de commande (génération de plans d'action,...).

## 2 - ETUDE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE

### 2-1 DESCRIPTION THEORIQUE DE L'AUTOMATISME

Pour décrire la commande de la partie opérative du prototype, nous avons choisi l'outil de description formel, le Grafcet. Le graphe de la figure /2/ représente l'état fonctionnel du processus.

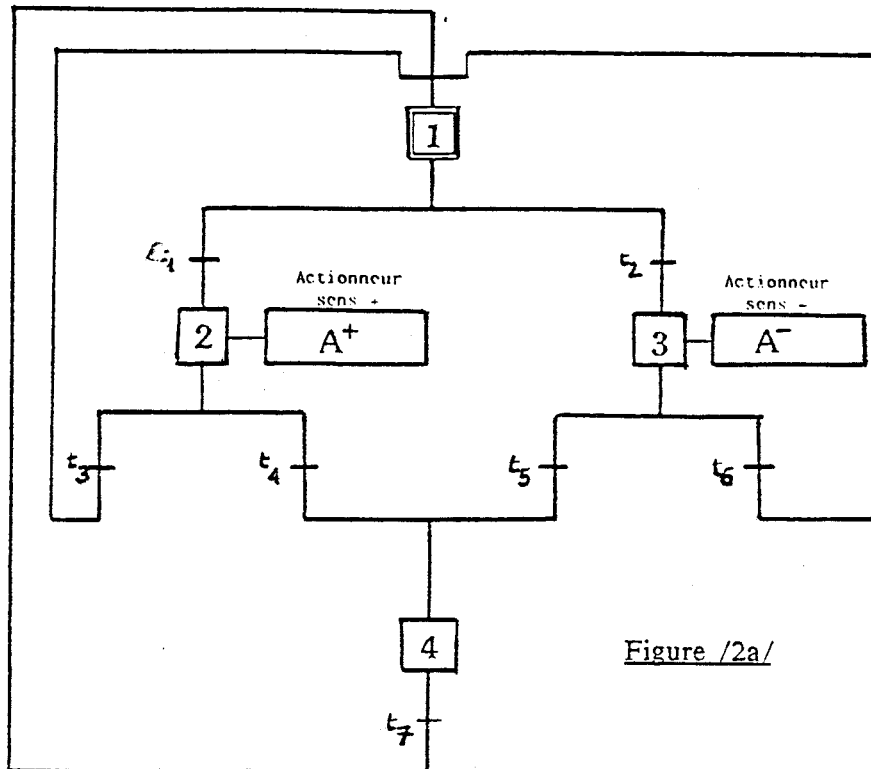


Figure /2a/

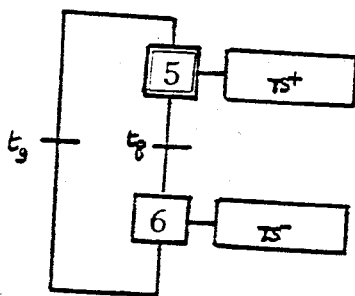


Figure /2b/



Figure /II-2/ : Graphe fonctionnel de l'atomatisme

Dans une première étape, nous allons traiter le problème comme s'il s'agissait d'un automate classique sans tenir compte de la nature des signaux d'entrée (logiques, analogiques, ou numériques), ou de leur origine (capteurs, opérateurs).

Nous avons vu au début de ce chapitre, que la partie mécanique était composée d'un porteur et d'un poignet ayant chacun leur fonction spécifique. De même la partie commande doit assurer, grâce à une commutation, le pilotage de ces deux sous-systèmes (Figure 3).

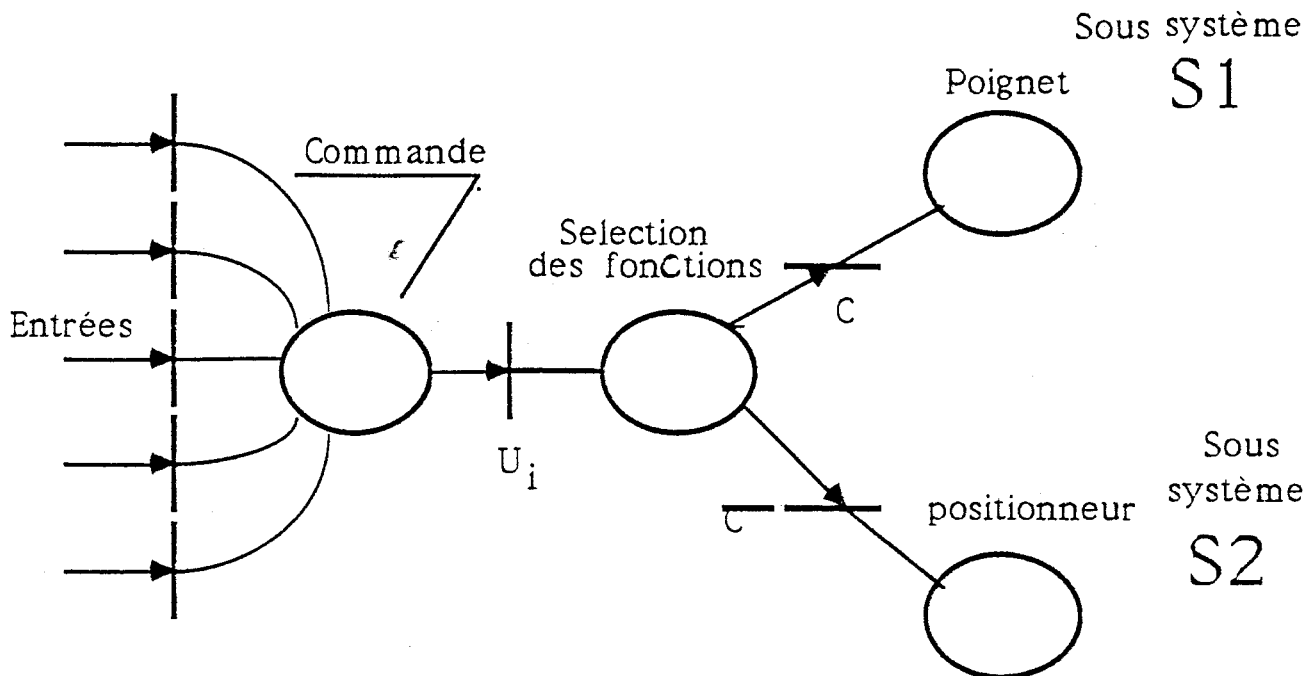


Figure /II-3/ : Représentation schématique de la commande du microtélémanipulateur

La figure /4a/ donne la liste des capteurs ou éléments de contrôle et indique leurs fonctions respectives.

L'ensemble des actions décrites par les actionneurs ou éléments de puissance et leurs mouvements respectifs sont regroupés dans la figure /4b/.

ELEMENTS DE CONTROLE		
ENTREES		
CAPTEURS	FONCTION	AGIT SUR S/SYSTEME S1/S2
AU	Arrêt d'urgence	S1 et S2
r1 r2	butées de fin de course pour RY	S1
Tcn1 Tcn2	butées de fin de course pour TCX	S1
Fch1 Fch2	butées de fin de course pour To	S1
Fcv1 Fcv2	butées de fin de course du Verin sécurité	S1 et S2
Rp	bouton de reprise après arrêt	S1/S2
d	demande d'évolution dans le graphe	S1/S2
COM	Commutation PORTEUR ou POIGNET	S1 + S2
m	mi=Ci-lecture i	S1/S2
ai	Info. Capteurs Proximétrie	S1/S2
ie	information externe interruptive	S1/S2



Figure /4a/ : Liste des entrées.



ELEMENTS ACTIONNEURS				
SORTIES				
(DDL)	Nom ACTIONNEUR	VARIABLE	FONCTION	S/SYSTEME
TCX	TCX+, TCX-	$\phi$	translation sur sur le rail	S1
RY	RY+, RY-	$\theta$	rotation/Y orientation du poignet	S1
RO	RO+, RO-	$\gamma$	rotation propre de l'instrument	S1
TX	TX+, TX-	x	translation du Porteur(X)	S2
TY	TY+, TY-	y	translation du Porteur(Y)	S2
TZ	TZ+, TZ-	z	translation du Porteur(Z)	S2
TS To	TS+, TS- To+, To-	Ts $e$	Retrait de l'outil Translation " "	S1



Figure /4b/ Liste des sorties

## 2-2 CONDITIONS D'EVOLUTION ET EQUATIONS DE SORTIE

Le graphe de la figure /2a/ est paramétré. Nous avons donné en annexe /2/ les différentes conditions d'évolution et les équations de sortie liées aux étapes. Ce graphe est couplé unidirectionnellement à celui de la figure 2b qui représente la partie sécurité du système.

## 3 - IMPLANTATION DU SYSTEME DE COMMANDE DU PROTOTYPE

Vu le nombre important d'E/S et par souci de modularité et d'évolution du système de commande, nous avons choisi une logique programmée. Elle est réalisée autour d'une carte maitresse "Apple II" possédant plusieurs slots, qui peuvent être étendus à plusieurs dizaines d'E/S par slot.

### 3-1 OBJECTIFS

Les principaux objectifs de la commande sont:

- commande de la partie opérative en mode "télémanipulé";
- possibilité d'opérer en automatique pour certaines tâches;
- bonne gestion de l'interface Homme/Machine.

### 3-2 CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES

#### 3-2-1 CONTRAINTES ECONOMIQUES

Les contraintes économiques concernent le choix des divers éléments et équipements de la chaîne; ceux-ci doivent être standard et économiques, et doivent remplir leurs fonctions avec une défaillance réduite.

#### 3-2-2 CONTRAINTES ERGONOMIQUES

Les contraintes ergonomiques concernent l'utilisation de la machine qui doit présenter:

- une souplesse d'utilisation;
- des protections contre les fausses manoeuvres: elle doit être munie d'un dispositif de sécurité efficace.

Ainsi nous avons choisi pour la commande des actionneurs du porteur un module de commande programmable de chez Microcontrôle. Cet indexeur programmable appelé "IP 28" (présenté en /NOTICE IP28/) est connecté au calculateur-maître par l'intermédiaire d'une liaison série standard RS-232 (vitesse d'échange 9600 Bds).

### 3-3 CHOIX DE L'ORGANE DE PILOTAGE

Ce microtélémanipulateur interviendra principalement en mode "téléopération". L'Homme se trouve alors constamment couplé à la machine, il utilise ses moyens "capteurs" et ses facultés intellectuelles afin de prendre la décision pour ajuster les directives à envoyer au processus (consignes élémentaires, trajectoires...).

Parmi les moyens d'action de l'opérateur, qui lui permettent de dialoguer avec sa machine, on peut citer les organes de pilotage suivants:

- Un joystick à trois axes perpendiculaires avec commutation (aiguillage Porteur/Poignet).
- Un minibras-maître à retour d'effort.
- La voix de l'opérateur.

Ce moyen de pilotage doit permettre au microtélémanipulateur de fournir des déplacements au niveau de l'outil, semblables aux gestes du chirurgien.

L'organe idéal pour accomplir ces tâches est vraisemblablement le minibras-maître à retour d'effort (Figure 5); malheureusement ce produit n'existe pas actuellement sur le marché. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur un joystick à trois axes perpendiculaires et sur un potentiomètre rotatif pour l'orientation du bec du vitréotome (Figure 6).

En effet, ce composant est choisi pour les raisons suivantes:

- peu onéreux: coût réduit;
- commodité d'utilisation: peu encombrant, portable, permettant à l'opérateur de se placer dans la meilleure position d'observation possible.

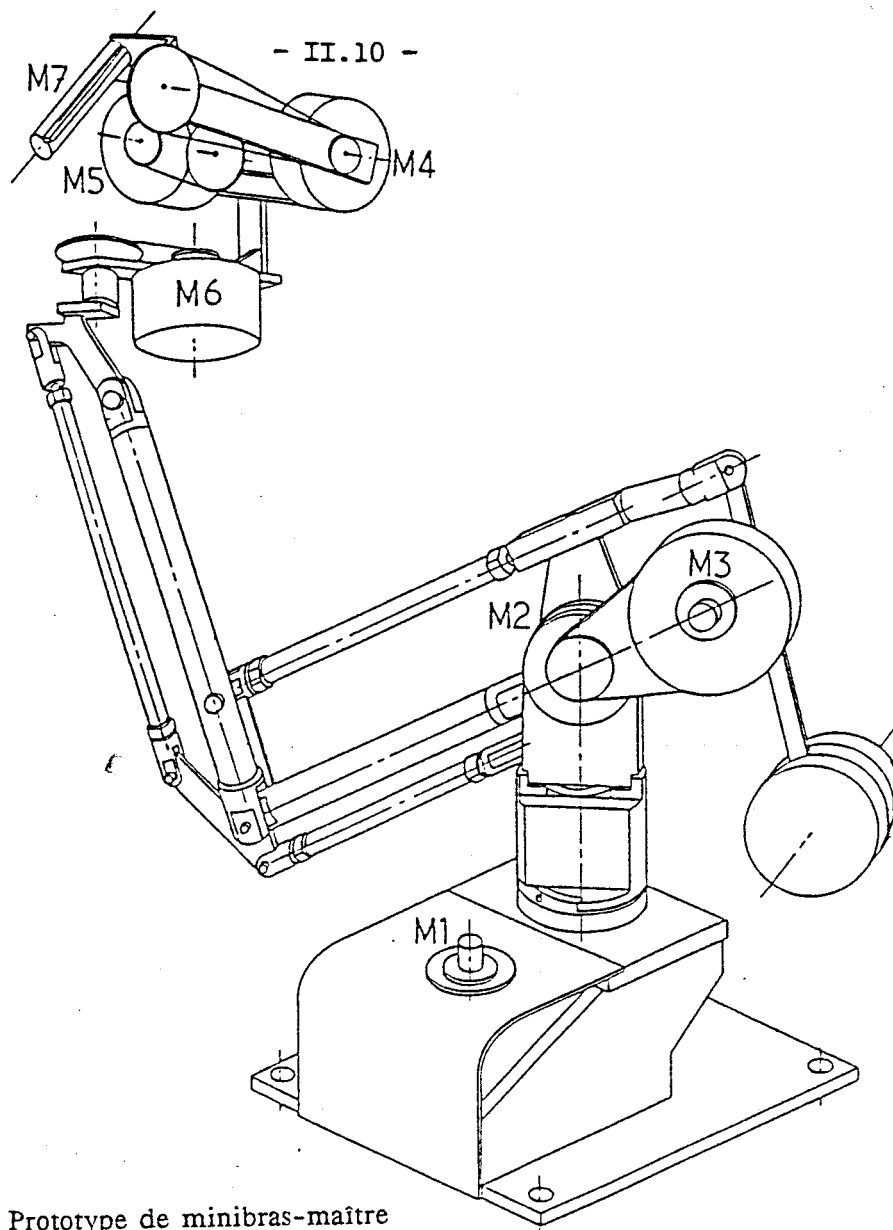


Figure /II-5/ : Prototype de minibras-maitre  
du Commissariat de l'Energie  
Atomique (C.E.A.).

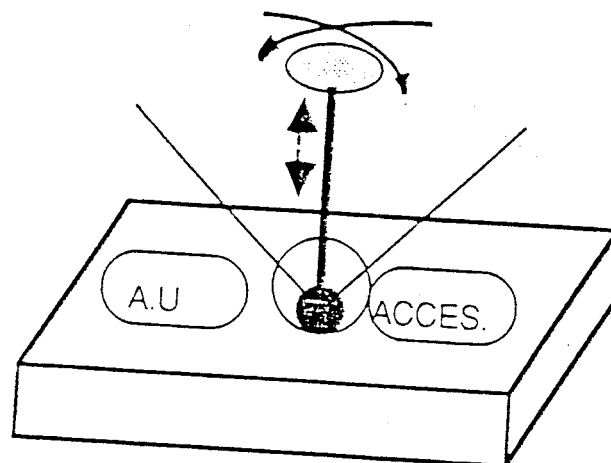


Figure /II-6a/ : Schéma du Joystick utilisé  
(A.U: Arrêt d'Urgence; Acces:  
Accessoires de contrôle)



### 3-4 ARCHITECTURE MATERIELLE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE

Dans le schéma de la figure /7/, on retrouve l'ensemble des éléments constituant la partie Hardware (unité centrale, les unités E/S, les différents interfaces, le joystick, le microphone, le clavier, la visualisation, la synthèse vocale et les unités de traitement).

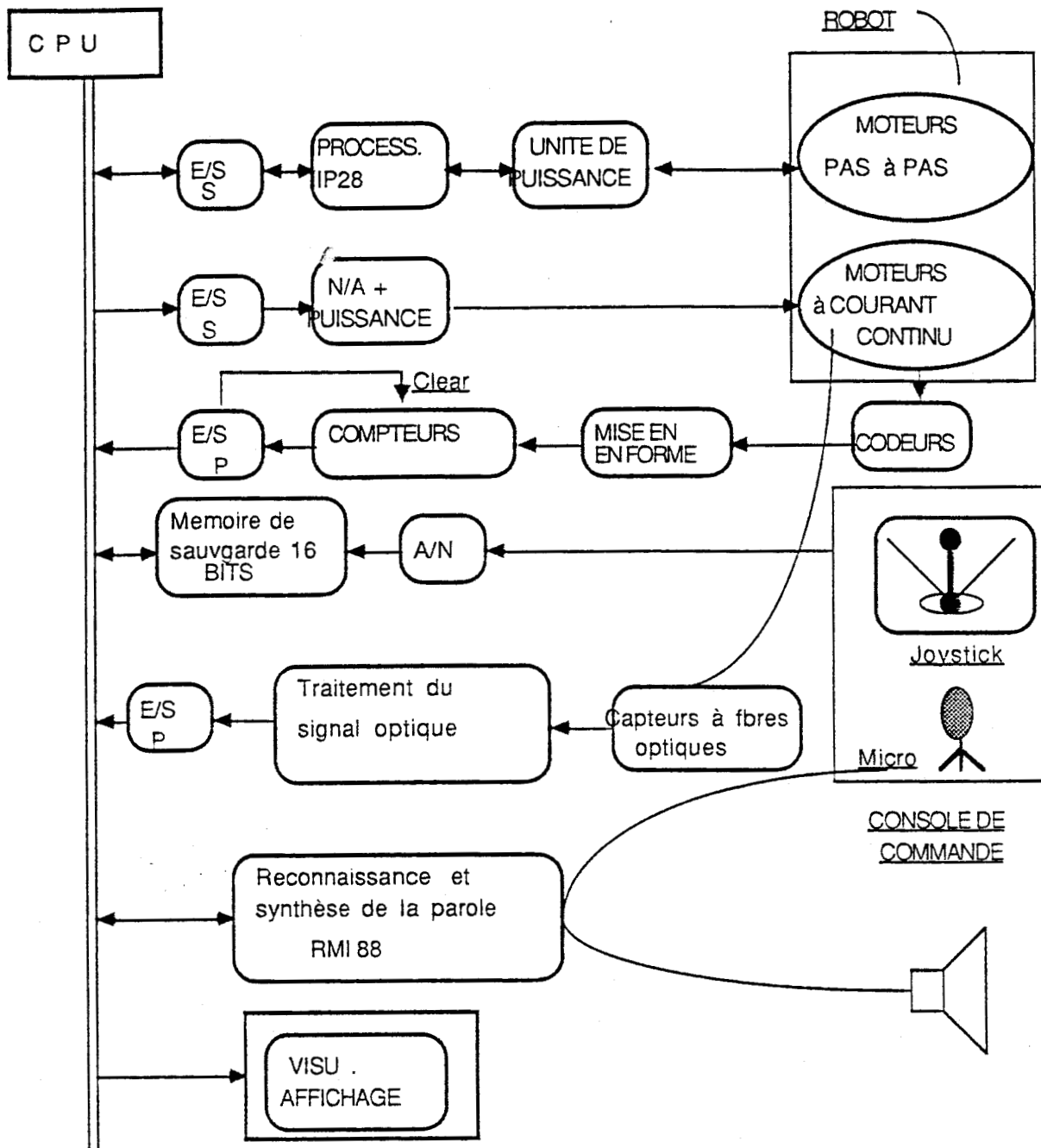


Figure /II-7/ : Architecture matérielle de la commande du microtélémanipulateur.



### 3-5 ROLE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS

La configuration de la commande du prototype est celle donnée par le schéma de la figure /7/.

- Le coeur du système est constitué par un microordinateur Apple. Celui-ci est chargé de lire les consignes du système maître et de les distribuer au sous-système S1 et S2 (S1: Moteurs à courant continu; S2: Moteurs pas à pas).

- Le sous-système S2 est constitué d'un processeur IP 28, de chez Microcontrôle. Il dialogue avec la carte mère par l'intermédiaire d'une liaison série standard RS-232 à la vitesse de 9600 bits/s. L'IP 28 émet sur la ligne un écho sur chaque caractère reçu et il renvoie un message compte-rendu en fin de transmission ou de réception. Son rôle à la suite de la réception d'une commande est de distribuer les consignes de déplacement aux différents actionneurs.

- Le sous-système S1 commande les moteurs du poignet, ils sont à courant continu. Le processeur maître (Apple) gère lui même ces actionneurs par l'intermédiaire de cartes d'interface parallèle (circuits PIA et VIA). Il envoie les consignes sur les convertisseurs digitaux-analogiques et reçoit en retour les informations des positions réelles grâce aux codeurs optiques montés au bout d'arbre.

- C'est également le processeur maître qui gère l'interface de dialogue avec l'opérateur et le module chargé de la sécurité.

Nous avons étudié et mis en oeuvre deux types de commande de microtélémanipulateur en mode téléopération:

- Commande en vitesse en fonction des positions du joystick;(P/V). Dans ce cas, le joystick est à rappel médian, grâce aux ressorts de rappel.

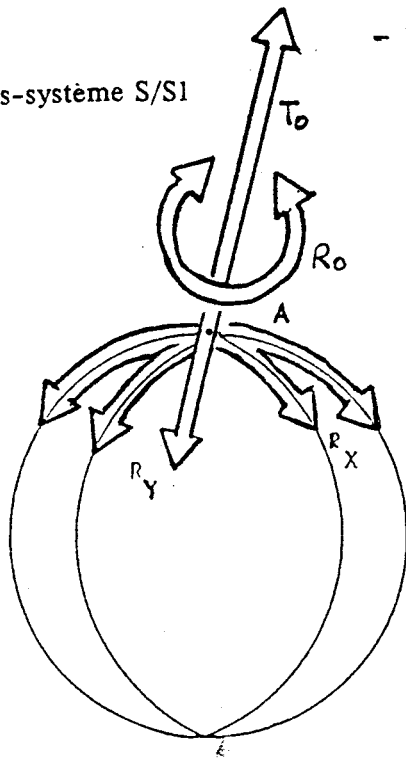
- Commande en position en fonction des positions du joystick(P/P). Le joystick est sans médian.

#### 4 - COMMANDE EN VITESSE (P/V)

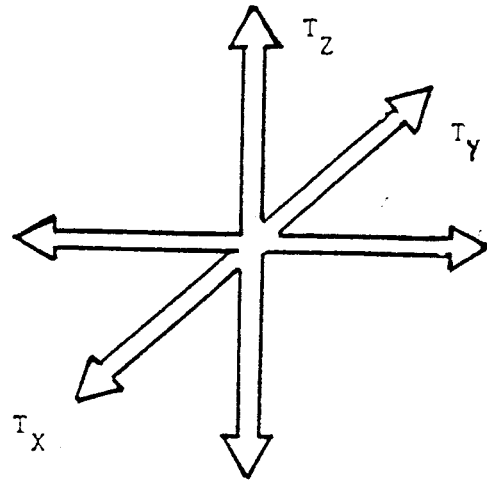
Schématiquement, le microtélémanipulateur peut être représenté par les deux sous-ensembles fonctionnels de la figure /8/.

Sous-système S/S1

Sous\_système S/S2



POIGNET + PORTEUR



PORTEUR <sup>ou</sup> POSITIONNEUR

Figure /II-8/ : Les deux sous-systèmes fonctionnels du microtélémanipulateur

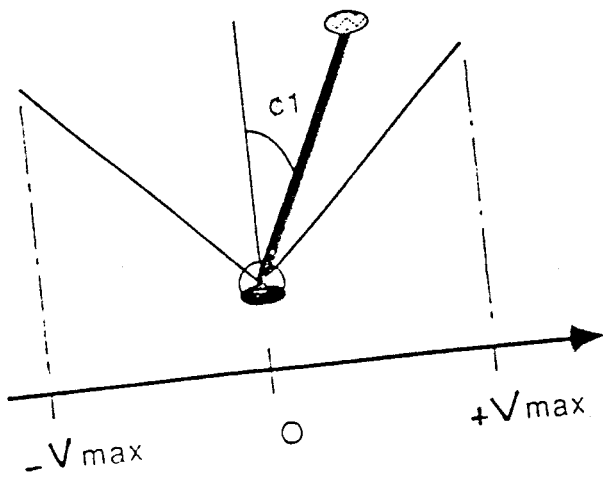
La motorisation est assurée par des moteurs à courant continu pour les mouvements TCX, TO et RO et des moteurs pas à pas pour les mouvements RY, TX, TY, et TZ.

Nous avons adopté une commande proportionnelle au niveau de l'organe d'entrée.

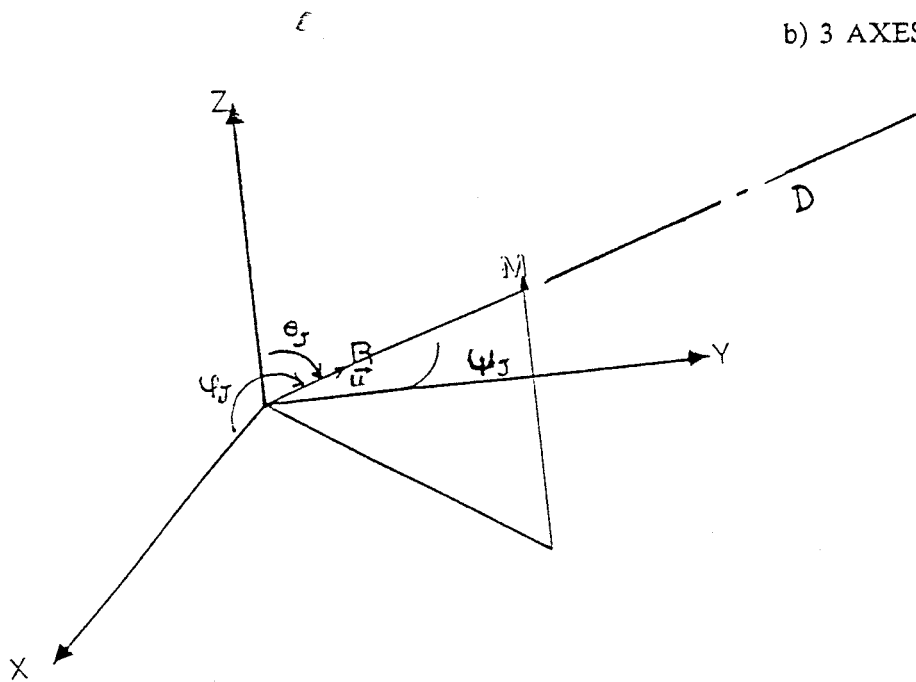
L'organe maître transforme un signal issu de l'opérateur en une tension exploitable par l'ordinateur.

Les déplacements créés sur le joystick et recopiés par le système esclave, définissent à chaque instant (Figure 9):

- une direction D;
- un sens (vecteur directeur  $\vec{U}$ );
- des vitesses de déplacement (composantes du vecteur vitesse  $\vec{V}$ )



a) UN AXE



b) 3 AXES

Figure /II-9/ : Codage des déplacements des axes du Joystick



#### 4-1 TRANSFORMATION DES COORDONNEES

La commande en vitesse est un commande en boucle ouverte vis à vis du calculateur (Figure 10): le calculateur reçoit les consignes de l'opérateur, il les tranforme, puis il les applique aux actionneurs. L'asservissement en vitesse de chaque axe est réalisé en analogique grâce à une carte d'asservissement réalisée au laboratoire (Annexe 2).



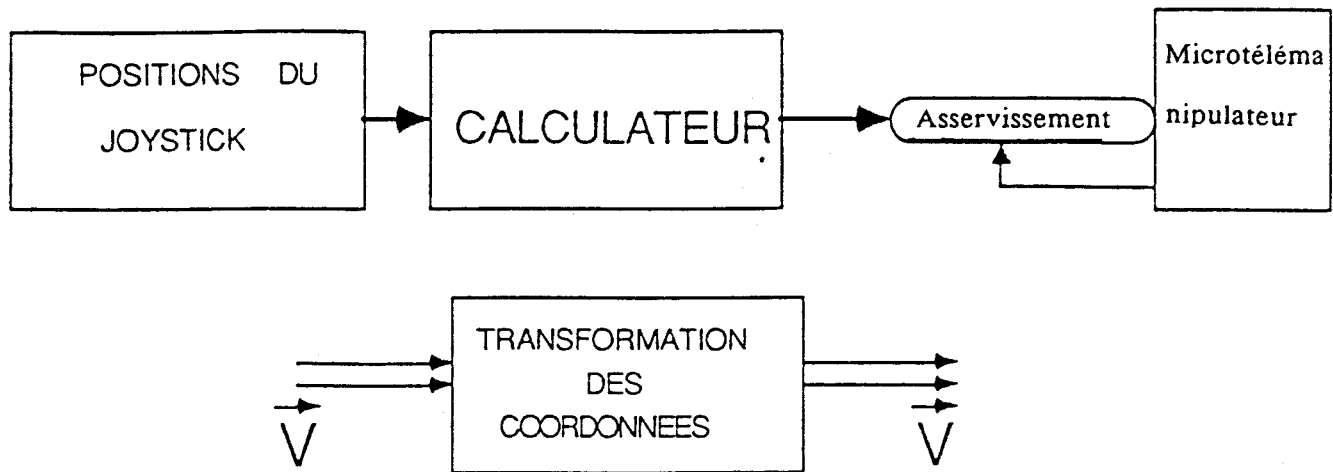


Figure /II-10/ : Synoptique de la commande en Vitesse

Soient  $X_j$ ,  $Y_j$ ,  $Z_j$ ,  $V_{xj}$ ,  $V_{yj}$ ,  $V_{zj}$  les valeurs des élongations et les vitesses correspondantes relatives aux axes X, Y, et Z du joystick (selon la décomposition de la figure 9a);

Soit T la période d'échantillonnage du signal, la vitesse sur chaque axe est déterminée par:  $Vd_j = \frac{d_j}{T}$

Avec:  $d = X, Y$  ou  $Z$  ;  $j = \text{Joystick}$

Le calcul des coefficients directeurs de la droite ainsi créée s'obtient facilement au moyen des relations suivantes:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta_j) &= \frac{\sqrt{(\rho_j^2 - Z_j^2)}}{Z_j} ; & \operatorname{tg}(\phi_j) &= \frac{\sqrt{(\rho_j^2 - X_j^2)}}{X_j} \\ \operatorname{tg}(\psi_j) &= \frac{\sqrt{(\rho_j^2 - Y_j^2)}}{Y_j} ; & \text{avec } \rho_j &= \sqrt{(X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2)} \end{aligned}$$

Ce calcul fournit les composantes du vecteur directeur  $\vec{U}$

$$\vec{U}^T = [ \operatorname{tg}(\theta_j) , \operatorname{tg}(\phi_j) , \operatorname{tg}(\psi_j) ]$$

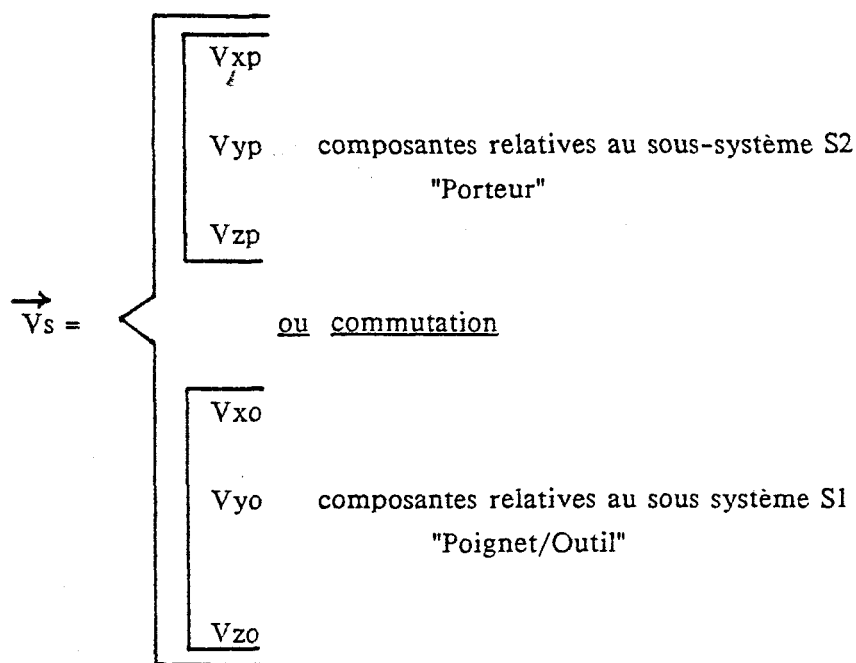
On définit alors un vecteur consigne instantané, de vitesse  $\vec{V}_c$  dont les composants sont les vitesses instantanées de chaque axe du joystick.

Il convient ensuite de transformer ces consignes pour former le vecteur de vitesse de sortie  $\vec{V}_s$ , puis de les envoyer au système opérateur afin d'obtenir les déplacements effectifs souhaités.

Il existe une relation linéaire entre le vecteur d'entrée  $\vec{V}_c$  et le vecteur de sortie  $\vec{V}_s$  à envoyer aux actionneurs du processus s'écrivant:

$$\vec{V}_s = F \vec{V}_c$$

avec: F une matrice (3,3) à coefficients constants.



#### 4-2 ARBRE DE PROGRAMMATION

La représentation arborescente de la figure /11/ donne le mécanisme du traitement de la commande incrémentale réalisée. Après un module d'initialisation générale (mise à l'origine de tous les éléments du système), on commence le traitement duquel on ne sort que sur une condition d'arrêt (arrêt d'urgence ou volontaire).

La procédure "traitement" est constituée par un ensemble de sous-modules dont l'exécution est conditionnée par les structures de contrôle suivantes:

- <1> Tant que le calcul donne  $\vec{V}_c = \vec{0}$  (il n'y a pas d'ordre de déplacement):
  - faire l'acquisition d'un paquet de données (lecture du joystick);
  - calculer  $\vec{V}_c$ ;
- <2> Vérifier les butées de fin de course;
- <3> Prendre en compte l'état de la commutation;
- <4> Calcul de la transformation  $(\vec{V}_c / \vec{V}_s)$ ;
- <5> Affectation des sorties;
- <6> Recommencer au début du programme <1>.

#### 4-3 LANGAGE DE PROGRAMMATION

La procédure de programmation est essentiellement basée sur une série de chaînes de mots et de traitement de modules sélectionnés.

Nous avons effectué la programmation en langage FORTH qui est un système extensible fondé sur une structure arborescente de faibles dimensions, directement accessible au programmeur /SALM 83/.

Le langage FORTH est un langage compilé. Il permet d'appeler des routines écrites en code machine. Ceci permet un gain de vitesse de traitement très appréciable (proche du code machine). D'autre part, ce langage structuré est considéré comme un langage évolué, il offre presque les mêmes avantages que ce dernier:

- la génération de programmes structurés très modulaires répondant aux exigences de la maintenance;
- la création d'un vocabulaire de mots de haut niveau répondant à un besoin spécifique;
- la création aisée des routines d'E/S adaptées aux modules à connecter.

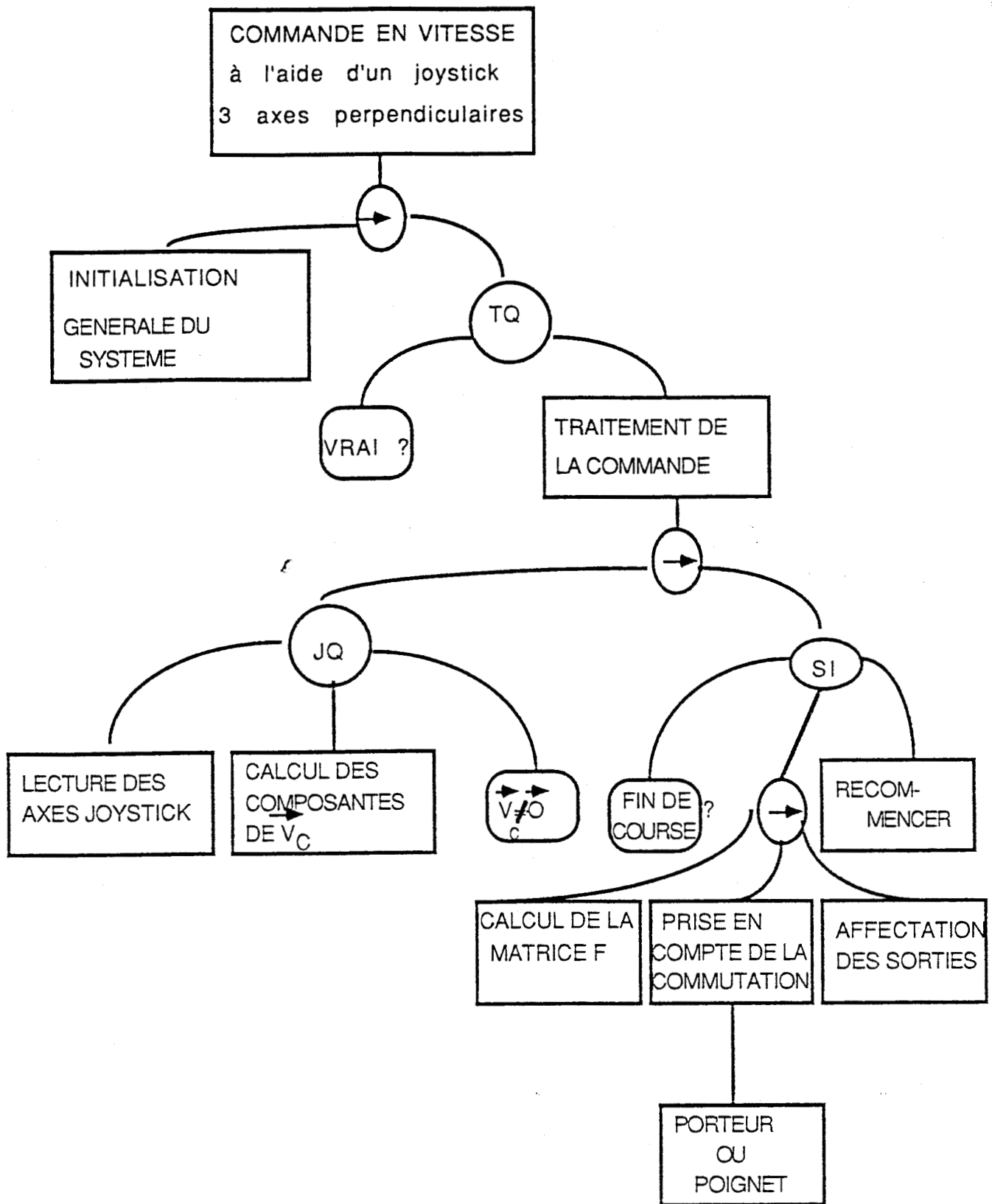


Figure /II-11/ : Procédure de traitement  
de la commande incrémentale

## 5- EVALUATION DES PERFORMANCES DU MICROTELEMANIPULATEUR COMMANDE EN VITESSE A L'AIDE D'UN JOYSTICK

### 5-1 CONTEXTE DES ESSAIS

La réalisation du système de micromanipulation a pour but principal de permettre des interventions avec une précision très accrue par rapport à celle obtenue par la main humaine, toutefois l'introduction d'un appareil de micromanipulation entre l'opérateur et l'instrument a souvent comme conséquence d'élever la durée de l'opération.

La commande en vitesse a servi pour l'évaluation des performances du microtélémanipulateur (travaux de C.DIAZ /DIAZ 85/) dans les tâches suivantes:

- suivi de trajectoire;
- insertion tige/cylindre.

Le relevé en continu des positions et efforts par le système d'intervention a permis d'extraire des données telles que les erreurs de suivi, les valeurs moyennes des vecteurs force et moments d'insertion. Ces données ont permis de comparer les performances du système de microtélémanipulation par rapport aux performances humaines.

### 5-2 PRINCIPAUX RESULTATS

Les résultats des essais expérimentaux réalisés sur le prototype (travaux de Diaz, Ben Gayed, Balivet et Thibaud) ont montré que:

- La présence du système de micromanipulation permet à des opérateurs non entraînés d'effectuer des tâches fines, d'en exécuter plusieurs à la suite sans commettre d'erreur;
- La difficulté d'intervention est rendue moins élevée, au prix d'une certaine tension ressentie par l'opérateur;
- L'allongement élevé des temps d'intervention, à type de commande équivalent, est meilleur que pour les manipulateurs industriels et peut encore être réduit;
- Enfin, le système est particulièrement robuste puisque l'imposition de facteurs d'intervention défavorables n'entraîne le plus souvent qu'une légère élévation du temps d'intervention.



## 6 COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR EN POSITION EN FONCTION DES POSITIONS DE L'ORGANE MAITRE

La commande en position permet à l'opérateur d'agir directement sur la valeur de la variable à commander, elle ne peut être utilisée que pour des manipulations locales /ESPI82/ où le poignet du microtélémanipulateur opère dans une zone restreinte; c'est le cas de l'application visée puisque le volume de travail en intervention de vitrectomie par exemple, est assimilé à une sphère de centre A (porte d'entrée de l'oeil) et de rayon le double de celui de l'oeil, soit 48mm.

### 6-1 PARTIE A COMMANDER EN POSITION

Dans le contexte de cette commande, on ne considère que la partie "poignet du microtélémanipulateur" (Figure 12)

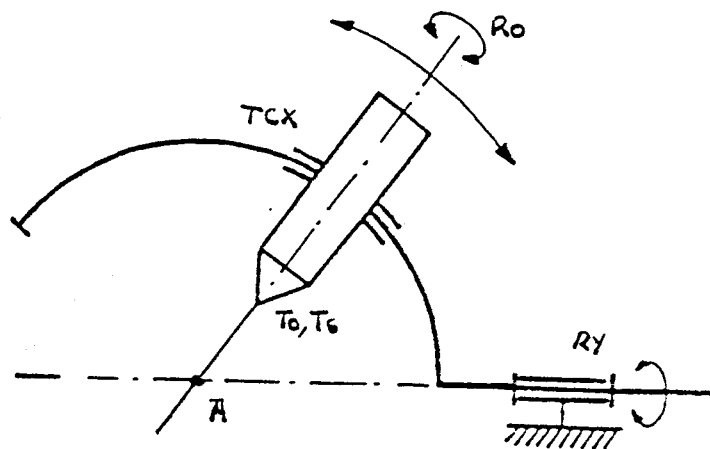


Figure /II-12/ : Structure à commander  
en position

Dans les conditions réelles d'utilisation, l'opérateur guide le bras du microtélémanipulateur vers la zone d'intervention en mode télémanipulation et le commande en vitesse (phase de positionnement dans l'espace de travail).

Après positionnement, le chirurgien commute son système de commande en mode de conduite locale, l'asservissement étant en position relative à celle du joystick.

## 6-2 LES TACHES CONCERNEES PAR LA COMMANDE LOCALE DE POSITION

Il est en effet quelquefois intéressant de travailler en position notamment pour les opérations se déroulant près des zones sensibles à éviter: cas de la rétine en vitrectomie ou de vaisseaux sanguins en opération de stéréotaxie, mais aussi d'autres domaines de microtélémanipulation où il y a nécessité d'un agrandissement pour l'observation de la zone de travail et d'une finesse pour l'accomplissement de la tâche.

## 6-3 PRINCIPE DE LA COMMANDE EN POSITION EN FONCTION DES POSITIONS DU JOYSTRICK

L'organe de pilotage utilisé est un joystick sans rappel médian, à l'inverse de celui utilisé dans le cas de la commande incrémentale.

Le schéma symbolique de la figure /13/ présente l'asservissement réalisé:

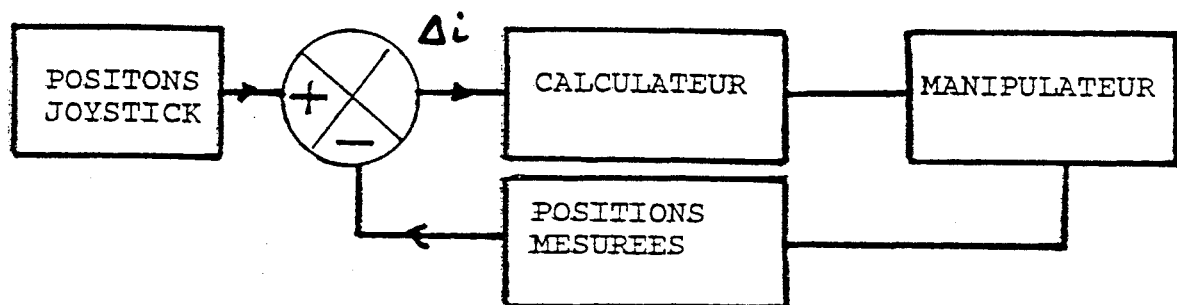


Figure /II-13/: Schéma de l'asservissement réalisé

Au démarrage ( $t=0$ ), l'instrument se trouve pointé sur la porte d'entrée de l'oeil, perpendiculairement à la surface de celui-ci comme le montre la figure /14/.

Cela signifie que la lésion doit se trouver dans le volume du cône engendré autour de l'axe perpendiculaire à la surface d'attaque de l'oeil et passant par le point A. La hauteur  $l$  de ce cône correspond à la partie de l'instrument introduite dans l'oeil et sa base est égale à

REMARQUE:

Pendant la phase de travail, on peut envisager la possibilité de changement d'origine au niveau de l'organe maître afin de permettre l'exécution de certaines tâches spécifiques (télémanipulation de précision).

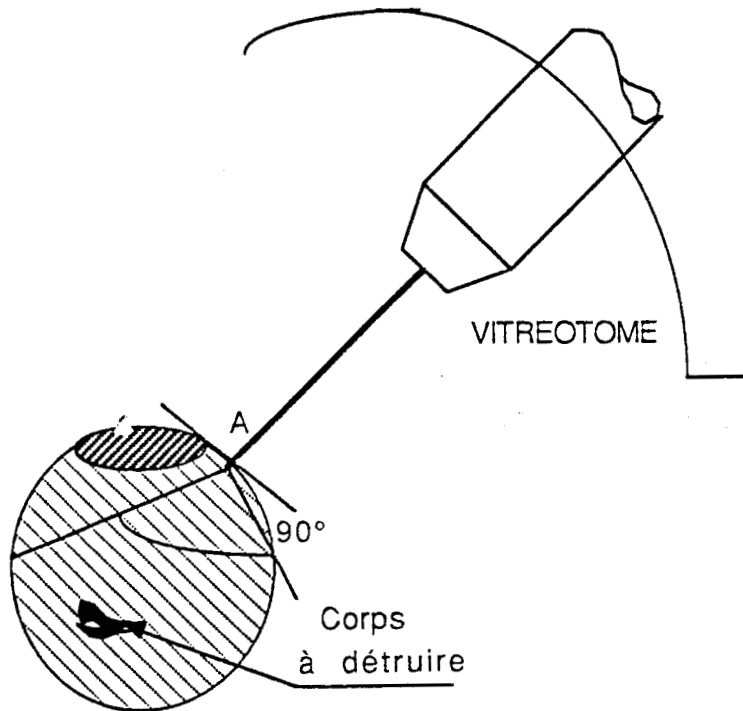


Figure /II-14/ : Positionnement en début d'opération.

6-4 TRANSFORMATION DES COORDONNEES

6-4-1 DEFINITION DES PARAMETRES AU NIVEAU  
DE L'ORGANE MAITRE

$-\phi_j, \theta_j$  et  $\rho_j$  sont les mesures absolues sur le joystick suivant les axes relatifs X, Y, et Z.

$-\phi_c, \theta_c$  et  $\rho_c$  sont les consignes (calculées) à atteindre par les actionneurs relatifs TCX, RY et TO.

$-\phi_m, \theta_m$  et  $\rho_m$  sont les mesures des positions vraies (retours codeurs).

Le repère étant prédéfini par l'opérateur.

#### 6-4-2 CALCUL DES ECARTS ENTRE LES POSITIONS DU JOYSTICK ET CELLES DE L'INSTRUMENT

$$\begin{aligned} \Delta\phi_e &= \phi_{jt} - k1. \phi_{mt-1} \\ \Delta\theta_e &= \theta_{jt} - k2. \theta_{mt-1} \\ \Delta\rho_e &= \rho_{jt} - k3. \rho_{mt-1} \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} \phi_c \\ \theta_c \\ \rho_c \end{bmatrix} = \vec{p}$$

Le schéma de la figure /15/ donne l'arbre de programmation de la commande réalisée.

#### 6-5 ROLE DU CALCULATEUR

Après une phase d'initialisation, les actions de l'ordinateur sont les suivantes:

- réception des consignes venant des diverses entrées;
- Transformation des consignes et envoi de celles-ci aux actionneurs;
- Lecture sur les codeurs des déplacements réels et leurs comparaisons aux consignes;
- Contrôle des butées de fin de courses;
- Contrôle du module capteurs de proximité;
- Visualisation des données caractéristiques, à destination de l'opérateur.

#### 7 - PROGRAMMATION

Soient:

- y1: la lecture des valeurs sur les axes du joystick considérés;
- y2: le cumul des positions vraies

$$Y_2 = Y_0 + \sum_{i=0}^N L_{ci}$$

avec Lci: Lecture instantannée du codeur i

L'erreur de position entre le maître et l'esclave est égale à  $D_{ei} = ky_1 - y_2$   
avec  $k \in \mathbb{N}^+$

$k = k_1 \cdot k_2$  : dépend du facteur d'échelle  $k_1$  entre le système maître et les positions réelles de l'esclave , et  $k_2$ : constante caractéristique de l'organe de pilotage.

— Module initialisation

:INIT.GEN

( Chargement des routines assembleurs

Initialisation des organes d'Entrée/Sortie et tests des liaisons  
f

Remise à zéro de la zone mémoire de travail

Initialisation des compteurs ) ;

— Module de traitement

: TRAITEMENT

( Tant que  $D_i = 0$ , faire:

lire le joystick (x, y, z)

lire le compteur des retours des positions

calculer  $D_i$ .

Fin de "Tant que"

Calcul des consignes

Prise en compte de l'état des butées de fin de course

Affectation des sorties non inhibées

Reboucler si pas d'arrêt (arrêt d'urgence ou volontaire) ) ;



Module d'exécution ou de commande

: ( COMMANDE.POS

INIT.GEN

TRAITEMENT ) ;

REMARQUE:

Les caractéristiques des moteurs à courant continu, sont données en annexe

/2/.

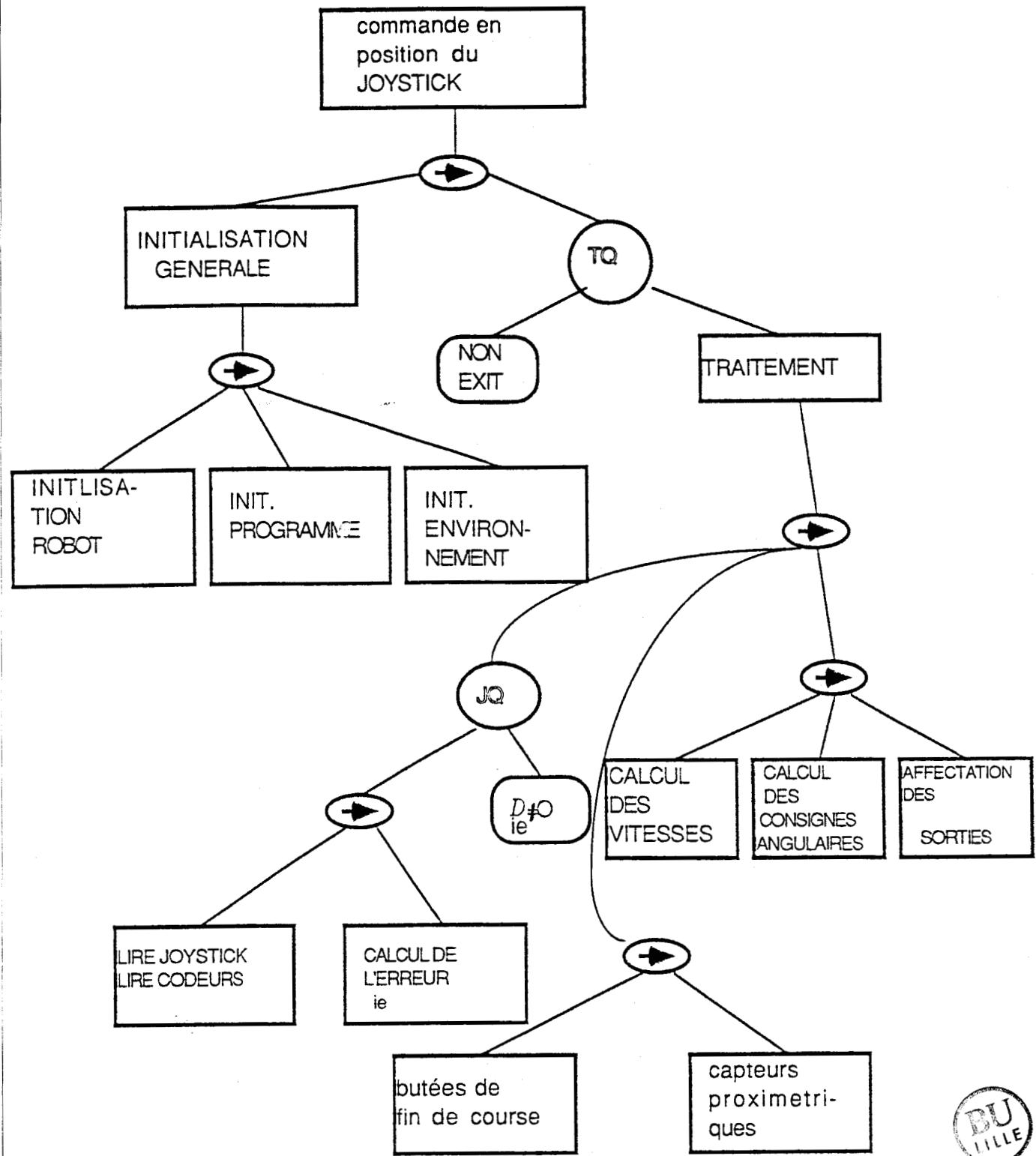


Figure /II-15/ : Procédure de traitement de la commande locale (en position)



## 8- EVALUATION DES PERFORMANCES DE LA COMMANDE EN POSITION

Nous avons procédé à plusieurs séries de télémanipulations afin de mesurer l'erreur de position commise lors de la commande en position.

Les essais se classent en deux catégories:

### 8-1 - PREMIER TYPE D'ESSAI

Nous nous sommes intéressés à la phase transitoire c'est à dire à celle concernant le démarrage du moteur considéré. A l'instant  $t=0$ , l'opérateur actionne un axe du joystick. Le geste provoque le déplacement presque instantané du moteur actionné. Le scénario est schématisé sur la figure /16/.

Le joystick est un organe sans retour d'effort, par conséquent, l'opérateur exécute son geste assez rapidement (pendant un temps  $t_n$ ), alors que le moteur commandé accomplissait la fonction de recopie avec un retard de  $kt_n$  ( $k$  est inversement proportionnel à la vitesse du moteur).

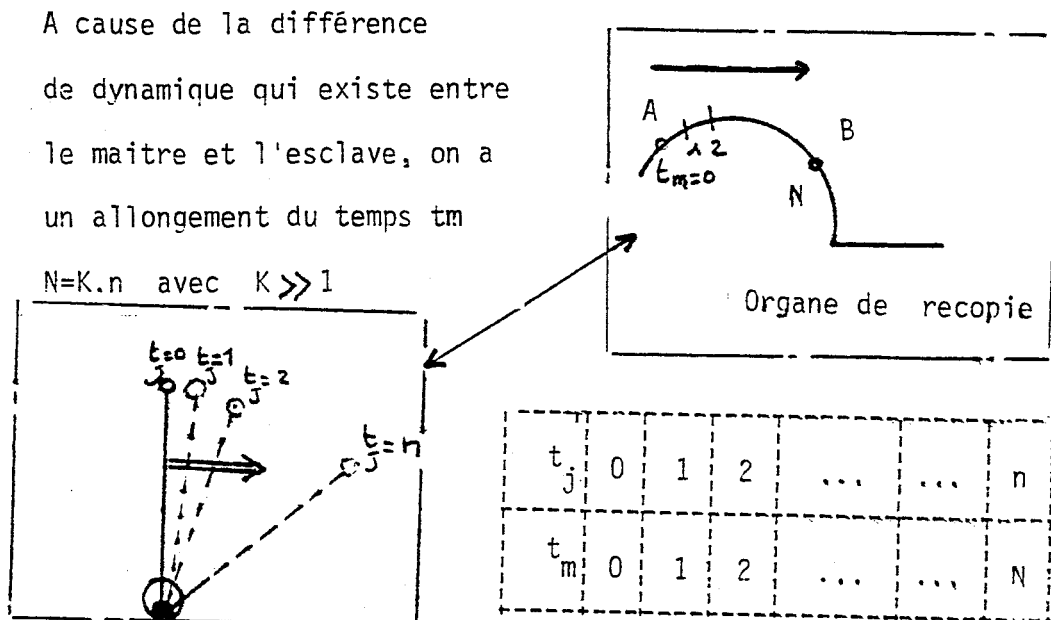


Figure /II-16/ : Scénario du premier groupe d'essai

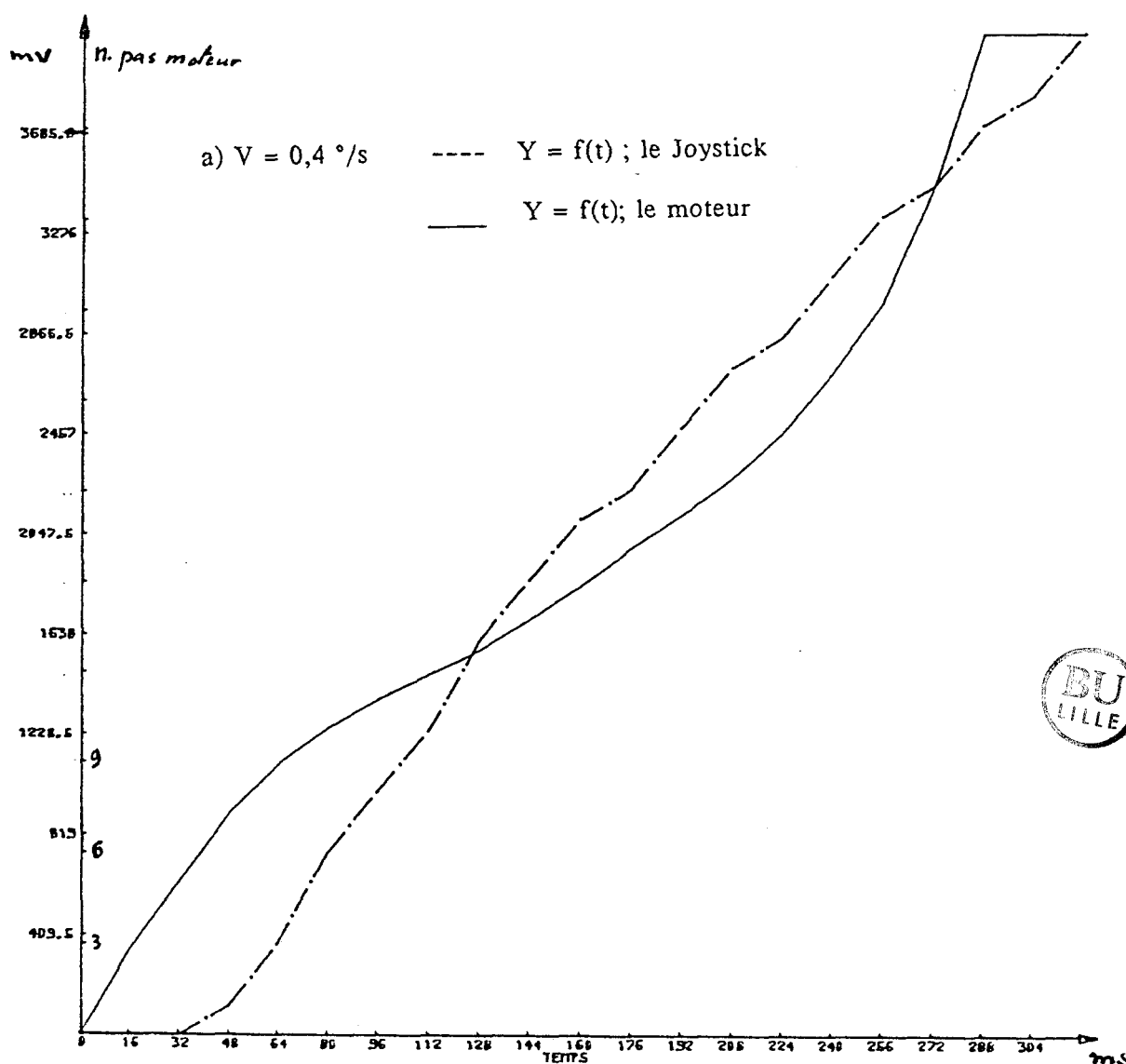
De même, nous avons noté un petit retard au démarrage qui est essentiellement dû à l'inertie mécanique et aux faibles vitesses des moteurs utilisés ( $V_{max}=12^\circ/s$ ). Pour ces essais nous avons utilisé quatre tranches de vitesse:  $V$  (en  $^\circ/s$ ) (0.4; 2; 4; 8) et nous avons mesuré les positions réelles du moteur et les positions de l'organe maître manoeuvré par un opérateur humain en fonction du temps.

Les résultats sont schématisés dans les courbes de la figure 17 (a,b,c,d). On relève en particulier trois points:

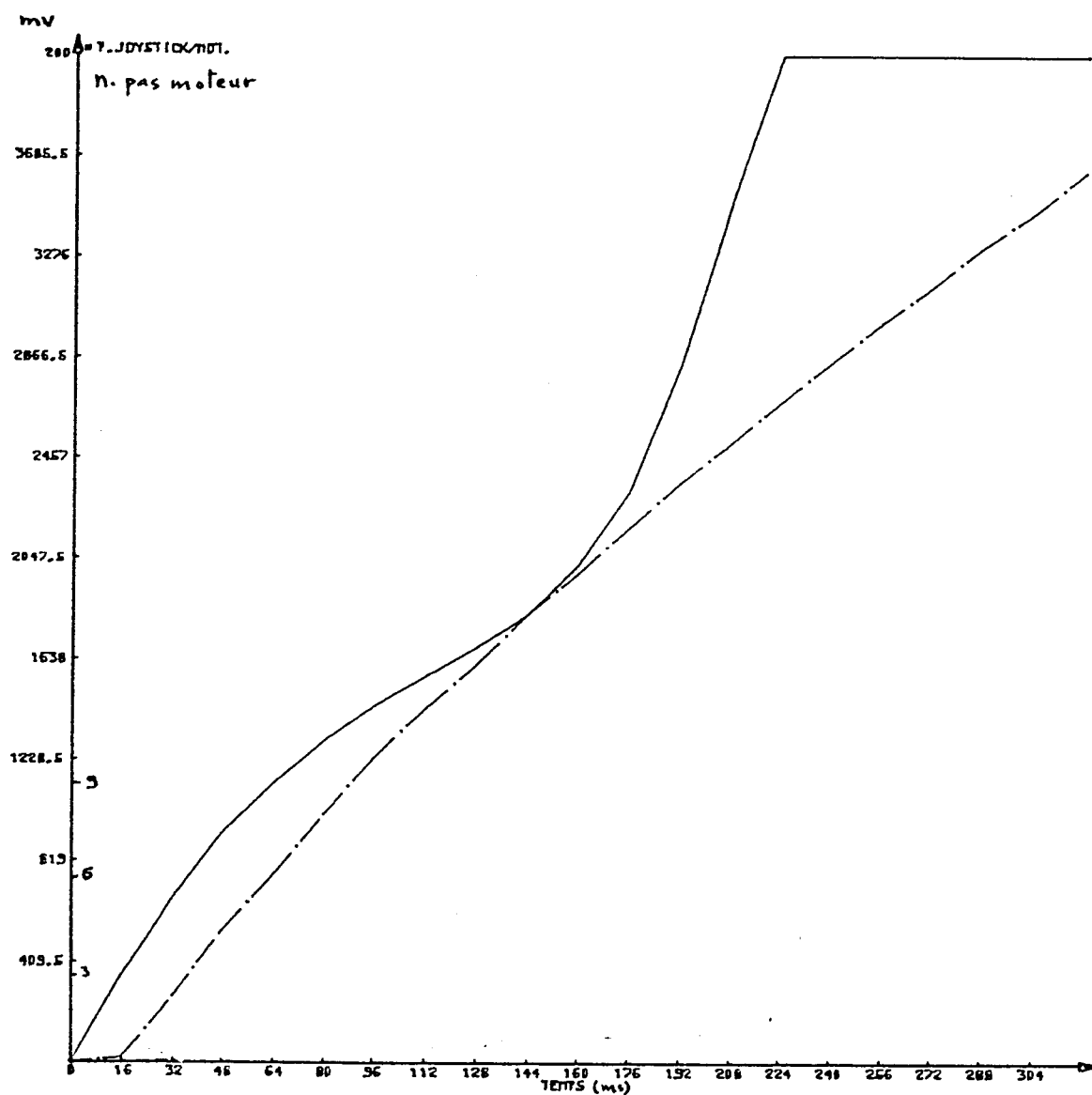
a) le moteur démarre effectivement 16 ms après le déclenchement du mouvement. Ce retard est pratiquement constant quel que soit la vitesse d'entrée.

b) il existe des grands écarts entre les déplacements des axes de l'organe maître (le joystick) et la recopie de l'esclave. Ce phénomène est observé uniquement en mode télémanipulé (pour la commande en position locale). En effet il existe une différence de dynamique non négligeable entre les gestes de "joystick manoeuvré par l'homme" et les réponses des organes actionneurs. Cette dynamique est d'autant plus grande que les vitesses de fonctionnement sont faibles.

c) le temps de réponse est nettement meilleur lorsque les vitesses de fonctionnement sont élevées.





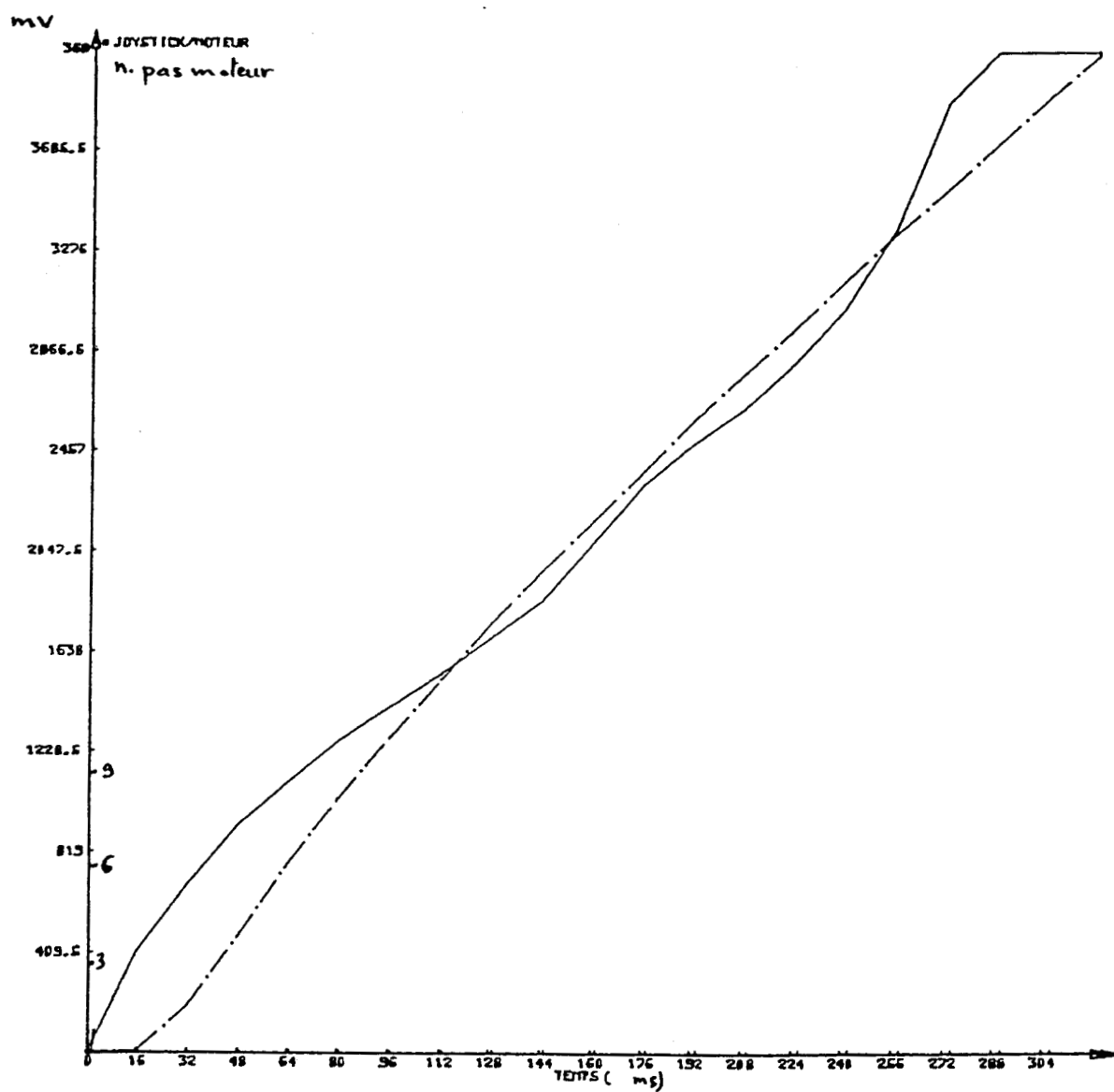


b)  $V = 2^\circ/s$

-----  $Y = f(t)$  ; le Joystick

\_\_\_\_\_  $Y = f(t)$ ; le moteur





c)  $V = 4^\circ/s$

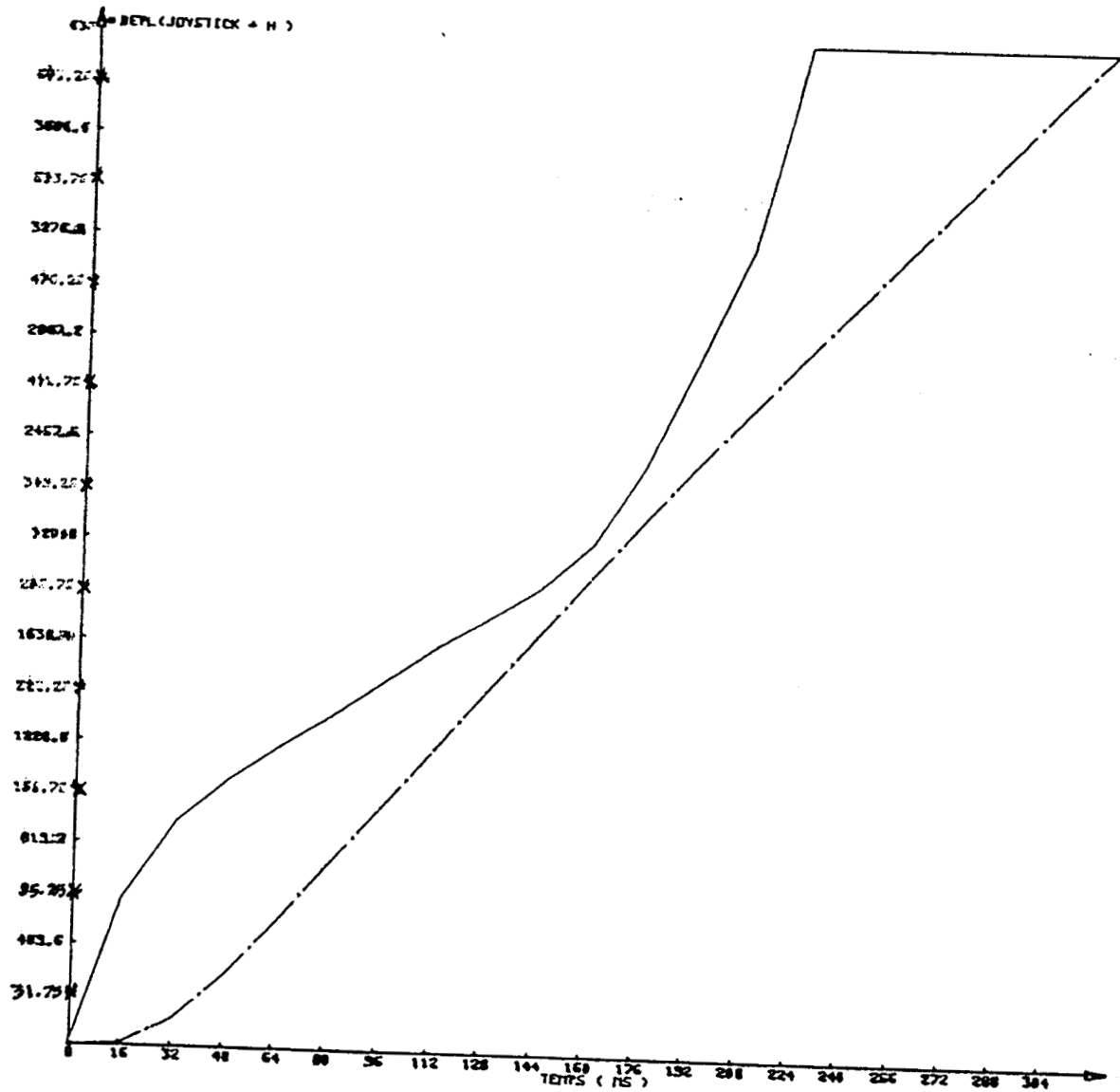
-----  $Y = f(t)$  ; le Joystick

———  $Y = f(t)$ ; le moteur



ECHELLE :

{ \* h. pas codeur  
- mV



d)  $V = 8^\circ/s$

-----  $Y = f(t)$  ; le Joystick

\_\_\_\_\_  $Y = f(t)$ ; le moteur



Figure /II-17/ : Réponse d'un moteur(axe Tcx) du microtélémanipulateur piloté par le Joystick

## 8-2 - DEUXIEME TYPE D'ESSAI

Nous avons commandé en automatique un axe asservi en position. Les manipulations consistent, après une phase d'apprentissage de deux points extrêmes A et B (Figure 18), à déclencher un déplacement automatique entre ces deux points (10 cycles); et on note à chaque fin de cycle l'erreur commise.

Les courbes de la figure /19/ représentent l'erreur en fonction du nombre de cycles. Nous constatons que l'erreur moyenne commise pour un cycle de 8000 impulsions est de l'ordre de 8 impulsions.

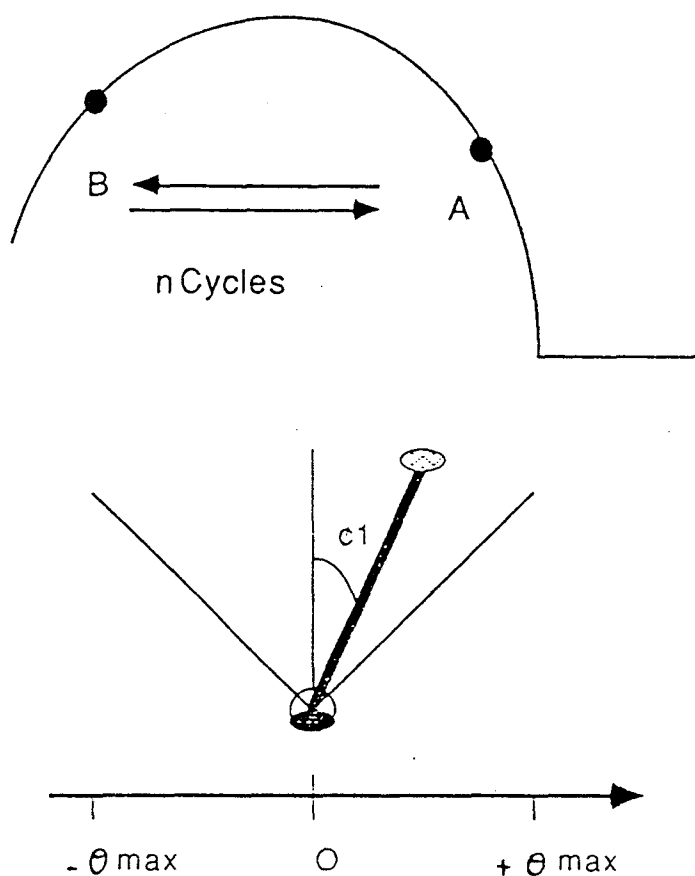
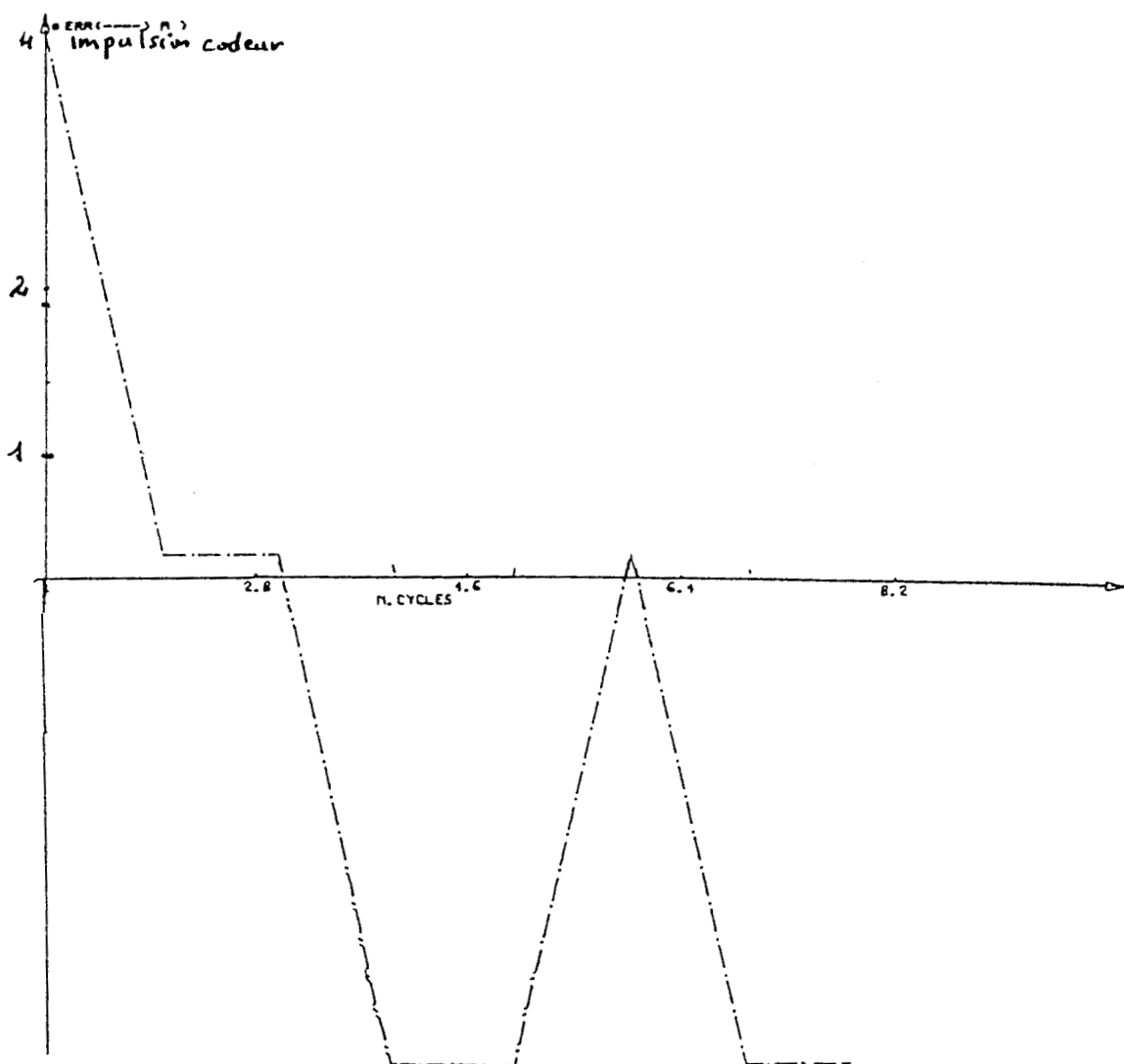


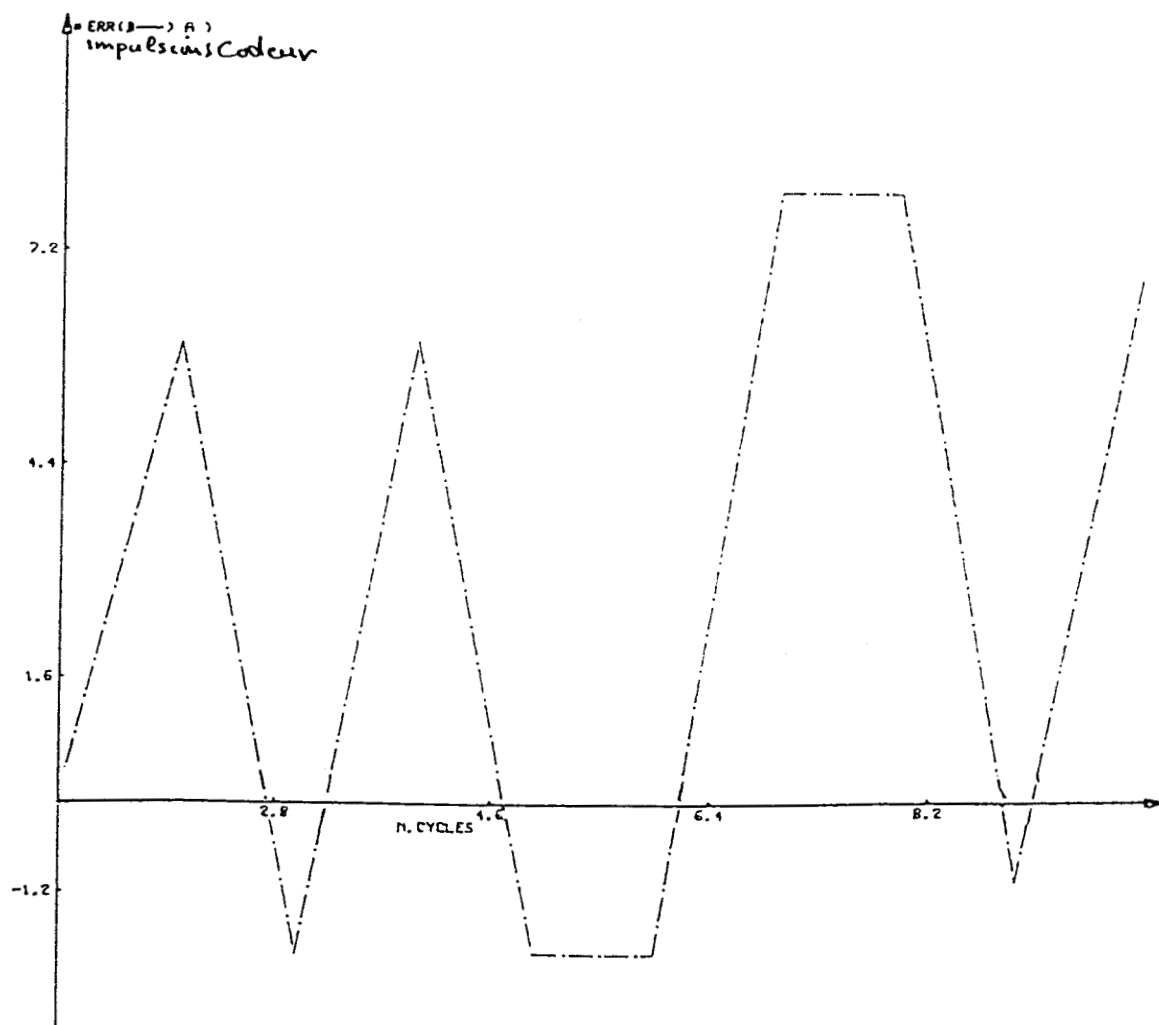
Figure /II-18/ : Evaluation des performances  
en fonctionnement cyclique



a)  $e = /A-B/ = 40770$  impulsions ; 10 cycles  
(demi course  $45^\circ$ )







b)  $e = |A-B| = 8000$  impultions ; 10 cycles  
( course de  $90^\circ$  )

Figure /II-19/ : Erreurs en fonction du nombre de cycle

### III- CONCLUSION

La conclusion de ces essais porte sur les commandes du prototype réalisées afin d'élaborer le cahier des charges de la version pré-industrielle.

- commande en vitesse et commande en position

Ces commandes ont été testées; elles présentent de très bonnes performances en mode téléopération où certaines fonctions du travail sont accomplies de façon directe ou à distance par l'intermédiaire d'un médiateur permettant de séparer poste maître/Homme du poste esclave/partie opérative avec transformation finalisée entre les deux (réduction/amplification des mouvements, des efforts, etc...).

- Par contre, l'effet de la dynamique de l'organe maître par rapport à l'esclave pendant la commande en position présente un inconvénient. Pour palier à cela, il est nécessaire de concevoir un bras maître motorisé afin de réaliser un retour d'effort, par exemple sous forme d'un frein adapté.

- De même, pour la version raffinée, il est souhaitable que le calculateur maître soit moins chargé afin d'accélérer la rapidité du traitement. Dans le chapitre suivant, nous décrirons des expériences de caractérisation de la commande du microtélémanipulateur et nous formulerons le cahier des charges ainsi que les premiers résultats concernant la conception de la nouvelle architecture hiérarchisée qui est actuellement à l'étude dans notre équipe, en collaboration avec certaines sociétés industrielles de la région.

### CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE DE CARACTERISATION DU MICROTELE-  
MANIPULATEUR EN VUE DE LA DEFINITION D'UNE NOUVELLE  
STRUCTURE DE COMMANDE POUR LE PROTOTYPE PRE-INDUSTRIEL



## CHAPITRE III

### ETUDE EXPERIMENTALE DE CARACTERISATION DU MICROTELEMANIPULATEUR EN VUE DE LA DEFINITION D'UNE NOUVELLE STRUCTURE DE COMMANDE POUR LE PROTOTYPE PRE- INDUSTRIEL

I- <u>INTRODUCTION</u>	p.1
II- <u>COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR A L'AIDE DU BRAS MAITRE MA23</u>	p.2
1- BUT DES MANIPULATIONS	p.2
2- SYNOPTIQUE DE LA COMMANDE	p.2
3- ROLE DES CONSTITUANTS DE LA COMMANDE	p.3
3-1 LES BRAS MAITRE ET ESCLAVE	p.3
3-2 LES INTERFACES DES BRAS	p.4
3-3 LES CALCULATEURS DE COMMANDE	p.4
3-3-1 MINI-ORDINATEUR SOLAR	p.4
3-3-2 MICRO-ORDINATEUR APPLE II	p.4
3-3-3 LE SYSTEME IP-28	p.5
3-4 LIAISON ENTRE ORDINATEURS	p.5
4- TRAVAIL REALISE	p.7
4-1 CARACTERISATION DU MICROTELEMANIPULATEUR	p.7
4-2 COMMANDE PAR BRAS MAITRE	p.7



III- <u>COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR PAR LA PAROLE</u> .....	p.11
1- GENERALITES .....	p.11
2- OBJECTIF DES EXPERIENCES .....	p.11
2-1 CONTEXTE DES MANIPULATIONS .....	p.11
2-2 DESCRIPTION DU BLOC OPERATOIRE .....	p.11
3- PRINCIPE DE REALISATION .....	p.12
3-1 SYNOPTIQUE DE LA COMMANDE .....	p.12
3-2 LOGICIEL .....	p.13
3-2-1 PHASE D'APPRENTISSAGE .....	p.14
3-2-2 PHASE DE RECONNAISSANCE OU DE COMMANDE .....	p.14
3-2-3 REMARQUES .....	p.15
4- EXPERIENCES .....	p.16
4-1 DETERMINATION DE LA REPOSE DU SYSTEME .....	p.16
4-2 COMPARAISON ENTRE COMMANDE MANUELLE ET COMMANDE VOCALE .....	p.16
4-2-1 COMMANDE MANUELLE .....	p.16
4-2-2 COMMANDE VOCALE .....	p.18
IV - <u>ELABORATION DE LA STRUCTURE FINALE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE</u> .....	p.19
1- ORGANE DE COMMANDE .....	p.20
2- L'ARCHITECTURE INFORMATIQUE .....	p.21



2-1 RAPPEL SUR LES STRUCTURES MATERIELLES .....	p.21
2-2 ARCHITECTURE MATERIELLE DE LA VERSION FINALE....	p.25
2-3 TOPOLOGIE DU RESEAU ADOPTE .....	p.25
3- DESCRIPTION DES DIFFERENTES CARTES .....	p.27
3-1 CARTE D'ACQUISITION .....	p.27
3-2 CARTE MOTEUR .....	p.27
3-3 CARTE DE SECURITE .....	p.28
3-4 REMARQUES .....	p.28
4- RETOUR D'INFORMATIONS .....	p.28
V- <u>CONCLUSION</u> .....	p.31



ETUDE EXPERIMENTALE DE CARACTERISATION DU  
MICROTELEMANIPULATEUR EN VUE DE L'ELABORATION D'UNE  
STRUCTURE FINALE DE COMMANDE POUR LE PROTOTYPE PRE-  
INDUSTRIEL

I - INTRODUCTION

Nous avons vu au chapitre précédent l'architecture de la partie " Hardware " de la commande et les logiciels correspondant à deux types de réalisation de la commande.

A la suite des expériences de validation, nous avons souligné les avantages et les inconvénients propres à chaque type de commande; notamment en ce qui concerne le temps de réponse et la souplesse d'utilisation de l'organe de pilotage.

Afin de s'approcher au mieux de la définition de ce qui est le cahier des charges final de la commande du microtélémanipulateur de la version pré-industrielle, nous avons effectué deux groupes d'expériences:

1) Commande du microtélémanipulateur à l'aide d'un bras maître à retour d'effort. La finalité de ces manipulations étant de caractériser les performances de chaque organe constituant la partie commande.

2) Commande du microtélémanipulateur par la parole. Le but ici réside en deux points:

- permettre l'évaluation des temps de réponse de la commande avec en plus le contrôle vocal.

- prouver l'intérêt de la commande vocale en téléopération et son application en ce qui nous concerne à la commande du bloc opératoire où le microtélémanipulateur va être installé.

## II- COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR A L'AIDE DU BRAS MAITRE MA-23

### 1- BUT DES MANIPULATIONS

Le but des manipulations effectuées au C.E.A (Commissariat de l'énergie Atomique de Saclay) sur le site de la manipulation canonique A.R.A. (Projet National d'Automatisation et Robotique Avancée), est de réaliser la commande du microtélémanipulateur par un bras maître. Une commande en position a été mise au point pour réaliser ce couplage.

### 2- SYNOPTIQUE DE LA COMMANDE

La réalisation de la commande, type maître-esclave, a nécessité l'utilisation des matériels suivants (schéma synoptique de la figure 1):

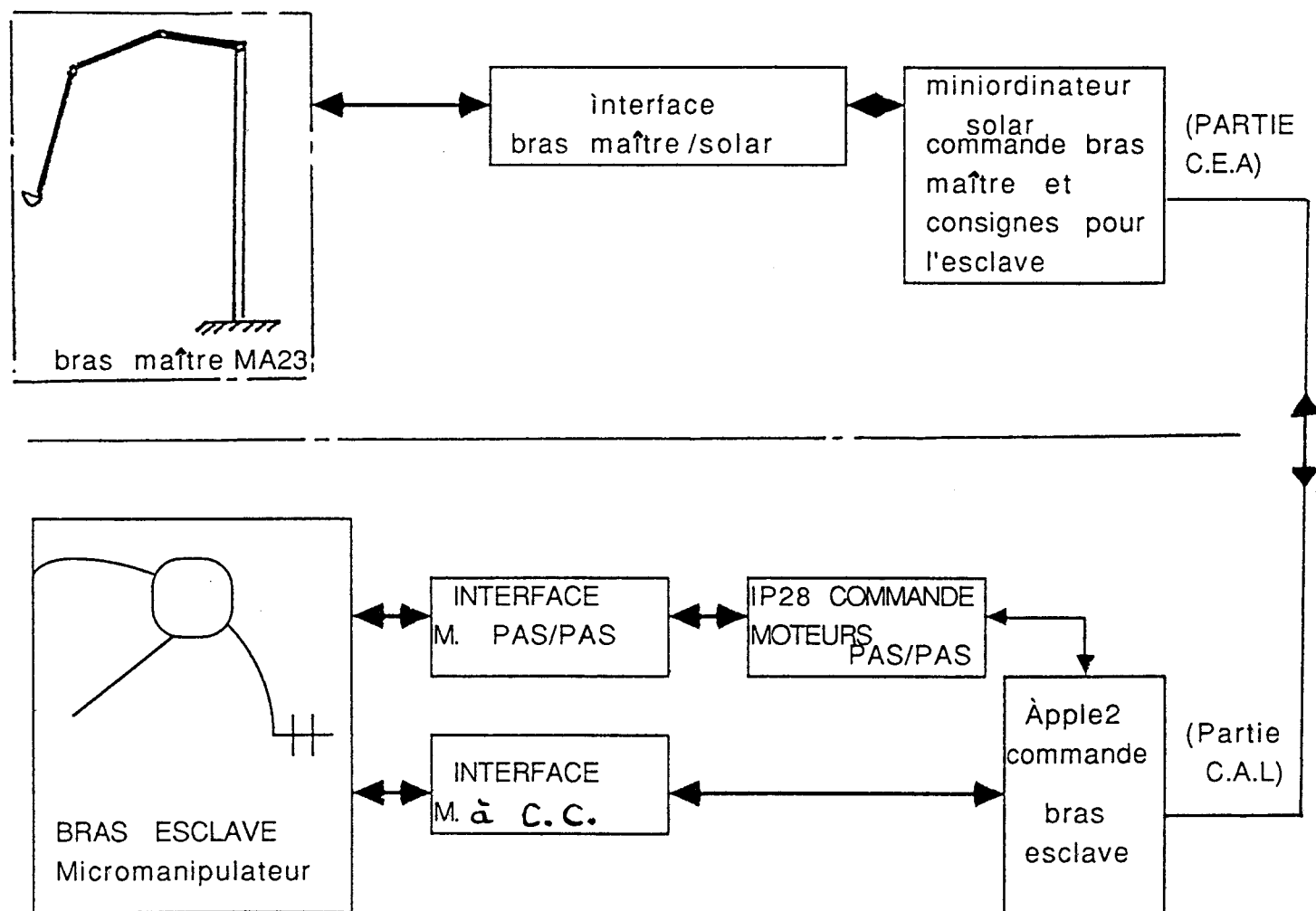


Figure /III-1/ : commande du Microtélémanipulateur par le bras-maître MA23 du C.E.A.

- III.3 -

- Bras maître MA-23 (C.E.A.)
- Interface du bras maître (C.E.A.)
- Mini-ordinateur Solar 16-75 (C.E.A.)
- Microordinateur Apple II (C.A.L.)
- Interface moteurs CC du bras microtélémanipulateur (C.A.L.)
- Interface moteurs PAS/PAS (C.A.L.-MICROCONTROLE)
- Microprocesseur IP 28 de liaison des moteurs pas à pas du bras microtélémanipulateur (C.A.L.-MICROCONTROLE)
- Bras esclave: microtélémanipulateur chirurgical (C.A.L.).

3- ROLE DES CONSTITUANTS DE LA COMMANDE

On peut distinguer trois types de constituants:

- \_ Les bras maître et esclave,
- \_ Les interfaces des bras,
- \_ Les calculateurs de commande.

3-1 LES BRAS MAITRE ET ESCLAVE

Le bras maître est piloté par l'opérateur humain. Son rôle est donc de "suivre" les déplacements fournis par l'opérateur et de restituer l'effort, réel ou simulé, dû au bras esclave. Le bras maître utilisé était un MA 23 de la société La Calhene, conçu pour les interventions dans le domaine nucléaire.

Le bras esclave reproduit les mouvements du bras maître. Dans le cas qui nous intéresse, cette reproduction n'est pas une copie pure car les "calculateurs d'interface" transforment les ordres du bras maître en des ordres adaptés au bras esclave.

L'étude de cette dissymétrie est l'un des objectifs de cette manipulation.

### 3-2 LES INTERFACES DES BRAS

Les interfaces des bras ont pour fonction de transformer les ordres calculateurs en des ordres analogiques qui pilotent les bras (fonction d'interface de puissance). Ils assurent aussi la retour des informations des codeurs montés sur les bras.

### 3-3 LES CALCULATEURS DE COMMANDE

#### 3-3-1 MINI-ORDINATEUR SOLAR

Ce calculateur a deux tâches principales:

- Piloter le bras maître pour assurer le retour d'effort;
- Recueillir les informations de déplacement du bras maître pour en déduire les consignes du bras esclave.

Les acquisitions des informations sur le bras maître se font à travers l'interface de commande. Les positions des différents degrés de liberté du bras sont transformées dans un repère normalisé (transformateur des coordonnées), pour obtenir la position de la poignée de commande, les nouvelles coordonnées sont alors retransformées pour en déduire les déplacements sur le bras esclave; les consignes sont alors envoyées à l'Apple II.

Dans notre cas, le retour d'effort sur le bras maître correspond à la différence de déplacement et de vitesse du bras esclave par rapport au bras maître, et donc à l'asservissement inverse du précédent.

#### 3-3-2 MICRO-ORDINATEUR APPLE II

Le rôle du microordinateur Apple II est de réceptionner les consignes envoyées par le Solar et de les transformer avant de les envoyer, d'une part aux cartes d'asservissement des moteurs à courant continu, d'autre part au processeur IP 28 qui les distribue aux moteurs pas à pas.

Ses actions sont donc les suivantes:

- Réceptionner les consignes venant du Solar;
- Séparer les consignes du type 1 pour les moteurs à courant continu

( 3 moteurs) des consignes du type 2 pour les moteurs pas à pas (4 moteurs);

- Transformer les consignes (1) et les envoyer aux cartes d'asservissement des moteurs à courant continu.
- Transformer les consignes (2) et les envoyer à l'IP 28 (consignes de déplacement absolu).
- Arrêter les moteurs à courant continu au bout d'un temps T déterminé au préalable (consignes de vitesse).
- Lire sur les codeurs des moteurs les déplacements réels effectués et les envoyer au Solar.
- Lire les fins de course des différents mouvements et les envoyer au Solar.

### 3-3-3 LE SYSTEME IP 28

Le rôle de l'IP 28 est de recevoir les consignes de déplacements et de vitesse envoyées par l'Apple II et d'en déduire quatre signaux qui pilotent les cartes d'interface des moteurs pas à pas. Les signaux sont des impulsions dont la période et le nombre sont indicatifs de la vitesse et du déplacement voulus.

### 3-4 LIAISON ENTRE ORDINATEURS

Les deux liaisons entre calculateurs sont:

- La liaison Solar/Apple;
- La liaison Apple/IP 28.

Elles sont des liaisons séries asynchrones.

#### Liaison Solar/Apple :

- Vitesse : 1200 bds;
- Nombre de bits par caractère : 11;
- Pas de contrôle de parité.



Les échanges se font sur des nombres entiers (2x8 bits) en complément à deux.

Le Solar émet 14 octets vers l'Apple. Ces octets étant les consignes de déplacement du bras esclave. L'Apple émet 16 octets vers le Solar. Ces octets étant les recopies des codeurs moteurs plus les états des butées de fin de course. Il est à noter que le Solar fait un écho sur chaque caractère reçu.

#### Liaison Apple/IP 28 :

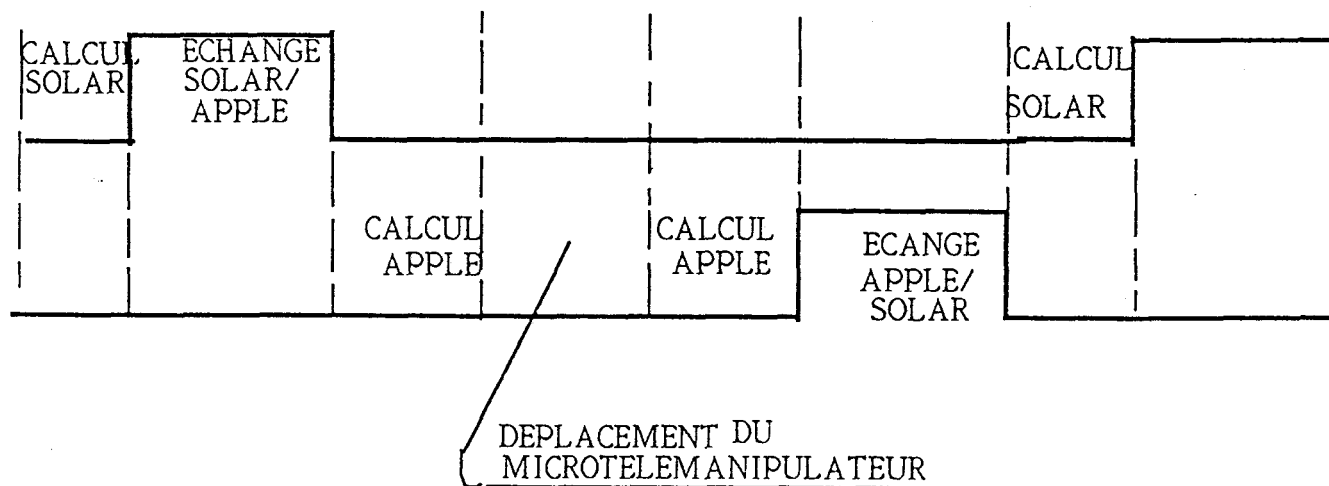
Les caractères de cette liaison sont :

- Vitesse: 9600 bds;
- Nombre de bits par caractère : 11;
- Contrôle de parité.

L'IP 28 fait également un écho sur chaque caractère reçu. Il renvoie un compte-rendu de message correct et un autre de fin d'exécution du mouvement.

#### Synchronisation des échanges Solar/Apple

Le mode de synchronisation choisi entre le Solar et l'Apple est très simple. Chaque processeur travaille à tour de rôle. La synchronisation obéit au chronogramme de la figure /2/.



Figure/III-2/chronogramme de la  
synchronisation solar/apple

#### 4- TRAVAIL REALISE

Le travail réalisé sur le site du C.E.A. a été fait en deux étapes:

- Caractérisation du microtélémanipulateur pour permettre la commande par un bras maître;
- Réalisation de la commande par bras maître.

##### 4-1 CARACTERISATION DU MICROTELEMANIPULATEUR

La caractérisation du microtélémanipulateur, pour la commande par un bras maître, a commencé par l'étude des possibilités et des performances de l'IP 28, et des moteurs pas à pas. A cette occasion, nous avons relevé la courbe du temps d'exécution (t) en fonction du nombre de pas (n) demandé en déplacement pour la vitesse maximum (3700 pas/s). Cette courbe est donnée en figure /3/.

Nous avons ainsi pu constater le temps relativement long de cette exécution par rapport au temps théorique de déplacement; ceci est dû à deux causes:

- Echanges nombreux entre l'Apple et l'IP 28;
- Temps d'interprétation de l'IP 28.

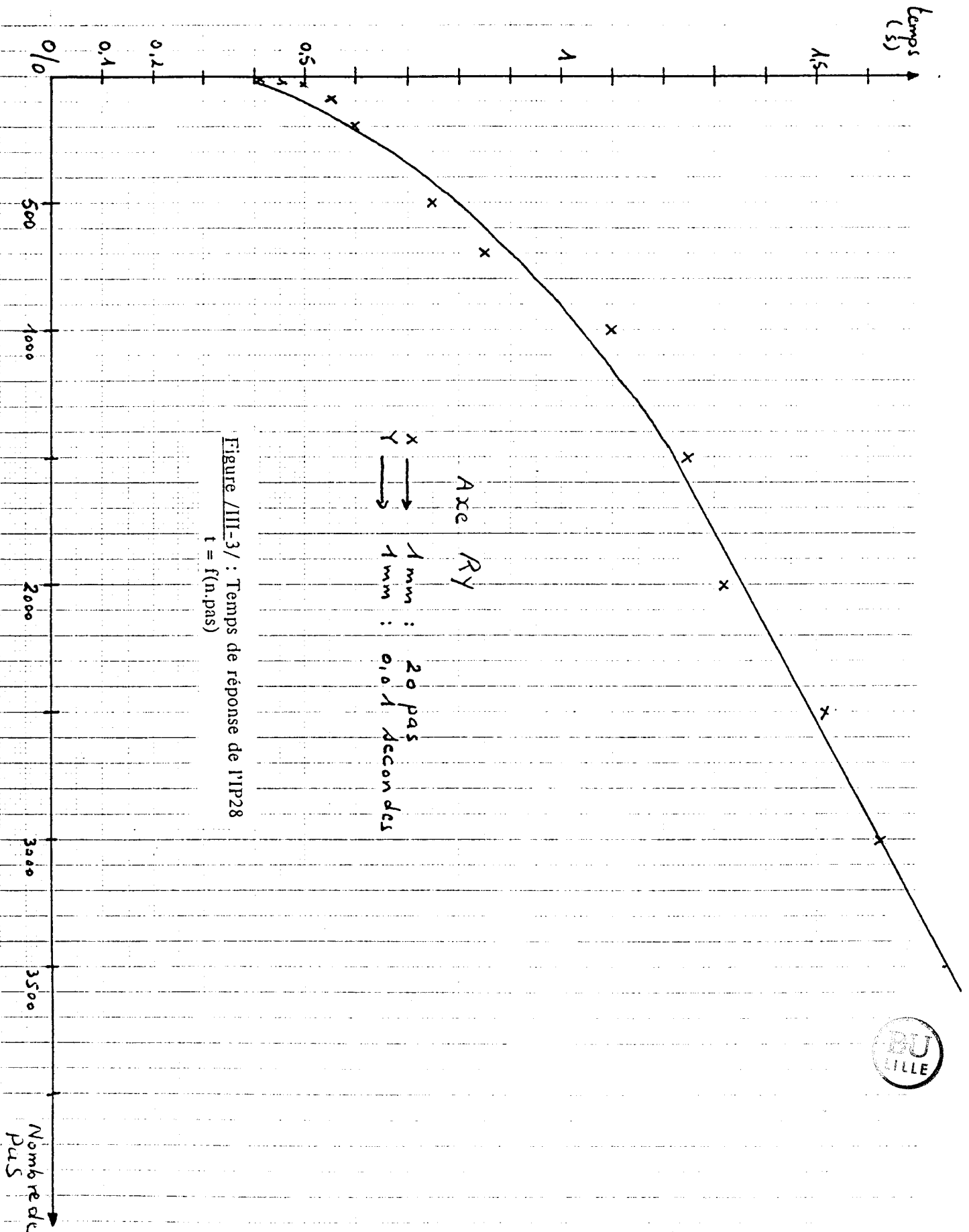
Nous avons ensuite établi les courbes de déplacement en fonction de la vitesse à temps constant pour les moteurs à courant continu (Figure 4).

##### 4-2 COMMANDE PAR BRAS MAITRE

La connection au Solar et donc la réalisation du système maître-esclave, a ensuite été faite. Après avoir fait les essais de connection, nous avons pu voir les résultats de ces expériences.

En fait, la commande maître-esclave ainsi réalisée, si elle fonctionne d'un point de vue technique: elle suit les mouvements du maître, n'est pas utilisable car le temps de cycle du système est beaucoup trop long. Ce temps a été estimé entre 1,3 et 1,4 secondes. Il faudrait un temps de cycle de l'ordre de 0,1 seconde pour que le système soit transparent à l'utilisateur.

La longueur du temps de cycle est due en grande partie à l'IP 28 et aux échanges qu'il impose. La solution serait donc de changer ce matériel afin de réaliser une commande de manière satisfaisante.

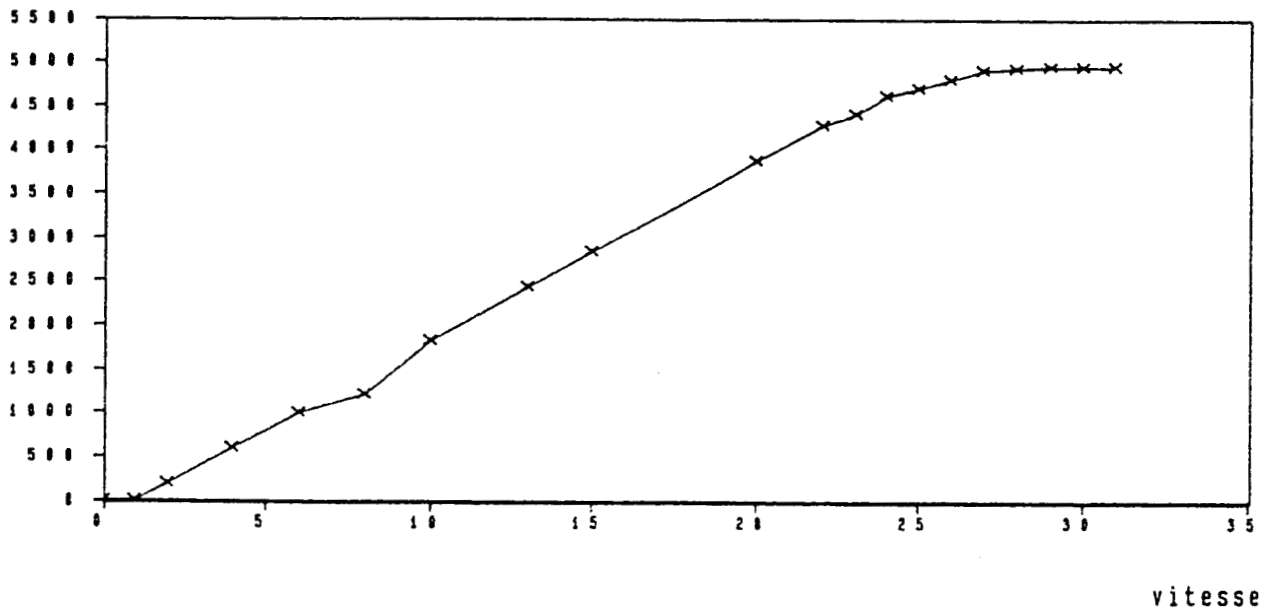


a) Moteur Tcx (Orientation du poignet)

Echelle  
0,4°/s  
0,5 mm

nombre de pas

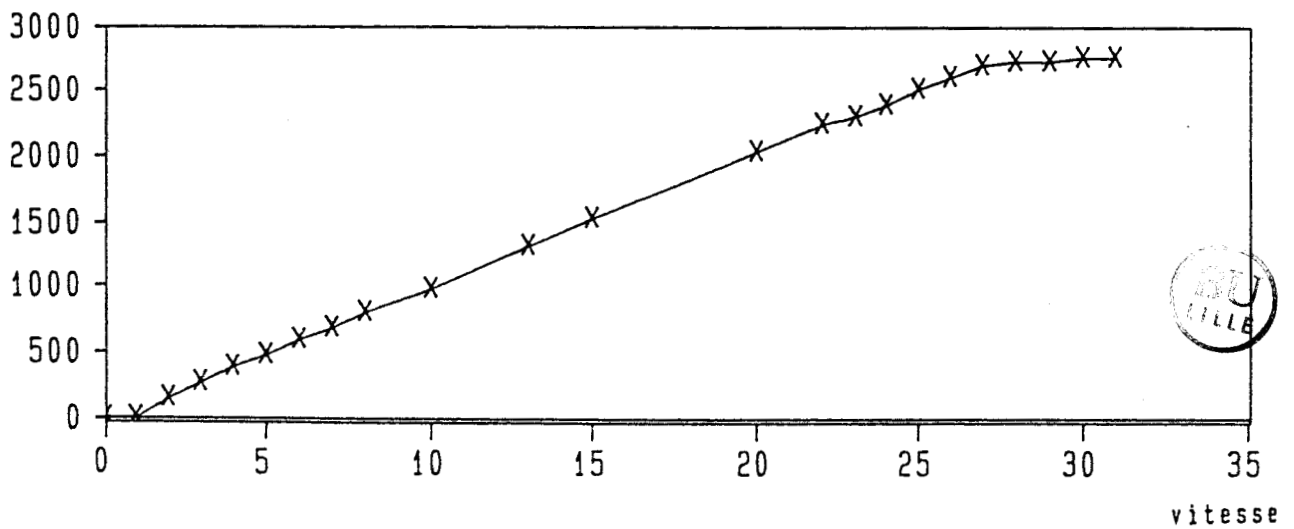
moteur Cx:  $T=2s$



Echelle  
0,4°/s  
0,5 mm

nombre de pas

moteur Tcx:  $T=1s$

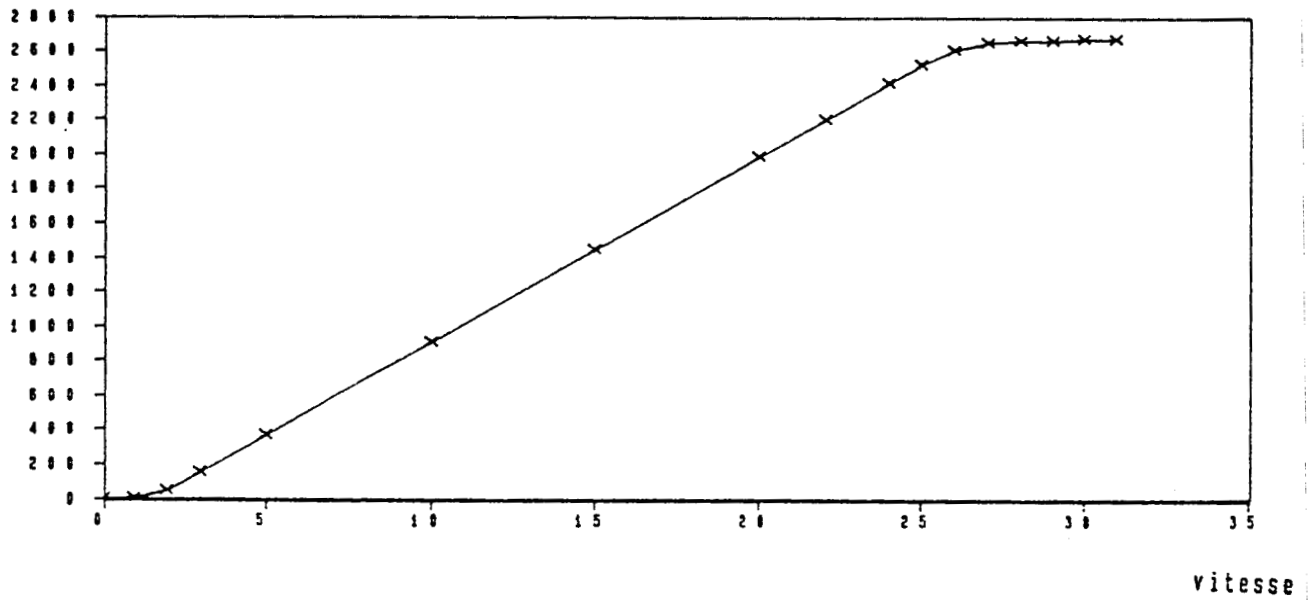


b) Moteur To ( Translation de l'outil)

nombre de pas

moteur cz:  $T=1$

Echelle  
0.03 mm/s  
0.5 mm



nombre de pas

moteur cz:  $T=2$

Echelle  
0.03 mm/s  
0.5 mm

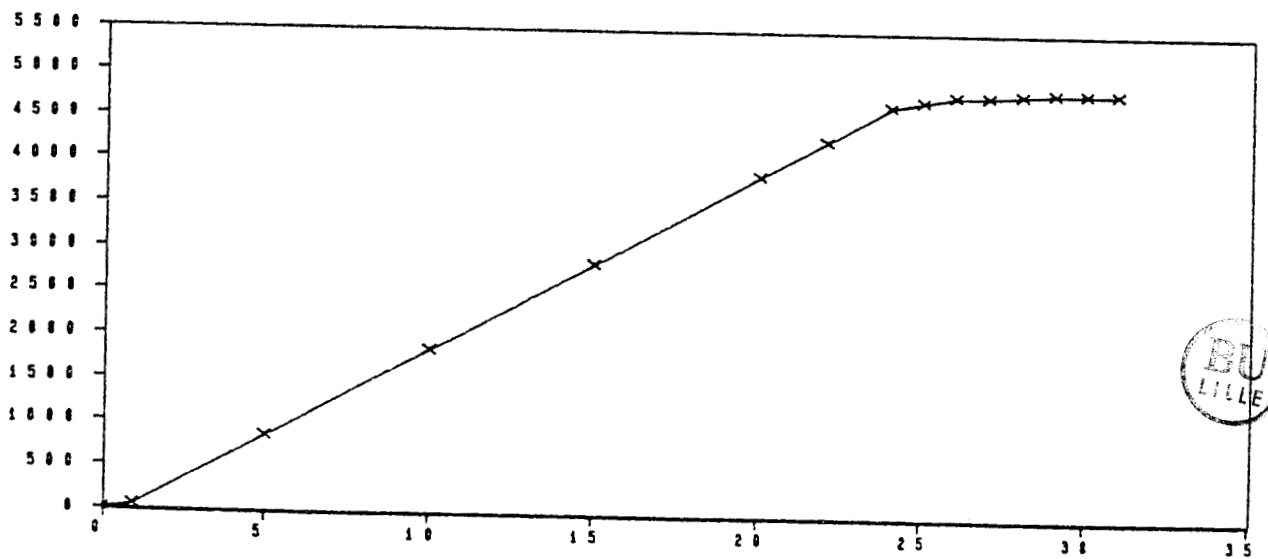


Figure /III-4/ : Déplacement en fonction des vitesses  
( Réponses des moteurs à courant continu)

vitesse



### III- COMMANDE DU MICROTELEMANIPULATEUR PAR LA PAROLE

#### 1- GENERALITES

La complexité d'utilisation des machines de téléopération, nécessite une amélioration des moyens de commande et de contrôle par l'utilisateur sur la machine. Le développement des méthodes d'interaction entre l'Homme et la machine passe par la diversification des canaux de communication (joystick, bras maître, clavier, souris, syntaxeur...).

Le progrès de la reconnaissance et de la synthèse vocale permettent d'introduire de nouveaux moyens de communication dans l'interaction H/M (communication par le canal vocal).

#### 2- OBJECTIF DES EXPERIENCES

##### 2-1 CONTEXTE DES MANIPULATIONS

Ce travail qui rentre dans le cadre de la téléopération générale /MANG 85/, concerne une application particulière qui est l'automatisation d'un bloc opératoire de chirurgie médicale.

##### 2-2 DESCRIPTION DU BLOC OPERATOIRE

Outre le microtélémanipulateur, le bloc opératoire contient /SAVY 85/:

- Un microscope opératoire: déplacement dans un plan horizontal et suivant un axe vertical (3 degrés de liberté);
- Les éclairages: réglage de l'optique, (netteté rapide, zoom);
- Le déplacement de la lampe à fente suivant un secteur angulaire dans un plan vertical;
- Le fonctionnement de la lampe à fente (cette fonction permet d'obtenir une vue en coupe de l'oeil).

L'ensemble des commandes de ces organes sont actuellement actionnées au pied de l'intervenant, ce qui demande une certaine dextérité de la part du chirurgien qui doit d'abord se concentrer sur l'opération elle-même. La commande vocale peut être un moyen de commande intéressant dans ce domaine car elle libère le chirurgien de la contrainte en position de ses membres et de son corps.

Nous avons organisé ces manipulations autour du microtélémanipulateur comme si ses actionneurs étaient les organes du bloc opératoire (préalablement décrit) à commander /BEGU 85/.

Les conclusions attendues de ces expériences sont les réponses aux questions suivantes:

- Comment répond le système commandé par la voix et utilisant l'architecture de commande du chapitre II ?
- Est-il nécessaire de changer l'architecture du système de commande pour piloter le processus en temps réel ?
- Et enfin la commande vocale présente-t-elle un intérêt par rapport aux moyens traditionnels de commande ?

### 3 - PRINCIPE DE REALISATION

#### 3-1 SYNOPTIQUE DE LA COMMANDE (Figure 5)

Nous avons utilisé pour ces manipulations le matériel suivant:

- Tous les organes de la commande du microtélémanipulateur présentés dans l'architecture matériel du chapitre II;
- Une carte de reconnaissance de la parole monolocuteur, pouvant reconnaître jusqu'à 240 mots isolés (les caractéristiques de cette carte sont données en /VESYS/). La transmission des paramètres de commande entre l'ordinateur et l'interface vocale est réalisée par une liaison série standard asynchrone à la vitesse de 9600 bds.

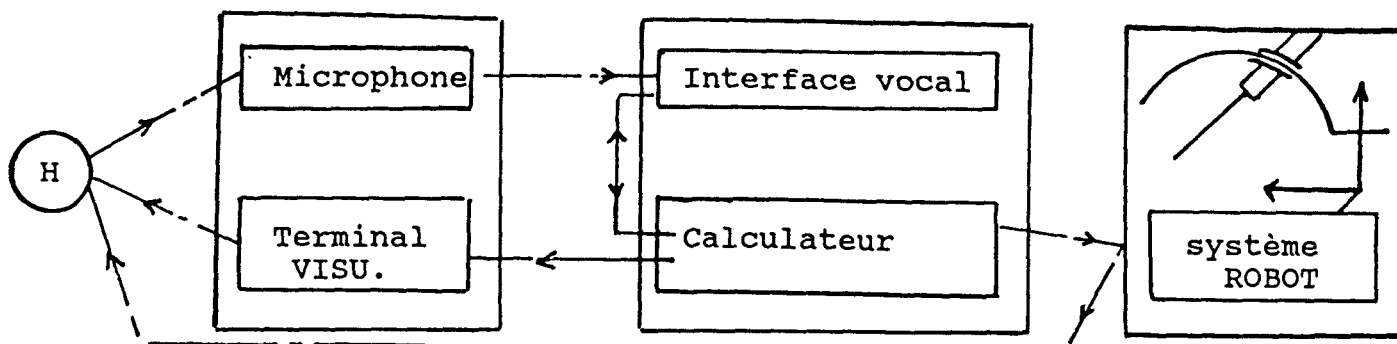


Figure /III-5/ : Elements matériels des expériences de caractérisation et chemin de l'information.

### 3-2 LOGICIEL

Il s'agit ici d'organiser le dialogue Opérateur/Machine au niveau logiciel. Le but étant de libérer l'homme de la manipulation des équipements environnants, il peut ainsi se réserver pour des tâches plus nobles (choix de l'action à exécuter).

Notre propos est donc d'organiser une certaine procédure grammaticale fiable (avec détection d'erreurs) permettant de simplifier la tâche du chirurgien /BENG 86/.

Nous distinguons alors deux étapes dans l'analyse du logiciel réalisé:

- Définir l'ensemble des mots de commande relatifs aux actionneurs à commander par exemple :

AVANT; ARRIERE; ARRET; DROITE; GAUCHE; HAUT; BAS; STOP;  
STOP1; STOP2; ROTATION; TRANSLATION; FIN; CONTINUER; ...

- Organiser le vocabulaire de telle manière que le temps de réponse du système soit minimal.

En effet, les informations transitent à travers des liaisons séries et celles ci sont assez lentes. La solution de ce problème est de considérer l'ensemble des éléments du tableau constitué par les mots adoptés pour la commande et de les trier par ordre alphabétique. Lors de la phase de commande, on procède par une recherche dichotomique dans la table ordonnée. Ceci a pour conséquence de gagner sur le temps de la recherche du mot. Chaque mot interprété par la carte de reconnaissance est considéré comme connu si et seulement si sa définition figure dans la liste que l'opérateur a préalablement définie. La commande ainsi

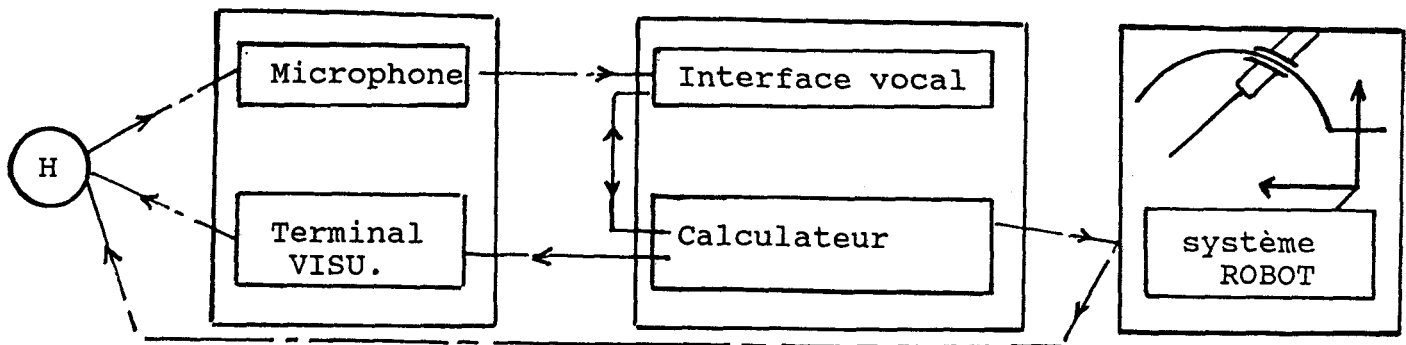


Figure /III-5/ : Elements matériels des expériences de caractérisation et chemin de l'information.

### 3-2 LOGICIEL

Il s'agit ici d'organiser le dialogue Opérateur/Machine au niveau logiciel. Le but étant de libérer l'homme de la manipulation des équipements environnants, il peut ainsi se réserver pour des tâches plus nobles (choix de l'action à exécuter).

Notre propos est donc d'organiser une certaine procédure grammaticale fiable (avec détection d'erreurs) permettant de simplifier la tâche du chirurgien /BENG 86/.

Nous distinguons alors deux étapes dans l'analyse du logiciel réalisé:

- Définir l'ensemble des mots de commande relatifs aux actionneurs à commander par exemple :

AVANT; ARRIERE; ARRET; DROITE; GAUCHE; HAUT; BAS; STOP;  
STOP1; STOP2; ROTATION; TRANSLATION; FIN; CONTINUER; ...

- Organiser le vocabulaire de telle manière que le temps de réponse du système soit minimal.

En effet, les informations transitent à travers des liaisons séries et celles ci sont assez lentes. La solution de ce problème est de considérer l'ensemble des éléments du tableau constitué par les mots adoptés pour la commande et de les trier par ordre alphabétique. Lors de la phase de commande, on procède par une recherche dichotomique dans la table ordonnée. Ceci a pour conséquence de gagner sur le temps de la recherche du mot. Chaque mot interprété par la carte de reconnaissance est considéré comme connu si et seulement si sa définition figure dans la liste que l'opérateur a préalablement définie. La commande ainsi

reconnu déclenche l'exécution du module correspondant. De plus, on définit des actions prioritaires dans la commande par exemple le mot "STOP", s'il est considéré comme arrêt d'urgence, il sera prioritaire par rapport aux autres mots de la liste, même si ces derniers sont des ordres d'arrêt (ARRET; STOP1; STOP2).

La commande par la voix de l'opérateur nécessite deux phases:

### 3-2-1 PHASE D'APPRENTISSAGE

La phase d'apprentissage permet à l'opérateur d'enregistrer dans la table de commande, l'ensemble des mots choisis pour celles-ci. Il dicte alors les mots de manière isolée et il libelle une étiquette/définition pour chaque mot prononcé. Cette étiquette sera retournée lors de la phase de reconnaissance ( retour effectué par affichage ou synthèse vocale). Pendant l'apprentissage, la machine renvoie un code à l'affichage permettant à l'opérateur de vérifier si le mot qu'il a prononcé a été bien accepté par la machine (exemple de code interprété: mot trop long, mot trop faible, mot court,...).

### 3-2-2 PHASE DE RECONNAISSANCE OU DE COMMANDE

La phase d'apprentissage étant faite, désormais la machine est prête à reconnaître les mots prononcés au microphone. La phase de reconnaissance correspond au module de la commande proprement dite.

Après un module d'initialisation, l'opérateur est invité par l'ordinateur à prononcer ses commandes et à surveiller l'évolution de son processus (visuellement ou auditivement).

Le fonctionnement correspond au schéma de la figure /6/. L'opérateur active une commande en prononçant le mot correspondant. Si ce mot existe dans le dictionnaire établi par l'opérateur pendant l'étape de l'apprentissage alors l'ordinateur active le module correspondant, génère les consignes nécessaires et les applique aux actionneurs correspondants; s'il n'existe pas , le système de commande supprime cet ordre et réinvite l'opérateur à consulter son dictionnaire et à reformuler ses directives de commande.

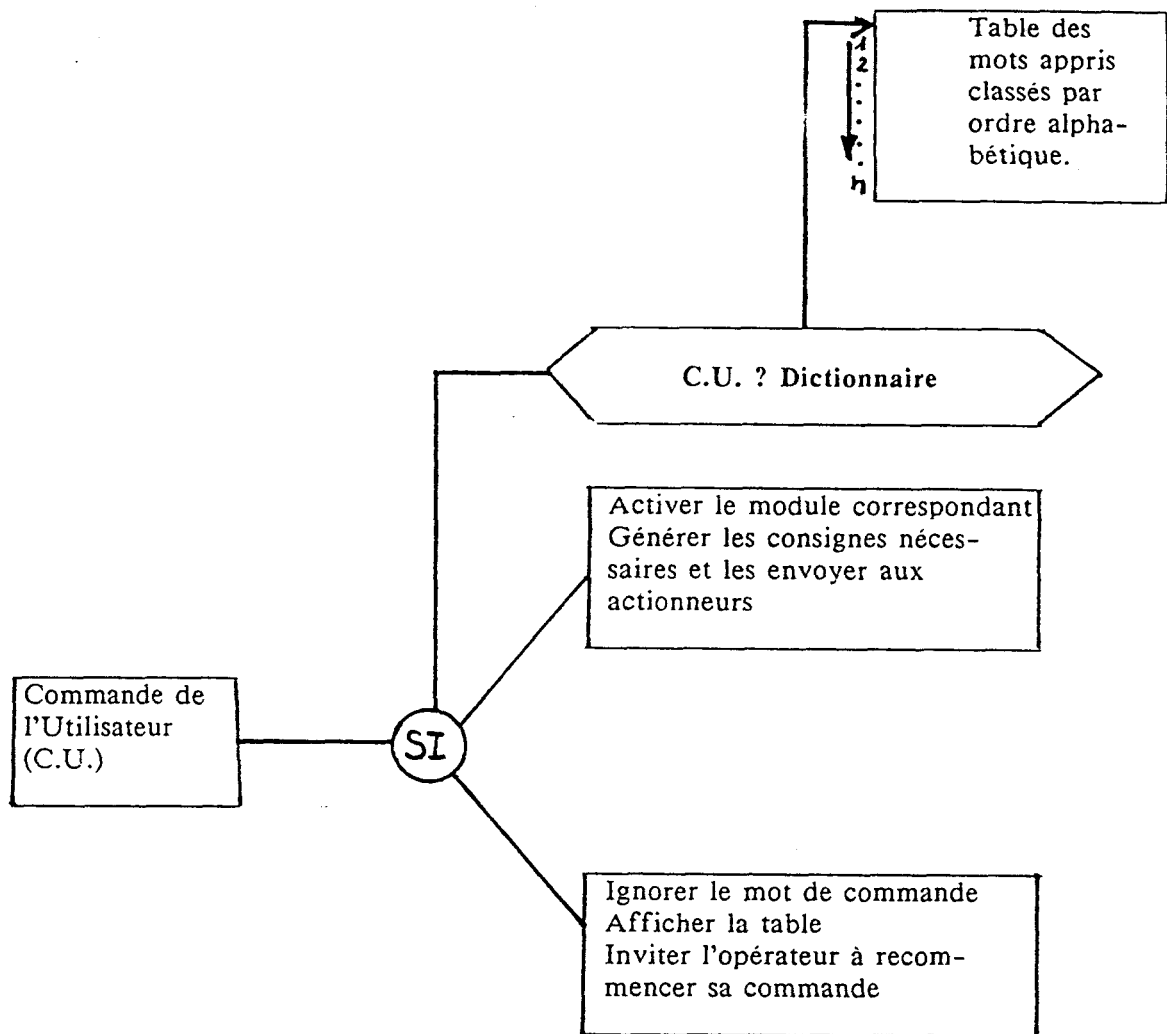


Figure /III-6/: Fonctionnement du programme de reconnaissance de la parole

### 3-2-3 REMARQUES

Le système que nous avons réalisé a des limites. En particulier, il n'indique pas le type d'erreur quand il y en a une et il considère comme inconnu tout mot qui présente une distance de ressemblance supérieure à un seuil entre le mot reconnu et celui prononcé. Nous signalons que l'étude de ces problèmes liés à la fiabilité de la commande vocale en téléopération, a été abordée dans les travaux de GUERROUAD /GUER 87/. Les résultats de ses travaux peuvent nous être utiles, notamment lors de la conception du poste opérateur.



#### 4 - EXPERIENCES

Nous avons effectué deux séries d'expériences:

##### 4-1 DETERMINATION DE LA REPONSE DU SYSTEME

En procédant comme indiqué dans les paragraphes précédents, nous avons commandé le microtélémanipulateur par la voix et nous avons noté pour chaque commande, le temps de son interprétation (chronogramme de la figure 7).

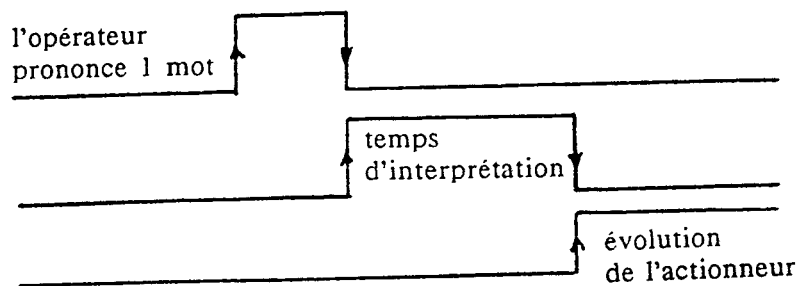


Figure /III-7/: Chronogramme d'interprétation d'un mot

A la suite de plusieurs essais, nous avons noté un temps moyen d'interprétation de 0,90 seconde lorsqu'on a 20 mots dans la liste de commande. Il faudrait un temps d'interprétation global de l'ordre de 0,1 seconde pour que le traitement soit en temps réel et que les contraintes de sécurité soient assurées.

##### 4-2 COMPARAISON ENTRE COMMANDE MANUELLE ET COMMANDE VOCALE

Dans ces essais, nous cherchons à caractériser les avantages de la commande vocale par rapport à la commande manuelle type "presse bouton".

###### 4-2-1 COMMANDE MANUELLE

Nous avons affecté pour chacun des 7 degrés de liberté du microtélémanipulateur, deux touches symétriques du clavier, placées aléatoirement pour l'opérateur (une touche pour le sens +, l'autre pour le sens - ), ( figure 8).

La manipulation consiste à faire fonctionner les actionneurs axe par axe ou/et en combiné, simplement en pressant la (ou les) touche(s) correspondante(s) et de surveiller ses axes de manière à ce que les moteurs actionnés ne touchent pas leurs butées de fin de course. Par exemple, le fait d'appuyer sur "HAUT" provoque la translation de l'axe  $T_O$  vers le haut; si on presse le bouton "BAS", l'actionneur  $T_O$  change de sens. Un compteur comptabilise le nombre de fois où les moteurs ont touché leurs butées de fin de course (le toucher d'une butée est considéré comme une erreur), en fonction du nombre d'actionneurs en activité (une tâche correspond à un actionneur en activité). La courbe (1) de la figure /9/, montre les résultats de ces essais. Ainsi nous constatons qu'à partir d'un certain nombre de tâches, le contrôle manuel est pratiquement impossible.

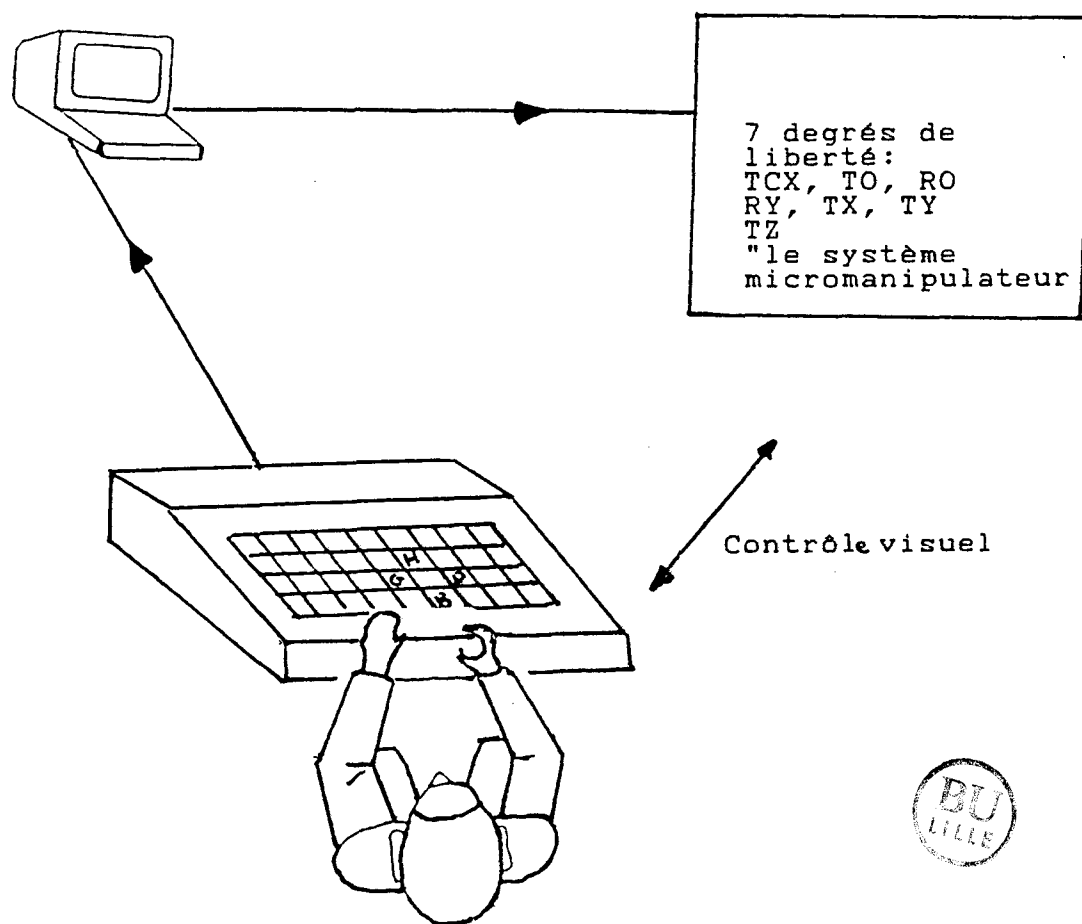


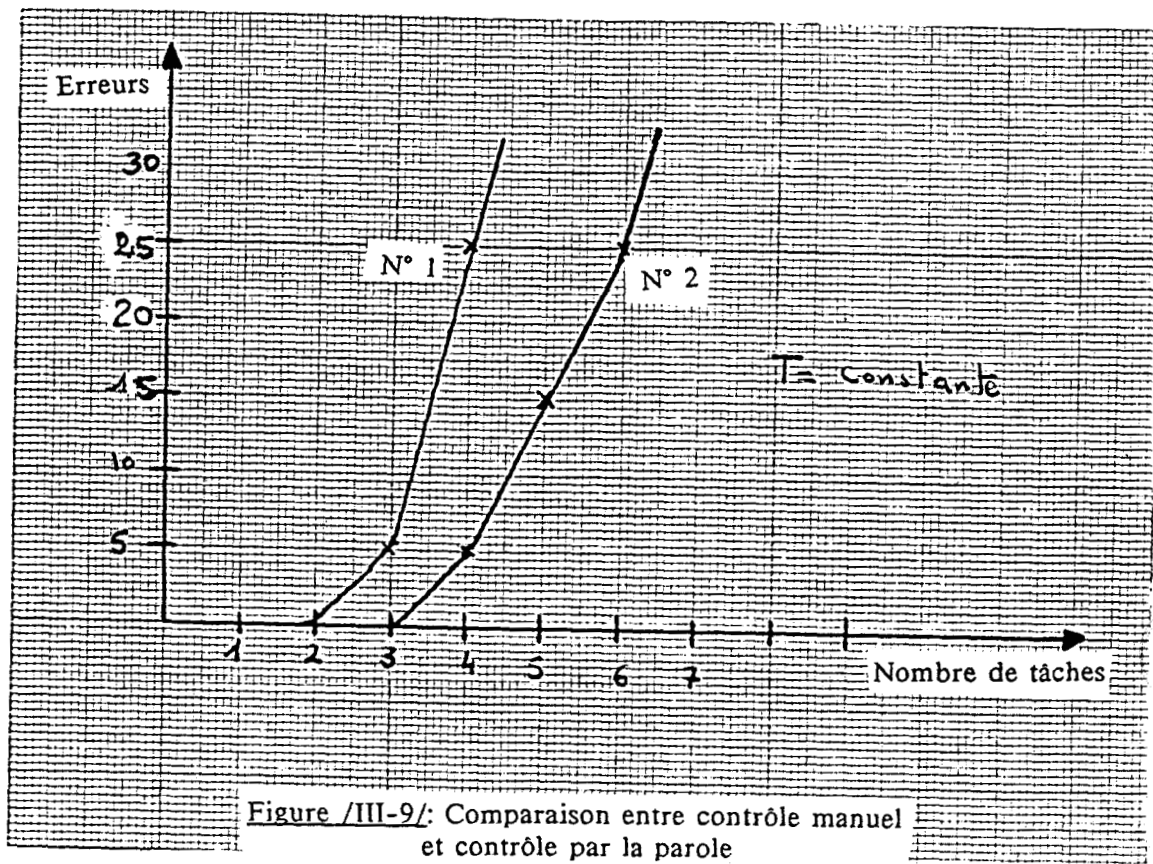
Figure /III-8/: Commande manuelle  
( 14 touches du clavier sont utilisées)

#### 4-2-2 COMMANDE VOCALE

De même, nous avons recommencé l'expérience en remplaçant le pavé des touches de commande manuelle par un microphone. Les essais se sont déroulés dans les mêmes conditions et nous avons noté les mêmes paramètres, c'est à dire le nombre de fois où les butées étaient atteintes en fonction de la difficulté de la tâche (nombre d'actionneurs en activité). La courbe n° 2 de la figure /9/ montre les résultats de cette deuxième série d'expériences.

Bien qu'il y ait des limites pour le nombre de tâches, la commande vocale permet un contrôle plus large que la commande manuelle (possibilité de contrôler plusieurs tâches simultanément).

Ces manipulations ont montré l'intérêt de l'utilisation d'une commande vocale, mais le manque de fiabilité en ce qui concerne actuellement la reconnaissance vocale, nous oblige à ne nous servir de ce moyen naturel de communication que pour les tâches secondaires (tâches ne nécessitant pas de contraintes de précision).



#### IV- ELABORATION DE LA STRUCTURE FINALE DE LA COMMANDE DU PROTOTYPE

Le choix d'une solution au problème de la commande du microtélémanipulateur ainsi caractérisé repose naturellement sur un grand nombre de paramètres, depuis la nature du milieu lui même et ses caractéristiques de difficulté d'utilisation par l'Homme jusqu'aux détails les plus minimes de la tâche à accomplir.

De même, il ne faut pas négliger l'aspect maintenance lors de cette conception. Meilir /MEIL 80/, a présenté différentes raisons sur le fait que la maintenance est si coûteuse en décrivant les différentes étapes d'une modification à opérer sur un système; il faut:

- <1> Comprendre comment le système fonctionne (ou pourquoi il ne fonctionne pas);
- <2> Savoir où implanter la modification demandée;
- <3> Déterminer son impact sur le reste du système;
- <4> Concevoir la modification;
- <5> Tester le système;
- <6> Rédiger un document de suivi.

Il nous a été indispensable de passer par l'étude et les expérimentations précédentes afin de déterminer:

- Une structure informatique optimale, modulaire en utilisant des réalisations standard;
- Le poignet de pilotage et les techniques à mettre en oeuvre;
- Les contraintes d'exploitation de la machine:

Deux modes sont possibles:

- En microtélémanipulation:

L'opérateur, par l'intermédiaire d'un organe maître détermine une trajectoire. Celle-ci peut être sauvegardée.

- En automatique:

Le microtélémanipulateur fonctionne suivant des trajectoires préalablement enregistrées.

Toutes ces connaissances sont indispensables pour prendre des décisions quant à la réalisation de la commande du prototype pré-industriel.

### 1-ORGANE DE COMMANDE

Lorsque le contrôle doit s'exercer suivant deux ou trois dimensions, il y a plusieurs solutions possibles en ce qui concerne les commandes: un levier par degré de liberté, un levier à deux degrés de liberté, deux leviers de caractéristiques dynamiques différentes...

Il ne semble pas exister de solution générale. Mentionnons quelques essais de vérification expérimentale: Kernikoff, Lemay et Citta /CITT 86/ montrent que lorsque les dynamiques de deux axes sont différentes, deux leviers séparés donnent une meilleure performance car l'Homme peut plus facilement séparer les stratégies qu'il utilise pour chaque axe. Ces mêmes auteurs montrent également que la sensibilité des commandes influence parfois négativement la performance (il faut éviter les commandes trop sensibles).

Par conséquent, faut un poignet particulièrement étudié, qui soit léger et fonctionnel. Le point essentiel réside dans le fait que l'opérateur doit disposer en toute position d'une commande "instinctive", quelles que soient l'orientation du bras et la position de l'opérateur sur les différentes faces de travail. Ainsi, nous distinguons les deux caractéristiques essentielles d'un poignet de commande:

- Il doit permettre un retour d'effort de manière à procurer à l'opérateur la sensation de toucher;
- Il doit être conforme aux exigences ergonomiques (encombrement, souplesse

d'utilisation...).

L'introduction du retour d'effort est sans aucun doute le problème majeur lié à cette étude. Le concept d'effort étant lui même très mal défini du fait de la difficulté d'évaluer les forces transmises par le chirurgien à l'instrument, lors de l'opération.

Nous avons spécifié ce cahier des charges en commun accord avec les chirurgiens d'ophtalmologie du C.H.R. de Lille et la société Santerne d'Arras.

La solution retenue est donc un poignet à trois axes motorisés permettant un retour d'effort et présentant un encombrement acceptable.

Nous présentons en annexe /3/, les premiers résultats de l'étude concernant l'organe de commande.

## 2-L'ARCHITECTURE INFORMATIQUE

### 2-1 RAPPEL SUR LES STRUCTURES MATERIELLES

Peu de méthodes sont proposées pour répondre au choix d'une architecture matérielle et bien souvent cette recherche reste intuitive et du domaine de l'expérience du concepteur.

Certaines publications présentent différentes structures (série, parallèles, étoiles...) avec leurs critiques telles que /fath 83/ ou l'intérêt des structures multiprocesseurs et des structures réparties /VERJ 83/; d'autres abordent ce problème de conception dans des méthodes globales /CALV 82/, /DUPO 86/, c'est à dire partant du cahier des charges et aboutissant à la réalisation finale du logiciel, du matériel et de l'intégration de l'un dans l'autre.

La conception d'une structure multiprocesseurs se rapporte essentiellement aux méthodes d'échange d'informations qui ont pour fonction la mise en oeuvre:

- Des communications interprocesseur;
- De l'architecture des interconnexions.

Les communications interprocesseur se font par l'intermédiaire de transferts de données réalisés:

- Soit via une mémoire commune (structure centralisée);



- Soit via un bus (structure répartie).

Dans le cas d'une mémoire commune, les éléments ne sont pas directement reliés entre eux et n'ont donc pas d'accès direct, par contre une structure de bus crée une voie de communication entre les éléments.

Dans les architectures d'interconnexions, quatre structures de base sont distinguées, /THOM 83/ (Figure 10).

a> Structure circulaire

Les données passent par chaque processeur en suivant une voie circulaire.

Cette structure est bien adaptée pour assurer une transmission complète.

Lorsqu'un processeur envoie un message, il parcourt toute la chaîne et la vérification d'une transmission correcte est effectuée en comparant le message envoyé avec celui reçu.

Par contre, cette structure est peu flexible: la chaîne doit être coupée lorsqu'on désire rajouter un autre élément, et si un processeur tombe en panne, ou si une liaison entre deux processeurs est coupée, l'échange d'informations ne peut plus se faire et toute la structure en pâtit.

b> Structure avec un bus commun

Dans cette structure les données sont transmises par l'intermédiaire d'un bus commun.

Cette structure possède l'avantage de faciliter la connexion ou la déconnexion d'un élément sans interagir sur l'ensemble du système et sans devoir couper le bus.

De plus, un processeur en panne ne pénalise pas tout le système.

L'inconvénient de cette structure est qu'une panne sur le bus bloque évidemment tout le système.

Comme pour la structure circulaire, le contrôle est décentralisé.

c> Structure étoile

Cette structure est caractérisée par un contrôleur central relié à chaque processeur.

Comme chaque processeur esclave est relié par une branche séparée, le contrôleur n'est pas affecté si un processeur ou une liaison tombe en panne.

De même, un élément peut être connecté ou déconnecté sans affecter tout le système.

L'inconvénient de cette structure réside dans la centralisation du contrôleur (processeur maître): si il a une défaillance tout le système est bloqué.

d> Structure pleinement connectée

Dans cette structure tous les processeurs sont reliés entre eux.

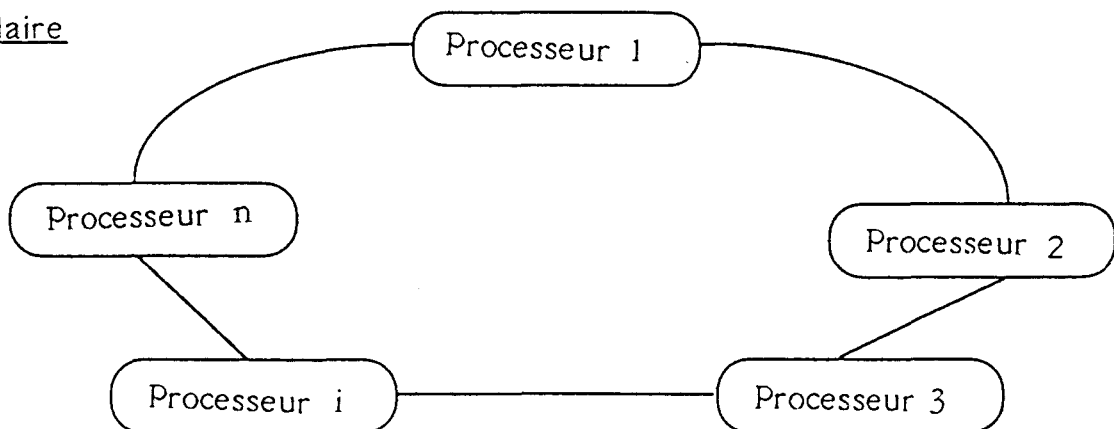
Dans le cas d'une défaillance d'une liaison entre deux processeurs, un troisième processeur peut servir d'intermédiaire pour rétablir la communication.

De même, la défaillance d'un processeur n'affecte pas les autres communications et donc ne pénalise pas le système global.

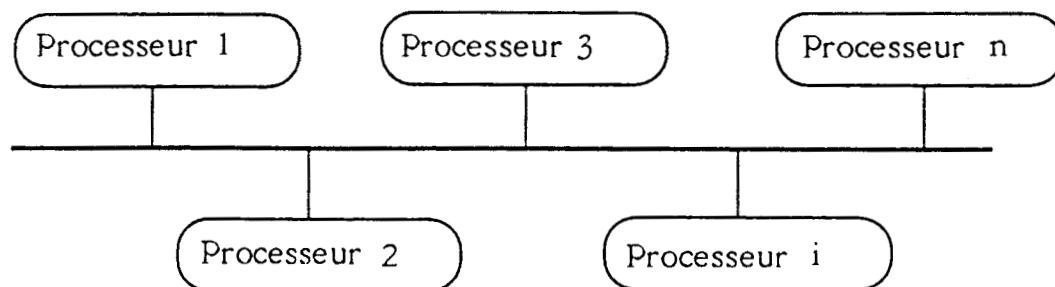
Ces différents avantages se soldent malgré tout par un inconvénient de taille: le nombre important de liaisons. Pour un système à  $N$  processeurs, il faut  $N(N-1)$  liaisons.

2

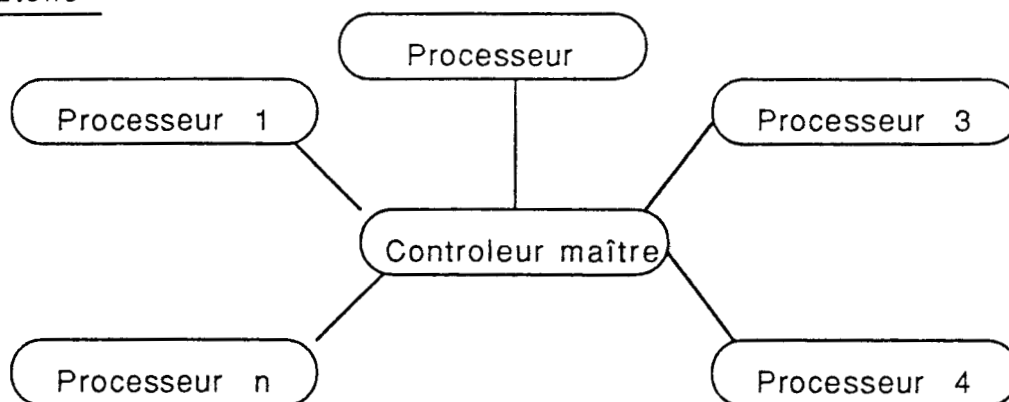
a) circulaire



b) Parallèle



c) Etoile



d) Structure pleinement connectée

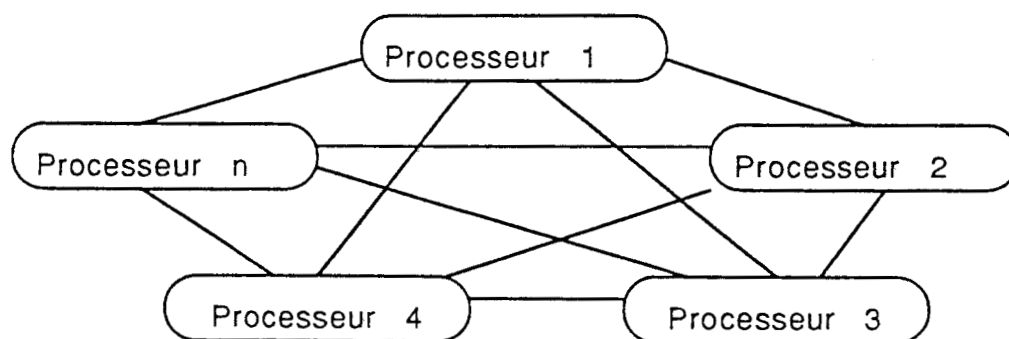


Figure /III-10/: Différentes architectures informatique  
utilisées pour les connexions des systèmes



## 2-2 ARCHITECTURE MATERIELLE DE LA VERSION FINALE

Les expérimentations effectuées sur le prototype nous ont permis de déterminer l'évolution de la commande et de proposer une nouvelle architecture informatique pour le prototype pré-industriel. Cette nouvelle architecture qui doit intégrer un certain nombre d'éléments physiques et de routines logicielles de la commande du prototype, doit être à multiprocesseurs et d'une conception modulaire. Nous affecterons chaque fonction spécifique à un sous-ensemble simple dans cette commande.

Toutes les considérations ci-dessus ont plaidé en faveur d'une commande décentralisée. La conception actuellement retenue permet des modules qui seront démontables et interchangeables (produit industriel standard), offrant ainsi la possibilité d'évolution de la machine et facilitant la tâche de la maintenance en cas de défaillance d'un organe spécifique.

Matériellement, la réalisation contiendra les cartes suivantes:

- Une carte d'acquisition et de traitement des consignes du bras-maître;
- Une carte de commande par moteur, comportant un microprocesseur et un environnement mémoire de traitement (cartes esclaves);
- Une carte de sécurité pour l'ensemble des éléments de sécurité du système (capteurs de détection optique, vérin de dégagement de l'outil en cas de panne, et éventuellement d'autres systèmes de sécurité);
- Un calculateur maître ou superviseur qui assurera la validité des informations reçues du poignet de commande (ou de l'extérieur en général) et les distribue aux différents esclaves.

## 2-3 TOPOLOGIE DU RESEAU ADOPTE

Les deux structures envisageables sont alors l'étoile ou le bus hiérarchisé.

Le bus en tant que liaison multipoints permet de limiter les liaisons et les interfaces de liaison. Mais il a le gros désavantage de poser le problème de l'accès à un canal commun et il peut donc y avoir des risques de conflit.

Il faut alors gérer des propriétés et donc consacrer un processeur à la gestion du canal. De plus, il n'y a pas de dialogue entre les esclaves.

La solution retenue est donc une structure étoile dont le schéma synoptique est donné figure /11/.

Dans une structure étoile, chaque processeur esclave a sa liaison privilégiée avec le maître. Le prix des interfaces parallèles de liaison rend cette solution préférable et le protocole de dialogue entre les postes simplifié.

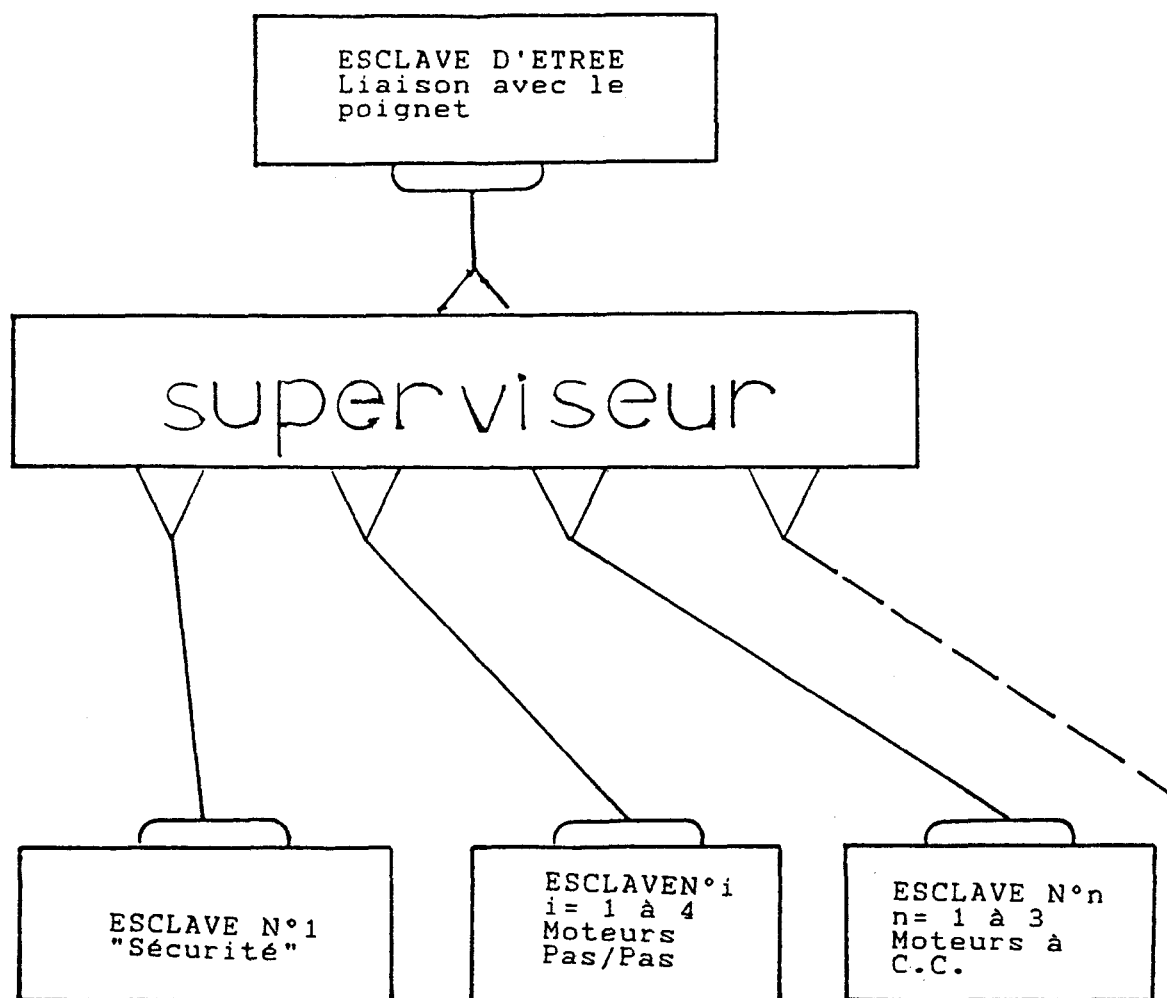


Figure /III-11/: Nouvelle Architecture de commande  
proposée pour le prototype de la version finale



### 3 - DESCRIPTION DES DIFFERENTES CARTES

Comme nous l'avons défini ci-dessus, nous avons trois types de cartes:

- Une carte esclave d'entrée ou d'acquisition des consignes du bras maître;
- Une carte de sécurité et de contrôle de la partie opérative;
- Des cartes de communication des moteurs ( une carte par axe).

Chaque carte est équipée d'un microprocesseur 6809 de Motorola (compatible avec les composants de la commande réalisée autour d'un micro-ordinateur maître Apple II).

#### 3-1 CARTE D'ACQUISITION

Cette carte fera l'acquisition des consignes d'entrée et assurera la transposition entre les mouvements du poignet et ceux du microtélémanipulateur à travers un transformateur de coordonnées. Elle comprend essentiellement les éléments suivants:

- Un convertisseur analogique/numérique qui permet la discrétisation des consignes d'entrée.
- Un multiplexeur analogique qui permet de sélectionner chaque degré de liberté du bras-maître.
- Un microprocesseur qui assure l'ordonnancement sous forme de blocs d'informations fournies par le convertisseur analogique/numérique ainsi que le transfert vers le calculateur "superviseur" via des liaisons parallèles.

#### 3-2 CARTE MOTEUR

Chaque carte moteur gère un axe. Elle sera équipée:

- D'un microprocesseur assurant le transfert des blocs de données reçus du calculateur maître vers le moteur et contrôlant la bonne exécution des consignes;
- D'un système d'asservissement en vitesse;



- D'un module de traitement des retours codeurs afin d'assurer l'asservissement en position;
- D'un système de sécurité permettant de bloquer l'axe concerné dans le cas de réception d'un ordre en provenance de la carte de sécurité ou par suite d'une détection d'anomalie sur cette même carte;
- Des signaux de synchronisation.

### 3-3 CARTE DE SECURITE

Elle comprend:

- Un microprocesseur assurant les transferts de blocs de données vers le calculateur maître et la gestion des différents capteurs de sécurité;
- Des entrées permettant de connecter divers types de capteurs (détection proximétrique,...).

### 3-4 REMARQUES

Les dialogues entre les processeurs maître et esclave doivent se faire en mode d'interruption (principe d'appel/réponse) avec éventuellement une hiérarchie dans le contrôle des appels.

Nous avons acheté les cartes industrielles formées autour du microprocesseur 6809 (présentées en annexe4) et nous avons développé les premiers protocoles du logiciel de commande. Mais nous n'avons pas jusqu'ici rassemblé l'ensemble des éléments pour permettre enfin les expérimentations de validation de la nouvelle commande.

## 4 - RETOUR D'INFORMATIONS

Certaines variables résumant l'état du système à commander sont présentées à l'Homme. Le choix de ces variables et les éventuelles transformations qu'elles subissent avant d'être transmises à l'opérateur dépend en partie de la technologie et en partie de l'ergonomie. Par exemple, est-il nécessaire de transmettre à un conducteur de voiture des informations concernant la vitesse du véhicule et son accélération ?

L'importance des choix des variables et des transformations a souvent été solignée, en particulier en ergonomie et en théorie de la décision. En règle général, la conception du poste de contrôle et de commande est conditionnée par l'importance qu'on accorde aux flux d'informations de retour (figure 12).

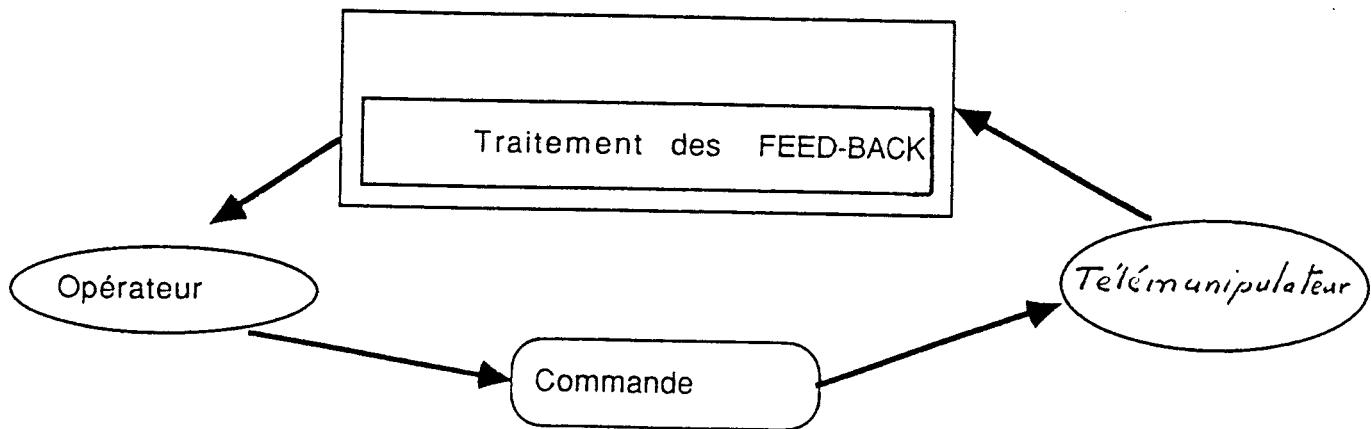


Figure /III-12/: Poste de controle et de commande  
(interaction H/M )

Au premier abord, la question qui se pose est de savoir sous quelle forme on doit présenter les informations de retour à l'opérateur:

- Une représentation réelle ou synthétique?
- Une synthèse textuelle, graphique ou vocale?.

Compte tenu du domaine d'utilisation de cet appareil, il est peut-être préférable d'avoir une redondance de "feed back" pour aider l'opérateur à la décision (sans pour autant saturer ses capacités cognitives). Par exemple, il serait justifié lors de l'intervention sur le globe oculaire, de disposer en même temps que l'image vidéo, une représentation synthétique du modèle de l'oeil à opérer. Ce modèle étant pré-identifié grâce à une analyse échographique réalisée au préalable/TRISCAN/. Cependant la présentation auditive garde un certain intérêt dans les situations où la tâche est multiple. Dans ce cas, une dimension de l'information ou une information secondaire peut être présentée auditivement sans que la performance visuelle en soit détériorée,/CITT 74/.

Les schémas de la figure /13/ montrent l'aspect retour d'information dont le microtélémanipulateur est doté actuellement.

L'état de chaque sous-système (chaque degré de liberté) est visualisé en temps réel (en activité, bloqué, au repos) sur l'écran devant l'opérateur. Celui-ci, grâce à cet affichage connaît à tout moment, le mode de fonctionnement en cours (télémanipulé, automatique, par la voix, bilatéral symétrique) et il peut alors choisir à volonté le mode de fonctionnement souhaité.

Par ailleurs, la conception complète d'un poste opérateur ergonomique propre au microtélémanipulateur reste à étudier. Il sera défini et complété au fur et à mesure que les essais de validation en prouveront le besoin.

PORTEUR			
ACTIONNEURS		CAPTEURS	MOYENS
<input checked="" type="checkbox"/>	TX sens +	<input type="checkbox"/>	DE COMMANDE
<input type="checkbox"/>	TX sens -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Joystick
<input type="checkbox"/>	TY sens +	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> par Voix
<input type="checkbox"/>	TY sens -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Bras-maître
<input type="checkbox"/>	TZ sens +	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Automat.
<input type="checkbox"/>	TZ sens -	<input type="checkbox"/>	

SELECTION porteur/poignet (1/2)

Interprétation

- . Porteur sélectionné
- . Axe X en activité
- . Le moyen de commande est le Joystick

POIGNET			
ACTIONNEURS		CAPTEURS	MOYENS
<input type="checkbox"/>	TCX sens +	<input type="checkbox"/>	DE COMMANDE
<input type="checkbox"/>	TCX sens -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Joystick
<input type="checkbox"/>	TO sens +	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> par Voix
<input checked="" type="checkbox"/>	TO sens -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Bras-maître
<input type="checkbox"/>	RY sens +	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Automat.
<input type="checkbox"/>	RY sens -	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	ROTATION		

SELECTION porteur/poignet (1/2)

- . Poignet sélectionné
- . Translation de l'outil (retrait)
- . Outil en rotation
- . Mode: Automatique
- . L'axe Z Contrôlé par capteur proximétrique



Figure /III-13/: Présentation à l'opérateur des informations de retour

## V - CONCLUSION

En conclusion, nous résumerons les différents points qui nécessitent encore un certain développement pour permettre dans un proche avenir, l'expérimentation clinique de ce microtélémanipulateur.

<1> Le développement d'un poignet de commande à retour d'effort, qui devrait donner au chirurgien le sentiment de sentir physiquement l'effort de ses manipulations et aussi améliorer grandement la fiabilité de l'appareil.

<2> La reconfiguration de la commande selon l'architecture et avec le matériel proposé, afin de permettre à la version pré-industrielle de franchir la phase d'expérimentation.

<3> Les moyens d'observation (capteurs, caméra de vision, image de synthèse,...) doivent aussi être développés car pour travailler il est indispensable de voir. Pour compléter cet aspect d'observation, nous rappelons que le chirurgien dispose en plus de l'observation directe, d'un microscope opératoire d'agrandissement et quelquefois d'un retour télévisé.

Pour augmenter la sécurité d'intervention, il est nécessaire de concevoir des modules de détection proximétrique, qui devraient permettre le fonctionnement en mode référencé capteurs. Cette approche est traitée dans le chapitre suivant.

#### CHAPITRE IV

UTILISATION DES PROXIMETRES OPTO-ELECTRONIQUES  
POUR L'ELABORATION D'UN MODULE DE CONTROLE/SECURITE  
ET D'AIDE A LA MICROTELEMANIPULATION



## CHAPITRE IV

### UTILISATION DES PROXIMETRES OPTO-ELECTRONIQUES POUR L'ELABORATION D'UN MODULE DE CONTROLE/SECURITE ET D'AIDE A LA MICROTELEMANIPULATION

I- <u>POSITION DU PROBLEME</u>	p.1
II- <u>ROLE DES PROXIMETRES</u>	p.2
1- CHOIX TECHNOLOGIQUE	p.3
2- PRINCIPE DES CAPTEURS UTILISES	p.4
3- BUT ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS	p.7
4- MODELE SIMPLIFIE	p.8
5- QUELQUES REponses $V=F(D)$	p.8
6- IMPLANTATION DES CAPTEURS DANS L'INSTRUMENT	p.11
7- REDONDANCE DES INFORMATIONS	p.14
III- <u>FONCTIONS DE BASE ET ALGORITHMES CORRESPONDANTS</u>	p.15
1- NECESSITE D'UN MODULE DE SECURITE	p.15
2- FONCTIONS DU MODULE	p.16
3- ALGORITHMES ET METHODES DE MESURES	p.16
3-1 MODE DETECTION	p.16
3-2 MODE ESTIMATION DE DISTANCE	p.20
IV- <u>DISPOSITIF EXPERIMENTAL</u>	p.22



1- PLATEFORMES DE SIMULATION	..... p.22
1-1 CHOIX DE REALISATION	.....p.22
1-2 DETECTION	..... p.23
1-3 SUIVI DE SURFACE	..... p.25
1-3-1 BUT DES EXPERIENCES	..... p.25
1-3-2 DEROULEMENT DES ESSAIS	..... p.25
2- RESULTATS	..... p.27
2-1 INTERVENTIONS MANUELLES (Im)	..... p.27
2-2 INTERVENTIONS TELEMANIPULEES (It)	..... p.29
2-3 INTERVENTIONS REFERENCEES CAPTEURS	..... p.31
V- <u>CONCLUSION</u>	..... p.32

UTILISATION DES PROXIMETRES OPTO-ELECTRONIQUE POUR  
L'ELABORATION D'UN MODULE DE CONTROLE/SECURITE ET D'AIDE A  
LA MICROTELEMANIPULATION

I- POSITION DU PROBLEME

Le concept d'un télémanipulateur moderne désigne un système "intelligent", doté de moyens d'action physique, de facultés de perception de l'environnement, de capacités d'analyse de l'information, de prise de décision et de communication avec l'Homme. Son "intelligence", caractérisée par son degré d'autonomie, dépend en grande partie de son pouvoir de perception et des possibilités de modification du comportement qui lui sont associées.

C'est pour cela qu'une part importante des recherches entreprises actuellement, se donnent pour objectif la commande adaptative relativement à l'environnement /ANDR 83/,/ESPI 84/,/WANP 84/.

Les récents progrès accomplis consistaient à doter les télémanipulateurs de "sens artificiels" et à améliorer les algorithmes de traitement et de commande s'y référant. Ainsi, dans le cadre du projet national A.R.A., l'équipe de l'I.R.I.S.A. (Institut National de Recherche en Informatique) a développé un système décentralisé multicateurs proximétriques pour le guidage local de l'effecteur d'un télémanipulateur industriel. Ces études visant l'amélioration de l'efficacité et de la sûreté du fonctionnement des systèmes de téléopération, vont dans le sens de l'allègement de la charge de travail et d'interprétation de l'opérateur humain. Cette assistance se traduit par l'introduction de dispositifs adaptatifs et la création de nouvelles procédures de communication.

On mesure alors l'intérêt de la perception de l'environnement local, par capteurs de proximité, permettant une réelle adaptation sur le domaine de travail. dans le contexte de la T.A.O., l'information proximétrique est fondamentale pour de nombreuses applications ( travail en vision altérée, complexité et diversité des tâches); la prise en compte de celle-ci intervient à deux niveaux:

- Dans le sens de l'autonomie de l'esclave, par la réalisation de sous tâches automatiques sous forme de commandes référencées capteurs.
- Dans la restitution, à l'opérateur, d'informations sur l'environnement local: ceci sous forme graphique, sonore ou d'une synthèse vocale.

Le cahier des charges du microtélémanipulateur chirurgical porte une importance primordiale à l'aspect sécurité vis à vis du patient. C'est pourquoi, nous avons pensé, dans le cadre de ce projet à développer un module de sécurité basé sur l'exploitation du retour d'information proximétrique. Les capteurs doivent être intégrés dans l'organe terminal.

## II -ROLE DES PROXIMETRES

La fonction essentielle d'un capteur proximétrique concerne la perception de l'environnement local. En effet il est mentionné par plusieurs auteurs /ANDR 83/, /ESPI 84/, /BEJC 79/, /CANA 82/ que les actions et l'évolution d'un télémanipulateur sont des phénomènes locaux dans l'espace et dans le temps. Dans le cas général de la vision en robotique, les systèmes de perception globale utilisent des caméras (vision à 2 ou 3 dimensions).

Le point de vue qui nous intéresse est la perception par capteurs proximétriques intégrés dans l'instrument. L'idée relève de cette approche bien illustrée par la formule "oeil au bout de l'instrument" et permet grâce à des commandes judicieuses:

- D'assurer une sécurité suffisante pour le système d'intervention, en générant un comportement à caractère adaptatif face à des variations attendues ou inattendues de l'environnement;
- De réduire la complexité des traitements par rapport aux analyses globales, et par la rapidité qui en résulte, d'améliorer la dynamique de l'interaction;
- De disposer d'informations en bout de chaîne permettant de réaliser une commande en boucle fermée sur une tâche suffisamment décrite.

A titre de résumé comparatif, nous donnons figure /1/ l'analyse comparative de G. ANDRE /ANDR 83/ concernant, les caractéristiques des deux approches (perception globale et perception locale).

	Perception Globale	Perception Locale
Vision	vision d'ensemble généralement fixe	Vision Locale Mobile
Information	débit important et fixe	Débit d'information généralement faible et variable (limité par nombre de voies)
Traitement	Traitement d'ensemble fixe pouvant être long	Traitement rapide de durée variable
Reconnaissance Environnement	Reconnaissances des formes possible dans le cas général	Seulement reconnaissance locale de zones de préhensibilité.
Commande	Commande en Boucle ouverte Génération d'actions de Haut niveau	Commande en Boucle fermée sur cibles ou obstacles Génération de primitives d'actions référencées aux capteurs
Précision	Dépend de la précision mécanique du manipulateur et de la résolution du capteur	dépend uniquement de la position relative Pince-objet
Saisie	ne permet aucun contrôle	permet la poursuite et la saisie d'objets fixes ou mobiles
Contraintes Techniques d'utilisation	Vidéo nécessite ambiance favorable (lumière, contraste..) Techniques 3D lourdes et complexes	Contraintes spécifiques des capteurs utilisés et dont la réponse dépend de la nature et orientation des objets.
Rapport <u>Qualité information</u> coût global	Moyen	très favorable

Figure /IV-1/ : Perception de l'environnement  
approches globale et locale  
d'après /ANDR 83/.

### 1- CHOIX TECHNOLOGIQUE

Il existe plusieurs types de capteurs proximétriques. Une classification suivant les principes physiques, fait apparaitre cinq principaux types de capteurs:

- Pneumatique;
- Inductif et capacitif;
- Hyperfréquence;
- Ultra-sonore;
- Optoélectronique infra-rouge.



Nous ne parlerons pas davantage de la technologie des différents capteurs, de leurs principes de fonctionnement, et de leurs domaines d'applications; le lecteur pourra consulter avec intérêt, les études de synthèse présentées dans /ANDR 83/, /CANA 82/, /ESPI 80/ et /BAUZ 81/. Mais il est important de signaler que le choix du type de capteur dépend essentiellement de l'application envisagée.

En ce qui nous concerne, le choix des capteurs est conditionné par les trois contraintes suivantes:

- a) Encombrement minimum. Le capteur doit être intégré dans l'instrument;
- b) Efficacité de détection sur des faibles portées (0 à 50mm) dans le milieu envisagé;
- c) L'utilisation des capteurs ne doit pas présenter de danger pour le sujet qui subit l'intervention.

C'est pourquoi, nous avons utilisé des capteurs optoélectriques à fibres optiques pour doter l'instrument du micromanipulateur d'une vision proximétrique suivant son axe de translation principal ( l'axe de l'outil TO ).

## 2 - PRINCIPE DES CAPTEURS UTILISES

Le principe de base repose sur la mesure de la distance entre un réflecteur et un embout de mesure formé par deux extrémités de monofibres optiques (figure /2/). Lorsqu'un flux lumineux constant FE est injecté dans la fibre d'émission, le flux reçu par la fibre de réception, après réflexion du flux émis par le réflecteur situé à une distance X, est lié à cette distance par une loi dont les deux zones intéressantes sont (figure /3/):

- Une zone linéaire donnant une proportionnalité entre le flux reçu et le déplacement,
- Une zone beaucoup plus grande où le flux varie sensiblement comme l'inverse du carré de la distance X.

L'étendue de mesure envisagée pour ce capteur étant de plusieurs mm; la zone à exploiter (en  $1/X^2$ ) va de 0 à 20 mm. Le schéma de principe (figure /4/) montre la composition des circuits d'émission et de réception de ce module (d'après le plan de /SEAT/)

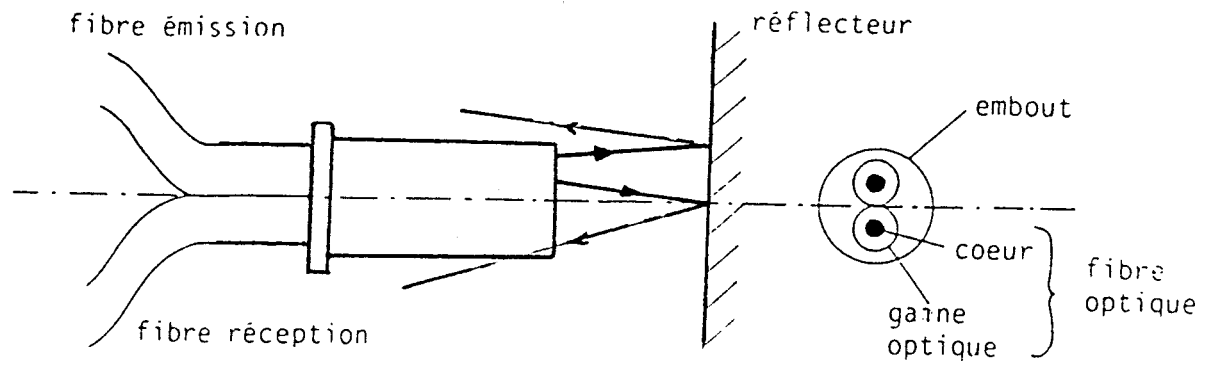


Figure /IV-2/ : L'embout actif de la fibre optique

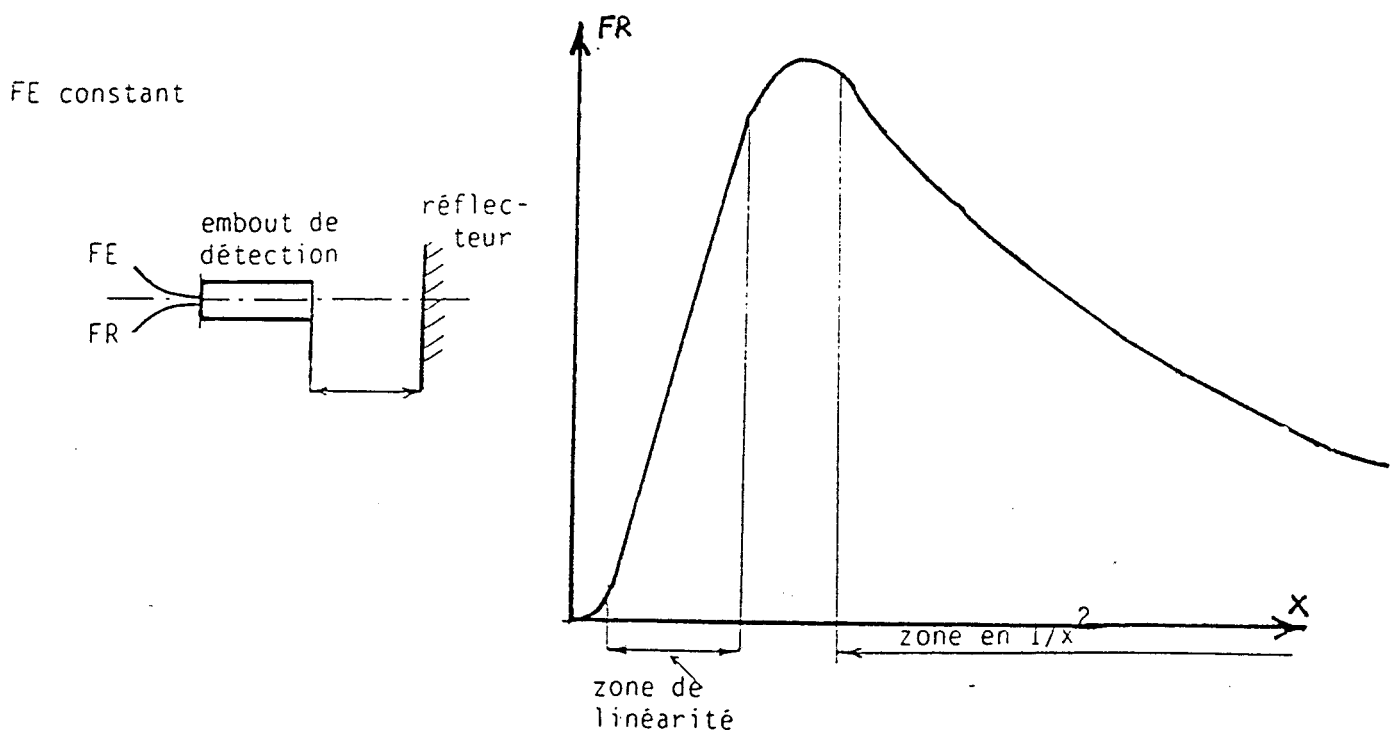


Figure /IV-3/ : Caractéristiques d'une cellule d'émission/réception



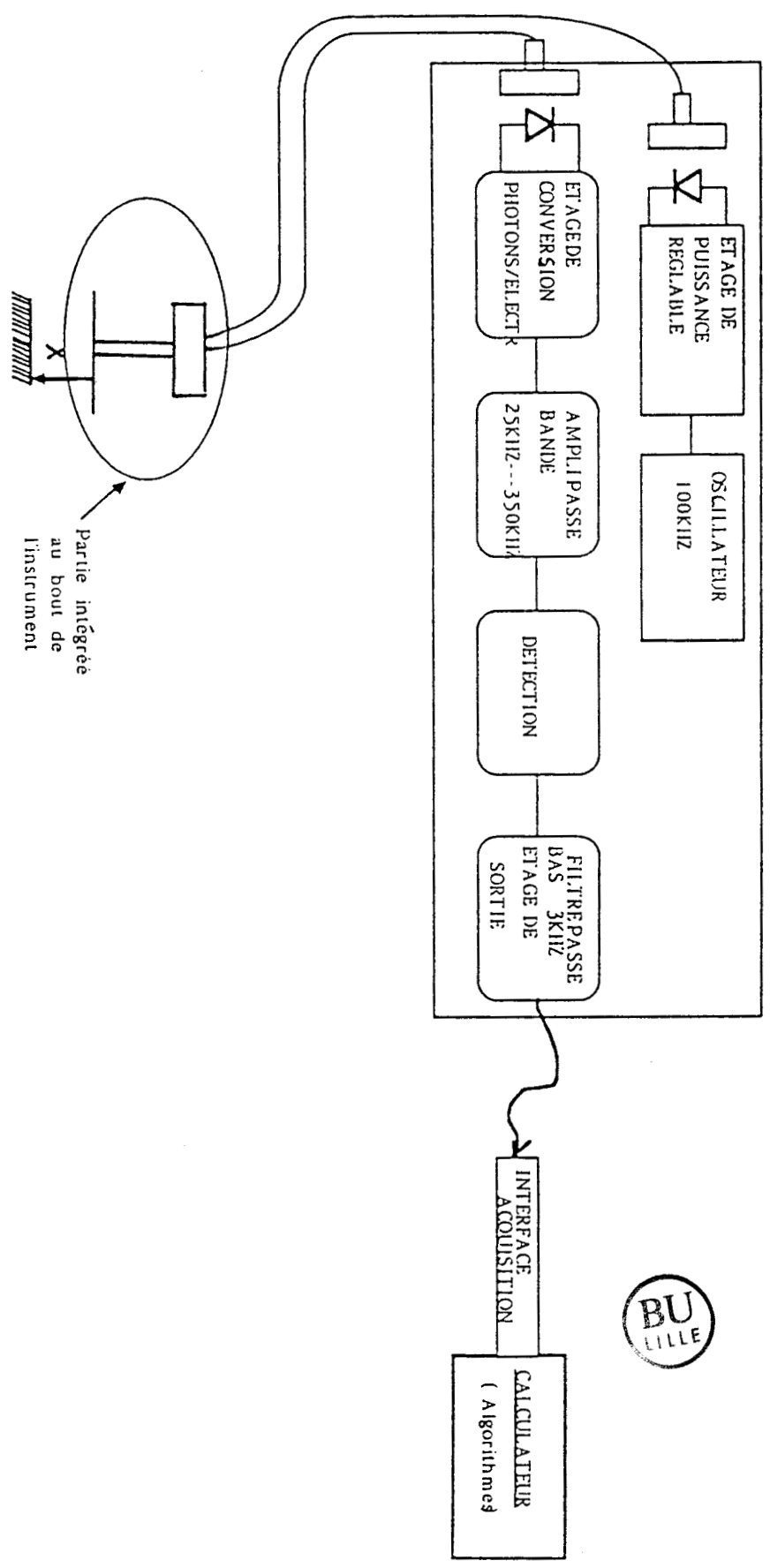


Figure /IV-4/ : Schéma synoptique de principe

BU  
LILLE

### 3 - BUT ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

Le but est alors de reconnaître à temps le danger pour freiner l'avancement de l'outil du microtélémanipulateur ou l'orienter dans une autre direction ou alors se mettre en état bloqué et donner la main à l'opérateur pour permettre la reprise du contrôle.

Si on doit arriver au contact avec certains organes, la connaissance de la situation de ces organes associée au contrôle des mouvements peut éviter de les détruire. Par exemple, lorsque le travail de l'instrument a lieu tout près de la rétine (nettoyage du vitré dans une région proche de la rétine: figure /5/) les capteurs de proximité fournissent les informations nécessaires pour l'élaboration de la stratégie qui s'impose (blocage de degré de liberté, travail dans un plan,...).

D'une façon générale, les proximètres adoptés peuvent être utilisés pour les fonctions suivantes:

- Détection de présence d'un obstacle,
- Positionnement en automatique,
- Fonctionnement en mode anti-collision,
- Estimation de distance par rapport à une cible,
- Reconnaissance de formes simples.

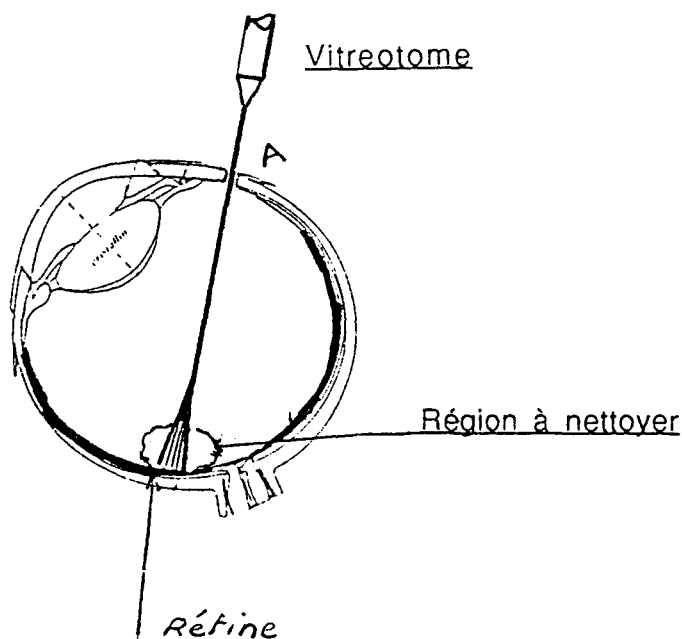


Figure /IV-5/ : Nettoyage du vitré dans une région proche de la rétine.

#### 4 - MODELE SIMPLIFIE

En raison de l'intégration sur le champ du capteur, la résolution analytique est complexe dans le cas général. Toutefois, dans le cas du capteur miniature, une formule simplifiée est applicable.

##### HYPOTHESES:

- > L'étude porte sur la réponse d'un couple émetteur/récepteur face à un plan, supposé parfaitement diffusant, d'albedo . et perpendiculaire à l'axe de la partie sensible
- > Emetteur et récepteur sont parallèles et supposés confondus; donc nécessité de miniaturisation.
- > Le demi angle d'ouverture  $\theta$  est identique à l'émission et à la réception. A l'intérieur de cet angle, la source rayonne suivant une loi de Lambert de la forme:  
$$I = L \cdot S_e \cdot \cos \alpha$$

Avec L: Luminance; I: Intensité lumineuse;  $S_e$ : Surface émise.

Moyennant ces hypothèses, le signal S de sortie du photo-récepteur est directement proportionnel au flux  $\Phi$  /ESPI 82/:  
soit  $S = K \cdot \Phi$  avec  $\Phi = k \cdot A / d^2$

#### 5 - QUELQUES REPONSES $V = F(d)$

Le modèle mathématique simplifié montre que la réponse du capteur tend vers une loi inversement proportionnelle au carré de la distance; les résultats expérimentaux vérifient cette même tendance (figure /6/).

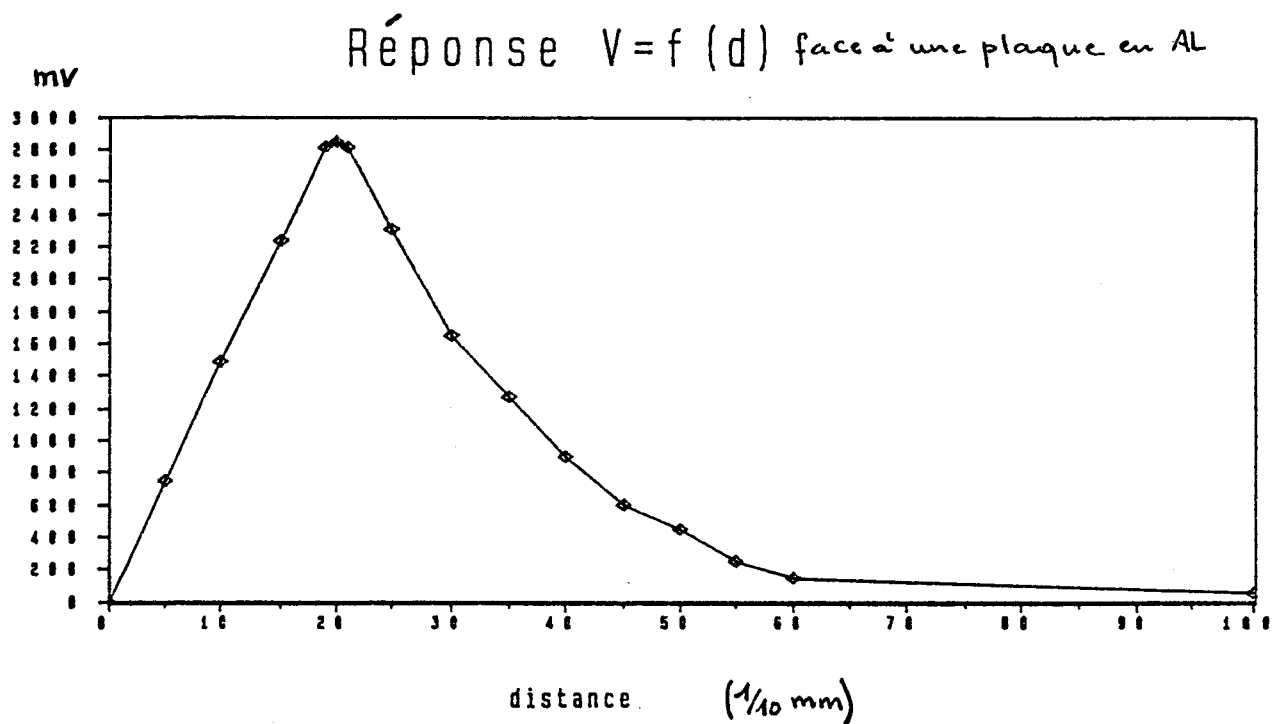
Par ailleurs, on a également vérifié expérimentalement que la caractéristique du capteur est fonction:

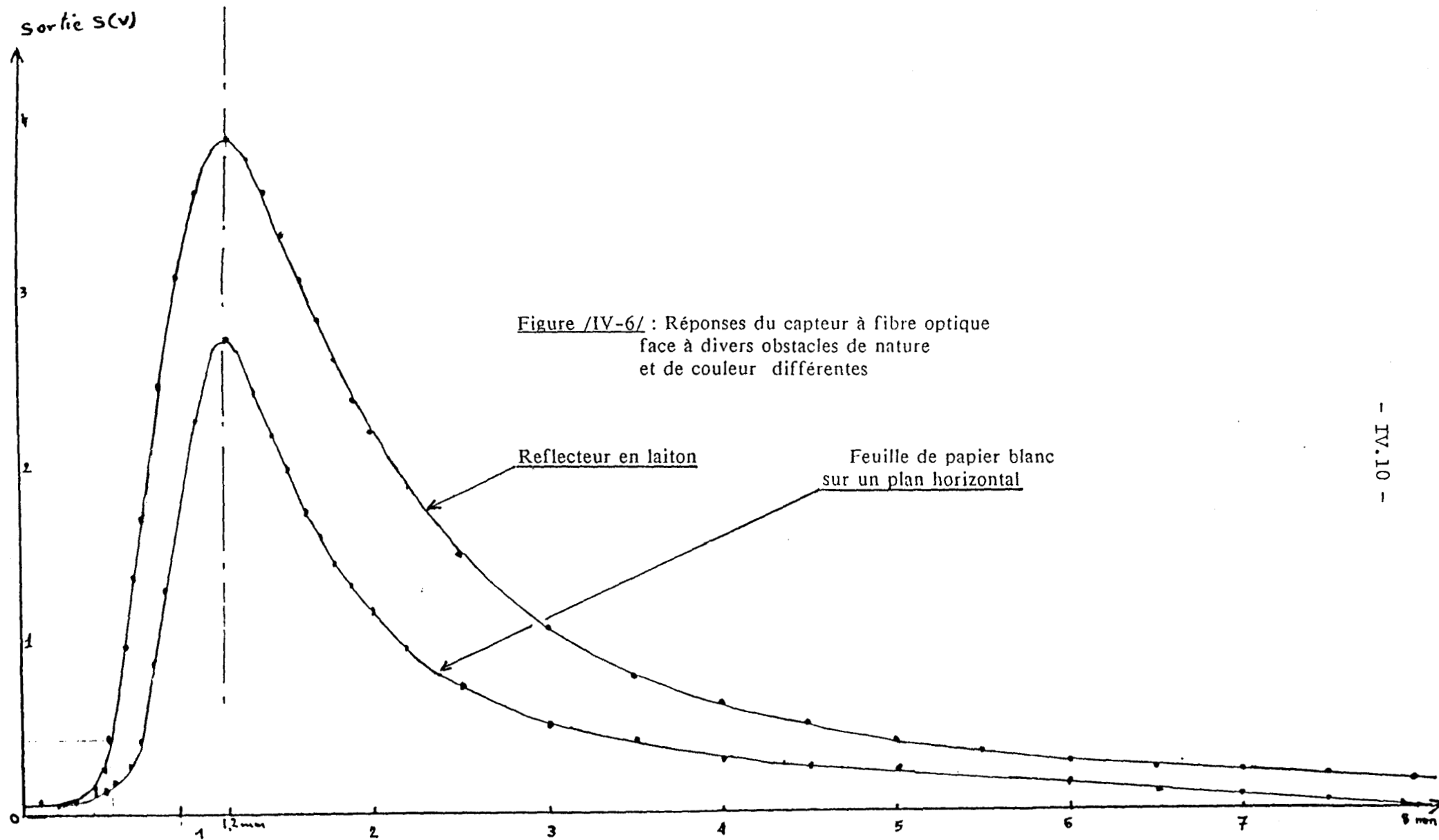
- de l'albédo (rapport entre le flux lumineux reçu et le flux lumineux rétrodiffusé) de l'objet visé: Il est lié à la couleur, l'état de surface...
- de l'indice du plan cible.

Pour réaliser ces mesures d'étalonnages, nous avons utilisé l'axe de translation Z du microtélémanipulateur qui offre une précision de 0.001 mm. Le pas de déplacement étant fixé à 0.1 mm.

Plusieurs manipulations d'étalonnages ont été effectuées, en particulier :

- a) réponse face à un plan horizontal (plaque en aluminium, feuille de papier blanc d'imprimerie, mêmes cibles de couleurs différentes...);
- b) réponse en détection dans un cuve pleine d'eau.





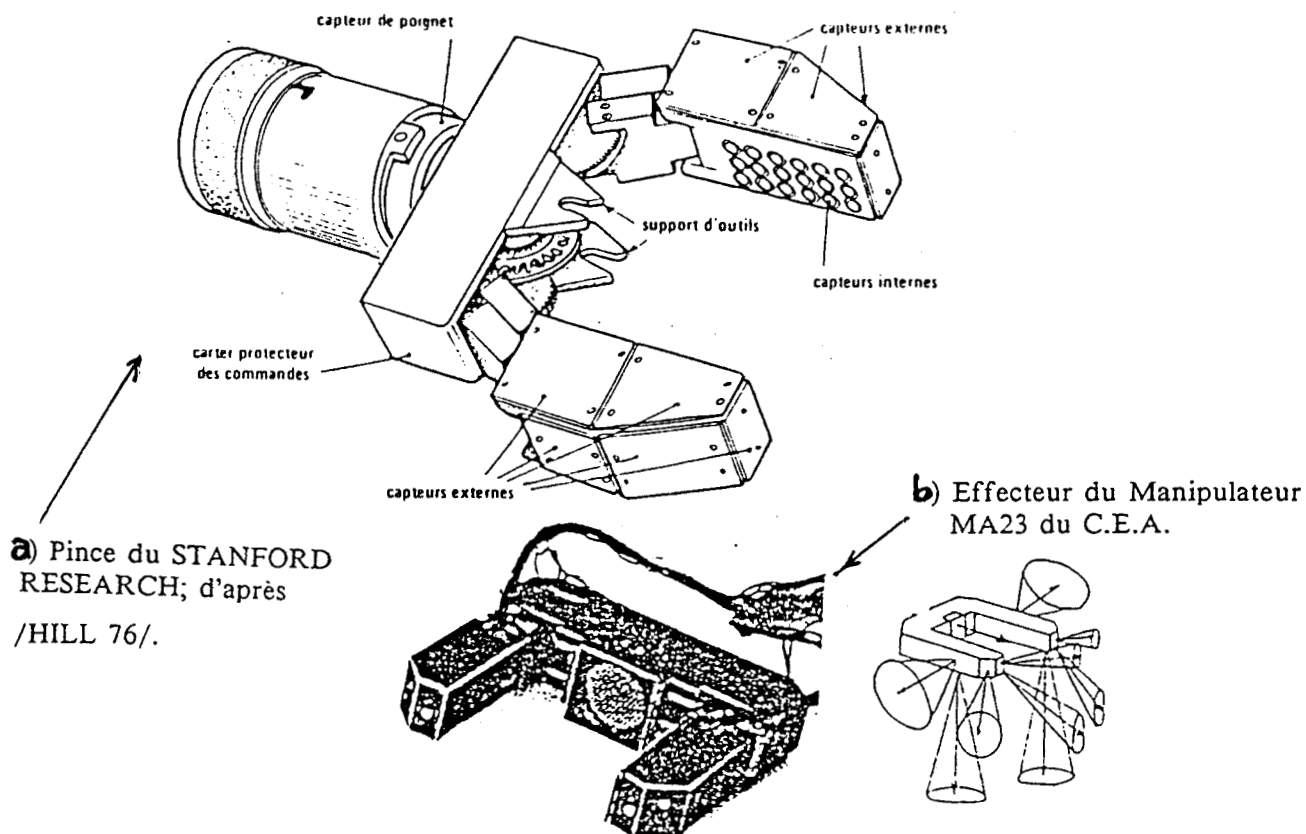
## 6 - IMPLANTATION DES CAPTEURS DANS L'INSTRUMENT

Comme nous l'avons déjà signalé, le choix et l'emplacement des capteurs sont conditionnés par l'application projetée. En ce qui nous concerne, notre objectif est d'intégrer un élément sensible au bout de l'outil exécutant, afin de rendre l'instrument en quelque sorte "intelligent" et de pouvoir présenter un effet de réflexe lors de l'approche des zones sensibles pré-apprises.

Par conséquent, avant de s'intéresser à l'exploitation des signaux, la question qui se pose est : Où faut-il installer les capteurs, comment les orienter et quel doit être leur nombre?

Dans les applications industrielles où l'organe terminal est une pince, les capteurs proximétriques sont intégrés dans celle-ci et orientés de manière à leur permettre d'assurer les fonctions qui leurs sont prévues (positionnement, saisie, suivi de surface,...).

Beaucoup d'efforts de développement étaient engagés ces dernières années en matière de réalisation d'effecteurs à perception proximétrique (figure /7/).





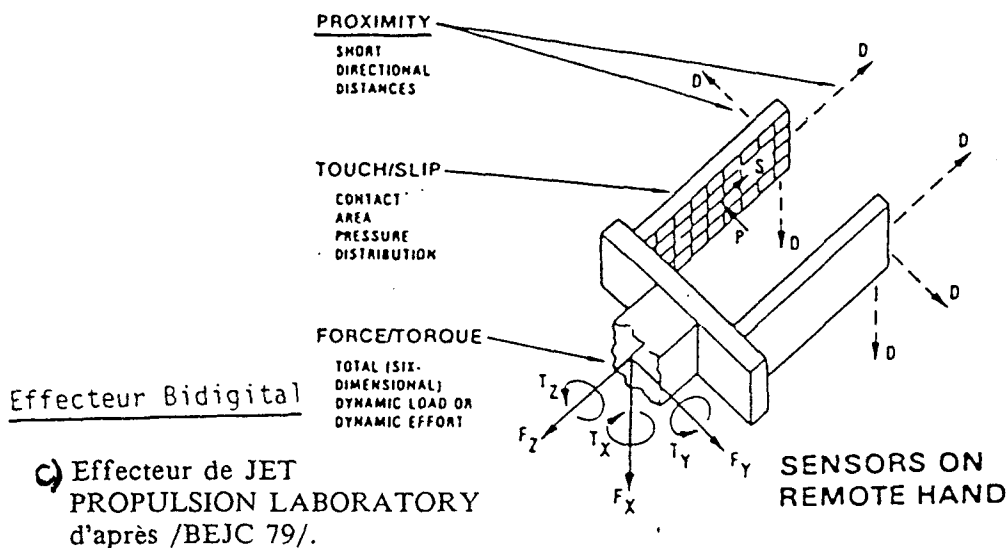


Figure /IV-7/ : Effecteurs à perception proximétrique

Dès lors où l'essentiel de la tâche se situe dans un environnement local proche de l'organe d'exécution, l'implantation des capteurs à d'autres niveaux (au niveau des segments du porteur par exemple), ne présente qu'un rôle de sécurité et d'anti-collision. Etant guidé par les applications de ce prototype de microtélémanipulateur chirurgical, et compte-tenu de son architectre spécifique, il nous a semblé essentiel d'implanter les capteurs sensibles à l'extrémité de l'instrument qui est du type crayon. Cet outil qui peut se trouver dans des zones locales à risque, doit en effet fournir des informations précises relatives à la tâche, à la fois par des traitements en boucle ouverte (fonctionnement en mode réflexe) et en boucle fermée (asservissement par rapport à la tâche). Le choix du nombre de capteurs et de leur répartition géométrique doit être judicieusement étudié. Pour notre part, les actions attendues de ces éléments sensibles sont:

- En phase d'approche à l'oeil: les fonctions de détection, d'estimation de distance et de positionnement,
- En phase de travail local: les fonctions d'anti-collision et de "feed-back" concernant l'extrémité de l'outil.

— En vitrectomie: la présence de l'unité sensible au bout de l'instrument permet d'éviter la destruction des organes sains et qui peuvent être cachés à la vue de l'intervenant; en particulier il faut éviter la collision avec la rétine. Dans ce cas un seul capteur peut jouer ce rôle.

— En stéréotaxie: la phase préliminaire consiste à se positionner perpendiculairement à la surface d'attaque et ceci grâce à l'assistance des capteurs (soit sous forme de retour synthétique des positions, soit en positionnement automatique lorsqu'on connaît d'avance les

coordonnées du point d'attaque). Dans ce cas, le nombre minimum des capteurs est de trois; ils sont installés à l'extrémité de l'outil (électrode ou guide d'onde laser), dans une configuration circulaire, espacés de 120° (figure /8/ et photo /1/).

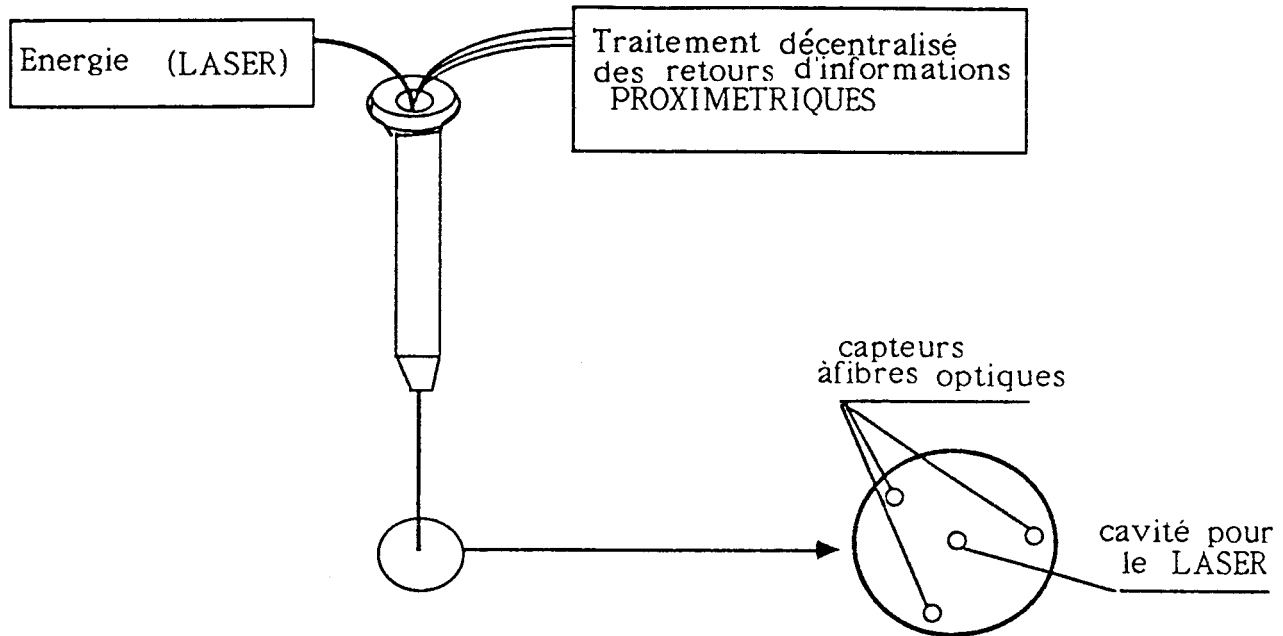


Figure /IV-8/ : Adaptation des capteurs à fibres optique à un instrument type crayon (exp: le vitréotome)

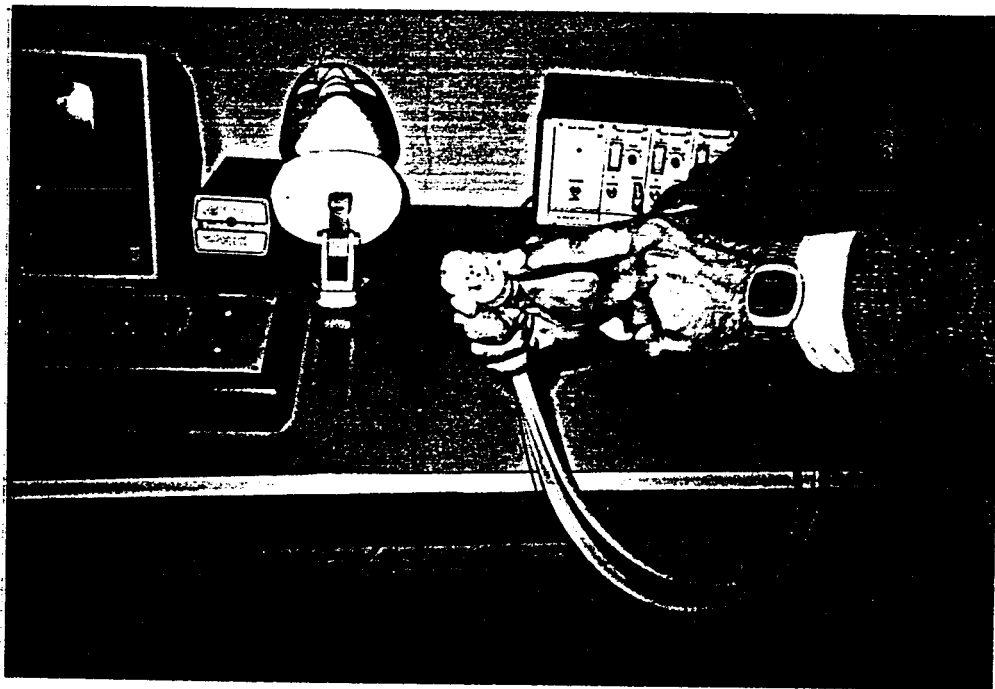


Photo IV-1 : Instrument actif adapté au Microtélémanipulateur (maquette pour les essais).

—Pour l'opération de kératotomie: l'incision automatique nécessite une connaissance préalable de la forme de la cornée afin de décider du nombre de stris, leur emplacement, leur profondeur et enfin de la méthode d'intervention. Pour cela, nous pensons qu'il est possible d'envisager une phase de reconnaissance préalable déterminant la forme de la calotte cornéenne, grâce à une matrice de capteurs judicieusement conçue ( voir schéma de principe: figure /9/).

Toutefois toutes ces propositions demandent à être validée en clinique.

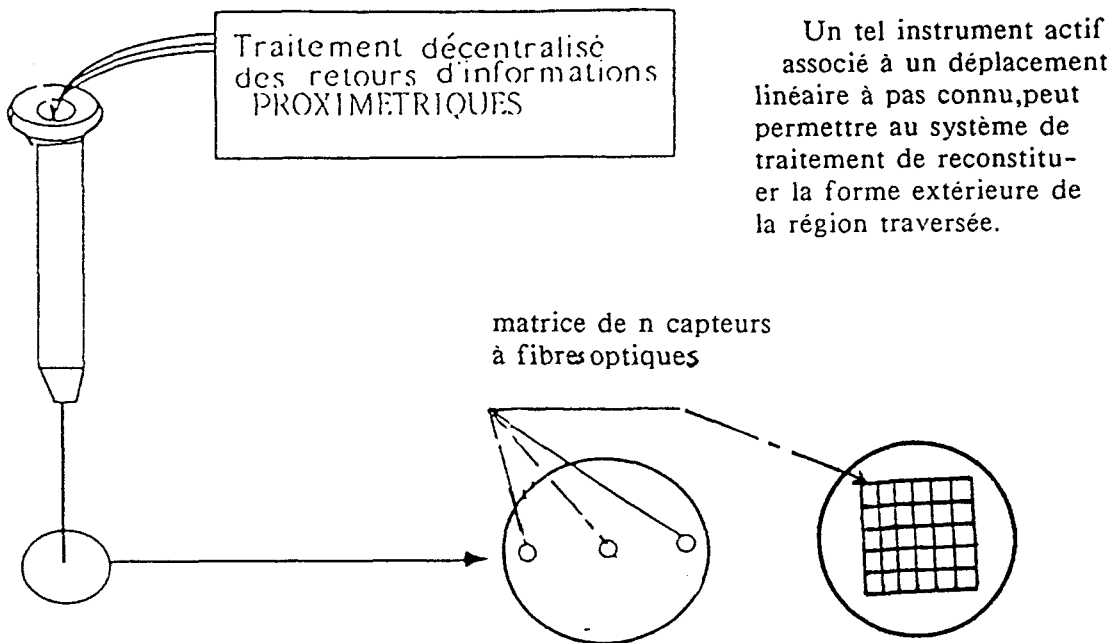


Figure /IV-9/ : Matrice de capteurs  
(n capteurs selon l'application)

## 7 - REDONDANCE DES INFORMATIONS

Comme il a été signalé auparavant, l'idéal serait d'implanter plusieurs capteurs ayant diverses orientations dans l'instrument et ceci dans le but d'augmenter la sécurité en multipliant le nombre de points de mesure.

La redondance des informations de retour peut être utile dans deux directions intéressantes concernant les performances du système télémanipulateur:

a) elle permet par regroupement d'accroître la confiance dans la qualité de l'information acquise par un capteur ou un ensemble de capteurs assurant une fonction sensorielle,

b) elle permet aussi d'élaborer une stratégie de remplacement lorsque un système fournissant une information redondante devient défaillant. La fiabilité du télésystème s'en trouve accrue.

En récapitulation, nous pouvons résumer en trois étapes la démarche nécessaire pour équiper un organe terminal d'éléments sensoriels:

- 1) établir une analyse fonctionnelle sur l'organe effecteur,
- 2) en déduire les zones et capteurs concernés, tout en effectuant parallèlement une analyse de degrés de liberté mis en jeu,
- 3) enfin, déterminer l'implantation optimale des unités sensibles.

### III - FONCTIONS DE BASE ET ALGORITHMES CORRESPONDANTS

#### 1 - NECESSITE D'UN MODULE DE SECURITE

La variabilité de la performance de l'opérateur Humain influe négativement sur la performance du système Homme/Machine. L'Homme n'étant pas un système déterministe de type servomécanisme produisant toujours les mêmes effets pour les mêmes causes (conditions initiales, contextes identiques), il réagit au contraire de manière discontinue en adoptant un comportement approximatif. L'activité de l'opérateur lors du pilotage d'un processus étant alors constituée d'une succession d'opérations élémentaires. Les corrections engendrées sur les commandes sont réalisées lorsque celui-ci juge le fonctionnement du processus trop éloigné de ce qui est désiré.

A ce comportement flou /RAOU 76/, viennent s'ajouter d'autres facteurs caractérisant l'Homme: connaissance du système, fatigue musculaire, fatigue cognitive... ce qui engendre une forte probabilité de mauvaise performance du système H/M lorsque ces facteurs sont altérés.

Pour une télémanipulation avancée, il est alors nécessaire que le télémanipulateur soit muni d'un module de sécurité active ( capteurs + traitements) afin d'obtenir un bon fonctionnement du couple H/M. Ce bon fonctionnement implique un compromis dynamique entre les deux partenaires /LEPE 85/.

#### 2 - FONCTIONS DU MODULE

Les fonctions de base attribuées à ce module de perception à base de capteurs extéroceptifs à fibres optiques sont essentiellement les suivantes:

- détection de présence,
- estimation de distance,

- reconnaissance de formes simples.

L'étude développée dans ce chapitre porte sur les deux premiers points. L'originalité ici réside dans l'amélioration des performances de l'intervention liées au traitement d'informations de retour en provenance des proximètres de faible portée (0 à 20 mm) et d'encombrement minimum (fibre  $\leq 1$  mm de diamètre). Nous soulignons par ailleurs, que ces travaux de nouvelle conception d'outil intelligent sont actuellement poursuivis par l'équipe.

### 3 - ALGORITHMES ET METHODES DE MESURES

#### 3-1 MODE DETECTION

Dans ce mode de fonctionnement, l'information de perception traduit l'apparition d'obstacles ou la présence d'un objet pouvant être prises en compte dans la commande sous diverses formes:

- alarmes;
- déclenchement de tâches élémentaires;
- génération de stratégies spécifiques (évitement, blocage de certains axes...).

Le problème de détection consiste à tester sur la réponse du capteur  $X(t)$ , l'hypothèse de la présence d'un signal significatif  $S(t)$ . On se heurte alors à plusieurs sources de difficultés:

- le bruit lié au capteur;
- les bruits externes causés par l'ambiance (éclairage..);
- $S(t)$  dépend également de la vitesse de déplacement du capteur devant l'objet.

Il existe de nombreuses techniques permettant d'exploiter le signal  $X(t)$  pour la détection d'objet /TREE 68/, /RUGE 78/, /ANDR 83/. Parmi l'ensemble des méthodes, nous proposons l'algorithme d'Hinkley qui est dérivé de méthodes statistiques et concerne la détection séquentielle d'un saut de moyenne.

A tout instant  $i$ , le signal échantillonné de sortie capteur est  $X(i) = S(i) + b(i)$

où  $S(i)$ : le signal significatif instantané

$b(i)$ : un bruit interne

$(X_1 \dots X_i \dots X_n) \ n \in N$  : une suite de lecture

La méthode consiste en prenant comme hypothèses que le retard moyen de détection est minimum et que le temps moyen séparant deux fausses alarmes est maximale /ESPI 82/, à procéder par intégration des mesures pour construire la somme cumulée:

$$S_n = \sum_{i=1}^n (X_i - m) \quad \text{avec } m = (m_0 + m_1)/2$$

$m_0$  : valeur moyenne du signal en l'absence d'objet  
(valeurs d'étalonnage);

$m_1$  : valeur moyenne minimale du niveau de sortie produit  
par la cible

Si on se place dans les hypothèses précisées précédemment et si l'on observe le maximum de la réponse  $M_n = \text{Max}(S_i)$ , ( $1 \leq i \leq n$ ), la détection a lieu dès que  $M_n - S_n \geq L > 0$  où  $L$  est un seuil donné.

Pour simplifier le traitement informatique, on construit la séquence discrète des variables aléatoires de Bernouilli:

$$R(i) = \begin{cases} +1 & \text{si } X(i) \geq m \\ -1 & \text{si } X(i) < m \end{cases}$$

La somme cumulée est alors définie par:

$$S_n = \sum_{i=1}^n R(i) = \sum_{i=1}^n \text{sgn}(X(i) - m)$$

Le détecteur est alors totalement défini par la connaissance de  $m$  et du seuil  $L$ . Ces données peuvent être déterminées par apprentissage de façon à assurer une sureté de détection maximale selon les exigences de l'application. Le détecteur peut être facilement programmé selon la procédure de la figure /10/.



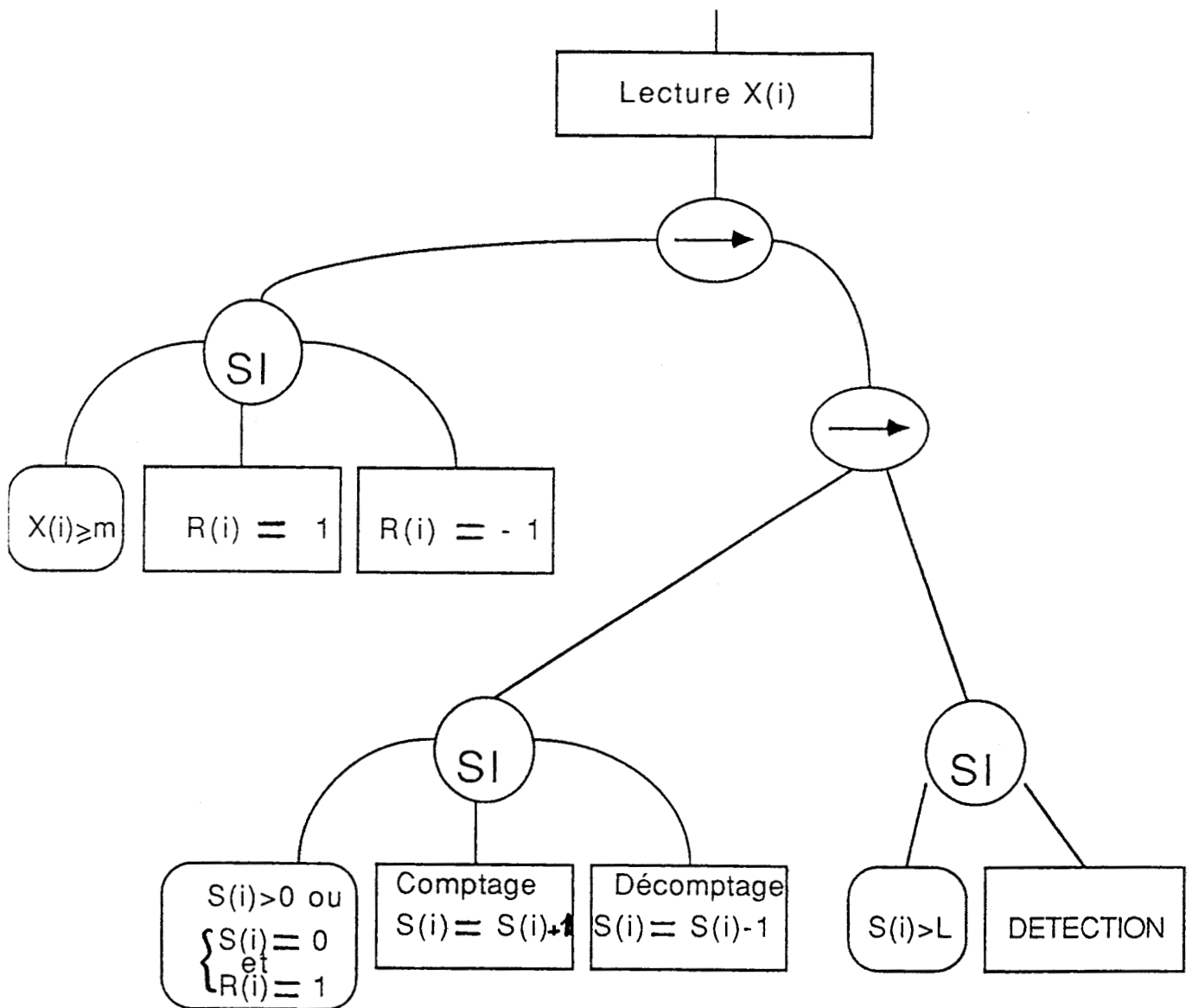
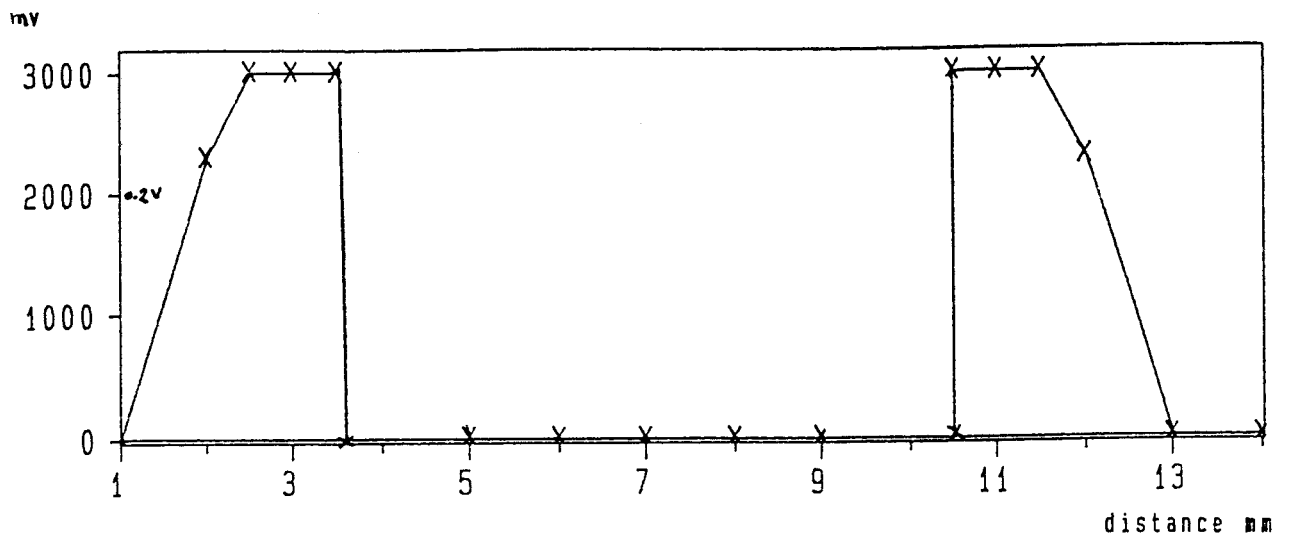


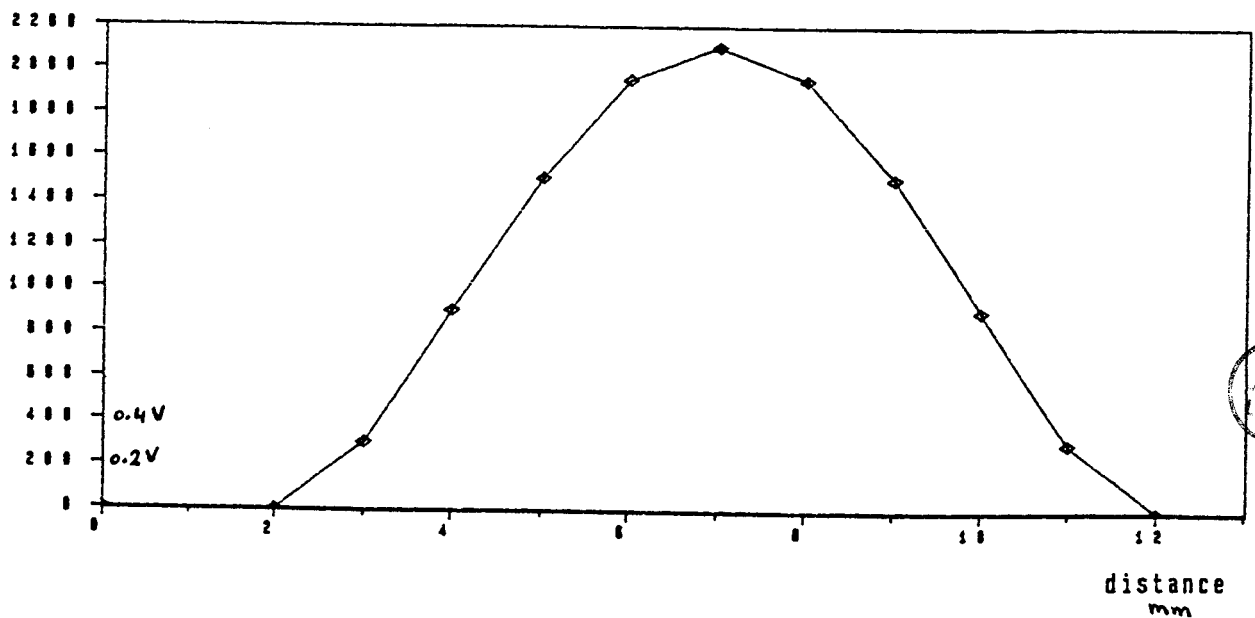
Figure /IV-10/ : Procédure de détection

detection: un ecrou vu de face



my

Détection : forme d'un "nez" : VUE DE FACE



### 3-2 MODE ESTIMATION DE DISTANCE

Il est évident que les capteurs de proximité ne peuvent être considérés comme de véritables télémètres. On ne peut alors parler de mesure de distance mais d'estimation de distance. En effet, la réponse d'un capteur est souvent non linéaire, non monotone, attachée de bruits et dépendante de la nature de la cible et de son orientation. Il existe essentiellement deux principes d'estimation de distance:

- <1> par multiplication des points de mesure dans l'espace
- <2> par multiplication des points de mesure dans le temps.

Le premier cas concerne la localisation d'objet à partir de configurations-types de capteurs, tandis que le deuxième s'intéresse à la réponse d'un capteur seul, au cours d'un déplacement. Il est à souligner que nous nous intéressons uniquement au deuxième cas.

Considérons maintenant l'aspect théorique d'estimation de distance, à partir de la réponse d'un capteur en déplacement rectiligne, face à un plan de caractéristiques connues ou variant lentement, tels que coefficient de rétrodiffusion . et orientation .

#### HYPOTHESES:

- > la réponse caractéristique du capteur face à un plan orthogonal à l'axe est  $X = f(d)$ ;
- > la réponse face à la cible est supposée de la forme  $X = \alpha * f(d)$  où  $\alpha$  est un coefficient d'affinité par rapport à la fonction de référence;
- > la mesure est perturbée par un bruit blanc;
- > le capteur est animé d'un mouvement linéaire  $L$  ( $L$  : l'incrément de déplacement connu à tout instant):  $d(i+1) = d(i) + L(i+1)$
- > la sortie est facile à linéariser (figure /11/).

$$\begin{cases} f(d) = a/d^2 & d \geq d_m \\ f(d) = f_M & d < d_m \end{cases}$$

Dans le cadre de ces hypothèses, plusieurs méthodes d'estimation sont proposées dans les littératures /LOPE 86/,/ESPI 82/,/COIF 81/,/ANDR 83/:

- par filtrage non linéaire (filtre de Kalman étendu);
- par identification de pente;
- par double moyennage temporel.

Nous proposons ici l'application de cette dernière méthode pour sa simplicité de mise en oeuvre. Ses conditions d'application sont les suivantes:

- les déplacements du capteur doivent être connus avec une bonne précision;
- la pente à identifier doit être constante. Ceci correspond à une cible fixe ou en déplacement à vitesse constante connue.

La procédure d'estimation est séquentielle: à distance  $D_1$ , on réalise  $n$  mesures temporelles dont la moyenne est  $\overline{Y}_1 = E(X(i)) = (1/n) \cdot \sum X(i)$ , après un déplacement  $dD$ , on procède de même  $\overline{Y}_2 = (1/n) \cdot \sum X(i)$ . La valeur de la pente est alors donnée par  $\hat{a} = (\overline{Y}_2 - \overline{Y}_1)/dD$ ,  $n$  étant déterminé en fonction de  $dD$ ; d'où l'estimation de distance

$$\hat{d}_2 = \overline{Y}_2 / \hat{a}$$

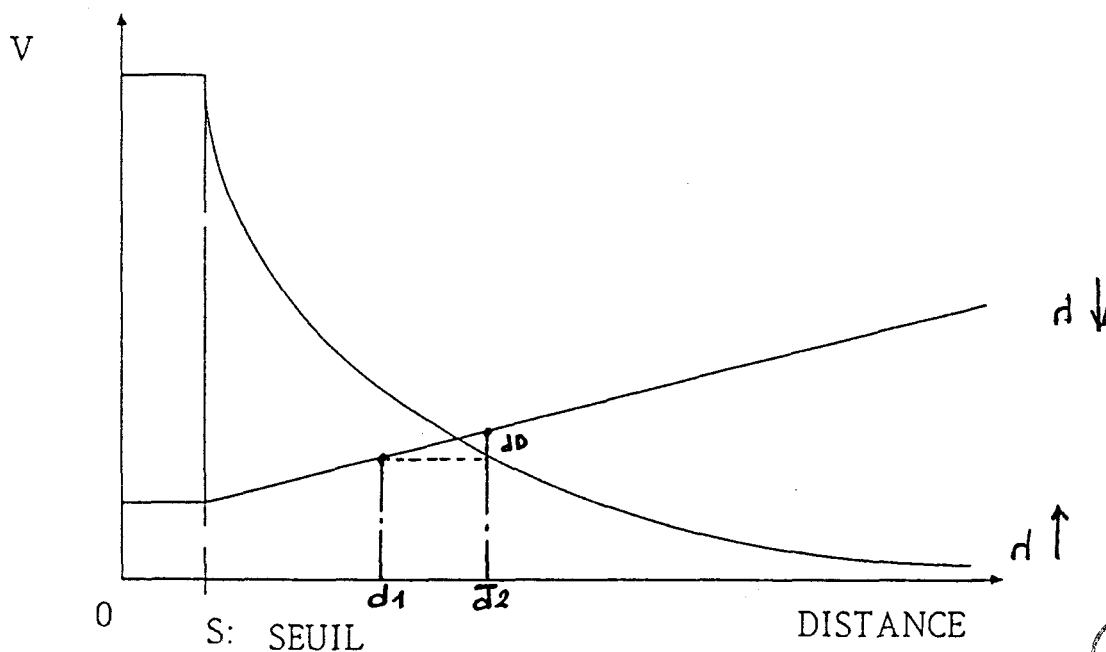


Figure /IV-11/ : Modèle simplifié de simulation

## IV- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 1- PLATES-FORMES DE SIMULATION

#### 1-1 CHOIX DE REALISATION

Il est nécessaire de développer des systèmes de simulation de tâches microchirurgicales utilisant le système de perception opto-électronique proposé, afin de relever les performances d'intervention en mode assisté. Le paramètre principal de la performance d'exécution est la précision  $\pi$ ; celle-ci n'étant pas mesurable dans les conditions réelles d'opération. Les essais de simulation engendrent essentiellement des résultats sous forme de succès/non réussite.

L'étude des systèmes de simulation de tâches est consacrée à une catégorie de tâches relativement simples:

- détection d'objets fixes,
- suivi de trajectoire,
- insertion tige/cylindre.

Le relevé en continu des positions du système d'intervention et des retours capteurs proximétriques, permet d'extraire des données telles que les erreurs de suivi, les valeurs de détection ou de collision, servant alors à comparer le système de télémanipulation avec l'homme.

Le but est d'évaluer ou de prouver l'intérêt du système de perception intégré dans l'instrument chirurgical. Cette étude de recherche devrait être concrétisée et complétée par une réalisation effective d'un prototype d'instrument chirurgical "intelligent" et miniaturisé.

Pour effectuer ces manipulations de simulation, nous avons commencé par entrainer les opérateurs sur le système de commande du microtélémanipulateur. Pendant cette phase d'apprentissage, l'opérateur batit la plus grande partie du modèle interne servant de référence pour la commande du microtélémanipulateur. Le but, ici, est de familiariser l'opérateur avec le système, de manière à ne pas influencer les mesures de caractérisation du système de perception qui vont suivre. Le facteur d'entraînement est donné par le suivi des performances sur plusieurs interventions (Figure /12/).

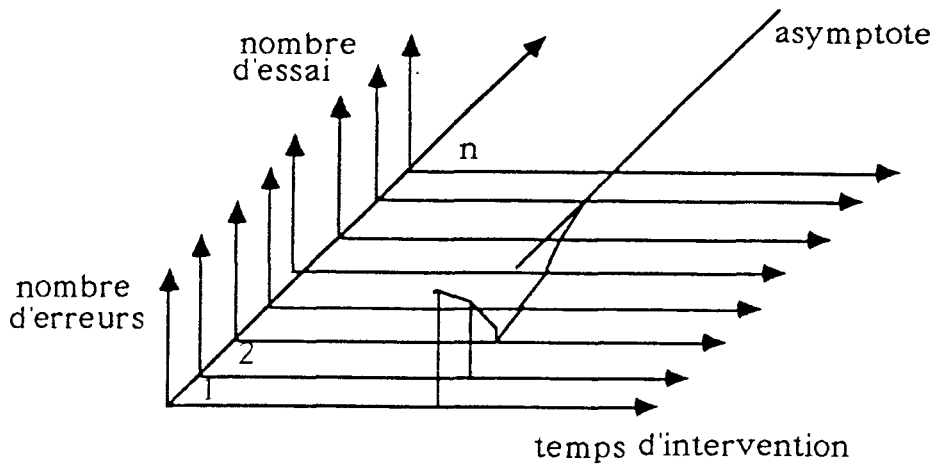


Figure /IV-12/ : Mesure de l'entraînement de l'Opérateur.

### 1-2 DETECTION

Il s'agit de déplacer le capteur à l'aide du microtélémanipulateur dans un plan horizontal et parallèle à un plan contenant l'objet fixe (cylindre, bille) et distant de  $d_1$  de celui-ci (Figure /13/) et noter les paramètres suivants:

- Le pas de déplacement du capteur (1/10 mm);
- Les niveaux digitaux du capteur proximétrique;

Les résultats des mesures sont schématisés dans la figure /14/.

En examinant le signal recueilli à la sortie du capteur dans ce déplacement de translation, on observe que les courbes reproduisent en quelque sorte l'enveloppe extérieure de l'objet. La détection dépend maintenant du seuil (L) à programmer:

- Si on adopte comme seuil (L1), on constate que l'objet sera détecté, mais il existe également deux fausses détections ou fausses alarmes.
- Par contre, si on adopte le seuil (L2), les fausses alarmes sont écartées, mais on introduit un retard de détection.

La solution est alors un compromis entre les deux situations et dépend évidemment de la valeur du facteur sécurité que l'on souhaite accorder au système. Une bonne détection doit maximiser le temps entre deux fausses alarmes et minimiser le retard moyen de détection.



- IV.24 -

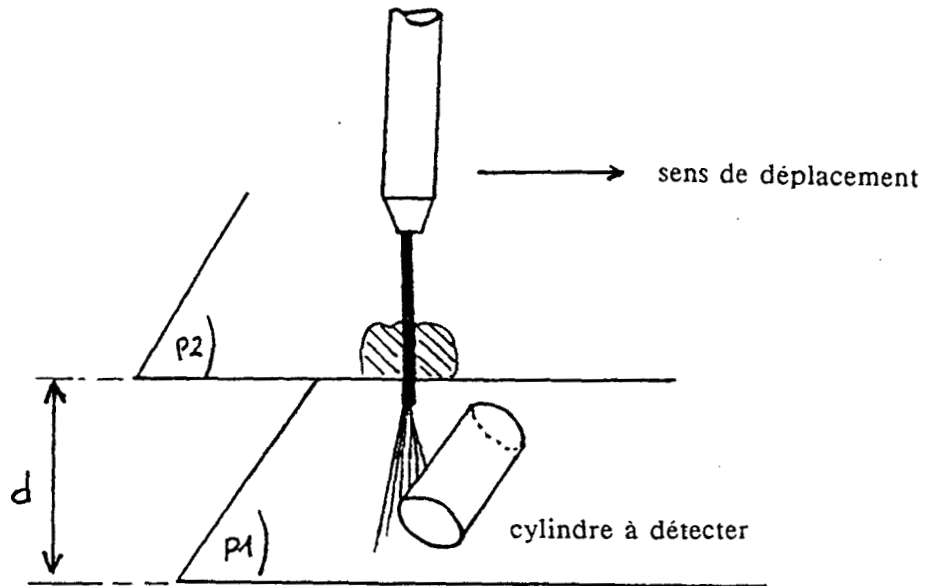
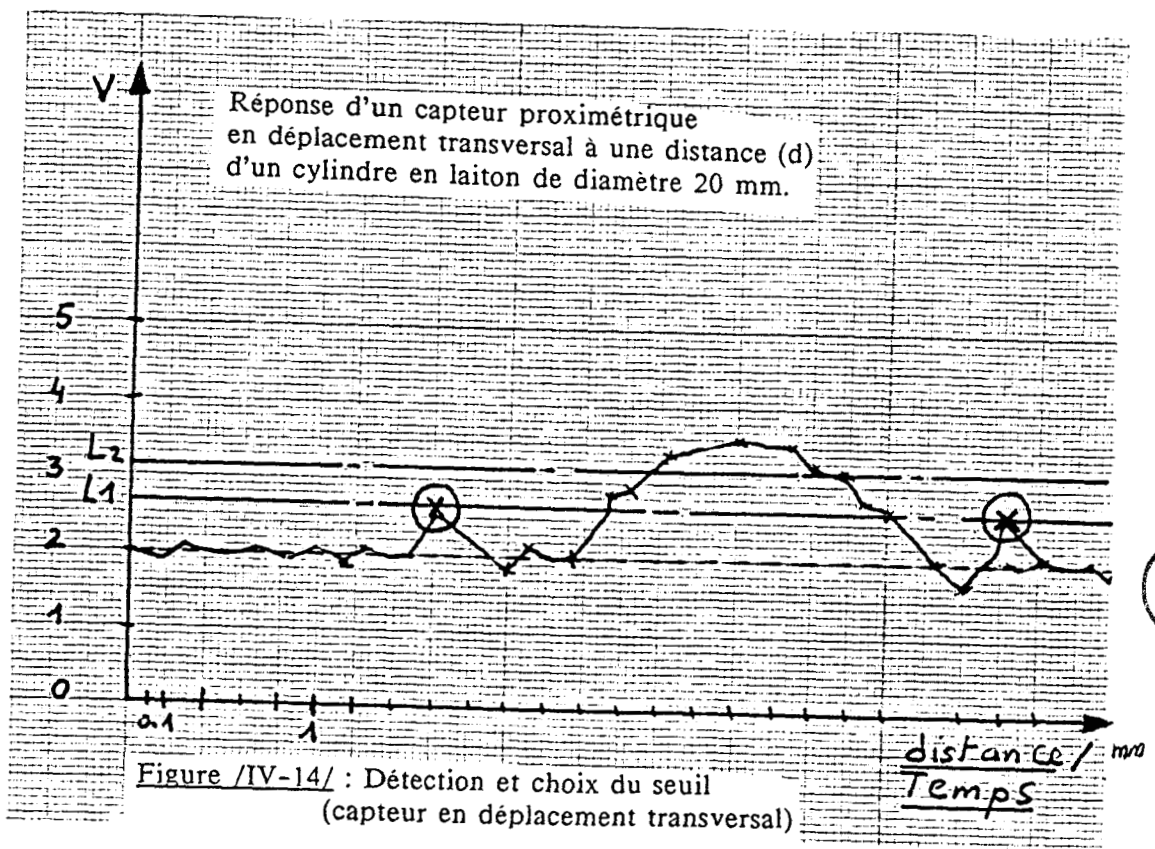


Figure /IV-13/ : Détection en déplacement transversal par rapport à un cylindre



BU  
LILLE

### 1-3 SUIVI DE SURFACE

Ce second constituant du dispositif d'essais est une maquette en aluminium composée d'une surface plane comportant une rainure de profondeur 3 mm et 1,5 mm de passage (Figure 15).

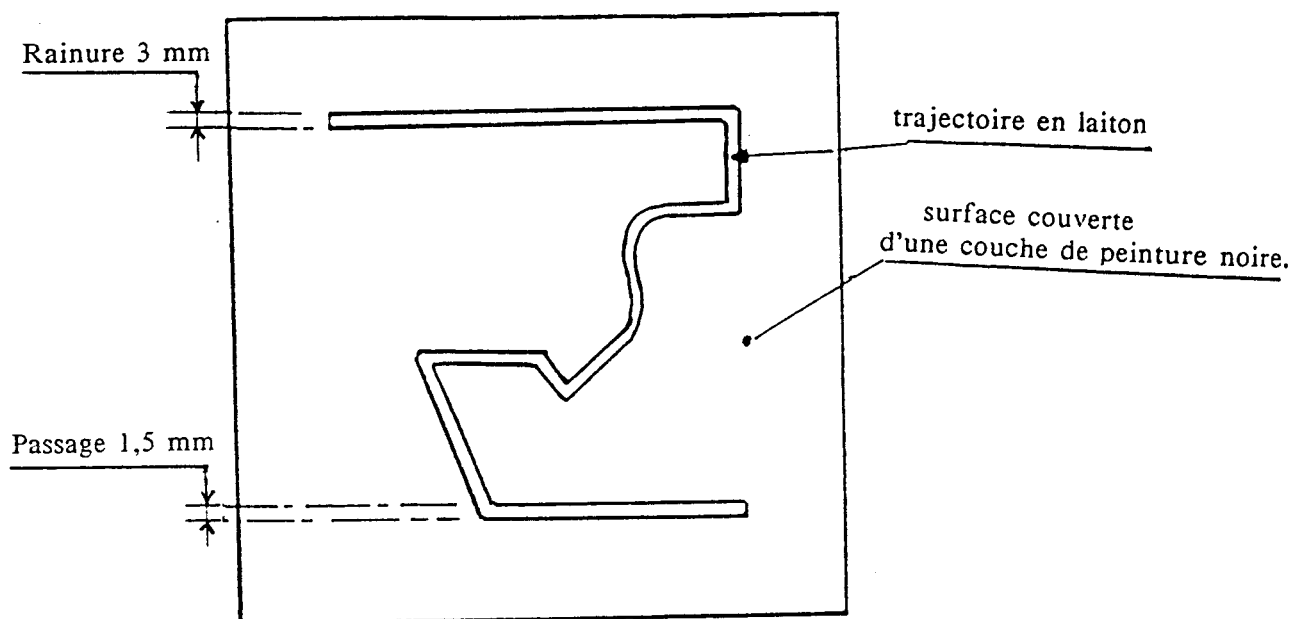


Figure /IV-15/ : Maquette de simulation de suivi de surface

La fibre étant intégrée dans l'instrument, le poignet étant correctement orienté perpendiculairement à la surface de cette plaque en début d'opération, le suivi ne demande que l'utilisation des mobilités du porteur.

#### 1-3-1 BUT DES EXPERIENCES

Le but des expériences est de comparer les performances de l'homme et celles du système de microtélémanipulation assisté par une commande référencée capteurs. Les paramètres à enregistrer sont la réponse du capteur et le temps mis pour parcourir la totalité de la trajectoire imposée.

#### 1-3-2 DEROULEMENT DES ESSAIS

Deux opérateurs entraînés OP1 et OP2, ayant travaillé sur le projet, ont manipulé pendant plusieurs jours sur cette plate-forme de suivi de surface.

Pour chaque opérateur, les essais sont divisés en trois groupes:

A> Interventions manuelles (Im)

La fibre est manipulée directement à la main; la démarche adoptée étant la suivante:

— Suivre la trajectoire manuellement et à 3 mm du fond de la rainure, donc exactement au même niveau que la surface de la plaque.

— On relève les paramètres d'un premier ensemble de 5 opérations avec récupération à la suite de chaque essai, l'opérateur jugeant lorsqu'il est prêt à recommencer.

— Le deuxième jour, on relève les paramètres d'un second ensemble de 5 opérations dans les mêmes conditions opératoires.

B> Interventions télémanipulées (It)

De même, et sur deux jours, les deux opérateurs ont recommencés les mêmes essais mais cette fois-ci en mode télémanipulé. Les paramètres enregistrés sont:

a) Le nombre de fois où l'extrémité de l'outil a dépassé les seuils de la trajectoire (à droite et à gauche de la trajectoire, en profondeur et en hauteur); chaque dépassement est considéré comme une erreur.

b) Le temps mis pour effectuer toute la trajectoire.

C> Intervention référencée capteurs (Irc)

Maintenant, le déplacement vertical est contrôlé par le capteur de proximité, le seuil étant fixé à un niveau de référence L qui correspond à 3 mm de la surface à suivre.

Les opérateurs effectuent de la même manière, le suivi de surface en manoeuvrant les degrés de liberté X, Y et Z; ce dernier est bloqué en cas de dépassement du seuil en profondeur (ce seuil correspond à une sécurité désirée). Les paramètres à relever sont identiques aux essais précédents.

## 2- RESULTATS

### 2-1 INTERVENTIONS MANUELLES (Im)

Les courbes de la figure /16/ montrent les résultats obtenus relatifs aux composantes de la performance affectant la tâche manuelle.

Ayant considéré, comme erreur les sommets des courbes dépassant le seuil fixé L (L=3 mm), on remarque que:

- Le nombre de fautes commises est important,
- Les opérateurs restent le plus souvent dans la zone de sécurité (attitude de prudence);

	TEMPS MOYEN (seconde)	NOMBRE D'ERREURS OU DEPASSEMENTS
OPERATEUR OP1	1,5	30
OPERATEUR OP2	1,2	26



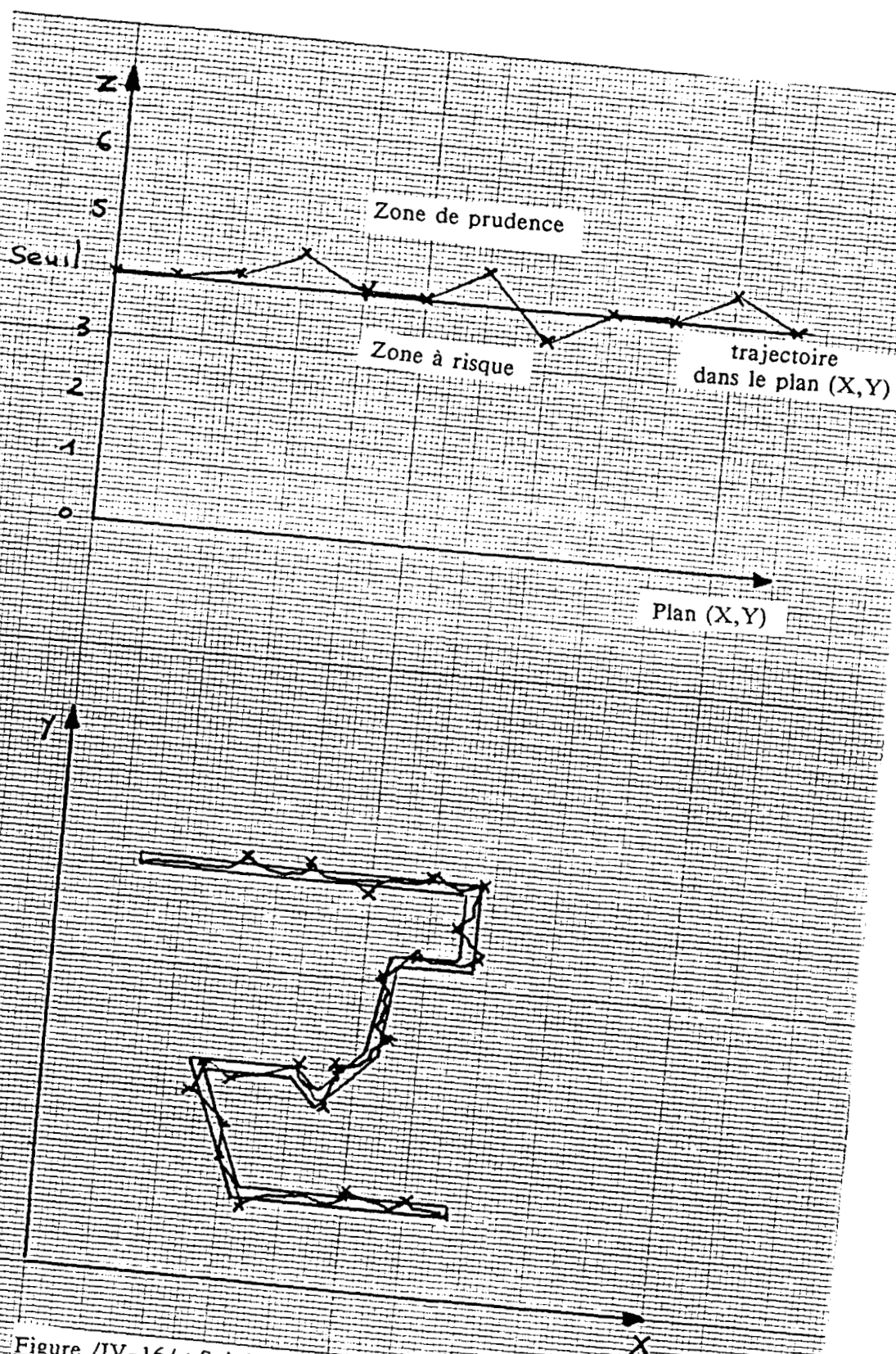


Figure /IV-16/ : Suivi manuel de trajectoire  
(variabilité des performances humaines:  
n.dépassements=28 dans le plan (X,Y) ).

2-2 INTERVENTIONS TELEMANIPULEES (It)

Les valeurs relevées (Figure /17/) permettent d'établir:

TEMPS MOYEN (seconde)		NOMBRE D'ERREURS OU DEPASSEMENTS
OPERATEUR OP1	5,6	4
OPERATEUR OP2	5,2	3



On constate ainsi que:

- Le nombre d'erreurs est nettement inférieur à celui des interventions manuelles (les déplacements sont restés dans une enveloppe voisine des seuils). Cependant, il n'est pas nul;
- Le temps d'intervention est allongé par rapport aux temps d'exécution à la main ( $T_{moy}(It) / T_{moy}(Im) = 5 \text{ s}$ ).

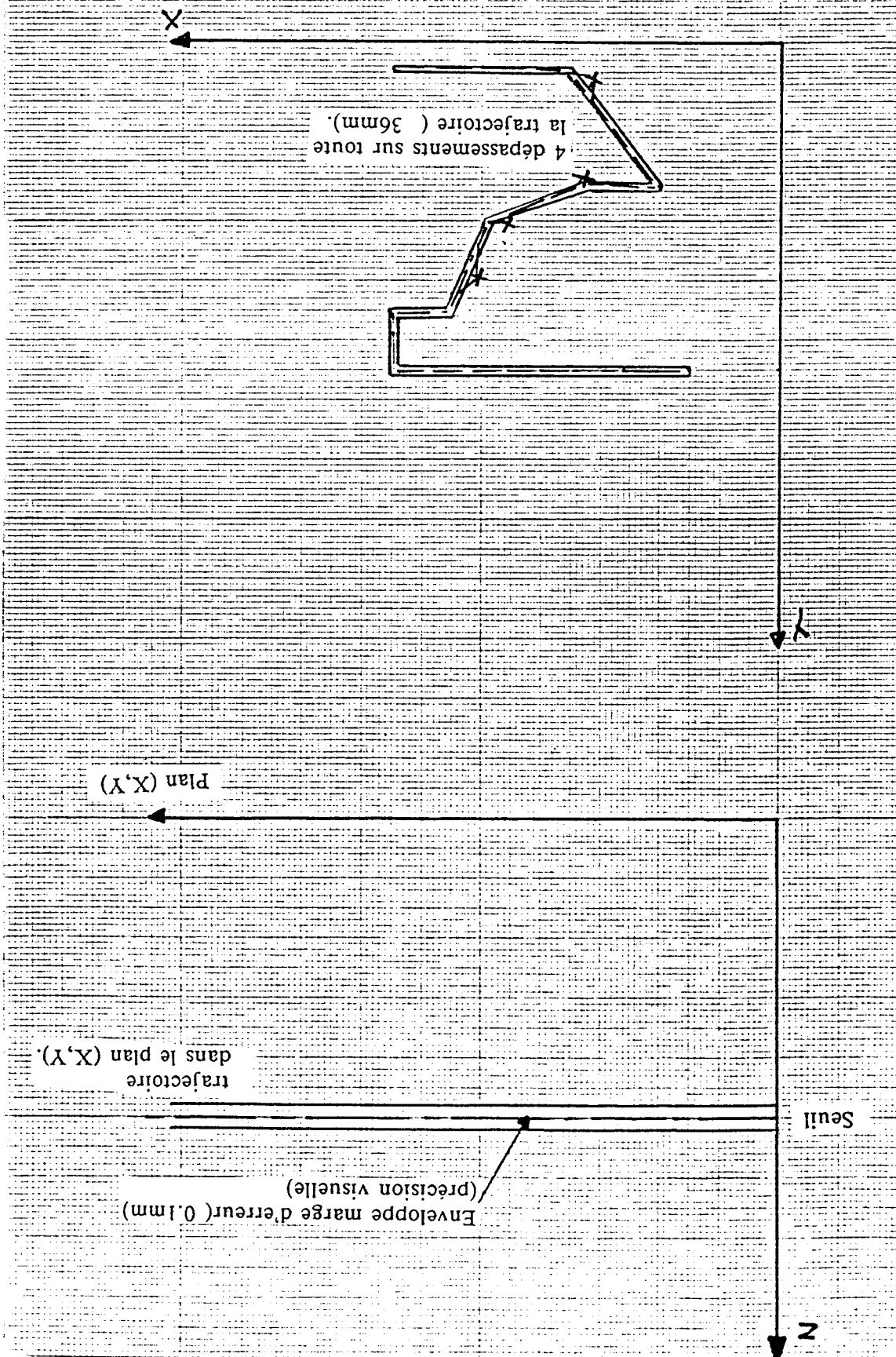


Figure IV-17/ : Suivi de trajectoire en mode télémanipulé non assisté (n. dépassements dans le plan (X,Y) = 4 ).



### 2-3 INTERVENTIONS REFERENCEES CAPTEURS

Ce mode permet un fonctionnement assisté et sécurisant. En effet, le seuil est fixé (3 mm au dessus de la trajectoire à suivre), l'opérateur doit essayer de rester le plus près possible de ce seuil tout en suivant la trajectoire. Les résultats des mesures montrent que (Figure /18/):

- Il n'y a pas de dépassement du seuil, jusqu'à l'atteinte de celui-ci, le degré de liberté correspondant se bloque et l'opérateur ne garde le contrôle que des deux autres axes;
- Les temps d'intervention sont les mêmes que (IV 2-2).

Ainsi pour terminer ces comparaisons, nous devons dire que d'après toutes les expériences que nous avons menées jusqu'ici, les performances des interventions télémanipulées référencées capteurs sont meilleures que celles réalisées par télémanipulation non assistée et ces dernières sont meilleures que celles obtenues en interventions manuelles.

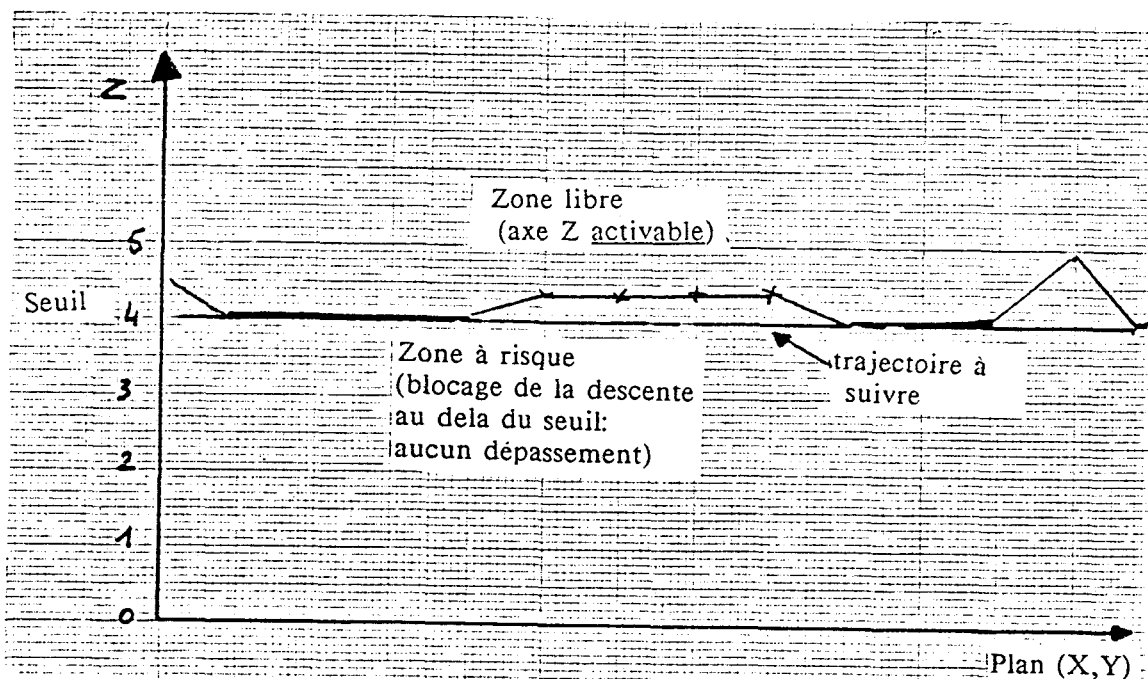


Figure /IV-18/ : Mode télémanipulé assisté

## V - CONCLUSION

Nous avons abordé dans cette partie, le problème de la perception locale appliquée à la téléopération.

Après avoir exposé les raisons ayant conduit à l'utilisation des proximètres à fibres optiques, et leurs modes d'implantation sur l'outil d'exécution, nous avons montré l'intérêt du dispositif de sécurité proposé et présenté les problèmes portant sur le traitement des données proximétriques du signal.

En application des algorithmes exposés, nous avons effectué des essais sur des plates-formes de simulation représentant des tâches-types (un seul capteur a été utilisé pendant les essais). Les résultats de ceux-ci montrent que :

- En mode télémanipulation non assistée : les erreurs commises sont beaucoup moins nombreuses que celles commises en manipulations manuelles, moyennant un allongement du temps d'exécution. Ceci montre l'apport du microtélémanipulateur en matière de précision.

- La présence du système de perception permet d'effectuer des tâches fines de microtélémanipulation assistée avec une grande précision (aucune erreur n'a été commise lors de la simulation du suivi de trajectoire en mode assisté).

Par ailleurs, nous soulignons l'intérêt essentiel des proximètres, qui réside dans leur capacité potentielle à résoudre les problèmes faisant intervenir une certaine adaptativité vis à vis de l'environnement local. La présence du calculateur dans la chaîne de commande peut permettre la génération de stratégies pour la commande du télémanipulateur. Elles peuvent être déduites d'un raisonnement du genre: *"Sachant que je viens d'acquérir telle information en provenance de tel capteur ou d'exécuter telle sous-tâche, comment vais-je poursuivre l'exécution de l'action? et que dois-je retourner à l'opérateur en guise d'information"*.

Enfin, l'étude peut être étendue au cas multivariable en utilisant un signal vectoriel ou matriciel, domaine où sont transposables certaines techniques de détection de contours et de traitement d'images.

- V.1 -

CONCLUSION GENENERALE



## 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 téléopération avancée appliquée à la microchirurgie.

Après avoir présenté les aspects mécaniques et fonctionnels du microtélémanipulateur, nous avons exposé la partie informatique que constitue l'interface de commande. Nous avons réalisé deux types de commande complémentaires: commande en vitesse et commande en position en fonction des positions d'un Joystick à trois axes.

Cet interface de commande offre au microtélémanipulateur un pilotage simple et adapté. En effet, lors de la phase de positionnement le microtélémanipulateur est commandé en vitesse tandis que la commande en position peut être utilisée pendant la phase de travail dans les régions locales nécessitant une précision et un soin particuliers.

Les études expérimentales de caractérisation de ce prototype de commande réalisé, nous ont conduit à proposer une nouvelle configuration de l'architecture de commande pour la version pré-industrielle.

De même, ces expériences nous ont permis d'affirmer que le meilleur organe de pilotage d'un système de télémanipulation est sûrement le minibras-maître à retour d'effort. Il est par conséquent nécessaire de concevoir un poignet de commande motorisé afin d'assurer un pilotage naturel et améliorer ainsi la fiabilité du système.

D'autre part, nous avons développé un dispositif de sécurité basé sur l'utilisation des proximètres à fibres optiques.

Les études algorithmiques et expérimentales effectuées sur ce module de capteurs actifs ont montré les avantages que peut assurer un tel dispositif intégré dans la boucle de commande, notamment en ce qui concerne la détection et l'estimation de distance. Il a été vérifié que le fonctionnement en mode référencé capteurs est très avantageux (précision, sécurité).

Pour conclure, il faut préciser que le travail présenté constitue une étape dans l'évolution de la commande du microtélémanipulateur et que de nombreuses études de développement restent encore à mener afin de permettre au système de se placer au stade des essais cliniques, signalons en particulier:



- le développement d'un poignet motorisé ergonomique de pilotage,
- la réalisation de la nouvelle architecture de commande proposée,
- la conception de nouveaux instruments chirurgicaux adaptés (insertion d'éléments sensibles dans les instruments d'exécution),
- la réalisation d'un système superviseur permettant le fonctionnement sous divers modes dans les meilleurs conditions de sécurité,
- mais aussi l'extension des applications du microtélémanipulateur vers la coopération avec d'autres bras télémanipulateurs.

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

BIBLIOGRAPHIE

/ANDR 86/: G.ANDRE

"Système multicateurs proximétriques pour le guidage local de l'effecteur"  
T.A.O:Journées des 3,4,5 Décembre 1986 C.E.N-SACLAY.

/ARA 86/: B. ESPIAU, R. FOURNIER, B. LEPERS et leurs équipes

"Projet A.R.A. Pole téléopération Avancée",  
Journée bilan, mai 1986 à PARIS.

/ARNE 86/: J.P ARNE

"Keratotomie radiaires"  
J.Fr.ophtalmol.,1986,9,1,67,73  
Revue générale.

/AUTC 83/: P. AUTCHAUD

"Contrôle Homme/Machine dans l'exécution d'une tâche en robotique".  
Thèse de 3ème cycle,Lille:1983.

/BAUZ 81/: G.BAUZIL,M.VAISSET

"Le module expert de navigation par ultra-sons du robot Hilare".  
2ème journée de robotique-Renne-5-7-Mai 1981.

/BEGU 86/: M. BEN GAYED, A. GUERROUAD, P. VIDAL

"An advanced control micromanipulator for surgical applications" International  
conference on systems science(IX).  
Wroclaw,Sept,16-19,1986.

/BEJC 78/: A.K. BEJCZY

"Sensor systems, for automatic grasping and object handing".Conférence  
Internationale sur les télémanipulateurs,IRIA,Rocquencourt,Sept.1978.

/BEJC 79/: A.K. BEJCZY

"Sensors and computer aided control of manipulators in space".  
M'dcon, Chicago, 1979.

/BENG 86/: M. BEN GAYED, P. VIDAL, J.C. HACHE

"Interface de commande pour un micromanipulateur chirurgical".  
Congrès biomédical de Paris,Mai 1986.



/BENG 87/: M. BEN GAYED, S. HAYAT, P. VIDAL, J.C.HACHE

"Biomedical robotics: A surgical microtelemanipulator applicable to ophtalmology and neurology".

Article soumis à IEEE: "Special Issue on Biomedical Robotics in october 1987".

/BERL 84/: R. BERLLAND, R. GOUDERC, C. FANNECHERE

"Un syntaxeur pour l'apprentissage de robots à trajectoire continue".

Nouvel automatisme(11)-1984.

/BOOK 84/: W.J. BOOK and V. SANGVERAPHUNSIRI

"Bracing strategy for robot operation",

5th ROMANSY, June 1984. UDINE.

/BOUR 84/: J.P. BOURRIEZ

"Acquisition et exploitation d'images morphologiques en conditions stéréotaxiques.

Application à l'irradiation interstitielle des tumeurs cérébrales",

Thèse de docteur de 3ème cycle LILLE, 1984.

/BRIC 77/: M. BRICOT

"La stéréognosie en robotique. Application au tri de solides",

Thèse d'état N° 780 U.P.S. Toulouse Nov. 1977.

/BRID 84/: T.J. BRIDGES, A.R. STRNAD

"Interaction of carbon dioxide Laser radiation with ocular tissu",

IEEE Journal of quantum electronics, vol.QE-20;N°.12, december 1984.

/BRIG 62/: G.E. BRIGGS

"Pursuit and compensatory modes of information display",

A review (Air force. Air Materiel command. Aero Medical Research laboratory technical documentary Report N°62-93); August 1962.

/CALV 82/: J.P. CALVEZ

"Une méthodologie de conception des multi-micro-ordinateurs pour les applications en temps réel",

Thèse d'état -ENSM- NANTES, 6 Nov. 1982.

/CANA 82/: C. CANALIC, G. DECICCO, B. MORTEN, A. TARONI

"An ultrasonic proximity sensor operating in Air",  
Revue 'sensors and Actuators', vol 2, 81/82.

/CATI 79/: E. CATIER

"La nouvelle robotique industrielle",  
Automatique et informatique Industrielle - N°81,  
Nov.1979.

/CITT 74/: M. CITTA

"Modélisation de l'opérateur humain par un élément à mémoire finie, dans des systèmes Homme/Machine",  
Thèse de docteur en sciences Appliquées; Université Catholique de Louvain, Belgique 1974.

/COIF 82/: P. COIFFET, M. CHIROUSE

"Elément de robotique", Hermes-82.

/DIAZ 85/: C. DIAZ

"Amélioration de la performance d'intervention en micromanipulation. Application à la microchirurgie";  
Thèse de 3ème cycle Lille 1985.

/DJEM 83/: A. DJEMIAI

"Analyse - Partage des tâches et gestion informatique des plans d'actions - Applications industrielles";  
Thèse de 3ème cycle CNAM, LEAH, Le Havre 1983.

/DUPO 86/: D. DUPONT

"Observation et aide à la décision: Application à la conception d'un observateur numérique couplé à un système expert";  
Thèse de 3ème cycle, Université de LILLE1; 1986.

/ESPI 80/: B. ESPIAU

"De l'usage de systèmes proximétriques en téléopération",  
Rapport IRISA-Octobre 1980.

/ESPI 84/: B. ESPIAU, G. ANDRE

"Sensory based control for robots and teleoperation"  
5th CISM-IFTOMM Symposium Romansy, Udine, June 84.

/FALE 79/: D. FALEK, M. PARENT

"LAMA-SI an evolutive language for for an intelligent robot",  
International seminar on programing Methods and languages for industrial  
robots.IRIA Roquencourt 20-29 June 1979.

/FATH 83/: E.T. FATHI, M. KRIEGER

"Multiple Microprocessor systems: What, Why, When",  
I.E.E.E. Computer, Mars 83; p23-32.

/FERR 78/: M. FERRETTI

"Le dossier de la robotique industrielle",  
Le Nouvel Automatisme-Sept.-Oct.1978.

/FOUL 81/: J.N. FOULC, P. LOPEZ

"Système de commande des robots, élaboration des consignes d'asservissements",  
Nouvel automatisme n°21-181.

/GALL 83/: E. GALLESIO, A. HAURAT,M.C. THOMAS

"Point en Robotique", Volume 1,page 135-145 Tec of DOC. 1983.

/GORM 86/: C. GORMAN

"A skeptical eye on contacts",  
Time: January 27, 1986.

/GRAN 87/: Y. GRANJON, J.P. L'HUILLIER, E. YVROUD

"Robotique Biomédicale et chirurgie précancéreuse: une intervention au LASER  
CO2,conduite par un système automatisé",  
I.T.B.M.,Vol.7,N°1,1987.

/GRAV 86/: P. GRAVEZ, B. LEPERS, R. FOURNIER, G. ANDRE

"Control and supervision and computer aided teleoperation",  
Romansy 86, Cracovie, Sept. 1986.

/GUER 87/: A. GUERRAOU

"Optimisation du dialogue H/M en téléopération par modélisation informationnelle"  
Thèse de Docteur ingénieur LILLE 87 (à paraître).

/GUFF 83/: P. GUFFOND

"Indication de la vitrectomie dans l'extraction et les complications de l'exécution des  
corps étrangers intra-oculaires",  
Doctorat en médecine LILLE 1983.

/HABC 81/: A. HABACHI

"Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain",  
Thèse de Docteur-ingénieur, USTL-LILLE 1, Mai 1981.

/HACC 86/: C. HACCART, F. KWIATAOOOWSKI

"Syntaxeur à retour d'effort"  
Mémoire de fin d'étude, E.U.D.L: 1985.

/HILL 78/: J.W. HILL , A.J. SWORD

"Manipulation based on sensor-directed control: an integrated and effector and touch sensing system",  
S.R.I., Report contract NAS2-8652, Juillet 78.

/JULL 81/: M. JULIERE

"Détection simple d'obstacles: bras tactile pour robot mobile"  
Nouvel automatisme mai 1981.

/KWOH 85/: Y.S. KWOH

"A new computerized tomographic-aided robotic stereotaxis system"  
Robotics age June 1985 p.17-21.

/LATO 79/: J.C. LATOMBE

"Une analyse structurée d'outil de programmation pour la robotique industrielle"  
Juin 1979, Inria, ROCQUENCOURT.

/LEPE 83/: B. LOPERS, C. DIAZ

"Sécurité du couplage H/M, l'apport des méthodes d'agrégation de preferences"  
Colloque IFAC "Techniques nouvelles en ergonomie" Juin 1983 VALENCIENNES.

/LIEG 77/: A. LIEGEOIS, P. COIFFET, A. FOURNIER, E. DOMBRI

"Conception d'un télémanipulateur pour handicapés"  
Projet spartacus: Rapport intermédiaire au titre de la convention de recherche I.R.I.  
N° 77069 Montpellier, Novembre 1977.

/LONC 83/: J. LONCHAMP

"Structuration logique en terme d'agents communicants des applications réparties de commandes/contrôle de processus"  
Actes des journées BIGRE 83, CAP D4AGDE, Oct. 83 P: 255-237.

/LOZA 77/: T. LOZANO-PEREZ , P.H. WINSTON

"LAMA: a language for automatic mechanical assembly"  
5th IHCAI 1977 Cambrige (MA-USA).

/MANG 85/: C. MANGEOT

"Adaptation d'une commande vocale à un système de télémanipulation"  
C.E.A. SACLAY 1985.

/MARS 86/: J. MARSWIK

"A comparative study of cornea incisions induced by diamond and steel knives and two ultra violet radiations from an excimer laser"  
British journal of ophtalmology, 1986.70, P:428-501.

/MELI 80/: R. MEILI

"The pratical guide to structured systems design"  
NEW YORK: Yourdon Press, 1980.

/MOLL 78/: A. MOLLARD, G. COBLENTZ

"Interêt de la connaissance de l'espace d'activité d'un sujet assis dans la conception d'appareils d'aide aux handicapés physiques"  
Colloques IRIA, p: 35-47, Rocquencourt 4-6 Sept. 1978.

/NOTICE IP28/: Notice technique d'utilisation de l'indexeur  
programmable IP 28 de MICRO-CONTROLE.

/PAUL 77/: P. PAUL

"Wave: a model based language for manipulator control"  
The industrial robot March 1977.

/REVE 81/: G. REVELIN

"Microprocesseurs du 6800 au 6809. Modes d'interfaçage"  
DUNOD informatique. 1981.

/RUGE 78/: G. RUGET, B. ESPIAU

"Etude et mise en oeuvre de détecteurs de proximité à fibres optiques" Projet spartacus. Rapport final de contrat IRIA N° 76-77-131 Octobre 1978.

/SARA 86/: J.J. SARAGOUSSI

"Que penser vous de la kératotomie radiaire en 1986?"  
J. FR. Ophtalmol. 1986, 9, 1; P: 11-12.

/SAVY 85/: J.P. SAVY

"Commande vocale de bloc opératoire"

Mémoire de D.E.A. U.S.T.L. 1985.

/THIB 85/: D.THIBAUD

"Analyse automatique de la fatigue lors d'un travail sur microtélémanipulateur"

Mémoire de D.E.A, LILLE 1985.

/THOM 83/: Y. THOMAS, J.P. CALVEZ

"Méthodologie de conception pour les multi-micro-ordinateurs de commande des processus complexes"

Rapport final ATPN. 9. 81. 63, Mai 1983, Nantes.

/THRI 83/: M.W. THRING

"Robots and telechirs "

WILEY 1983.

/TREE 68/: H. L. VAN TREES

"Detection, estimation and modulation theory"

Wiley, New York, 1968.

/TRISCAN/: Notice d'utilisation de l'appareil d'échographie EO2 de Biophysic Medical.

/VECSYS/: Notice d'utilisation de la carte de reconnaissance vocale RMI-88 de la société VECSYS.

/VERJ 83/: J. P. VERJUS

"Parallélisme et synchronisation". Bulletin de liaison de la recherche en informatique et automatique, N.83, 1983.

/VERN 78/: P. VERNEL, M.L. BESSON-LAGIER

"Dispositif et procédure de communication dans un système de multimicroprocesseur".

Nouvel Automatisme, décembre 1978.

/WANP 84/: C.W. WANPLER

"Multiprocessor control of a telemanipulator with optical proximity sensors". The Int.Journal of Robotics Research, Vol.3,N°1, MIT,84.

/ZADE 86/: L.A. ZADEH

"La logique floue". Dossier spécial de MICROSYSTEMES de Mai 1986.

/ZEISS 79/: FIRMA CARL ZEISS

Firme individuelle de droit Allemand. Demande de brevet d'invention N°7930830.



A N N E X E S

# ANNEXE I

## CONDITIONS D'EVOLUTION ET EQUATIONS DE SORTIES

Nous avons décrit grâce à un grafcet au chapitre II, le fonctionnement du microtélémanipulateur (figure 2 du CH2). Les graphes étaient donnés paramétrés. Nous allons expliciter pour exemple dans cet annexe, les solutions de trois cas de figure (partie concernant le poignet) et associer à leurs transitions, les propositions logiques appropriées.

Le graphe (15a) est couplé unidirectionnellement au graphe (15b) dont les conditions d'évolution associées aux transitions  $t_8$  et  $t_9$  sont les suivantes:

$$Ce_8 = Fcv_2 \cdot (AU+ie) \cdot X_5$$

$$C_{E9} = Fcv_1 \cdot \overline{AU} \cdot RP \cdot X_6$$

$$X_5 = Ce_9 + I$$

$$X_6 = Ce_8 + \overline{I}$$

I : Initialisation

$$Ts+ = X_5$$

$$Ts- = X_6$$

Equations de commandes  
du vérin de sécurité

### a) CAS DE LA ROTATION DU RAIL/Y (ACTIONNEUR RY)

Les transitions concernées sont:  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$  et  $t_7$

$$CE1 = X_5 \cdot \overline{r_2} \cdot d_{1+} \cdot X_1$$

$$CE2 = X_5 \cdot \overline{r_1} \cdot d_{1-} \cdot X_1$$

$$CE3 = (r_2 + \overline{d_{1+}}) \cdot X_2$$

$$CE4 = \overline{X_5} \cdot X_2$$

$$CE5 = \overline{X_5} \cdot X_3$$

$$CE6 = (r_1 + \overline{d_{1-}}) \cdot X_3$$

$$CE7 = X_5 \cdot X_4$$

$$X_1 = CE3 + CE6 + CE7 + I$$

$$X_2 = CE1 \cdot \overline{I}$$

$$X_3 = CE2 \cdot \overline{I}$$

$$X_4 = (CE4 + CE5) \cdot \overline{I}$$

$$RY+ = X_2$$

$$RY- = X_3$$

b) CAS DE LA TRANSLATION CIRCULAIRE DE L'OUTIL  
(ACTIONNEUR)

Conditions d'évolution		Activité	équations
de l'étape			
Transition			
t1	$CE1 = X5.\overline{TCx1}.d2+.X1$	$X1 = CE3 + CE6 + CE7 + I$	
t2	$CE2 = X5.\overline{TCX2}.D2-.X1$	$X2 = CE1.\overline{I}$	$TCX += X2$
t3	$CE3 = (tcx1 + \overline{d1} +).X2$	$X3 = CE2.\overline{I}$	$TCX -= X3$
t4	$CE4 = \overline{X5}.X2$	$X4 = (CE4 + CE5).\overline{I}$	
t5	$CE5 = \overline{X5}.X3$		
t6	$CE6 = (tcx2 + \overline{d1} -).X3$		
t7	$CE7 = X5.X4$		



c) CAS DE LA TRANSITION DE L'OUTIL (ACTIONNEUR : TO, VARIABLE

transitions	conditions d'évolution	activité	équations
t1	$CE1 = X2.\overline{Fbh}.d3-.X1$	$X1 = CE3 + CE6 + CE7 + I$	

t2	$CE2 = X5.\overline{Fch}.d3-.X1$	$X2 = CE1.\overline{I}$	$TO+=X2$
t3	$CE3 = (Fcb+d3+).X2$	$X3 = CE2.\overline{I}$	$TO-=X3$
t4	$CE4 = \overline{X5}.X2$	$X4 = (EC4+CE5).\overline{I}$	
t5	$CE5 = \overline{X5}.X3$		
t6	$CE6 = (Fch+d3).X3$		
t7	$CE7 = X5.X4$		



ANNEXE II

CARACTERISTIQUES DES MOTEURS A COURANT CONTINU

1) MOTEUR DE ROTATION DE L'OUTIL Ro (8)

Moteur ESCAP	Type 16.c.11-207.0
Codeur	Type c16 (1canal, 16 lignes)
Réducteur	Type E16
	Rapport de réduction 64,1
	Rendement 0,5
	Vitesse max. à l'entrée: 5000 tr/mn
	Couple max. en sortie : 0,02 N.m

Caractéristiques Moteurs à 22°C

Tension	: 6 v	Vitesse à vide : 17500 tr/mn
Couple de démarrage	: 0,96 N.m	Puissance meca.: 0,45 W
Courant à vide moy.	: 22 mm	FEM : 0,34v/1000tr
Inductance	: 19	Tension démarrage: 0,15 V
Résistance	: 19	Constante de couple: 3,2N.m/A
Moment Inertie rotor	: 0,27 kg m <sup>2</sup> 10 <sup>-7</sup>	
Constante de temps mécanique	: 53 ms	
Constante du couple visqueux	: 0,015 Nms 10 <sup>-6</sup>	
Constante du temps thermique	: Rotor 5s ; Stator 230 s	

Vitesse maximale de rotation du Vitréotome = 1 rd/s

2) MOTEUR DE TRANSLATION DE L'OUTIL To

Moteur ESCAP	Type 23.L-216-E5
Codeur	Type B (2canal, 27 lignes)
Réducteur	Type B 24
	Rapport de réduction 2048
	Rendement 0,55
	Vitesse max. à l'entrée: 4000 tr/mn
	Couple max. en sortie : 0,1 N.m

- VII.6 -

La vitesse maximale de translation du Vitréotome est de 1mm/s

Caractéristiques Moteurs à 22°C

Tension	: 9 v	Vitesse à vide	6000 tr/mn
Couple de démarrage	: 17,2 N.m	Puissance meca.:	3 W
Courant à vide moy.	: 25 mA	FEM	: 1,3v/1000tr
Inductance	: 0,4 Mh	Tension démarrage:	0,1 V
Résistance	: 6,6	Constante couple	: 12,6 mNm/A
Moment Inertie rotor	: 4,5 kg m <sup>2</sup> 10 <sup>-7</sup>		
Constante de temps mécanique	: 19 ms		
Constante du couple visqueux	: 0,4 Nms 10 <sup>-6</sup>		
Constante du temps thermique	: Rotor 12 s ; Stator 460 s		

2) MOTEUR DE TRANSLATION SUR LE RAIL Tcx

Il est du même type que le moteur de translation To avec un réducteur de 320.





Carte des moteurs à C.C. réalisée au C.A.L

### ANNEXE III

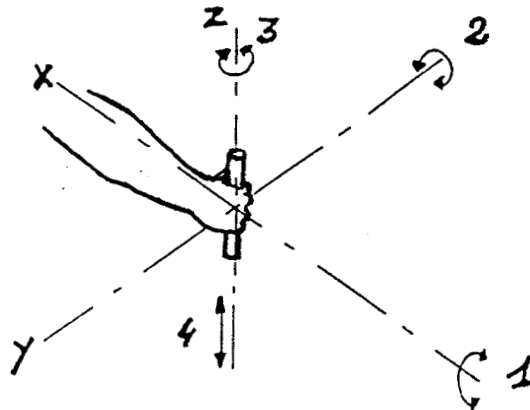
#### SYNTAXEUR A RETOUR D'EFFORT

Dans cet annexe, nous présentons les études déjà effectuées dans le cadre de ce projet et concernant la réalisation d'un prototype de syntaxeur à retour deffort (mémoire de fin d'étude de Messieurs C.Haccart et F. Kwiatkowski, fourni par la société Santerne).

##### 1) CAHIER DES CHARGES

###### a) Degrés de liberté

Dans les conditions opératoires, si on lie à l'outil maintenu par le chirurgien un repère centré en A point fixe ou orifice de pénétration dans l'oeil, les différents mouvements exécutés par l'opérateur autour de ce point sont :



- "1" Rotation autour de l'axe X identifiée à Tcx pour le Microtélémanipulateur,
- "2" Rotation autour de l'axe Y identifiée à Ry pour le Microtélémanipulateur,
- "3" Rotation autour de l'axe Z identifiée à Ro pour le Microtélémanipulateur,
- "4" Translation le long de l'axe Z identifiée à To pour le Microtélémanipulateur,

L'ensemble poignée main peut effectuer les trois rotations de base. Ces rotations sont obtenues grâce à la "rotule" que constitue le poignet. L'adjonction d'une translation amène donc quatre degrés de liberté au syntaxeur.

b) Volume de travail

Comptetenu de la zone de travail, les rotations "1" et "2" auront une amplitude de (+- )45° par rapport à l'axe de pénétration de l'outil dans l'oeil. Ces deux rotations ajoutées à une translation "4" de 25 mm de course (diamètre moyen de l'oeil) permette d'explorer le volume oculaire. La rotation propre de l'aiguille "3" sera totale, soit 360°.

c) Volume d'intégration du syntaxeur

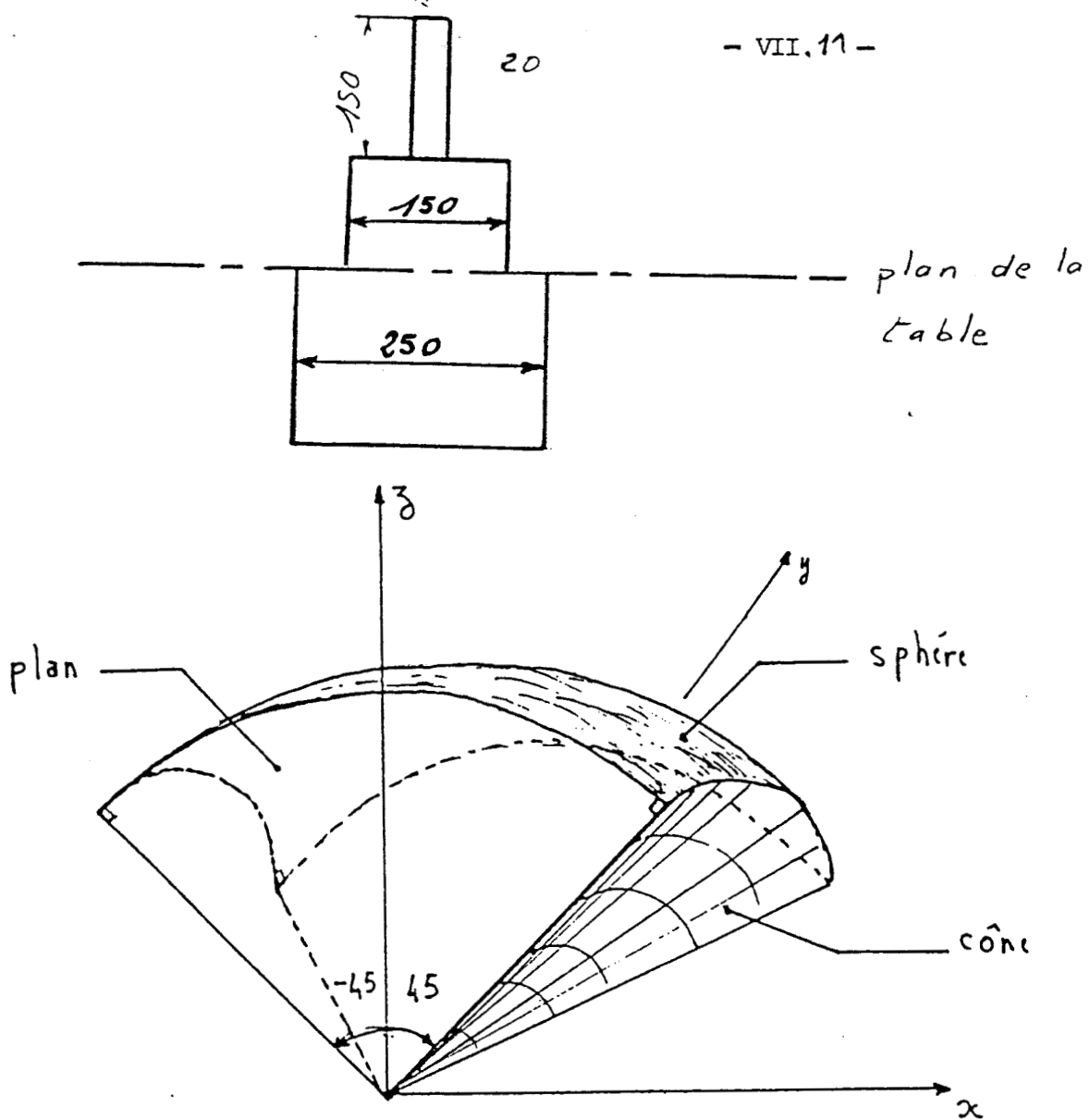
Comptetenu de l'environnement déjà chargé de table d'opération, le volume maximal de l'organe a été fixé à :

- un "cube" de 250 mm de coté dans la partie inférieur de l'appareil;
- un "cube" de 150 mm de coté dans sa partie supérieur;
- l'organe de préhension ayant un diamètre de 20 mm et une longueur de 150 mm.

d) définition des repères

- . R1 (O, X1, Y1, Z1) repère lié au manche
- . R2 (O, X2, Y2, Z2) repère lié à la fourchette
- . R (O, X, Y, Z) repère principal
- .  $\alpha$  : angle de rotation de R1/R2 d'axe Y1, Y2
- .  $\beta$  : angle de rotation de R2/R d'axe X, X2
- . A : extrémité du manche.





Enveloppe maximale du volume de travail de l'outil



## 2) SOLUTIONS PRESENTEES DANS /HACC 86/

Nous ne présentons pas ici toute l'étude effectuée sur ce sujet, mais nous notons simplement les différents choix.

- Solution utilisant les moteurs. Le retour d'effort généré par l'intermédiaire d'un moteur couple.
- Solution utilisant des freins. Le retour d'effort est obtenu grâce à des freins électromagnétiques.

ANNEXE IV

CARACTERISTIQUE DES CARTES INDUSTRIELLES EQUIPEES D'UN 6809

a) Caractéristique des Cartes

- bus G 64, 8 bits monoprocesseur compatible avec le bus VME  
16 bits de Motorola
- 8k réservés à des EPROMs + 1k de RAM
- Plusieurs lignes d'Entrées/Sorties parallèles par des  
PIA/VIA
- Possibilité d'utiliser le système d'exploitation 05-9

b) Caractéristiques du Processeur 6809

- Microprocesseur 8 bits externe (16 bits en interne)
- 2 Registres d'Index 16 bits
- 2 Pointeurs de pile 16 bits
- Un éventail de modes d'adressage très complet (10 modes)
- 6 Niveaux d'interruption
- Un jeu d'instruction machine très étendu

