

THESE

PRESENTEE A

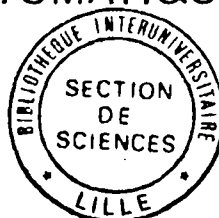
L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR 3^{EME} CYCLE

SPECIALITE AUTOMATIQUE

PAR



DIAZ-G CONSTANTINO

« AUGMENTATION DE LA PERFORMANCE
D'INTERVENTION EN MICROMANIPULATION »

APPLICATION A LA MICROCHIRURGIE

SOUTENUE LE 12 JUIN 1985 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MESSIEURS	P. VIDAL	PRESIDENT ET RAPPORTEUR
	JC. HACHE	EXAMINATEUR
	P. TURUT	EXAMINATEUR
	C. VASSEUR	EXAMINATEUR
	P. MICHEAU	EXAMINATEUR
	C. MARREAUD	INVITE

A Mes Parents

A Mina

Ce travail vise à augmenter la performance d'intervention lors de tâches micromanipulées par :

- une aide à l'exécution ,
- la surveillance de l'opérateur.

Le premier chapitre décrit un système de micromanipulation dont les particularités sont une gestion par ordinateur permettant d'envisager la réalisation en automatique de phases élémentaires et un système de sécurité active n'autorisant l'intervention que lorsqu'aucune panne n'est décelée.

Dans le deuxième chapitre, l'évaluation du système est effectuée sur banc d'essai, révélant la possibilité de réaliser des interventions très précises même dans des conditions de contexte très défavorables. Les tests montrent que l'opérateur introduit une grande variation dans la qualité de l'intervention engendrant le besoin d'un système de surveillance de celui-ci.

Dans le troisième chapitre, le choix d'un système de surveillance portant sur l'observation du comportement de l'opérateur sur les commandes est effectué. Nous y décrivons les traitements effectués sur les variables relevées.

Enfin le dernier chapitre montre une méthode permettant d'extraire à partir des données relevées des règles de décision sur la performance développée et de construire un modèle d'estimation de la performance.

Mots clés : micromanipulation, estimation de performance, systèmes H/M

Je tiens à exprimer ici mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL, Directeur du Centre d'Automatique, qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a orienté dans mes recherches.

Que Monsieur le Professeur J.C. HACHE, Directeur du Service d'Exploration Fonctionnelle de la Vision du CHR-B de Lille, soit assuré de ma profonde gratitude et de ma sympathie pour les conseils avisés prodigués tout au long de l'étude.

Je remercie Monsieur le Professeur Paul TURUT, Chef de Clinique Ophtalmologique à l'Hôpital d'Amiens qui a consacré de longs moments à nous faire connaître le domaine de la microchirurgie.

Que Monsieur le Professeur C. VASSEUR soit assuré de ma gratitude pour les remarques constructives et les conseils délivrés à l'égard de ce travail.

Je remercie Monsieur le Professeur P. MICHAUX, Directeur du Département de Construction Mécanique de l'EUJIL qui a bien voulu juger ce travail.

Monsieur C. MARREAUD, Directeur du Département Recherche de la Société BANTERNE est également remercié pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je désire aussi exprimer ma gratitude à Monsieur CUILBERT pour la gentillesse avec laquelle il m'a accueilli dans le Département Informatique du Service d'Exploration Fonctionnelle du Système Nerveux du Professeur MILBLED au CHR-B.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Bernard LEPERS, Chercheur au Centre d'Automatique, pour les longues discussions et l'aide qu'il m'a apportée.

Que Messieurs AGRICOLE et BENRAYED également Chercheurs au Centre d'Automatique soient remerciés pour leur participation.

Un grand Merci à Messieurs VEYHANT et HOUZE ainsi qu'à Brigitte, Elefthérios, Aïcha, Fabrice, Michel et tous ceux qui de près et de loin m'ont soutenu tout au long de ce travail.

J'exprime enfin une pensée émue à l'égard de la mémoire de Monsieur Jean VERTUT, Adjoint au Chef du Département de Protection Technique au CEA de Fontenay-aux-Roses et Coordonnateur du pôle Téléopération Avancée du projet ARA, qui avait témoigné un intérêt pour ces travaux et le désir de participer au jury.

Ce travail a été en partie financé par l'Agence de l'Informatique.

Il a été réalisé au Centre d'Automatique de Lille en collaboration avec le CHR de Lille.

SOMMAIRE

CONTEXTE	1
----------------	---

CHAPITRE 1 : SYSTEME D'AIDE A LA MICROMANIPULATION

I - PRESENTATION	
I.1 Microchirurgie	8
I.2 Opérations de vitrectomie	9
I.3 Actes concernés par le Micromanipulateur	11
II- MICROMANIPULATEUR ESCLAVE	
II.1 Introduction	14
II.2 Sécurité	18
II.3 Mobilités	20
II.4 Cinématique	21
II.5 Porte instrument	24
II.6 Utilisation	25
II.7 Motorisation	26
II.8 Matériaux	27
III- ORGANE MAITRE	
III.1 Introduction	29
III.2 Types de commande	29
III.3 Console de commande utilisée	32
IV- CALCULATEUR	
IV.1 Ensembles gérés	34
IV.2 Langage de commande	34
IV.3 Logiciel	36
V - CONCLUSION	

CHAPITRE 2 : EVALUATION DU SYSTEME DE MICROMANIPULATION

I - INTRODUCTION	
II- PERFORMANCE DU SYSTEME H/M	
II.1 Présentation	40
II.2 Evaluation du système	42
III- DISPOSITIF EXPERIMENTAL	
III.1 Plateformes de simulation	45
III.2 Tâche ajoutée	50
III.3 Evaluation des facteurs-opérateur	52

IV- EXPERIMENTATION	
IV.1 Contexte	56
IV.2 Résultats	58
V - CONCLUSION	

CHAPITRE 3 : SYSTEME DE SURVEILLANCE DE L'OPERATEUR

I - INTRODUCTION	
II- VARIABILITE DE LA PERFORMANCE DE L'OPERATEUR	
II.1 Principales causes des variations de performance	68
II.2 Travail supervisé	68
II.3 Methodes d'estimation	69
III- OBSERVATION DE L'OPERATEUR	
III.1 Dispositif d'observation	71
III.2 Paramètres considérés	74
III.3 Traitement des signaux recueillis	76
III.4 Extraction automatique des paramètres-opérateur	78
IV- EXPLOITATION DES DONNEES	
IV.1 Analyse des données syntaxiques	83
IV.2 Analyse des données structurelles	85
V - CONCLUSION	

CHAPITRE 4 : MODELE D'ESTIMATION DE PERFORMANCE

I - INTRODUCTION	
II- RECONNAISSANCE DE STYLES DE CONDUITE	
II.1 Structure du dispositif de reconnaissance	91
II.2 Module de traitement	94
II.3 Premier cycle d'apprentissage	98
II.4 Modèle préliminaire	100
II.5 Validation	102
II.6 Second cycle d'apprentissage	103
II.7 Suivi des estimations	104
III- APPLICATION AUX DONNEES RECUEILLIES	
III.1 Interprétation des histogrammes	105
III.2 Validation	107
IV- CONCLUSION	

<u>CONCLUSION GENERALE</u>	110
----------------------------------	-----

CONTEXTE

I TELEMANIPULATION/ROBOTIQUE : DEUX DISCIPLINES COMPLEMENTAIRES

Ces deux domaines ayant fait leur apparition vers les années 1950 et 1965 respectivement, découlent de deux démarches fondamentalement opposées.

A) TELEMANIPULATION

L'objectif de cette discipline est d'augmenter les capacités d'intervention de l'opérateur en prolongeant son bras par un bras artificiel; initialement créée pour les besoins du nucléaire, elle s'est par la suite répandue dans les milieux sous-marin et spatial.

Un système de manipulation affecte la partie action de l'opérateur mais ne change pas les sous-ensembles perception et décision de celui-ci; l'opérateur est le maître d'oeuvre, il pilote le bras esclave qui constitue un complément permettant une performance accrue dans l'espace (télémanipulation), l'effort (manipulation industrielle) ou la précision (micromanipulation). Le système Homme-Machine résultant est très versatile et peut ainsi accomplir des tâches très variées dans des environnements très complexes.

B) ROBOTIQUE

Son but est de substituer l'opérateur par un système capable d'effectuer le travail à sa place, ce qui conduit à la création d'ensembles de perception et de décision automatiques et explique ainsi l'apparition plus tardive de cette discipline.

Les performances des systèmes actuels de reconnaissance de contextes et de décision ne permettent cependant aux robots de travailler que dans des cadres relativement figés où toute situation est prévisible.

C) DOMAINES D'EMPLOI

La spécificité de chacun de ces deux types de systèmes conduit à les utiliser pour des travaux très différents.

Ainsi, l'emploi d'un robot s'impose pour la réalisation de tâches répétitives et relativement simples, sa facilité de program-

mation le rendant supérieur aux automatismes figés pour les séries moyennes où il trouve son domaine d'action, alors qu'un manipulateur est utilisé pour des interventions ponctuelles lorsque les travaux à réaliser sont complexes et variés et réclament le savoir-faire et la capacité d'appréciation de situations d'un expert, mais demandent des performances ne permettant pas une intervention directe de ce dernier.

II TELEOPERATION AVANCEE

Les avantages et inconvénients des robots et des manipulateurs sont complémentaires, aussi la réunion de ces deux systèmes au sein d'un même ensemble d'intervention permet d'exécuter de façon automatique des tâches répétitives après qu'elles aient été enseignées par un opérateur /FOUR 83/, engendrant ainsi un travail rapide; et autorise une reprise en main par l'homme pour un travail en mode manipulé dès qu'une tâche complexe survient (engins Viking /VERT 84/).

Cette approche de l'intervention entreprise par le pôle Téléopération Avancée du projet A.R.A. /ARA 84/ est possible lorsqu'un ordinateur est couplé au système électromécanique de manipulation. La partie esclave qui exécute la tâche n'est alors pas obligée de recopier les mouvements générés sur l'organe maître et peut à certains moments devenir un robot travaillant de manière autonome. Par ailleurs l'ajout de capteurs locaux sur l'esclave /ESPI 82/ rend possibles des modes de manipulation assistée, dans lesquels l'opérateur pilote une partie du manipulateur, laissant la commande du reste au système automatique (suivi d'une surface à distance constante, par exemple).

La mise en commun des ressources de l'homme et de la machine fait alors apparaître la notion de symbiose homme-machine, pour laquelle l'obtention d'une efficacité maximale de l'ensemble passe par l'instauration d'une coopération équitable entre l'opérateur et le système physique en fonction des particularités propres à chacun d'entre eux /LICK 60/.

III DOMAINE D'ETUDE : LA CHIRURGIE FINE

Nous avons voulu réaliser un tel système d'intervention dans un cadre se prêtant particulièrement bien à son emploi : la microchirurgie. Une illustration d'artiste est donnée figure 0 /THRI 83/.

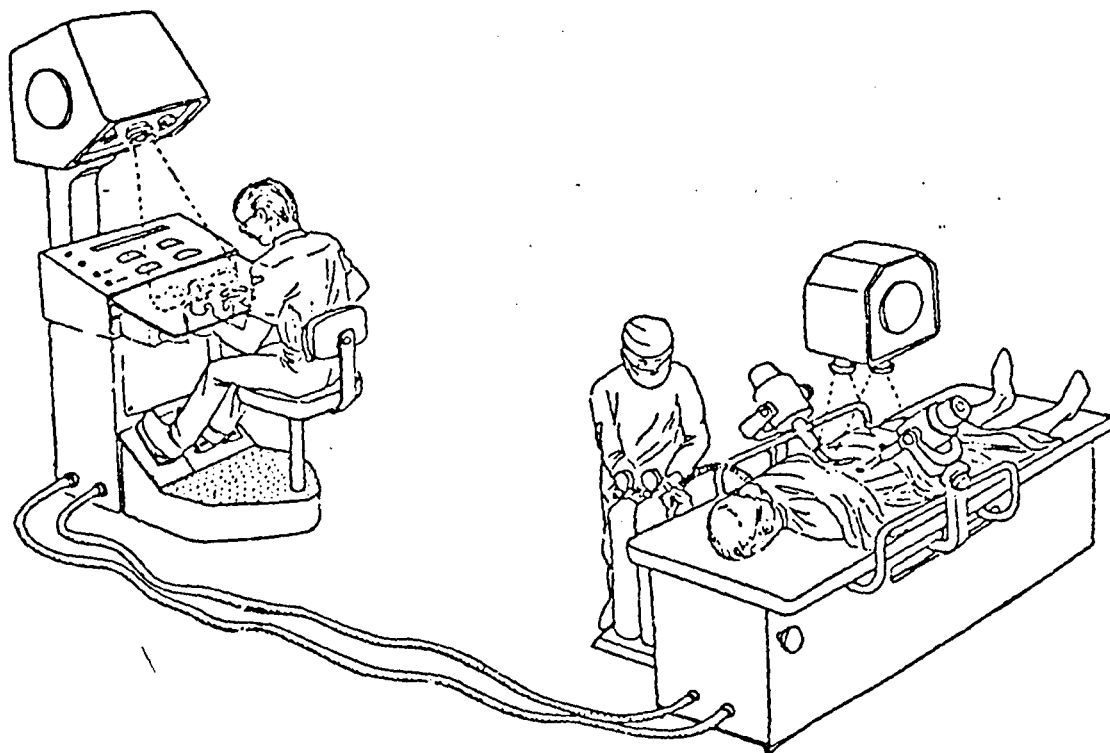


Figure 0 Micromanipulation chirurgicale

A) AIDE A L'INTERVENTION

Les avantages apportés par un système de micromanipulation se situent à trois niveaux :

a) Précision

Actuellement la précision des opérations de microchirurgie atteint une limite qui est celle permise par l'homme travaillant sous microscope, l'utilisation d'un mécanisme a pour conséquence de permettre la réalisation de travaux beaucoup plus fins.

b) Facteurs humains
.....

L'intervention directe impose au chirurgien une sévère contrainte d'immobilité et oblige celui-ci à une tension constante tout au long de l'opération alors que plusieurs tâches sont effectuées de façon répétitive. L'exécution de certaines phases en automatique permet alors à l'opérateur de se consacrer uniquement aux phases critiques et abaisse ainsi sa charge de travail lors d'opérations de longue durée.

c) Sécurité
.....

La mise en place de capteurs proximétriques, nécessaires à l'automatisation du système, permet enfin d'accroître la sécurité des interventions par la définition de zones de sûreté à l'intérieur desquelles toute manipulation est rendue interdite ou par des retours d'efforts donnant une information complémentaire à celle fournie par la vision.

B) SURVEILLANCE DE L'OPERATEUR

La réalisation d'un système dans lequel l'homme et la machine coopèrent oblige à considérer la collaboration entre ces deux composants, de manière à rendre l'ensemble performant et sûr. Ainsi lorsqu'au cours d'une intervention, l'un des deux partenaires a une baisse de disponibilité, il est utile que cette information soit connue afin que l'autre puisse prendre la relève s'il en est capable, ou bien de manière à ce que le système soit placé dans un état interdisant des modes d'intervention devenus aléatoires.

Le développement d'un tel projet demandant la création de systèmes de surveillance du tandem H/M, nous avons entrepris l'étude d'un estimateur de la performance développée par l'opérateur.

Ce module de surveillance constitue le second volet du travail exposé et fait suite à la présentation de l'ensemble de micro-manipulation effectuée dans la première partie.

IV PLAN

1^{ère} partie Système d'intervention

Dans un premier chapitre, nous présentons le système de micromanipulation chirurgicale ainsi que les choix ayant guidé à sa réalisation.

Le chapitre deux est consacré au test du système sur un banc d'essais représentant des tâches-type de microchirurgie. Nous comparons les performances obtenues avec son aide et celles réalisées sans sa participation. On montre que les facteurs humains engendrent des résultats aux qualités très différentes, amenant ainsi le besoin d'estimer les performances dont l'opérateur est capable afin d'y pallier.

2^{ème} partie Module de prédiction de performances

Le chapitre trois rappelle les méthodes envisageables pour la réalisation d'un espion-opérateur. Un choix répondant au critère de transparence, nous amène à considérer le comportement de l'opérateur sur l'interface de commande. Nous donnons les paramètres utilisés ainsi que les traitements effectués sur les relevés et arrivons à la conclusion que les méthodes classiques d'analyse ne permettent pas d'extraire les caractéristiques liées à la performance.

Dans le chapitre quatre, une approche reconnaissance de formes basée sur les histogrammes des paramètres de comportement, aboutit à l'extraction des grandeurs caractéristiques et permet la création d'un modèle basé sur des règles de décision. Nous terminons en donnant les performances obtenues par le système proposé sur un ensemble d'interventions.

I

**SYSTEME D'AIDE
A LA
MICROMANIPULATION**

I PRESENTATION

I.1 MICROCHIRURGIE

La microchirurgie regroupe l'ensemble des interventions s'effectuant avec une très grande précision et réclamant la plupart du temps l'utilisation de procédés d'agrandissement de la zone de travail.

La finesse exigée provient de :

- la taille des organes

c'est notamment le cas de la :

- . traumatologie, les organes manipulés étant des nerfs et vaisseaux sanguins sectionnés,
 - . kératoplastie, consistant à greffer des implants cornéens sur les organes visuels,
- la présence de surfaces très sensibles, proche desquelles l'intervention doit être pratiquée sans qu'il y ait toucher; citons ainsi les opérations de :
- . médecine nucléaire intracrânienne, l'implantation d'électrodes radioactives devant se faire avec évitement des vaisseaux sanguins importants,
 - . vitrectomie, pour lesquelles l'extraction du vitré est parfois accompli très près de la rétine (roclage).

Des interventions fines de ce type existent dans d'autres domaines :

- industriel : fabrication de circuits électroniques,
- biologique : manipulation de cellules,

mais elles sont effectuées sur des surfaces planes et font appel à des manipulateurs très légers ayant seulement quelques mobilités et une amplitude de mouvement de quelques millimètres /UMET 80/, /MATS 81/.

Le système réalisé d'aide à l'intervention microchirurgicale est destiné à exécuter des opérations de vitrectomie, sa struc-

ture a cependant été conçue de façon à ce qu'il puisse être également employé pour d'autres types d'interventions. Il est extensible, entièrement motorisé et couplé à un ordinateur, et constitue ainsi un instrument ouvert utilisable en recherche.

I.2 OPERATIONS DE VITRECTOMIE

I.2.a Extraction de corps étrangers intra-oculaires

La vitrectomie est une opération pratiquée lorsqu'un corps étranger est parvenu dans la cavité vitrénne y causant des complications graves, ou bien lorsque l'éclatement d'un vaisseau sanguin a provoqué une hémorragie endo-oculaire.

L'intervention s'effectue en dirigeant le bec d'un instrument de brochage vers la zone atteinte, à partir d'une porte d'entrée pratiquée sur la sclère, afin que le mouvement du bec fragmente la matière immédiatement environnante qui est alors aspirée hors de l'oeil (figure I-1). 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 ou par une seconde incision sclérale (donnant ainsi un meilleur drainage de la solution vitrénne mais obligeant à un traumatisme plus grand).

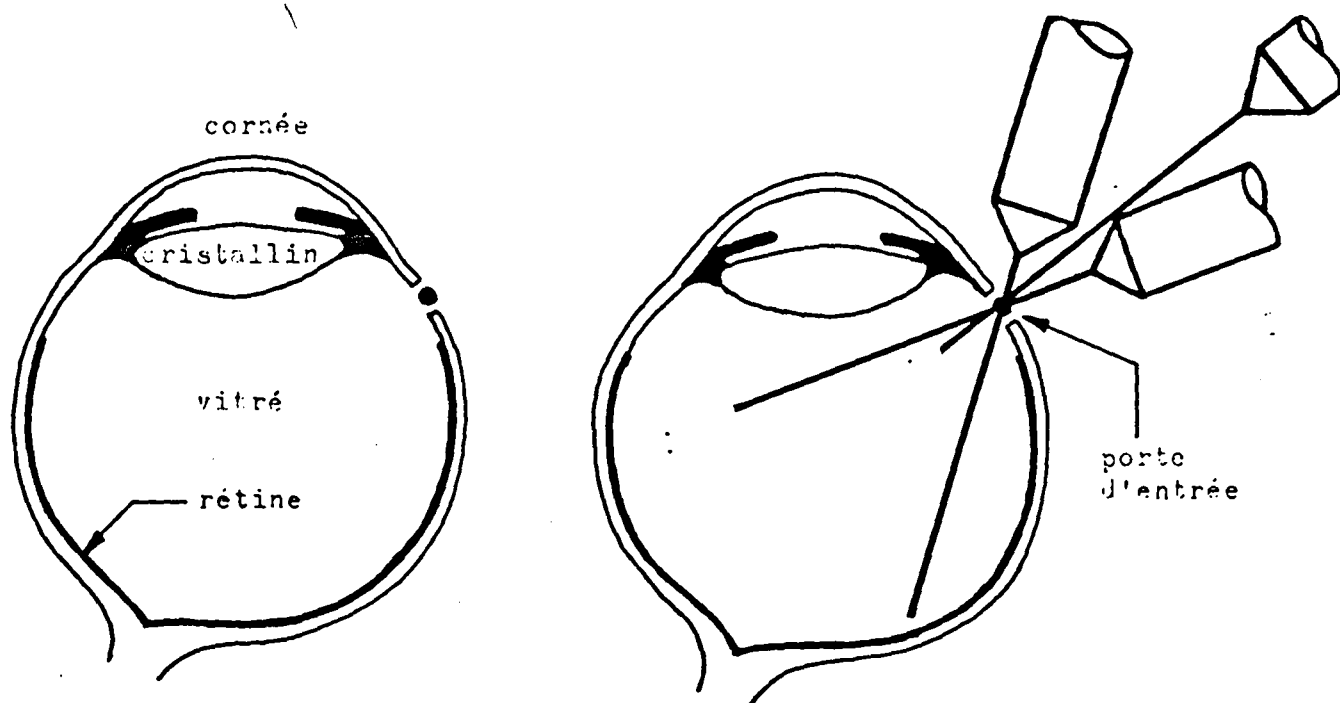


Figure I-1 Vitrectomie

Pendant l'intervention, l'information indispensable concernant l'espace de travail est obtenue par un verre posé sur l'oeil du patient donnant au chirurgien une vision à travers le cristalin de celui-ci (figure I-2).

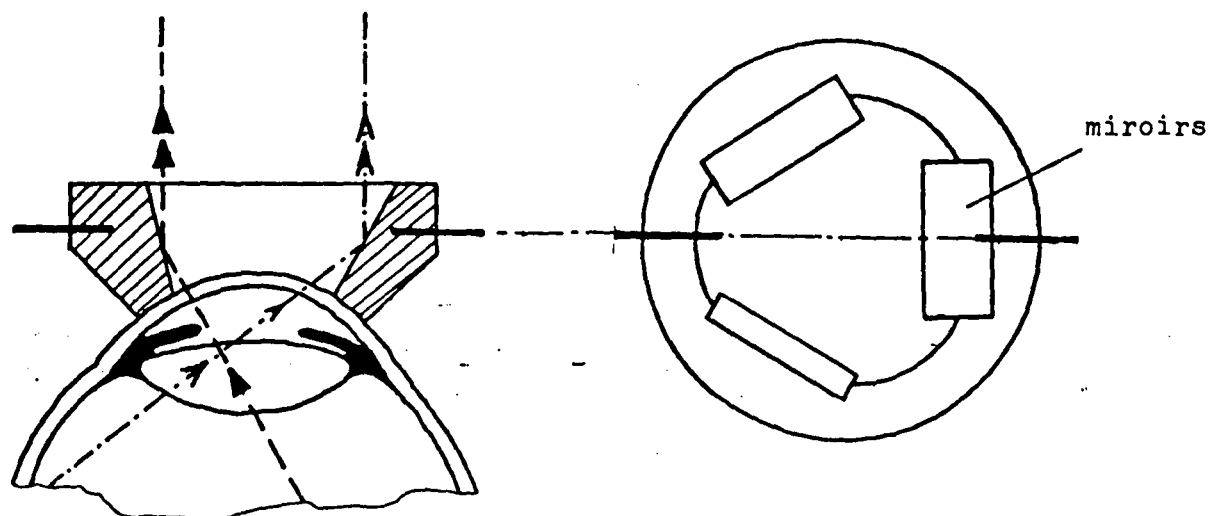


Figure I-2 Méthode actuelle de captage d'informations relatives à l'espace d'intervention

Nous terminons cette description 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 d'éclairage interne par fibre optique, complète l'environnement de l'intervention.

Il est à souligner que pendant toute la durée de l'opération, l'oeil est maintenu fixe par rapport à la tête au moyen de fils, la tête étant elle-même immobilisée par un support.

I.2.b Le Vitréotome

Il existe de nombreux modèles, les plus utilisés en Europe portent les noms de Micro-stripper, Vitrophage et Ocutome /GUFF 83/. Semblables dans leur constitution, ils sont composés d'un corps motorisé et de deux fins tubes concentriques terminés par le dispositif de coupe (figure I-3).

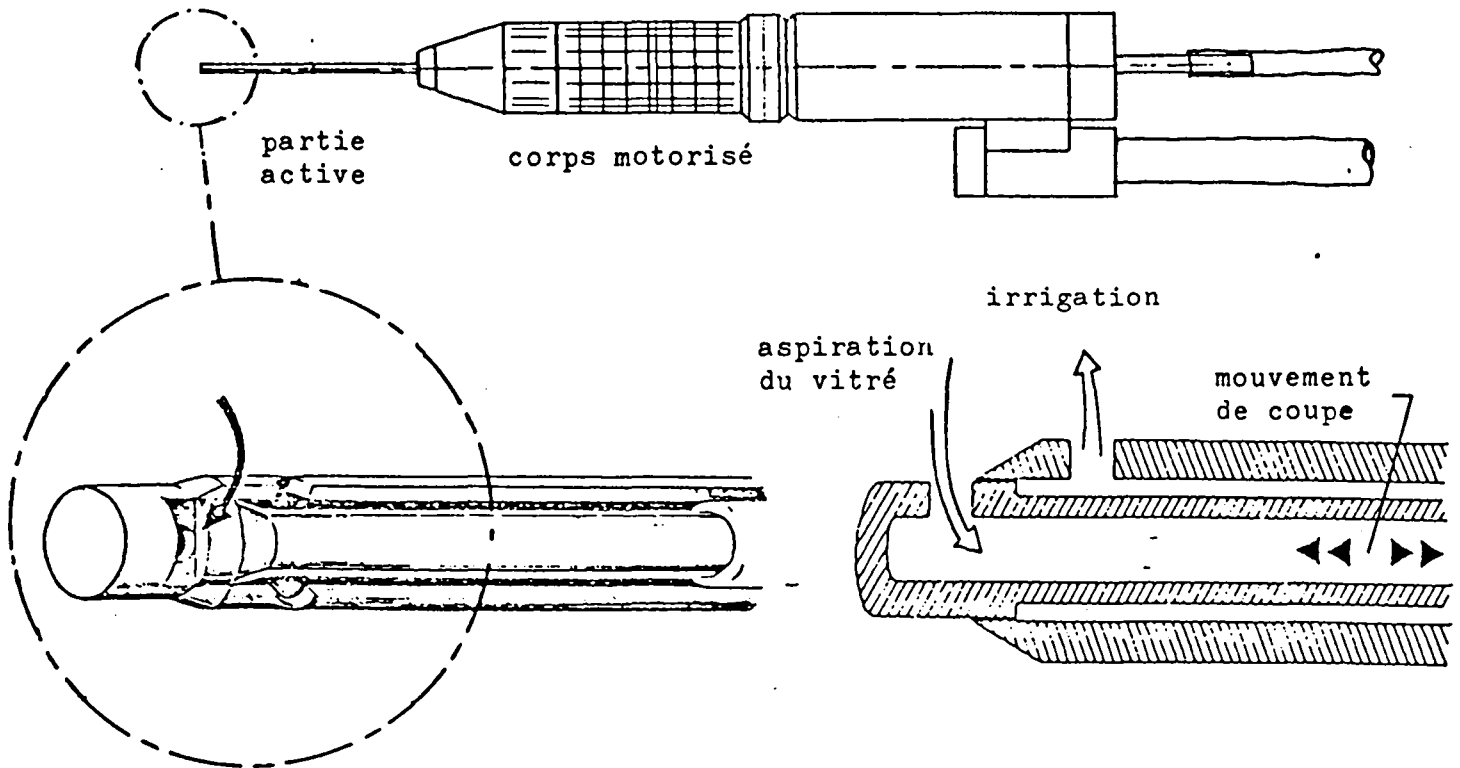


Figure I-3 Vitréotome

Le tube externe est fixe par rapport au corps de l'instrument, le second est animé d'un mouvement de coupe alternatif. Une fenêtre placée en extrémité de l'outil sert à aspirer le vitré.

Le diamètre de la partie introduite dans l'oeil varie entre 0,9 et 2 mm suivant la version utilisée, il est porté à une valeur plus élevée lorsqu'une fibre optique d'éclairage est ajoutée.

Enfin, citons le poids de l'instrument qui est de l'ordre d'une centaine de grammes.

I.3 ACTES CONCERNES PAR UN SYSTEME DE MICROMANIPULATION SPATIALE

L'aide à la manipulation apportée par un système capable d'autonomie touche de nombreux secteurs microchirurgicaux; en envisageant uniquement des interventions sur des organes fixes, avec un seul bras esclave, nous pouvons considérer les points suivants :

- La présence d'un ordinateur entre le bloc maître et le

mécanisme esclave permet de mémoriser les trajectoires réalisées par l'effecteur, pour une restitution ultérieure; cette capacité d'exécuter deux actes parfaitement identiques trouvant une application immédiate en kératoplastie. En effet, le remplacement d'une partie de la cornée par un greffon implique que leur forme et taille soient identiques. Actuellement cette contrainte est respectée par l'utilisation de trépan donnant des découpes circulaires (figure I-4), l'inconvénient étant l'extraction de tout un disque lorsque seule une zone de la cornée est endommagée. L'utilisation d'un système de découpe à mémoire permet alors d'optimiser la zone remplacée et autorise de plus la réalisation de découpes coniques favorisant la retenue du greffon.

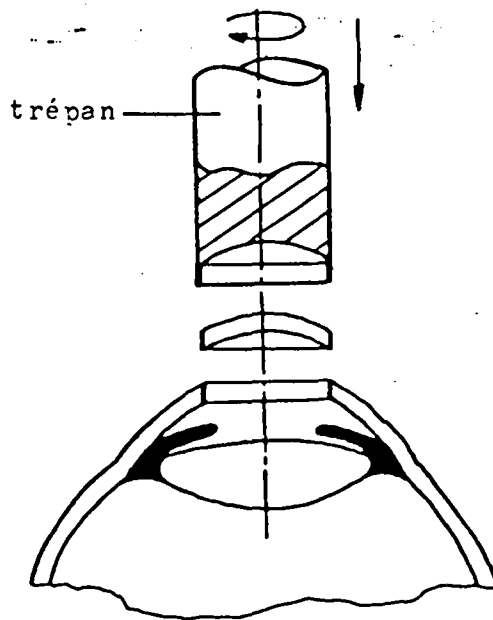


Figure I-4 Remplacement d'un élément de cornée

- Les larmes rendant inopérantes les colles organiques, le maintien en place du greffon est obtenu par des points de suture. L'existence d'un appareil de manipulation intelligent capable de tenir de fines aiguilles courbes et doté de capteurs d'efforts très sensibles permet d'envisager l'automatisation de cette partie de l'opération.

- Le laser qui remplace avantageusement certains instruments réclamant un contact, est très employé lors d'opérations chirurgicales. Son utilisation demande cependant une orientation très précise de l'axe

de tir pour des photocoagulations ainsi que des déplacements avec des vitesses appropriées lors de découpes. Sa manipulation par un système précis et souple d'utilisation est alors toute indiquée.

- Enfin, la procédure actuelle d'introduction d'électrodes intratumorales à l'intérieur du cerveau, qui est discontinue (prise de vues au scanner, décision, calcul des lieux et angles de pénétration, action /BOUR 84/), peut être orientée du côté aval vers une procédure continue plus rapide et plus sûre, si les calculs et la mise en place des électrodes sont alloués à un système de micromanipulation.

Les apports d'un tel système s'avérant grands pour plusieurs types d'interventions, cela nous a amenés à concevoir le bras - esclave autour d'un élément de tenue d'instruments et à réaliser le système le plus général possible.

II MICROMANIPULATEUR ESCLAVE

II.1 INTRODUCTION

Celui-ci constitue un des trois sous-ensembles du système de micromanipulation (figure I-5).

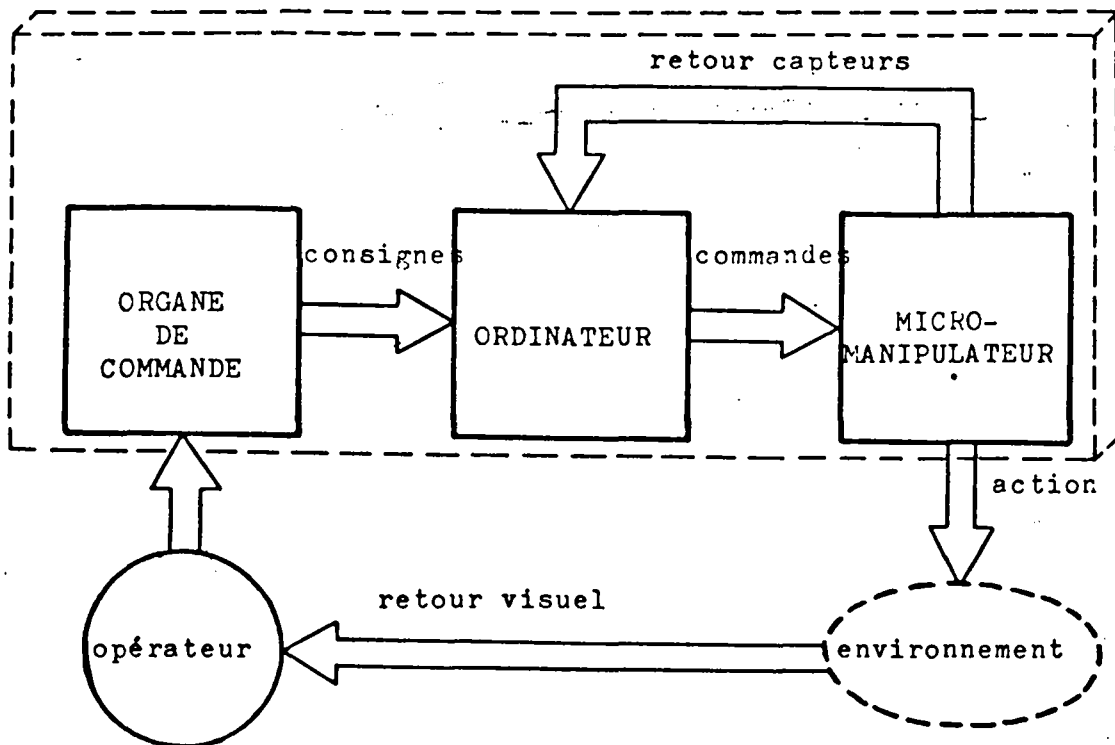


Figure I-5 Système de micromanipulation

De nombreux mécanismes d'aide à l'intervention conçus pour des opérations spécifiques ont été réalisés et peuvent être classés en deux groupes suivant la technologie adoptée :

1^{ère} génération
.....

Les systèmes inclus dans cette classe sont des mécanismes simples constituant des guides qui évitent tout tremblement engen-

drable par la main de l'opérateur et maintiennent l'instrument au repos lorsqu'aucune action manuelle n'est entreprise.

Citons pour exemple :

- . le cadre de Tallerac qui fixé à la boîte crânienne sert de matrice pour la mise en place d'électrodes dans le cerveau,
- . le micromanipulateur stéréotaxique donné figure I-6 /STRA 72/ destiné à des vitrectomies.

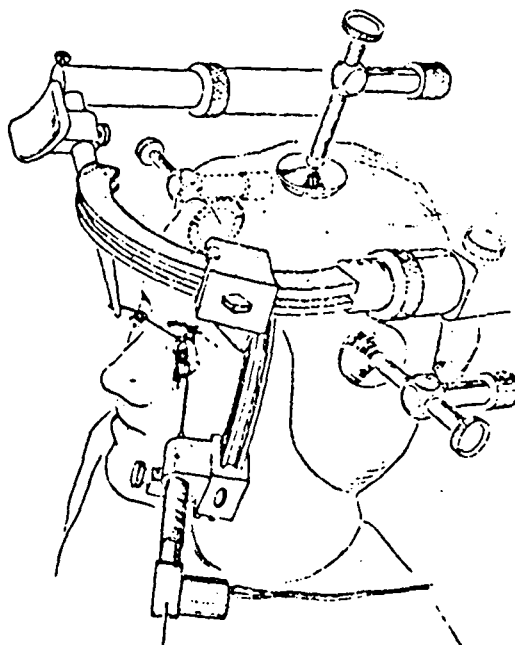


Figure I-6 Micromanipulateur stéréotaxique de première génération

Les mouvements sont générés directement par la main ou par l'intermédiaire de vis micrométriques donnant une meilleure précision.

2^{ème} génération
.....

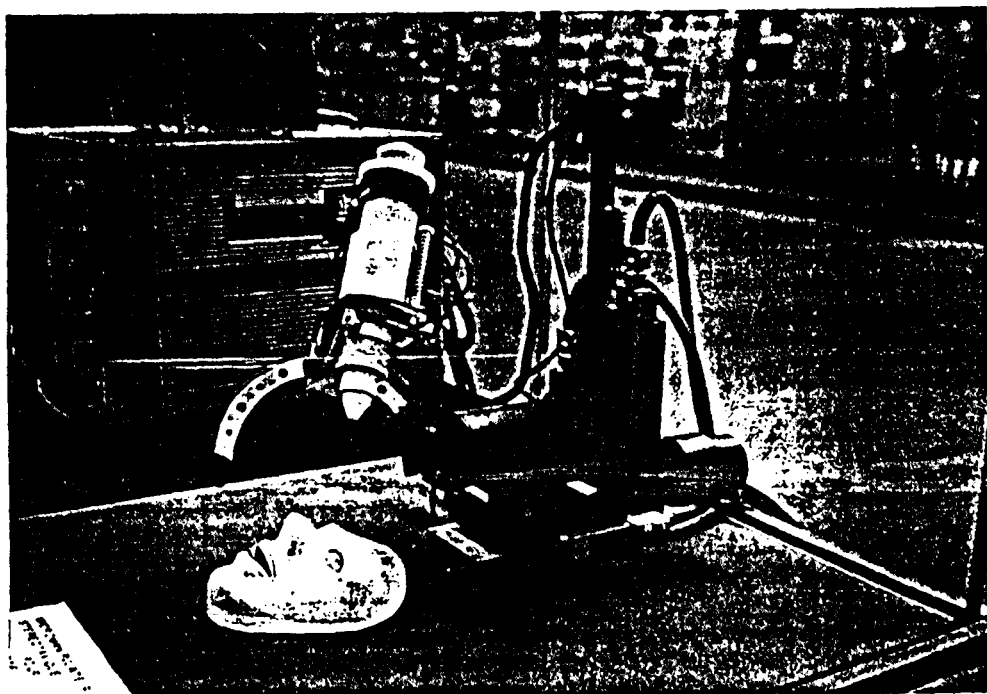
L'adjonction de moteurs pour la réalisation des déplacements permet d'obtenir des appareils ne demandant plus l'intervention de l'opérateur sur le site même de l'opération évitant ainsi toute collision /ZEIS 79/. Cependant la motorisation n'affecte bien souvent que quelques degrés de liberté de travail, le positionnement initial de l'appareil étant réalisé à la main.

Remarque : Ce classement peut être complété du point de vue technologi-

que par une 3^{ème} génération de systèmes lorsqu'un ordinateur assurant la liaison entre la commande et le micromanipulateur est ajouté.

La démarche adoptée pour la réalisation du système électromécanique esclave développé (photo I-7) est schématisée à la figure I-8 sur laquelle sont représentées les étapes d'avancement et les principaux facteurs motivant les choix stratégiques; sur ce schéma ne figurent pas des critères tels le prix et la maintenabilité car il s'agit d'un prototype pour la fabrication duquel des moyens très particuliers ont été mis en oeuvre.

Nous exposons dans la suite les choix réalisés, les données techniques étant groupées dans /MSVO 84/.



I-7 : Système réalisé

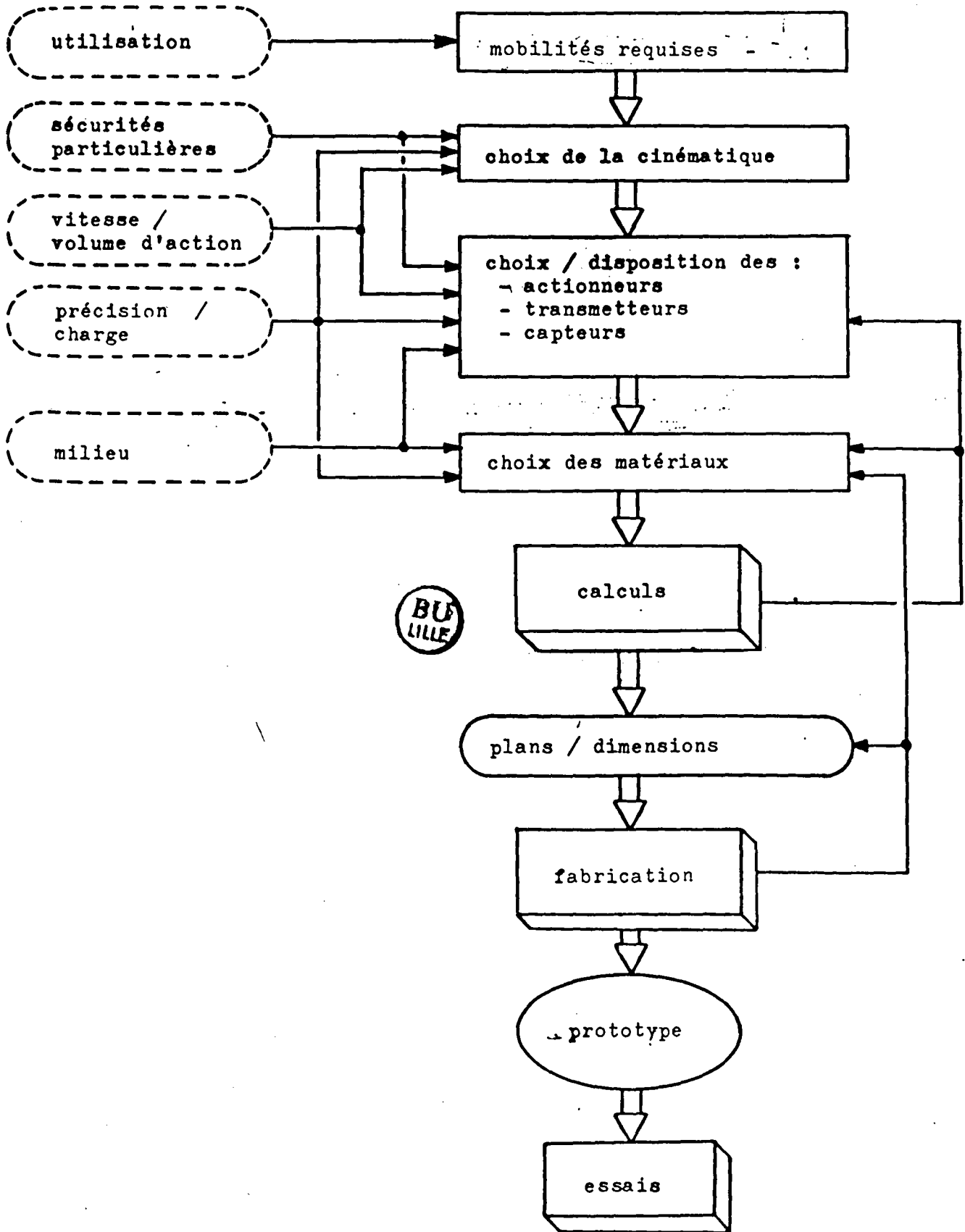


Figure I-8 Plan de conception (

II.2 SECURITE

II.2.a Choix technologique

Considérons une vitrectomie pour laquelle une partie du positionnement du bec coupant à l'intérieur de l'oeil est assurée par la rotation de l'instrument autour d'un point correspondant à la porte d'entrée.

L'invariance spatiale de ce centre de rotation peut être obtenue de deux manières différentes, l'une est mécanique, l'autre informatique :

Pour un robot (mécanisme en chaîne ouverte), la deuxième méthode conduit à calculer en temps réel les valeurs à donner aux articulations, de façon que la combinaison de celles-ci fasse toujours passer l'axe de l'effecteur par un point fixe dans l'espace. Le danger de cette technique réside dans le fait que la défaillance d'un asservissement ou le fonctionnement dégradé d'un actionneur compromettent cet objectif de façon pouvant être brutale.

L'environnement étant ici un patient, une telle perspective conduit à écarter cette solution au profit de la solution mécanique; compte tenu des efforts mis en jeu, la probabilité de rupture d'un pignet physique donnant l'invariance est plus faible que la probabilité de panne d'un composant électronique d'asservissement ou de commande (ou le débranchement accidentel d'un fil).

Un chiffrage de la fiabilité mécanique n'est cependant pas possible car le système est faiblement utilisé et les chocs intervenant inévitablement dans un bloc chirurgical (démontages, stérilisations...) engendrent des contraintes non chiffrables supérieures à celles ressenties en cours d'utilisation opérationnelle. Par ailleurs pour ce mécanisme, le fait d'adopter un coefficient de sécurité même élevé, conduit à des dimensions très faibles. Aussi, certaines valeurs retenues sont en fin de compte les dimensions minimales imposées par le procédé de fabrication, en dessous desquelles la réalisation est impossible.

II.2.b Sureté de l'intervention

Nous devons considérer que des incidents peu probables sont quand même possibles. En dehors de la rupture mécanique évoquée ci-dessus, pour la prévision de laquelle il faudrait une prolifération de

capteurs et de moyens informatiques augmentant la complexité de l'ensemble pour un gain inappréciable, on doit tenir compte de pannes :

- informatiques
- énergétiques
- motrices
- de transmission de puissance mécanique,

et du réveil non signalé du patient.

La première précaution à prendre est de réaliser des ajustements entre pièces ne permettant pas le mouvement sous le seul fait du poids.

Ensuite, puisqu'un blocage du système en cours d'opération est possible, la conception suivante est adoptée : l'intervention chirurgicale n'est autorisée que lorsque le mécanisme se trouve dans une position instable qui est obtenue par apport correct d'énergie et d'information. Si une panne survient, le micromanipulateur se place alors dans une position naturelle de retrait, mettant l'instrument hors de la zone jugée dangereuse. L'information de retrait peut provenir :

- . d'un non respect des conditions requises pour le système de micromanipulation,
- . d'un système de surveillance du patient (monitoring),
- . d'une commande de type arrêt d'urgence, actionnée par le chirurgien ou un aide et constituant le dernier niveau de sécurité.

L'adoption d'une position instable comme fonctionnement normal apporte une sécurité maximale dans le sens où si un seul des indicateurs donne une information de retrait, ou même ne délivre aucune information du tout, cela provoque la mise en attente de l'effecteur en zone non dangereuse.

II.3 MOBILITES

II.3.a Types de mobilités (figure I-9)

Le travail qui consiste à brouter des zones à l'intérieur de l'oeil est réalisé en coordonnées sphériques à partir d'un repère attaché à la porte d'entrée et se trouve complété par la rotation du vitréotome autour de lui-même (de façon à orienter le bec coupant qui se trouve à la périphérie de l'instrument). Ces mouvements constituent l'acte essentiel de l'intervention de vitrectomie, ils correspondent à ceux engendrés par le poignet et les doigts du chirurgien, aussi nous désignons les mobilités correspondantes : mobilités de travail.

Le positionnement spatial de ce repère est obtenu par un second groupe de déplacements qui assure la mise en correspondance du point invariant avec la porte d'entrée en début d'intervention. Cet ensemble joue le rôle du bras de l'opérateur, comme lui il est immobilisé pendant l'intervention; on parle alors de porteur et de mobilités de positionnement.

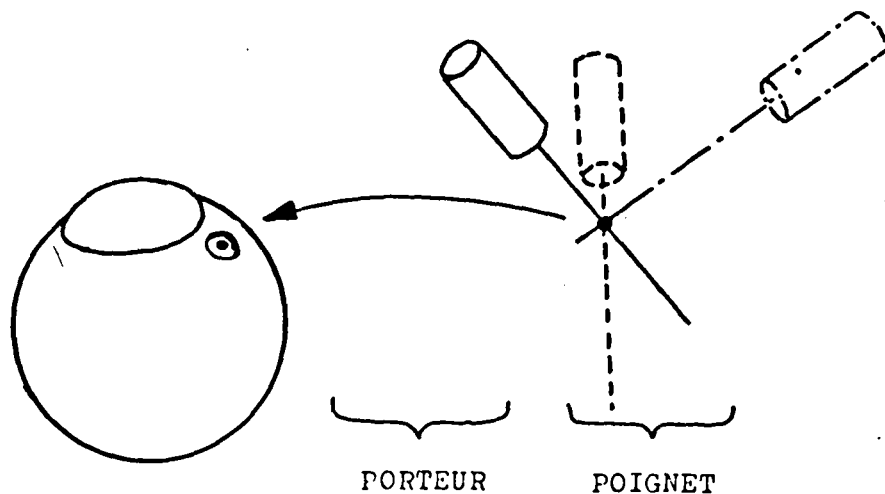


Figure I-9 Décomposition des mobilités

II.3.b Redondance d'articulations

Le mécanisme ainsi obtenu comporte 7 mobilités, soit plus que nécessaire pour un fonctionnement dans l'espace. Ce nombre élevé est dû à la contrainte de contournement d'obstacle imposée par la porte d'entrée; il est cependant trop petit pour permettre l'obtention de deux orientations par rapport à la surface interne de l'oeil (celles-ci ne pouvant être obtenues que par un instrument adoptant une structure de type 'scolopendre' /LAMB 83/).

Lorsque le micromanipulateur est utilisé pour d'autres tâches que la vitrectomie, cette redondance de mobilités peut être mise à profit quand certaines articulations tombent en panne. La mobilité défaillante peut alors être secourue par les six restantes. Cela justifie pleinement le rôle d'un espion-machine, non seulement comme indicateur-alarme, mais aussi comme capteur permettant une reconfiguration et augmentant donc la disponibilité immédiate de l'appareil.

II.4 CINEMATIQUE (figure I-10)

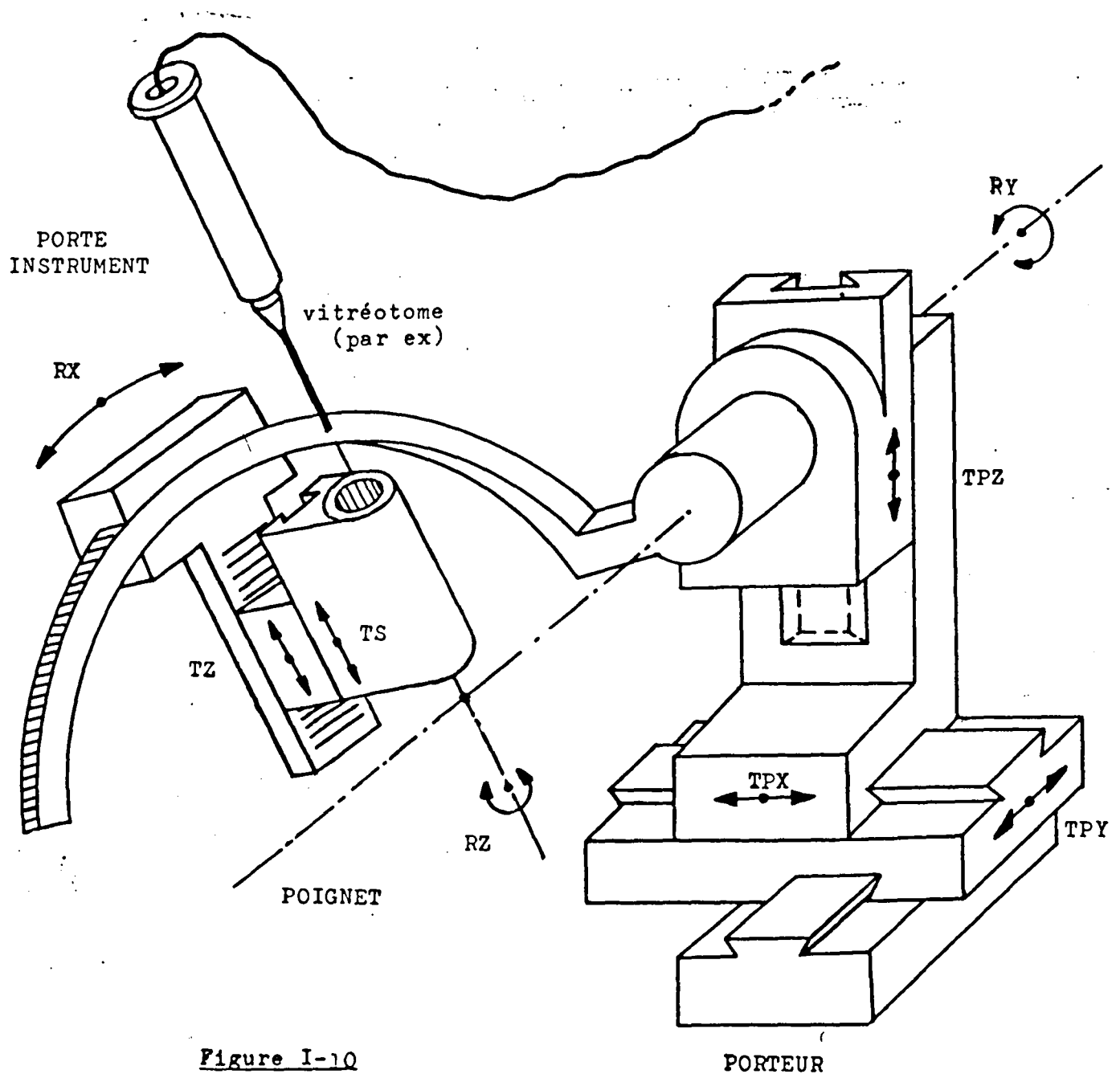


Figure I-10
Schéma du micromanipulateur

II.4.a Porteur (TPX,TPY,TPZ)

Celui-ci associe trois mobilités pouvant être prismatiques ou rotoïdes, leur combinaison conduisant à un positionnement sphérique, cylindrique ou cartésien.

En robotique et télémanipulation, les vitesses exigées sont élevées et l'encombrement du mécanisme est désiré minimal par rapport au volume d'action, ce qui conduit à utiliser très souvent des mobilités de rotation ne demandant pas de glissières et engendrant des systèmes élancés. L'association à des actionneurs rotatifs, complétés éventuellement par des réducteurs engendre alors une certaine flexibilité qui peut être recherchée pour des tâches d'assemblage.

A l'inverse, pour l'accomplissement de déplacements devant être très précis, l'emploi de liaisons prismatiques avec une motorisation par vis (à billes...) conduit à un encombrement non négligeable de l'ensemble à l'égard de l'amplitude de déplacement (ex: machines-outil).

Une solution à articulations rotoïdes et actionneur rectiligne en chaîne fermée, réalisant de façon générale une liaison prismatique à levier, permet d'allier grande vitesse, bonne précision et faible encombrement mais introduit une non linéarité entre la commande sur le moteur et le déplacement dans l'espace (figure I-11).

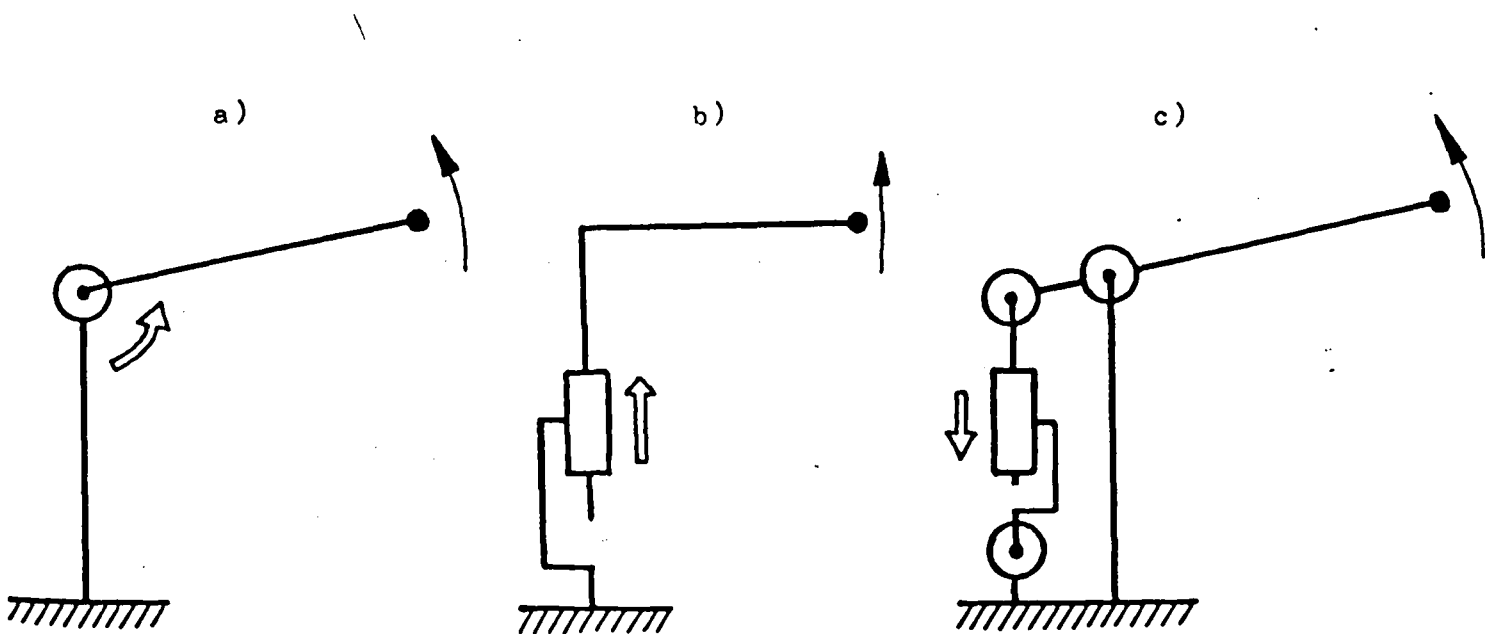


Figure I-11) Types de mécanismes :

- a) articulation rotoïde
 - b) art. prismatique
 - c) chaîne fermée
- } chaînes ouvertes (

Les déplacements à réaliser étant faibles, l'emploi de trois guidages linéaires précontraints pour le porteur du micromanipulateur engendre un bloc précis, rigide et compact par rapport au reste du mécanisme, qualités auxquelles s'ajoute l'avantage que le positionnement du poignet en mode cartésien ne nécessite pas un transformateur de coordonnées pour traduire les ordres de déplacement désirés dans l'espace de la tâche, permettant ainsi de décharger l'ordinateur d'un certain nombre de calculs.

II.4.b Poignet (RX,RY,RZ,TZ)

Cet ensemble réalise les mouvements de travail. Il autorise trois rotations d'axes concourants et par abus de langage englobe aussi la translation de pénétration/retrait de l'instrument.

Les mécanismes engendrant une rotule virtuelle à centre de rotation dégagé sont schématisés à la figure I-12 /LHOT 84/.

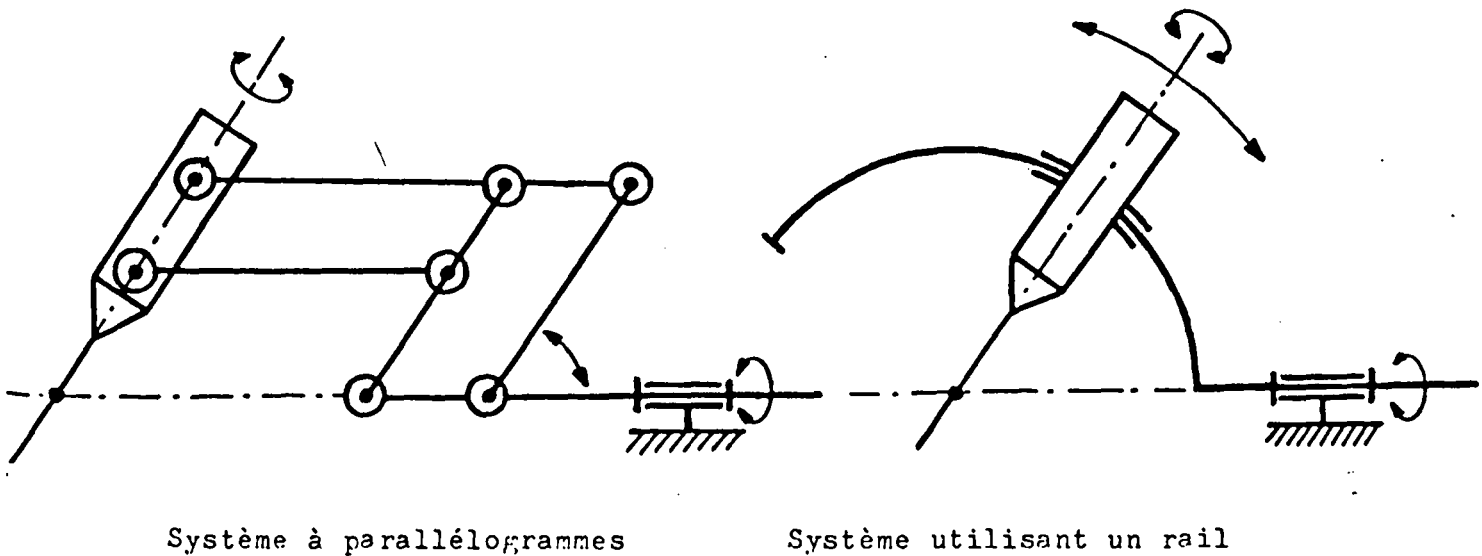


Figure I-12 Poignets à centre de rotation externe au système

L'adoption de la solution à rail courbe pour le micromanipulateur est due à des contraintes géométriques de déport/collision avec le porteur.

II.4.c Retrait d'urgence (TS)

La translation qui permet le retrait de l'instrument hors de l'oeil en conservant les autres mobilités fixes est colinéaire à la translation de travail TZ. L'énergie de retrait est fournie par une capacité mécanique (ressort) ayant été comprimée par un vérin pneumatique, le mouvement de retrait étant amorti par une résistance à l'échappement. Un contact électrique en butée basse autorise l'initialisation de tout le système seulement lorsque la condition de position instable est respectée, une chute de pression significative en cours d'intervention entraînant une alarme de retrait et une réinitialisation hors de l'oeil.

II.5 PORTE INSTRUMENT (figure I-13)

Il constitue un effecteur interchangeable permettant la tenue de plusieurs instruments chirurgicaux, ses dimensions autorisant également l'embarquement de capteurs de force pour des applications particulières de sécurité ou de retour vers l'opérateur /DAVI 83/.

Le changement de l'instrument est réalisable en cours d'intervention, le mécanisme venant alors dans une position chargement/déchargement.

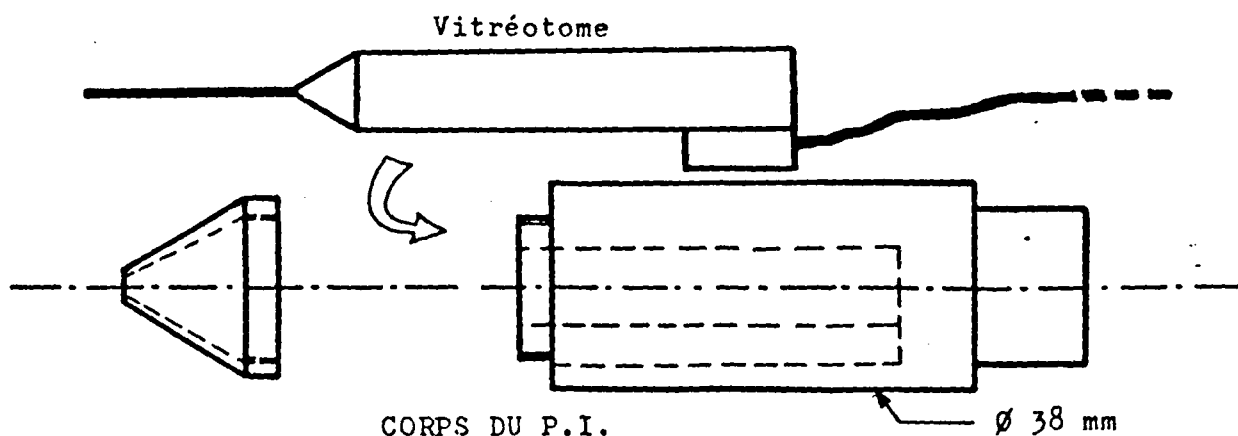


Figure I-13 Porte vitréotome

II.6 UTILISATION

II.6.a Volume d'action

Une fois la base du mécanisme esclave fixée sur le lieu de l'intervention, le porteur permet au point invariant du poignet de se déplacer dans un cube de 10 cm de côté; l'orientation de l'instrument étant limitée dans le plan du rail à ± 60 degrés par rapport à la verticale, aucune butée ne restreignant son inclinaison dans le plan vertical perpendiculaire au précédent.

II.6.b Initialisation

Tout emploi du micromanipulateur passe par la mise en butée préalable de tous les degrés de liberté :

- les translations du porteur placent le poignet en position dégagée,
- les translations TS et TZ sont mises en position haute,
- l'axe de l'instrument est placé verticalement.

L'alimentation en air comprimé du système terminal permet alors d'amener l'instrument en position instable d'intervention (TS en butée basse). A ce moment, la pointe du vitréotome matérialise le point invariant du mécanisme.

L'utilisation du porteur étant autorisée, le chirurgien peut positionner l'extrémité de l'instrument en correspondance avec la porte d'entrée de l'oeil réalisant ainsi le positionnement du poignet. Le blocage du porteur dans cette position met fin à la phase d'initialisation et permet la commande des mobilités terminales.

II.6.c Incident

La course du vérin qui place l'instrument dans une position instable étant de 40 mm, toute alarme mettant fin à cet état permet le retrait du vitréotome hors de l'oeil quelle que soit sa position (\emptyset moyen d'un oeil : 24mm). Tout nouvel emploi du système de micromanipulation demande alors une réinitialisation loin de la zone d'intervention.

II.7 MOTORISATION

II.7.a Actionneurs

L'environnement chirurgical impose tout naturellement une technologie électrique, les avantages étant nombreux : propreté, précision, facilité de transport et aisance d'interfaçage avec l'informatique. Dans tout bloc opératoire existe également une source pneumatique utilisée par certains instruments. La légèreté des actionneurs à air comprimé associée à leur caractéristique tout ou rien, nous a amenés à l'employer pour la translation de sécurité TS; l'énergie électrique étant utilisée pour les autres mobilités.

II.7.b Emplacement

Lorsque les accélérations sont élevées, un déport de la masse des actionneurs vers la base permet une meilleure dynamique de l'ensemble, au dépend d'une certaine augmentation de la complexité (transmissions devant être très peu élastiques).

Si le système est rigide et quasi-statique, ce recours ne s'impose pas, ainsi l'emploi d'ensembles micromoteurs-réducteurs-codeurs optiques ayant une masse faible et présentant une gêne visuelle peu élevée a permis de les placer sur les lieux des liaisons.

II.7.c Vitesses

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

- . positionnement du poignet (TFX,TPY,TPZ) : 10 mm/s
- . orientation du poignet (RX,RY) : 12 °/S
- . translation axiale du vitréotome (TZ) ; 1 mm/s
- . rotation axiale de l'instrument (RZ) : 60 °/s

La vitesse de retrait de sécurité (TS) est réglable par une résistance placée à l'échappement du vérin.

II.8 MATERIAUX

II.8.a Partie terminale

Le poignet du micromanipulateur devant être le plus léger possible, des matériaux de synthèse ont été employés pour :

- la réalisation de pièces sur lesquelles les contraintes sont faibles,
- le remplacement d'organes mécaniques encombrants (bagues en matériaux à faible coefficient de frottement au lieu de roulements et cages à billes) ;

en effet, ces matériaux offrent plusieurs qualités :

- . ils ont une faible densité,
- . ils allient des propriétés souvent contraires chez les matériaux traditionnels,
- . certains sont stables à des agents désinfectants.

Les variétés utilisées sont :

	avantages	inconvenients	applications
Polyacétal	- dur, rigide	- coeff. de frott. (0,4) - densité : 1,40 - s'use (4,5 $\mu\text{m}/\text{km}$)	supports
Polyamide	- densité (1,14) - ne s'use pas (0,09 $\mu\text{m}/\text{km}$)	- dureté, rigidité moyennes	guidages
Tétrafluor-éthylène	- coeff. de frott. (0,2 sur acier)	- s'use vite (21 $\mu\text{m}/\text{km}$) - tendre - densité (2,15) - forte dilatation à la chaleur	guidages demandant un très faible coeff. de frott.

Un avantage supplémentaire présenté par rapport aux matériaux classiques est la possibilité de collage.

II.8.b Rail

Celui-ci devant supporter le poids de tout l'ensemble terminal sans grande déformation (invariance du centre de rotation du poignet), sa réalisation a fait appel à un acier inoxydable (Z 2 CN 18-10), en effet ce matériau rigide autorise une section de rail plus faible qu'un alliage d'aluminium pour un poids sensiblement égal. Les matériaux composites quant à eux n'ont pas été retenus à cause de :

- la complexité de réalisation (moule),
- leur faible module de cisaillement (fibres unidirectionnelles).

II.8.c Tenue aux agents chimiques

En bloc chirurgical, la stérilisation par la chaleur ne porte que sur les objets venant très près ou en contact avec la zone d'intervention, le reste de l'environnement étant désinfecté par le maintien dans une atmosphère d'aldéhyde formique pendant 2 ou 3 heures. L'impact de ce produit à base d'alcool sur les matériaux employés a été testé et s'est avéré nul.

III ORGANE MAITRE

III.1 INTRODUCTION

Après la description du système esclave qui constitue un compromis mécanique entre le robot et la machine-outil, nous considérons maintenant l'autre extrémité de la figure I-5 : l'organe de commande.

Celui-ci transforme un signal biologique issu de l'opérateur en une tension exploitable par l'ordinateur.

III.2 TYPES DE COMMANDE

Plusieurs solutions peuvent être choisies concernant l'entrée, la sortie, la relation E/S et la combinaison de capteurs élémentaires de manière à former cet organe maître /QUET 81/.

III.2.a Commande de type discret ou continu

La relation qui lie l'entrée du système à sa sortie peut adopter la forme :

- tout ou rien (boite à boutons)
- à seuils
- proportionnelle
- non linéaire.

Cette dernière est employée lorsque l'on désire à la fois un travail précis et rapide. La solution tout ou rien ne permettant que deux valeurs, apparaît peu naturelle pour l'homme car elle impose des contraintes de travail trop importantes, ne serait-ce que pour l'arrêt précis à l'endroit choisi. Aussi, la préférence va-t-elle souvent vers une commande de type proportionnel.

III.2.b Entrée

La grandeur d'entrée de cet organe peut prendre la forme d'un déplacement ou d'un effort. Le premier est très utilisé lorsque les mouvements du système esclave doivent être précis, le second étant plu-

tôt réservé aux grands déplacements rapides. On doit remarquer que pour les poignées de commande en effort acceptant plus d'une variable en entrée (commande en X-Y, ...), la difficulté à apprécier la direction oblige parfois à adjoindre une légère compliance.

III.2.c Sortie

La grandeur attachée à l'esclave, qui est affectée par la position ou l'effort sur l'organe maître est soit la position, soit la vitesse.

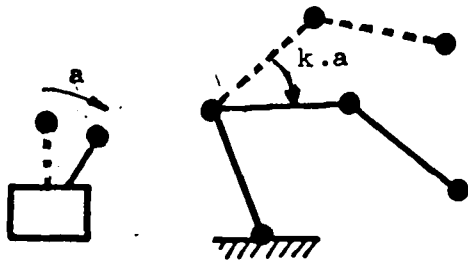
Dans une commande position-position, très utilisée lorsqu'une trajectoire précise est à réaliser, un rapport existe entre les déplacements du maître et de l'esclave. Pour ce type de commande, l'homothétie entre le micromanipulateur et le système de commande devant fonctionner en temps réel, cela implique une bonne dynamique du premier ou un retour limitant la vitesse du second.

La commande position-vitesse oblige à un rappel de l'organe de commande vers son point neutre, rappel n'existant pas dans la solution précédente. Ce second type de commande est plutôt réservé pour des déplacements où seuls comptent les points de départ et arrivée, ou bien lorsque la trajectoire suit des axes privilégiés.

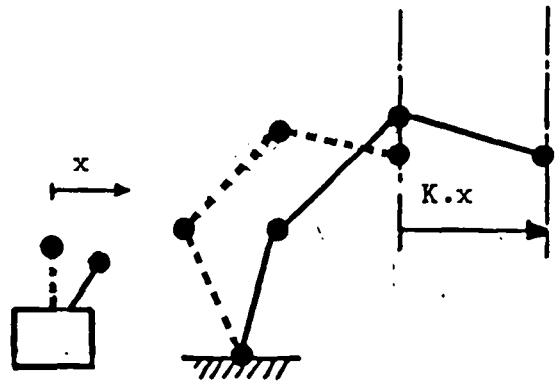
III.2.d Variables commandées

La manière la plus simple de faire mouvoir un manipulateur est d'établir une relation entre chaque mobilité de l'organe de commande et chaque variable articulaire de l'esclave, l'inconvénient étant le jeu mental que doit développer l'opérateur pour accomplir un mouvement. Cette commande dans l'espace des variables articulaires peut avantageusement être remplacée par une commande dans l'espace de travail par l'interposition d'un transformateur de coordonnées (figure I-14).

Dans notre cas, l'utilisation de liaisons prismatiques pour le porteur rend le transformateur de coordonnées transparent, l'opérateur pilotant alors directement les déplacements de l'effecteur.



commande dans l'espace des variables articulaires



commande dans l'espace de travail avec un transformateur de coordonnées

Figure I-14 Exécution de la commande

III.2.e Organisation spatiale

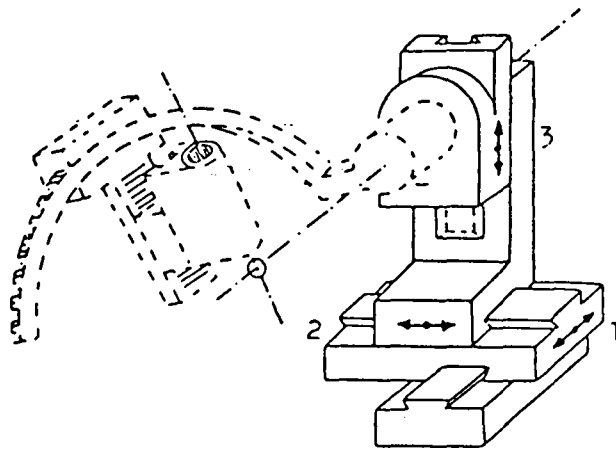
Depuis la table de mixage à n curseurs jusqu'à la poignée équipant une reproduction identique du micromanipulateur (pantín), l'organe de commande peut prendre une multitude de formes, chacune possédant ses avantages et inconvénients et ayant donc des applications ponctuelles; un organe universel n'existant pas.

Une condition essentielle est cependant à respecter, il s'agit de la compatibilité spatiale entre organes commandant et commandé; des décalages de sens ou de direction supérieure à 30 degrés perturbent la manipulation en obligeant l'opérateur à réfléchir, ils opacifient l'interface homme / machine et entraînent une charge de travail plus élevée.

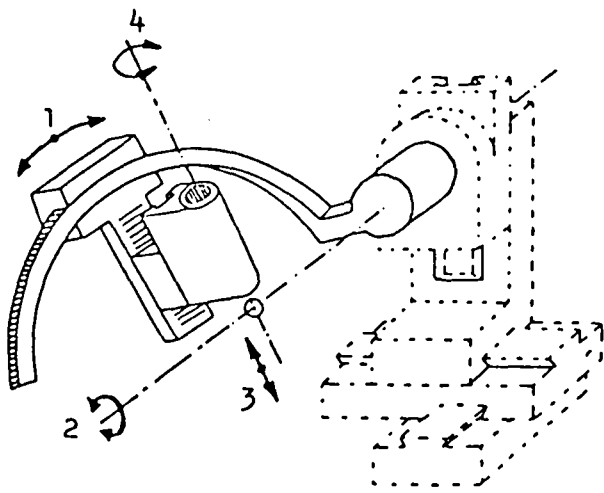
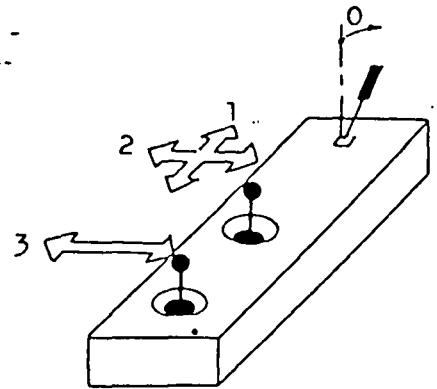
III.3 CONSOLE DE COMMANDE UTILISEE

III.3.a Agencement

Nous avons considéré un poste à deux manches (X-Y et Z-R) permettant la commande des mobilités du porteur ou de celles du poignet, le passage d'un mode à l'autre étant obtenu par un commutateur basculant vers le bloc commandé (figure I-15).



a) Commande du porteur



b) Commande du poignet

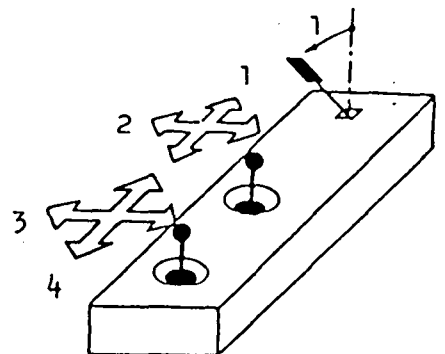


Figure I-15 Commande du micromanipulateur à partir d'une console avec découplage des mobilités du poignet et du porteur

Cette disposition, après un temps d'apprentissage court, permet une manipulation naturelle. Cependant, l'opérateur n'étant pas embarqué sur l'effecteur, il arrive que le sens de l'outil soit disposé vers l'opérateur ou s'en éloigne; la confusion résultante demande un temps d'apprentissage un peu plus long mais disparaît complètement au bout de quelques heures de manipulation.

II.3.b Réalisation

Les mini-manches utilisés sont à rappel vers le centre et commandent en vitesse les déplacements de l'outil chirurgical. Comme ils ne sont pas motorisés, l'effort de contact aiguille-milieu ne peut pas être restitué, aussi au retour visuel direct existant normalement, il a été ajouté pendant les essais sur banc, un retour sonore indiquant un contact outil-milieu. Ce retour auditif est un complément d'informations à seuil utilisé en téléopération unilatérale pour l'information de contact pince-objet et peut également être employé pour délivrer des informations proximétriques, dans ce cas il peut donc remplacer le retour d'efforts, source d'instabilités.

Les amplitudes des mouvements à engendrer sur les manches sont faibles et permettent aux poignets de l'opérateur de rester fixes; la précision obtenue par ce système découplant les orientations et les positions est ainsi meilleure que celle obtenue par un système combinant toutes les mobilités mais ne permettant pas l'appui du bras de l'opérateur. L'inconvénient en est bien sûr l'impossibilité d'obtenir une trajectoire spatiale, sauf si la commande s'effectue avec l'aide de capteurs de proximité (le suivi d'une surface quelconque est alors possible avec seulement deux mobilités de commande).

L'aménagement d'espaces morts près des points neutres permet d'éviter tout couplage non désiré (entre, par exemple, X commandé et Y devant rester immobile).

IV CALCULATEUR

Il est basé sur une carte Apple à microprocesseur 6502 choisie par l'existence de nombreux connecteurs permettant l'enfichage de cartes spécifiques ou de liaison vers d'autres systèmes. Le fait que ce calculateur soit ouvert en fait un instrument évolutif.

IV.1 ENSEMBLES GERES (figure I-16)

Pendant les essais du micromanipulateur, se trouvent connectés sur cette carte :

- une liaison série vers le bloc décentralisé de commande des moteurs pas à pas du porteur,
- une carte supportant des ports d'entrée/sortie vers les moteurs du poignet et les capteurs de fin de course,
- une carte de conversion analogique/numérique recevant les tensions de l'organe maître,
- une unité de disquettes,
- un clavier détachable et un écran pour le dialogue avec l'homme,

ainsi qu'une carte supportant des ports d'E/S vers les plateformes de simulation.

IV.2 LANGAGE DE COMMANDE

Le choix s'est porté sur le langage FORTH. C'est le seul langage disponible sur microcalculateur qui permette une gestion en temps réel de plusieurs processus (avec prise en compte des capteurs). Il a été utilisé dans de nombreux domaines : pointage de télescopes, animation de décors, robotique. Il est presque aussi rapide que le langage assembleur, très compact en taille mémoire utilisée et possède la particularité d'être modulaire et extensible : à partir d'un vocabulaire de base formant le dictionnaire de départ, l'utilisateur définit de nouveaux mots-fonction en faisant appel à ceux existant déjà et par là augmente le volume du dictionnaire et le domaine d'action. C'est aussi un langage qui est structuré.

Son défaut est d'être totalement illisible sans forte concentration.

Nous avons utilisé une version de Forth qui est axée vers le calcul scientifique : le TRANSFORTH. Celui-ci est compilé, les mots étant traduits aussitôt que la fin de leur définition est effectuée. Il n'est cependant pas standard.

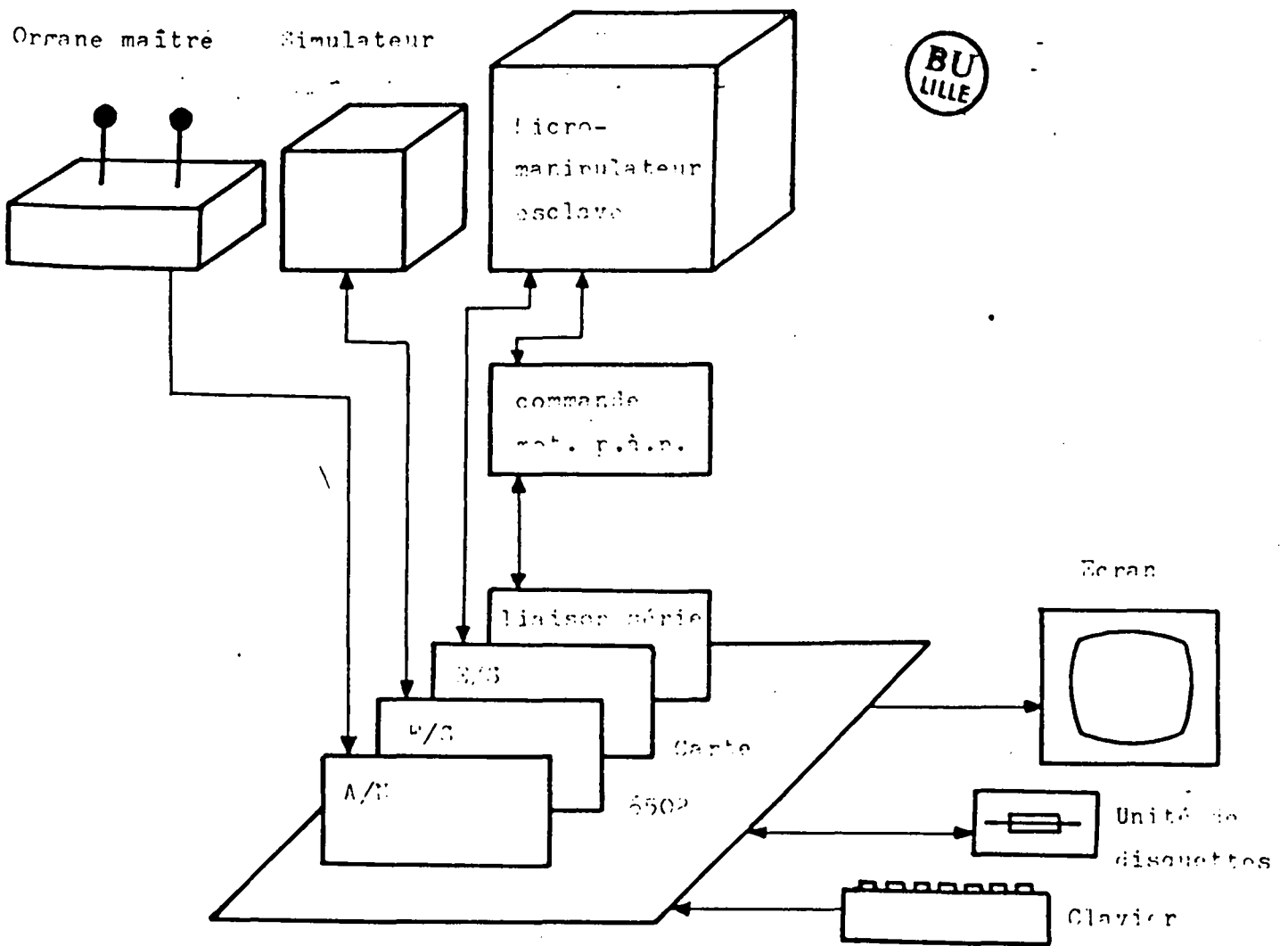


Figure I-16 Calculateur

IV.3 LOGICIEL

La commande du micromanipulateur peut se faire à partir de la console ou du clavier de programmation. L'apprentissage d'une trajectoire et le stockage sur un support externe sont permis; la combinaison à une autre trajectoire déjà apprise autorise la génération de gestes complexes, une structure conditionnelle pouvant être mise en oeuvre afin de prendre en compte les informations en provenance des capteurs installés sur l'esclave de manière à permettre l'enchaînement des gestes.

Pendant les essais, la commande de l'esclave a réuni les modules suivants (annexe 1) :

- conversions analogiques-numériques des valeurs de la console,
- commande des moteurs et prise en compte des capteurs de fin de course,
- gestion des plateformes d'essais (lecture/écriture),
- comptage du temps,
- comptage des erreurs de manipulation,
- gestion de l'écran.

L'utilisation de Transforth a ainsi permis le fonctionnement en temps réel du système (aucun temps mort n'est ressenti par l'opérateur), cela malgré la lenteur du microprocesseur 6502 (1 Mhz).

V CONCLUSION

Le système de micromanipulation présenté constitue une base pour les recherches dans le domaine chirurgical et possède la qualité d'être très souple d'utilisation et ouvert à toutes modifications et extensions. Dans l'état actuel, c'est un micromanipulateur unilatéral limité pour des travaux sur organes fixes.

L'intérêt principal de ce système réside dans l'interposition d'un ordinateur entre les parties maître et esclave, ce qui en fait un micromanipulateur de 3^{ème} génération, la première et la seconde génération étant constituées par des systèmes entièrement mécaniques /STRA 72/ et électromécaniques /ZEIS 82/.

La présence de l'ordinateur ouvre ainsi des perspectives de recherche telles que :

- l'implantation de boucles automatiques pour l'exécution de travaux répétitifs,
- l'asservissement sur des organes mobiles,
- l'établissement d'une collaboration homme-machine efficace,
- le couplage à des systèmes d'aide à la décision,
- le travail en coopération avec d'autres bras.

L'évaluation du système se fera ainsi réalisée doit être entreprise, cela fait l'objet du chapitre 2.

II

**EVALUATION
DU SYSTEME DE
MICROMANIPULATION**

I INTRODUCTION

a) 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 manipulation entre l'opérateur et l'instrument a souvent comme conséquence d'élever le temps de l'opération (multiplication de la durée de l'intervention à la main par un quotient temporel q_t).

Ces deux paramètres ainsi que les changements intervenant dans les contraintes d'exécution ressenties par l'opérateur en cours de manipulation constituent les trois composantes fondamentales de la performance du système de micromanipulation qui seront évaluées dans un premier temps.

b) L'observation de la performance réalisée par le système Homme/Machine lorsque des facteurs affectant l'opérateur sont modifiés permet ensuite de tester la robustesse du système entier à un mauvais fonctionnement de la composante Homme.

II PERFORMANCE DU SYSTEME H-M

II.1 PRESENTATION

Le système d'intervention étant constitué de deux entités : l'opérateur et le système de micromanipulation, la qualité de l'intervention résultante dépend de la performance de chacun d'entre eux. Sur un type de tâche donné et sauf défaillance, la machine permet une qualité d'intervention qui est stable dans le temps, la variation de performance enregistrée étant alors due à l'opérateur :

$$\overrightarrow{\text{Perf}}(\text{Int}_i) = \overrightarrow{\text{K}} + \overrightarrow{\text{Perf}}(\text{OP}_i)$$

performance d'intervention du système H/M	=	$\overrightarrow{\text{K}}$ contribution de la machine (considérée cste)	+	$\overrightarrow{\text{Perf}}(\text{OP}_i)$ contribution de l'opérateur (variable)
---	---	---	---	---

II.1.a Facteurs de performance du micromanipulateur

Trois types de facteurs caractérisent le système de micromanipulation :

a) La performance d'exécution /COIF 82/

Les paramètres concernés :

- volume d'action,
- vitesse maximale de déplacement,
- sensibilité,
- charge utile ...

sont essentiellement engendrés par les jeux, inerties et élasticités de la charpente, par la motorisation adoptée et le type de commande utilisé et sont, pour la plupart, connus par le calcul.

b) L'extensibilité

La facilité d'interface du système considéré, autori-

sant ou non le couplage à des systèmes développés ultérieurement, conditionne la performance future du système de manipulation. Les choix effectués lors de la conception, faisant appel à une large part d'incertitude car fondés sur des standards existants, ne peuvent être vérifiés qu'avec le temps.

c) La transparence du système /GART 79/
.....

Ce facteur affecte l'opérateur en lui imposant en plus de la charge due à la tâche à accomplir, une charge de commande.

Les règles de l'ergonomie permettant la création d'interfaces Homme/Machine relativement naturels /HOFK 82/, sont souvent trop générales et le choix parmi un ensemble de solutions acceptables ne peut être réalisé que par des essais.

Il est à remarquer que ceux-ci révèlent en outre des détails qui négligés lors de la conception du système, prennent une importance considérable lors de l'utilisation. Ainsi, certains moteurs pas à pas peuvent engendrer un bruit très désagréable ayant une incidence sur l'humeur de l'opérateur et se répercutant sur la qualité de l'intervention.

II.1.b Facteurs de performance de l'opérateur /MCKE 79/

Une étude bibliographique des facteurs ayant une influence sur la performance d'action de l'opérateur permet un classement en deux groupes :

Le premier est constitué de quatre facteurs ayant une influence déterminante et pour l'évaluation desquels un certain nombre de méthodes ont été développées. Il s'agit de :

- l'entraînement : e
- la difficulté de travail ressentie : d
- la pression imposée par le contexte (tension nerveuse) : s
- la fatigue accumulée : f

Ces facteurs sont liés entre eux, ainsi une élévation de la fatigue entraîne une augmentation de la difficulté de travail perçue, un grand entraînement permet d'atténuer les pics de tension nerveuse ...

Le second groupe comprend des facteurs ayant une influ-

ence indéniable, tels :

- la motivation
- l'émotivité (sensibilité à la présence de spectateurs...)

mais pouvant être considérés comme constants et homogènes pour une classe professionnelle donnée, et donc non retenus pour notre étude.

II.2 EVALUATION DU SYSTEME DE MICROMANIPULATION

Adoptons les notations suivantes :

E_p l'espace de performance (dim p)

T_j un type d'intervention donné

S_k le système de manipulation; pouvant être la main de l'opérateur

$E_{CP} = \{OP_1, OP_2, \dots, OP_p\}$ un ensemble d'opérateurs

$F = \{F^1, F^2, \dots, F^q\}$ un ensemble de facteurs propres à l'opérateur
aux valeurs comprises entre 0 et 1

$G = \{G^1, G^2, \dots, G^r\}$ un ensemble de facteurs affectant l'opérateur
durant l'intervention ($0 \leq \text{valeurs} \leq 1$)

Nous caractérisons ainsi chaque intervention I_i par un

(q+3)uplet $I_i = (T_j, S_k, CP_1, F_i^1, \dots, F_i^q)$

et construisons un vecteur performance $\vec{P}(I_i)$ de dimension $2+r$ dont les
composantes concernent :

- la performance d'intervention du système H/M
 - . précision d'exécution (p_i)
 - . temps d'intervention (t_i)
- la charge imposée à l'opérateur par le système de manipulation (G_j)

$$\vec{P}(I_i) = [p_i, t_i, G_i^1, \dots, G_i^r]^t$$

Choix : les facteurs humains considérés précédemment conduisent à

$$I_i = (T_j, S_k, CP_1, e_i, f_i)$$

et $\vec{P}(I_i) = [p_i, t_i, d_i, s_i]^t$

II.2.a Performance du micromanipulateur $\vec{P}_{S_k}^{T_j}$

Pour chaque tâche T_j , le relevé des performances $\vec{P}(I_i)$ réalisées par l'ensemble des opérateurs lorsque les conditions d'intervention

$$e_i = 1 \text{ et } f_i = 0$$

sont respectées, permet de former un nuage de points dans E_p dont le centre d'inertie est considéré constituer la performance recherchée $\vec{P}_{S_k}^{T_j}$ du système de micromanipulation S_k relative au type de tâche T_j

(exemple figure II-1).

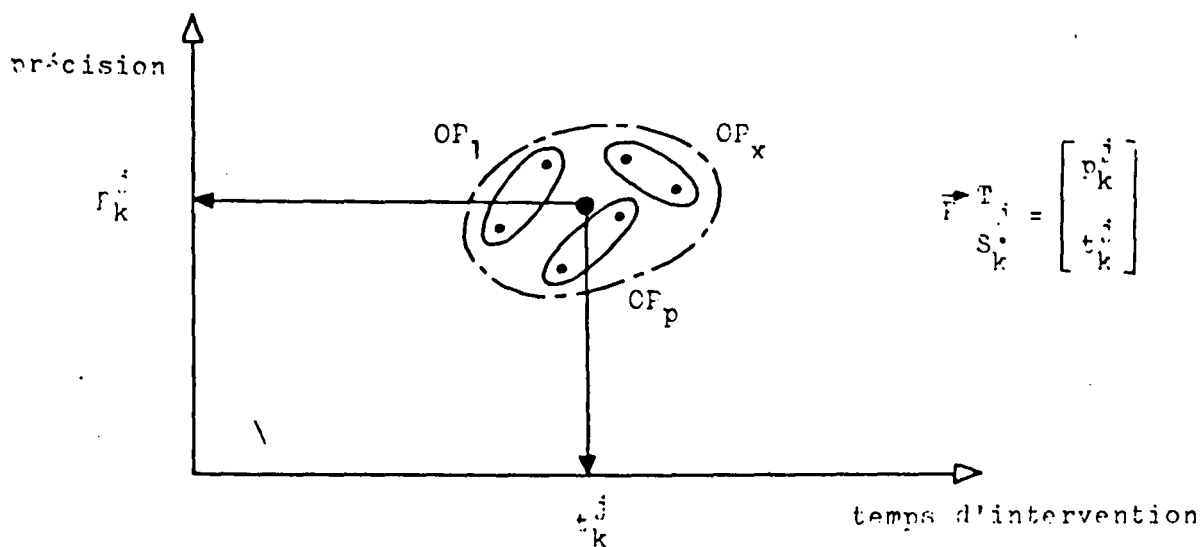


Figure II-1 Exemple de détermination de la performance d'un système S_k sur une tâche-type T_j , dans un espace de performance restreint à un plan

II.2.b Robustesse du système

Chaque performance relevée dont les composantes sont relatives

- à la tâche
- à l'opérateur

peut être décomposée en :

$$\vec{P}(I_i) = \vec{P}_{S_k}^{T_j} + \Delta P(OP_n)_i$$

où $\vec{P}_{S_k}^{T_j}$ correspond à ce qui est obtenu par un opérateur virtuel;
 $\vec{\Delta P}(OP_n)_i$ étant fonction :
- de l'opérateur
- des facteurs l'affectant à l'instant i
(figure II-2).

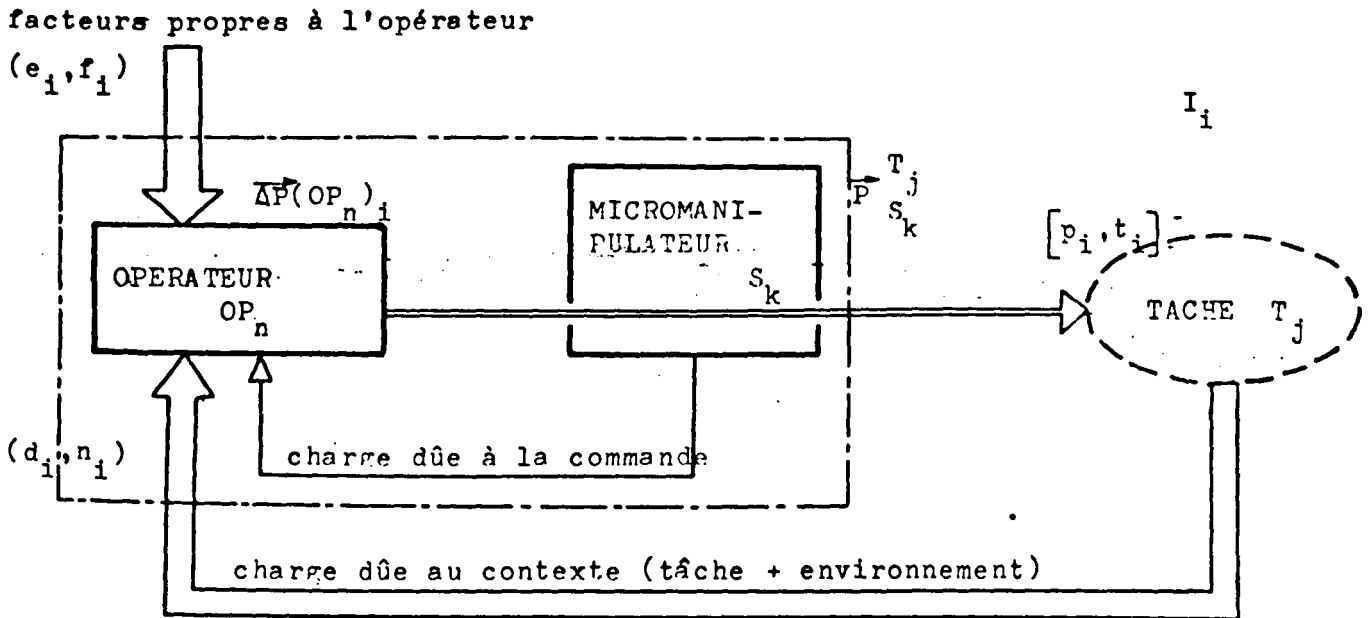


Figure II-2 Facteurs de performance de l'intervention

Afin de tester la robustesse du système d'intervention, il convient alors de faire varier les facteurs opérateur, modifiant ainsi les performances enregistrées, et permettant de décider des valeurs limites à adjoindre aux facteurs, d'un côté desquelles l'intervention est acceptée.

Hypothèse :

Nous admettons que la variation forcée d'un des facteurs, engendrée par les conditions expérimentales, n'a aucune incidence sur les autres facteurs; cette simplification étant valable en première approximation car la variation d'un facteur engendre une variation bien plus faible des autres restants.

III DISPOSITIF EXPERIMENTAL

III.1 PLATEFORMES DE SIMULATION

III.1.a Choix de réalisation

a) Le développement d'un système de simulation de tâches microchirurgicales s'avère nécessaire car le relevé de la performance d'intervention demande l'enregistrement de la précision p_1 , paramètre non mesurable en conditions réelles d'opération, les essais sur cobayes n'engendrant des résultats que sous forme de succès/ non réussite et ne permettant pas une appréciation plus fine de la qualité de l'opération.

Remarque : un système de simulation est nécessaire pour l'entraînement des opérateurs : ainsi la réalisation sur simulateur de la première phase de l'apprentissage pendant laquelle l'opérateur bâtit la plus grande partie du modèle interne servant de référence pour la commande du micromanipulateur permet de créer des contextes différents amenant celui-ci à explorer toutes les possibilités du système en peu de temps.

b) L'étude des systèmes de simulation de tâches permet de classer ceux-ci en deux catégories, relatives aux deux points précédents :

Systèmes de mesures /PERU 84/

Ils font appel à des tâches-type relativement simples :

- . suivi de trajectoire,
- . insertion tige/cylindre.

Le relevé en continu des positions et efforts engendrés par le système d'intervention permet d'extraire des données telles les erreurs de suivi, les valeurs moyennes des vecteurs force et moment d'insertion, servant alors à comparer divers systèmes de manipulation entre eux, ou avec l'homme.

Systèmes d'entraînement

Ils simulent le plus fidèlement possible le support de travail et les

réactions de celui-ci. Un critère de normalité, donné par des seuils relatifs à divers paramètres du système, entraîne l'avortement de la mission lorsque le dépassement de l'un d'entre eux se produit. Le but recherché étant d'amener l'opérateur à effectuer des interventions à l'intérieur des limites de sécurité, le résultat est donné sous la forme : correct / accident.

c) Un système intermédiaire entre les deux solutions précédentes est envisagé pour l'évaluation du micromanipulateur; il est constitué de deux plateformes simulant un type d'intervention et comportant des obstacles fixant la valeur de précision demandée pour l'intervention.

L'enregistrement de l'opération se fait sous forme dichotomique : une variable n comptant le nombre de fautes commises durant l'intervention est initialisée à zero et gardée figée aussi longtemps que l'opérateur effectue la tâche en respectant les contraintes de précision exigées; le toucher d'une surface sensible entraîne l'incrémenta-tion de n mais n'interrompt pas l'intervention.

La composante p_i du vecteur performance $\vec{P}(I_i)$ est alors donnée par :

- le paramètre de précision imposée sur la tâche $T_j : c_j$
- la variable nombre de fautes de l'intervention $I_i : n_i$

$$\vec{P}(I_i) = [n_i^{(c_j)}, t_i, d_i, s_i]^t$$

III.I.b Plateforme de simulation de vitrectomie (T_1)

Le site d'intervention est une demi-sphère dont la face interne porte N_1 éléments identiques, répartis aléatoirement (pour l'expérimentateur); chacun d'entre eux étant composé (figure II-3a) :

- d'un micro-contact,
- d'un cache muni d'une porte d'entrée,
- d'une diode électroluminescente signalant l'élément activé.

L'intervention consiste à fermer les micro-contacts avec la pointe d'un vitréotome, sans toucher les caches, suivant un sens pré-établi signalé par les diodes.

Les dimensions du site, ne permettant pas l'atteinte de chaque élément lorsque le point invariant du mécanisme est positionné au centre de la plateforme, obligent à utiliser les mobilités du porteur et du poignet du micromanipulateur pour chaque intervention élémentaire.

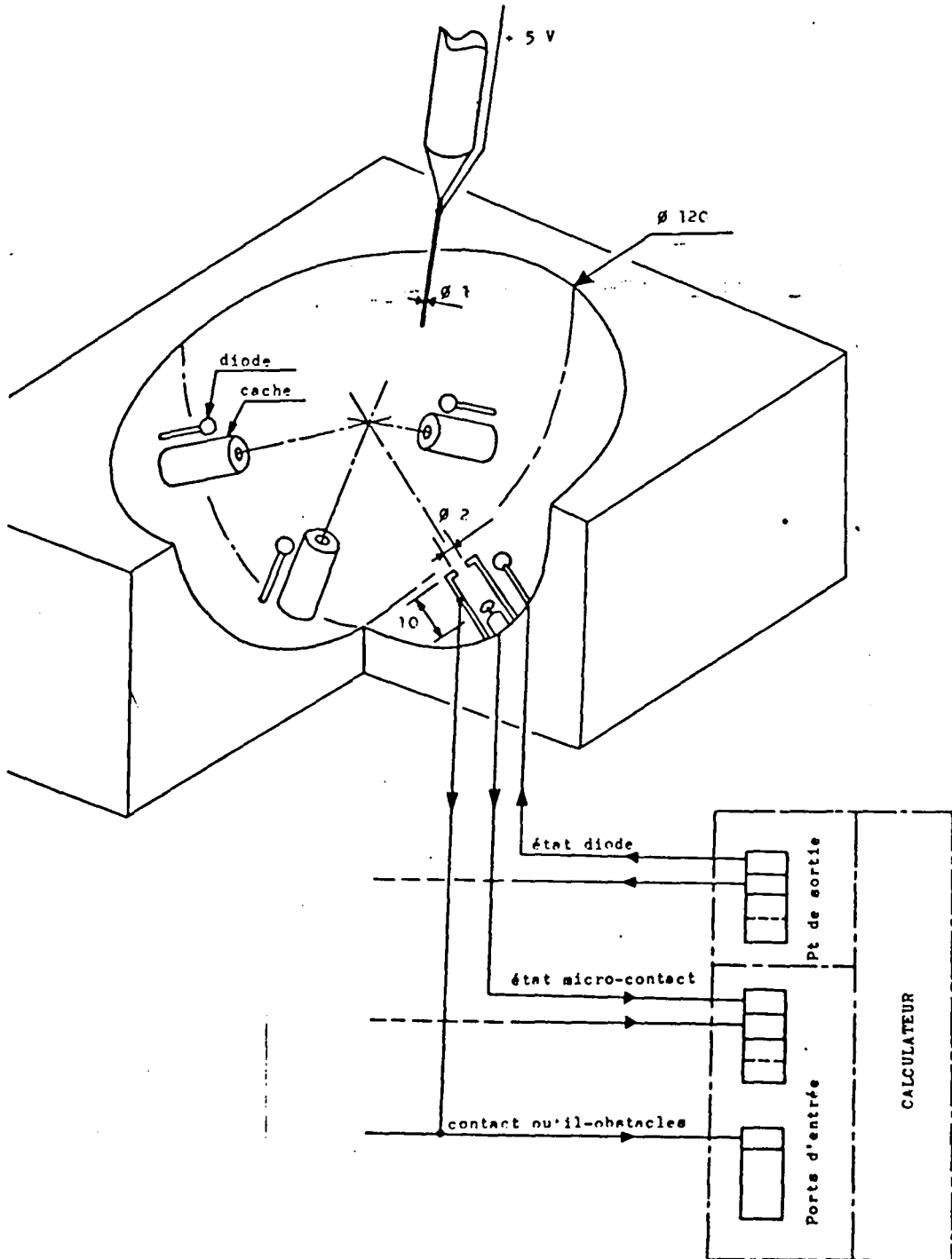


Figure II-3a Plateforme de simulation de vitrectomie

$$N_1 = 8, \quad c_1 = 1 \text{ mm}$$

La gestion de la plateforme est assurée par le calculateur Apple II servant à la commande du micromanipulateur, un module Forth implanté dans l'arbre de commande :

- gère un port d'entrée (état des contacts) et un port de sortie (état des diodes) suivant une stratégie de poursuite donnée à la figure II-3b,
- compte le nombre de transitions non contact→contact entre l'aiguille et les obstacles (n),
- engendre un signal sonore avertissant l'opérateur lorsqu'une faute est détectée,
- lance un chronomètre lors de l'activation de la première diode et le fige lors de l'action sur le dernier poussoir.

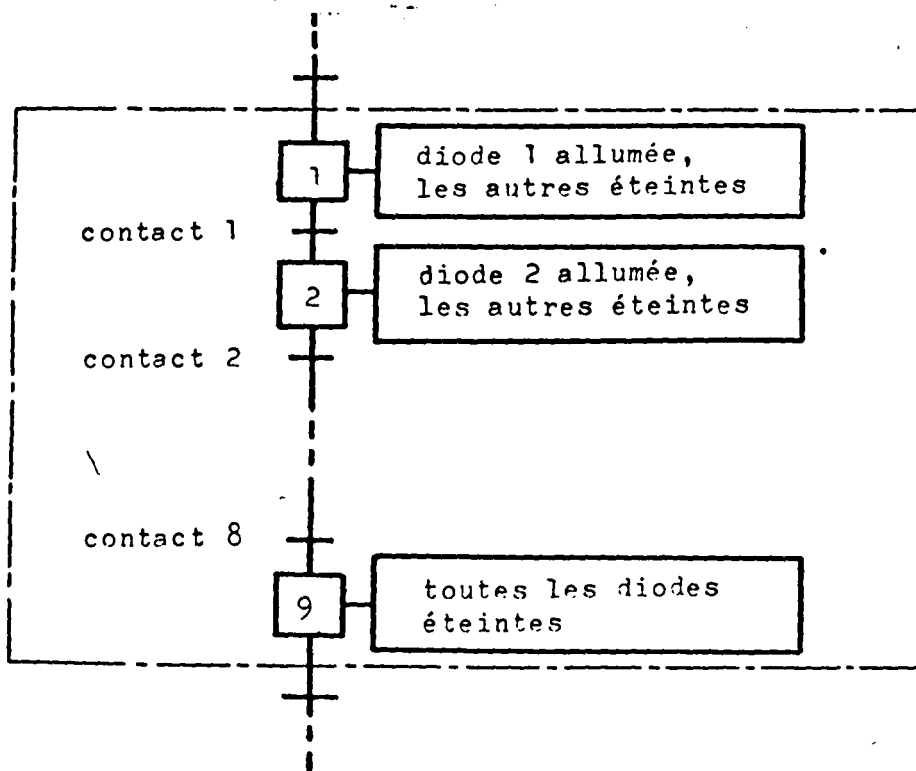


Figure II-3b Poursuite imposée à l'opérateur ($N_1 = 8$)

III.I.c Plateforme de suivi (T_2)

Ce second constituant du dispositif d'essais est composé d'une surface plane comportant (figure II-4) :

- une rainure,
- N_2 obstacles engendrant des restrictions de passage,
- N'_2 micro-contacts à actionner au passage.

Le poignet étant correctement orienté en début d'opération, le suivi de la rainure ne demande que l'utilisation des mobilités X et Y du porteur.

Le module de gestion reste analogue.

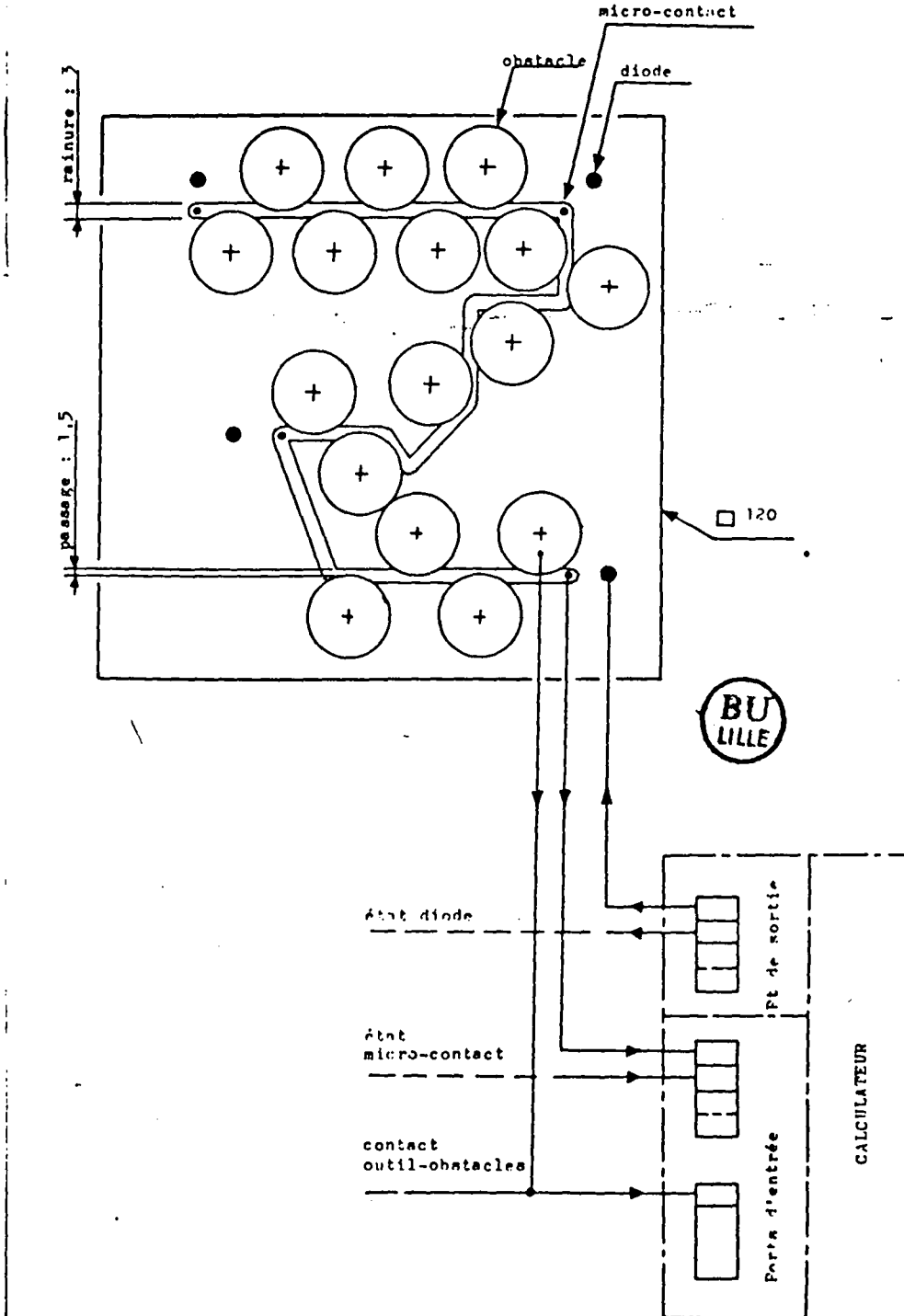


Figure II-4 Plateforme de suivi

$$N_2 = 20, N_2' = 4, c_2 = 0,5 \text{ mm}$$

III.2 TACHE AJOUTEE

III.2.a Choix de la tâche

Dans la seconde partie de l'évaluation, la variation des facteurs e,n,f affectant l'opérateur est réalisée sans modification du système de simulation; ce qui impose, pour avoir un groupe de résultats homogènes, de faire varier le facteur difficulté d par l'ajout d'une tâche effectuée en même temps que l'intervention principale et ne changeant donc pas les paramètres des plateformes d'essais.

Le choix d'une tâche de maintien d'une cible mobile à l'intérieur d'un domaine, sur écran graphique, permet de répondre aux contraintes suivantes :

- tâche prenante (fonction du temps),
- tâche utilisant les mêmes canaux sensori-moteurs que les interventions sur plateformes de simulation (tâche oculomotrice), cela afin de ne pas permettre le travail simultané et obligeant à une allocation séquentielle de l'attention,
- type de tâche sensiblement identique à la tâche principale (pilotage demandant une forte attention mais faisant intervenir un effort musculaire et cérébral faibles).

III.2.b Description

La tâche ajoutée, réalisée sur un calculateur placé près de l'opérateur (figure II-5a), comporte un pavé se déplaçant à vitesse constante sur l'écran, et ne devant pas venir en contact avec les limites visualisées du champ.

L'opérateur peut modifier le sens des composantes de la vitesse de l'élément mobile par appui sur certaines touches du clavier, disposées de façon logique entre elles, mais n'ayant pas de marquage particulier (figure II-5b). Lorsque le pavé touche le bord du champ, il s'immobilise et une variable A totalise les temps d'arrêt.

La charge supplémentaire apportée par cette tâche est due à ce que l'opérateur doit :

- garder présent à l'esprit le modèle de déplacement de l'élément mobile et actualiser sa position pendant l'intervention sur la plateforme,
- effectuer une recherche de la touche correspondant au changement désiré parmi un ensemble de touches semblables,
- développer des efforts d'adaptation
 - . le clavier et l'écran sont dans des plans perpendiculaires,
 - . la nature des tâches est différente (précision/temps),
 - . les supports sont dissemblables (luminosité).

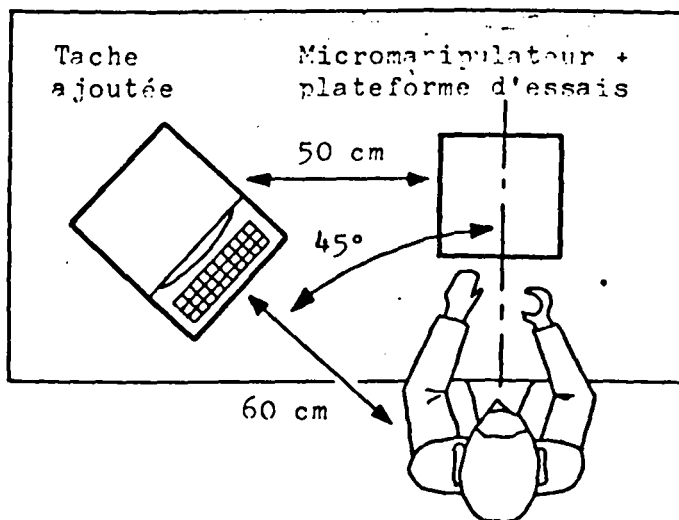


Figure II-5a
Disposition
de travail

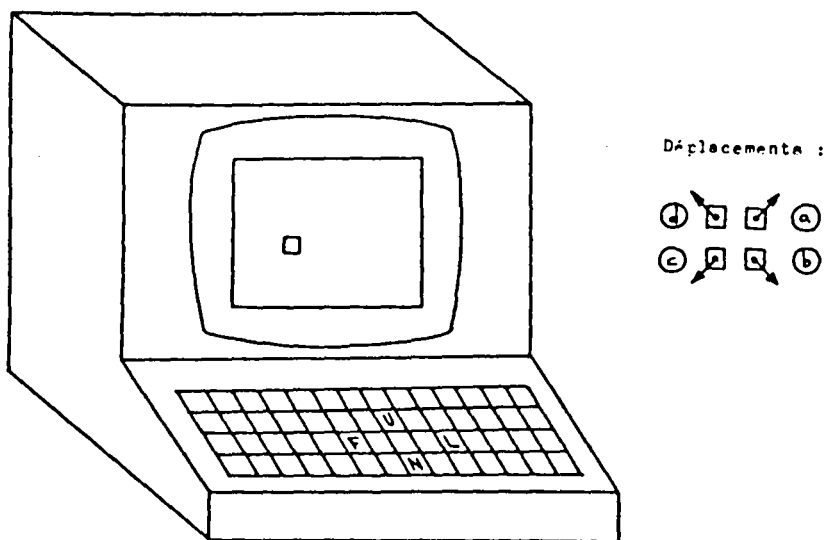
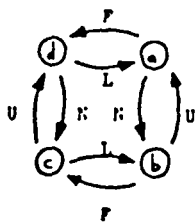


Figure II-5b
Tâche ajoutée
(langage Grö-
Forth)



Modifications
réalisables

III.3 EVALUATION DES FACTEURS-OPERATEUR

III.3.a Présentation

L'emploi d'une grille d'auto-évaluation permet de relever les facteurs-opérateur d, s, f à la fin de chaque intervention; le facteur entraînement e étant donné par le suivi des performances sur plusieurs interventions et n'étant pas estimé par l'opérateur ($e=0$ pour le premier essai, puis $e=1$ dès que la performance atteint une asymptote, figure II-6).

L'utilisation d'un tel procédé d'évaluation est simple, ne perturbe pas l'expérience et permet d'obtenir des valeurs moyennes car il fait appel à la mémoire de l'opérateur.

L'appréciation par l'opérateur des facteurs humains qualifie cette méthode de subjective.

Elle possède l'avantage par rapport aux méthodes objectives (EMG, ECG...) de délivrer les facteurs tels qu'ils sont vraiment ressentis; ainsi, si l'opérateur estime que sa fatigue est grande, on doit la prendre comme telle, même si une méthode objective indique que ce n'est pas vrai, car de nombreux facteurs non tous mesurables entrent en jeu.

La difficulté réside dans l'établissement de la grille qui doit être claire et ne pas prêter à confusion, de manière que l'opérateur exprime le facteur considéré et non un autre.

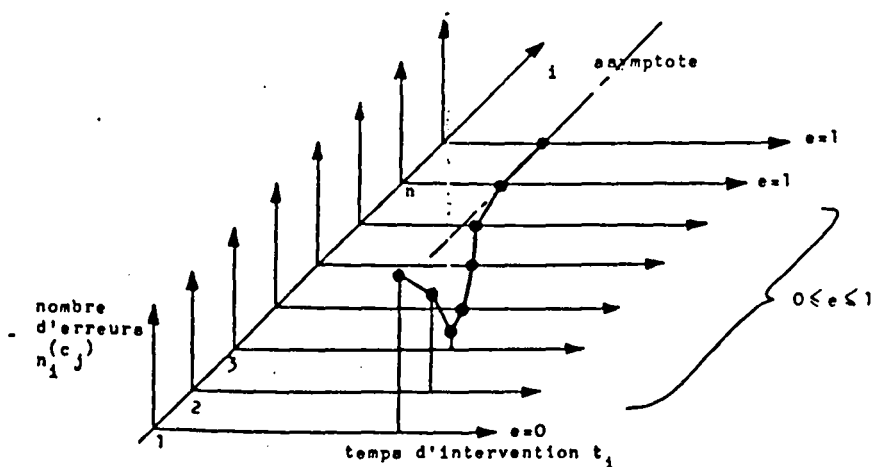


Figure II-6 Evaluation du facteur entraînement e

III.3.b Recherche des facteurs d,s,f

Nous avons réalisé une grille redondante $h(I_i)$ (figure II-7a) où chaque attribut relatif à un facteur est associé à une échelle composée de 6 régions, ce nombre relativement peu élevé étant pris afin que la grille soit rapidement complétée et que les réponses finales ne soient pas trop perturbées par celles du début.

Les attributs sont placés de façon aléatoire ainsi que les sens des échelles.

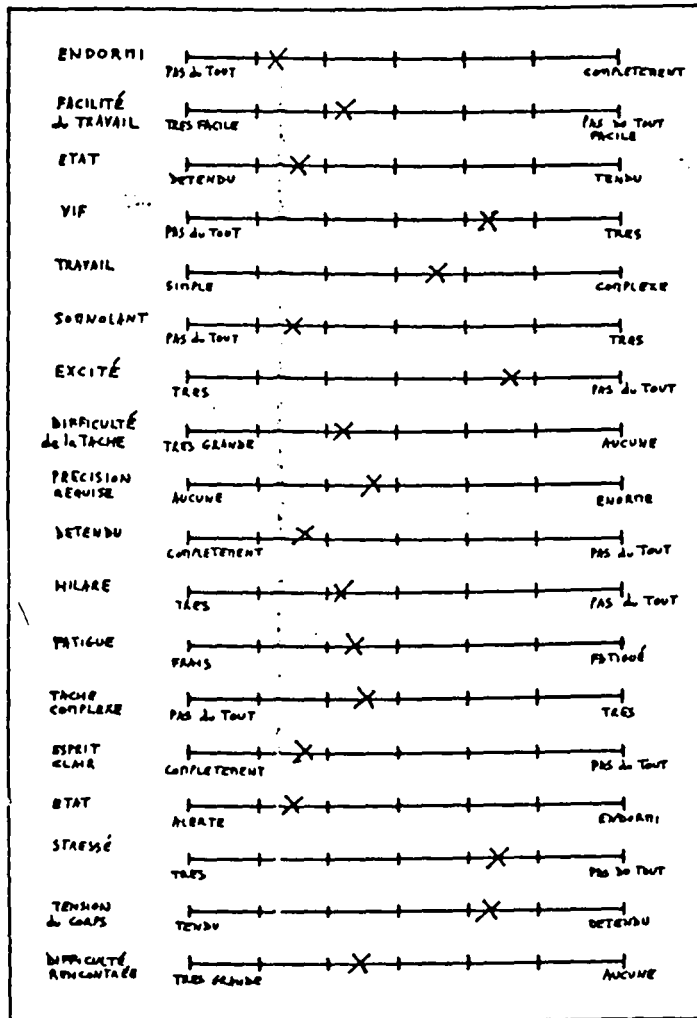


Figure II-7a Exemple rempli de grille d'auto-évaluation $h(I_i)$

La superposition de la grille H (figure II.7b), où chaque région est étiquetée de 0 à 1 par pas de 0,2, à $h(I_i)$ permet de donner un ensemble de valeurs à chaque facteur :

$$E_d = \{v_1^1, \dots, v_n^1\}, \quad E_s = \{v_1^2, \dots, v_n^2\}, \quad E_f = \{v_1^3, \dots, v_n^3\} \quad (\text{figure II-7c}).$$

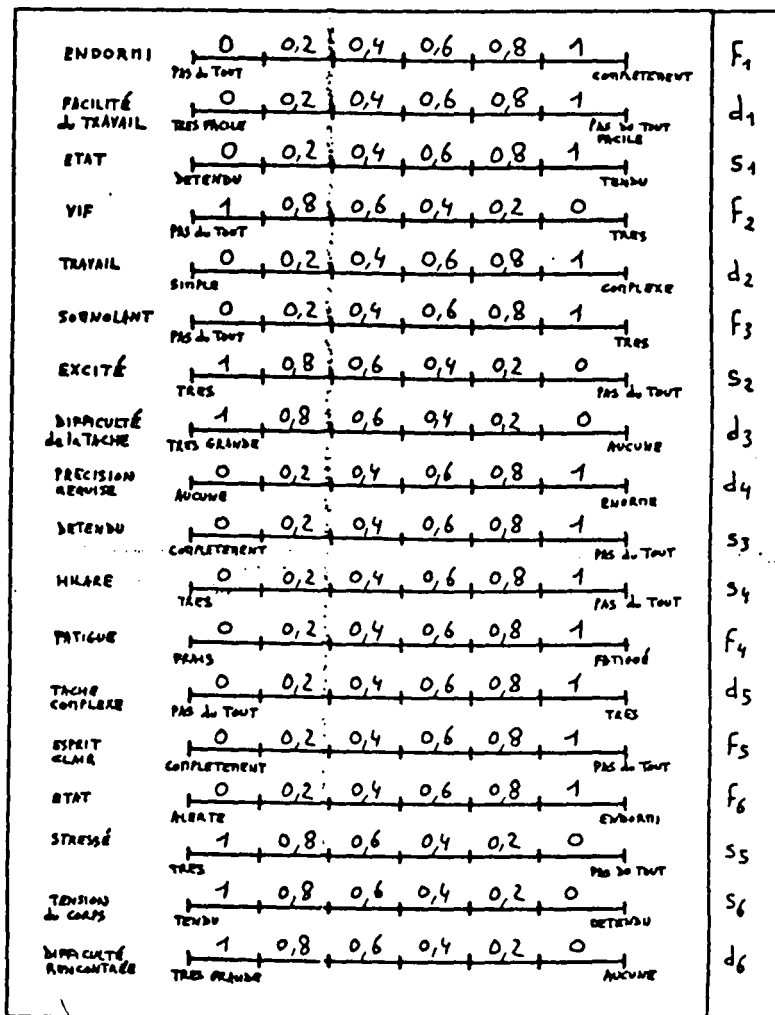


Figure II-7b Grille-test H

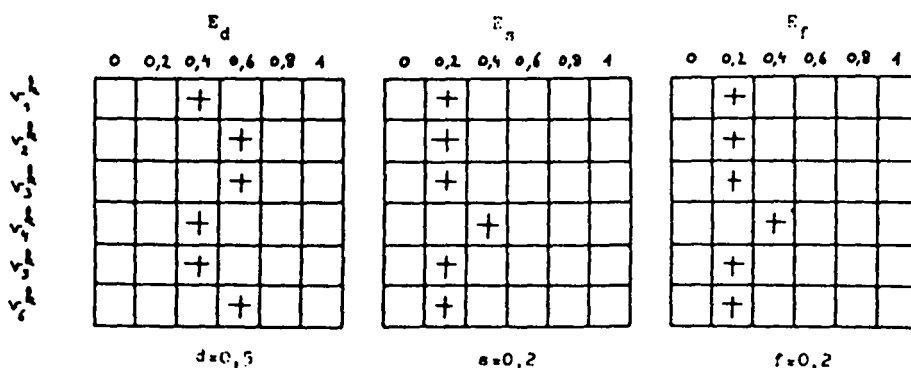


Figure II-7c Extraction des valeurs de E^k à partir de $h(I_i)$ et H

a) Discordance locale :

sa recherche permet l'élimination des réponses où l'opérateur s'est trompé dans le report :

Pour chaque facteur (k=1 à 3)

Pour j=1,n
on calcule
$$D_j = \left| v_j^k - \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k}{n} \right) \right|$$

Pour j=1,n

si $D_j > \xi$ (seuil de discordance locale)

alors $E^k = \{v_1^k, \dots, v_n^k\} - \{v_j^k\}$

la valeur v_j^k n'est pas considérée (figure II-8a)

b) Discordance globale :

elle permet d'émettre un avis sur la validité, le sérieux des réponses de l'opérateur :

Pour k=1 à 3

$$DG_k = \sum_{j=1}^n D_j$$

si $DG_k > \nu$ (seuil de discordance global)

alors E^k non valable (valeurs trop dispersées, figure II-8b)

c) Valeurs attribuées aux facteurs :

ce sont les moyennes m^k , calculées sur les ensembles validés :

$$\{v_1^k, \dots, v_n^k\} - \{v_p^k, \dots, v_q^k\}$$

et approchés à la valeur décimale la plus proche.

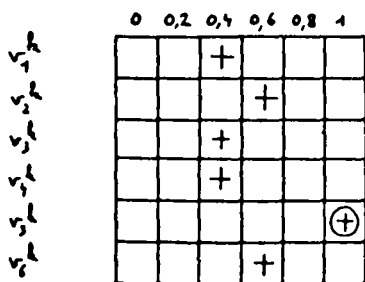


Figure II-8a Discordance locale : la valeur v_5^k ne concorde pas avec l'ensemble restant

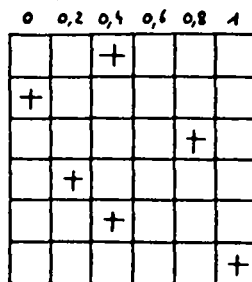


Figure II-8b Discordance globale : les valeurs v_j^k sont trop peu concordantes entre elles

IV EXPERIMENTATION

IV.1 CONTEXTE

IV.1.a Environnement

Le lieu d'expérimentation est une pièce isolée permettant d'obtenir une bonne stabilité des facteurs extérieurs.

Les dispositions de l'ensemble micromanipulateur-plateforme de simulation et de l'organe de commande sur la table de travail, ainsi que la position et hauteur du fauteuil sont réglées par l'intervenant en début d'opération; ces variables sont figées pendant l'intervention, l'opérateur gardant cependant une grande liberté de mouvements.

IV.1.b Déroulement des essais

Deux opérateurs OP_1 et OP_2 , non chirurgiens, non entraînés, ayant travaillé sur le projet, ont manipulé pendant une semaine sur les deux plateformes T_1 et T_2 .

Pour chaque opérateur et plateforme, les essais sont divisés en deux groupes :

A) Interventions sans micromanipulateur (S_1)

L'instrument chirurgical est manipulé directement à la main; la démarche adoptée étant la suivante :

- 1- Deux interventions non enregistrées, constituant une phase de familiarisation.
- 2- Le relevé des paramètres d'un premier ensemble de trois opérations; avec récupération entre deux essais, l'opérateur jugeant lorsqu'il est prêt à recommencer.
- 3- Un délai comportant deux périodes de sommeil (deux jours pendant lesquels l'opérateur fait autre chose), permettant ainsi une assimilation de ce type d'activité.
- 4- Le relevé des paramètres d'un second ensemble de trois interventions.

B) Interventions avec micromanipulateur (S_2)

Quatre groupes de relevés relatifs aux facteurs-opérateur sont effectués :

b1) Entraînement (e)

Le déroulement de ces essais est le même que précédemment :

- 1- Une intervention de familiarisation.
- 2- Le relevé des paramètres d'un premier ensemble de trois interventions.
- 3- Un délai d'assimilation de deux jours.
- 4- Le relevé des paramètres d'une opération.

b2) Difficulté de travail (d)

L'expérience comprend :

- 1- Une intervention de familiarisation avec la tâche ajoutée.
- 2- Un repos de dix minutes.
- 3- Le relevé des paramètres d'une intervention avec la tâche ajoutée.

b3) Tension imposée par le contexte (s)

Cette étape comprend le relevé de 4 interventions (OP_1 et OP_2 sur T_1 et T_2) lorsque les deux opérateurs sont placés dans une situation de concours où :

- celui qui accomplit la meilleure performance sur l'ensemble des deux tâches-type, gagne une somme d'argent et est dispensé de manipulations
- celui qui perd ne gagne rien et doit rester pour le dernier groupe de mesures.

b4) Fatigue (f)

L'étape précédente s'étant déroulée le matin, le perdant manipule sur T_1 et T_2 toute l'après-midi jusque tard le soir, sans qu'aucune pause soit accordée entre deux essais.

On effectue alors le relevé des paramètres de toutes les interventions.

IV.2 RESULTATS

IV.2.a Interventions sans micromanipulateur (S₁)

a) La figure II-9b montre les résultats obtenus relatifs aux composantes de la performance affectant la tâche (n,t).

Après apprentissage, on remarque que :

- La différence de performance inter-individu est élevée, l'un des deux opérateurs étant habitué à des travaux fins est plus lent et fait peu d'erreurs.

- Le nombre de fautes commises est grand; les deux candidats s'estimant par ailleurs incapables d'exécuter deux interventions de suite sans faire une seule erreur.

b) Le relevé des facteurs opérateur d et s (tableaux II-9a) pour les seconds groupes de mesures (jour J+2) permet d'établir la performance d'intervention manuelle sur chaque plateforme :

$$\begin{matrix} T_1 \\ P \\ S_1 \end{matrix} = \begin{bmatrix} n_{\text{moy}} : 4 \text{ erreurs} \\ t_{\text{moy}} : 180 \text{ secondes} \\ \text{difficulté moyenne} : 0,7 \\ \text{tension moy} : 0,2 \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} T_2 \\ P \\ S_1 \end{matrix} = \begin{bmatrix} n_{\text{moy}} : 10 \text{ erreurs} \\ t_{\text{moy}} : 80 \text{ secondes} \\ \text{difficulté moyenne} : 0,85 \\ \text{tension moy} : 0,3 \end{bmatrix}$$

T ₁	OP ₁	OP ₂
d	0,7	0,7
s	0,2	0,2

T ₂	OP ₁	OP ₂
d	0,8	0,9
s	0,4	0,2

Tableaux II-9a Difficulté de l'intervention et tension ressenties par les opérateurs lorsque e=1

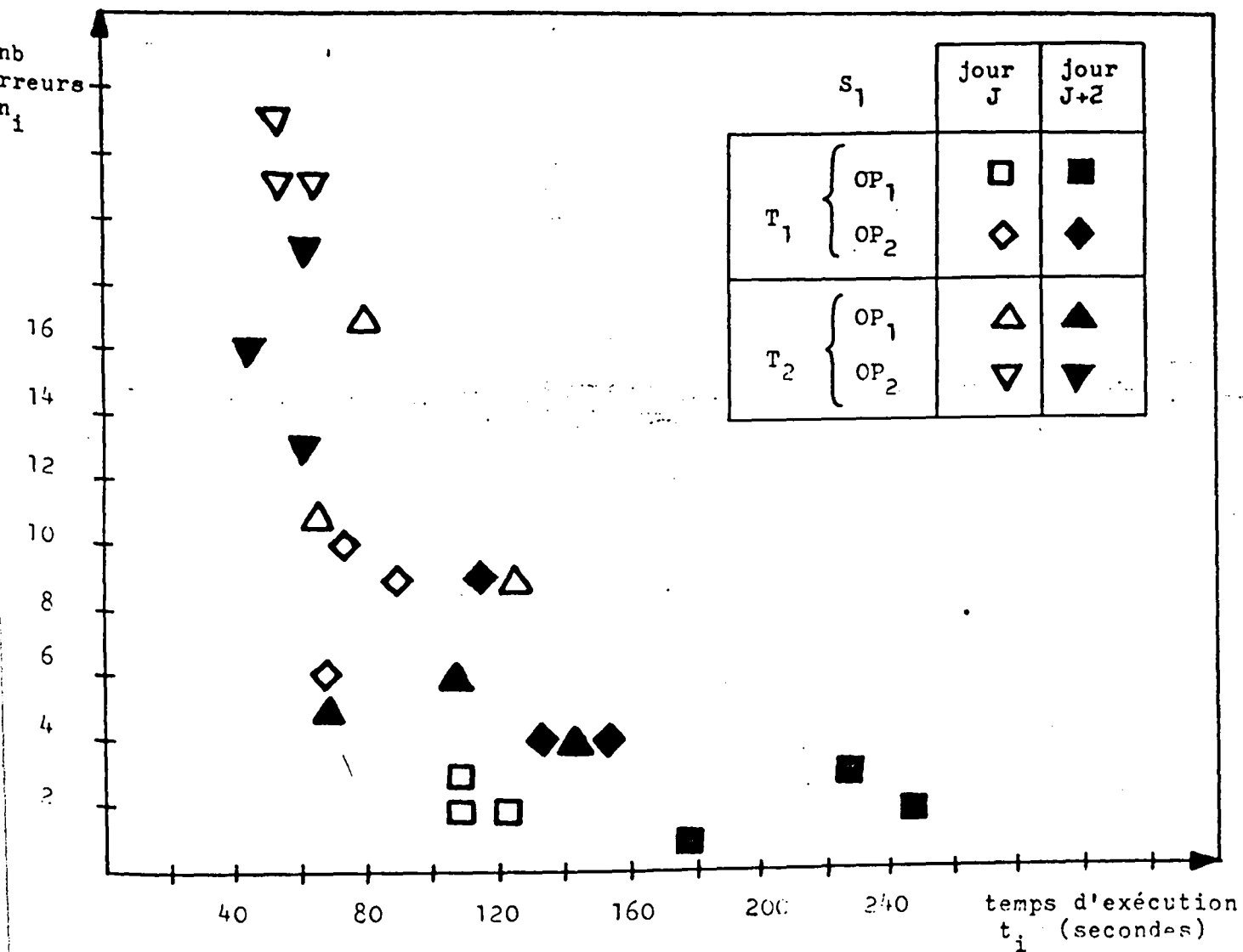


Figure II-9b Interventions pratiquées :

- à la main
- par les deux opérateurs OP_1 et OP_2
- sur les plateformes T_1 et T_2

(variable : entraînement)

IV.2.b Interventions avec micromanipulateur (S_2)

A) Performance du système
.....

Les valeurs relevées (figure II-10a et tableaux II-10b) permettent d'établir :

$$P \begin{matrix} T_1 \\ S_2 \end{matrix} = \begin{bmatrix} n_{\text{moy}} : 0 \text{ erreur} \\ t_{\text{moy}} : 1550 \text{ secondes} \\ \text{diff. moyenne} : 0,6 \\ \text{tension moy} : 0,4 \end{bmatrix}$$

$$P \begin{matrix} T_2 \\ S_2 \end{matrix} = \begin{bmatrix} n_{\text{moy}} : 0 \text{ erreur} \\ t_{\text{moy}} : 750 \text{ sec.} \\ \text{diff. moy} : 0,7 \\ \text{tens moy} : 0,35 \end{bmatrix}$$

On note ainsi qu'après apprentissage :

- Aucun des intervenants ne commet plus de fautes, ce qui permet d'affirmer qu'avec l'assistance du micromanipulateur, un opérateur peut accomplir des interventions très délicates, même s'il ne possède pas une dextérité particulièrement développée.

- Les temps d'intervention avec le micromanipulateur sont allongés par rapport aux temps d'exécution à la main.

Le quotient temporel $q_t = t_{\text{moy}}(S_2) / t_{\text{moy}}(S_1)$ est de l'ordre de 10 pour les deux tâches.

Comparé avec les résultats obtenus par des télémanipulateurs industriels non assistés et dotés du même type de commande (position+vitesse), le résultat est meilleur : 10 au lieu de 20 /VERT 84/.

On remarque par ailleurs que les dimensions des plateformes sont plus élevées que les dimensions du champ opératoire pour lequel a été conçu le micromanipulateur; la similitude n'étant pas conservée, le système s'avère lent. On peut ainsi penser que le quotient temporel obtenu sur des zones plus petites est meilleur.

Il peut encore être amélioré par l'utilisation d'un syntaxeur permettant une commande position-position sans décomposition des mouvements /BERL 84/ et l'utilisation de capteurs de proximité engendrant un retour d'effort synthétique /ANDR 83/.

- La difficulté de l'intervention est réduite mais la

tension ressentie est plus élevée. Cette tendance se rencontrant chaque fois que l'homme utilise un système de plus en plus complexe (figure II-11) ne peut être infléchie que par une aide au mental /GAIL 84/, sous forme de systèmes intelligents aidant l'opérateur à prendre des décisions, le prévenant de dangers...

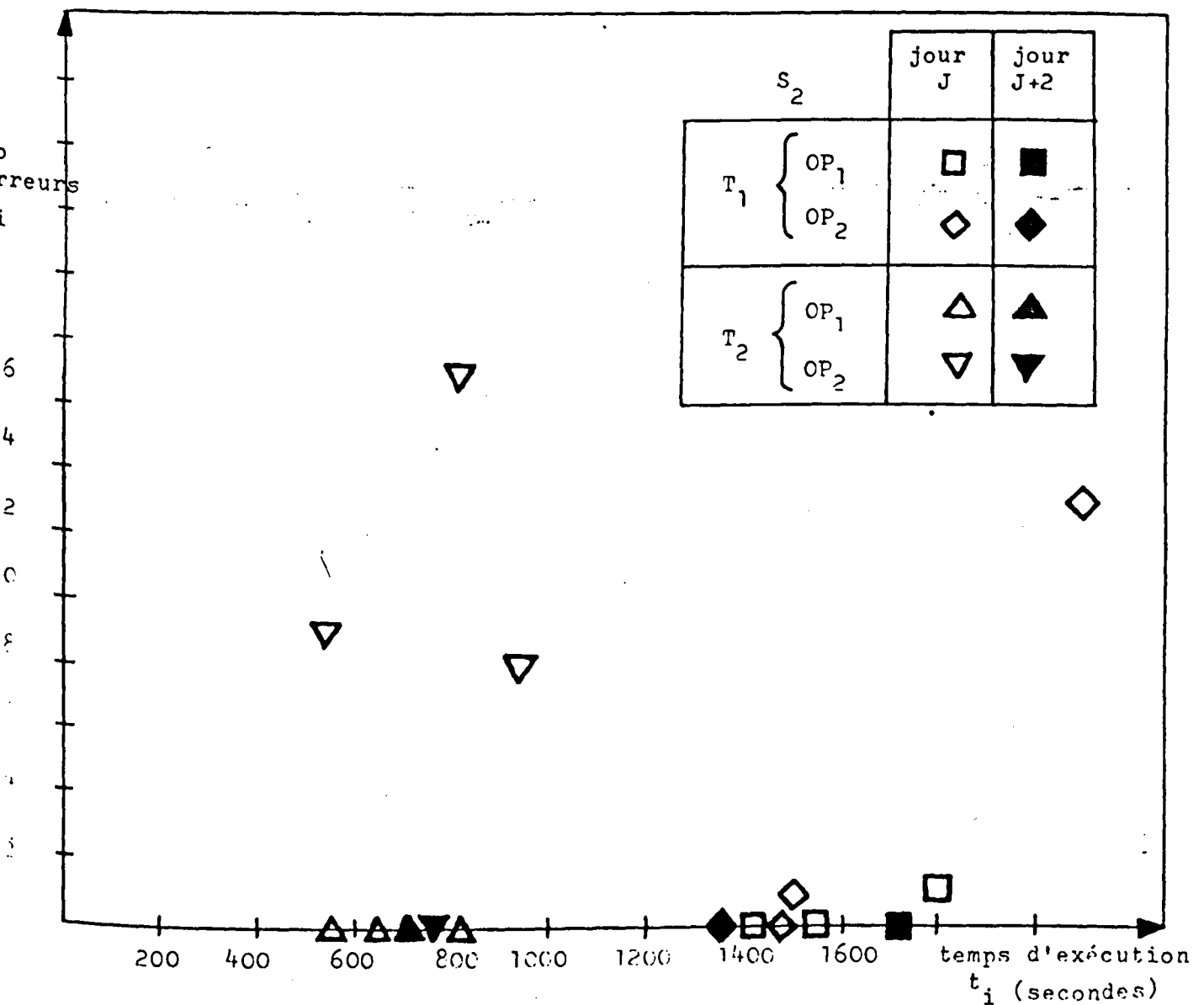


Figure II-10a Interventions pratiquées :
 - avec le micromanipulateur
 - par CP₁ et CP₂
 - sur T₁ et T₂
 (variable : entraînement)

T_1	OP ₁	OP ₂
d	0,5	0,7
s	0,4	0,4

T_2	OP ₁	OP ₂
d	0,6	0,8
s	0,5	0,2

Tableaux II-10b Difficulté de l'intervention et tension ressenties par les opérateurs lorsque $e=1$

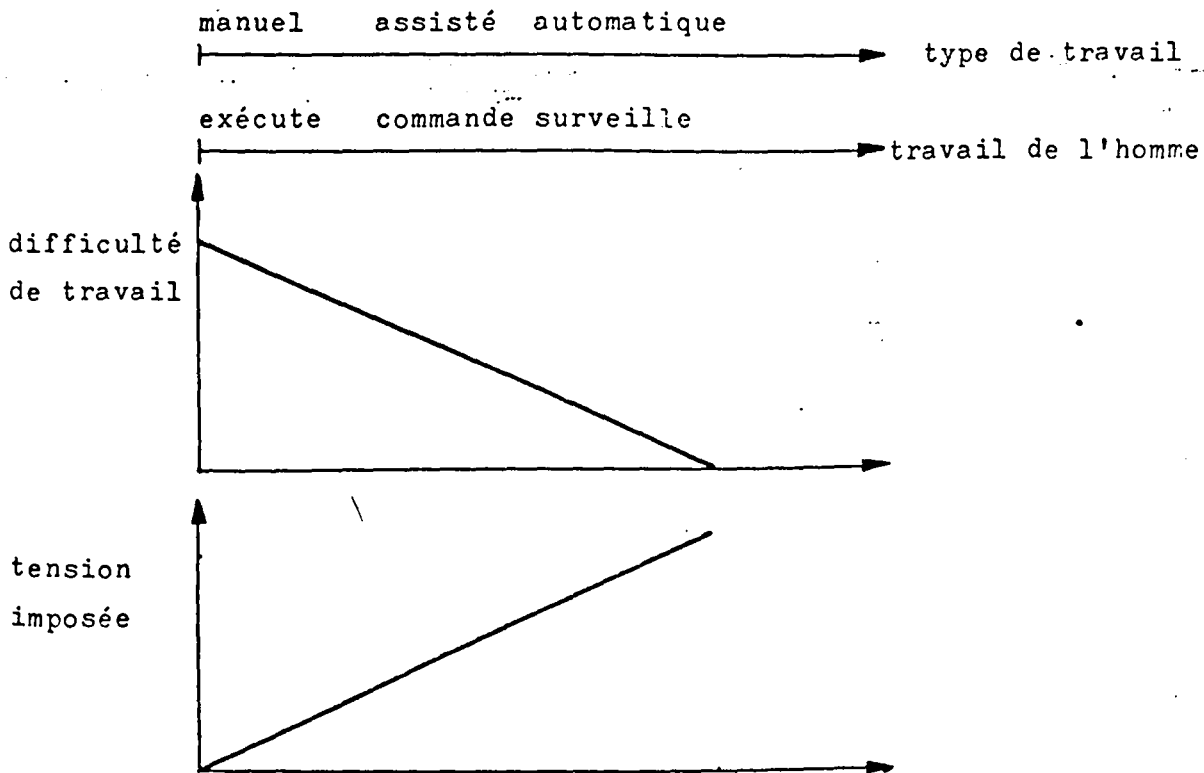


Figure II-11 Tendence difficulté/tension en fonction de la complexité du système utilisé par l'homme

B) Robustesse du système H-M

+ Tâche ajoutée

L'effet du surcroît de travail, dû à l'exécution de la tâche graphique de maintien de cible à l'intérieur d'un champ, se traduit sur la figure II-12 par une détérioration de la performance. On remarque cependant que pour l'opérateur qui est habitué à accomplir des travaux fins, seule une légère élévation du temps d'intervention est obtenue, le nombre d'erreurs restant nul.

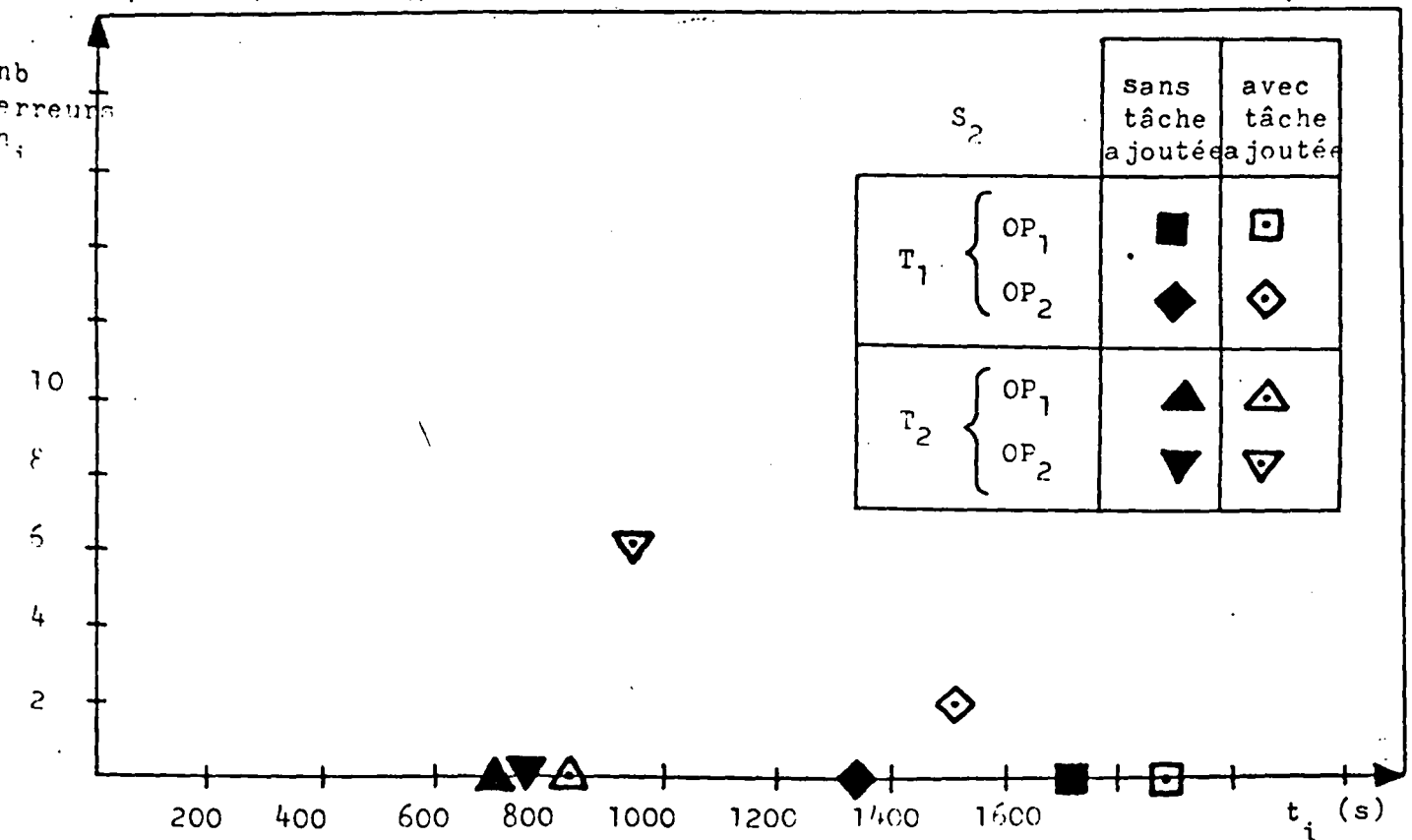


Figure II-12 Incidence de la tâche ajoutée sur la performance

+ Compétition entre opérateurs

Les résultats portés figure II-13 montrent des temps d'intervention allongés mais pas d'erreurs.

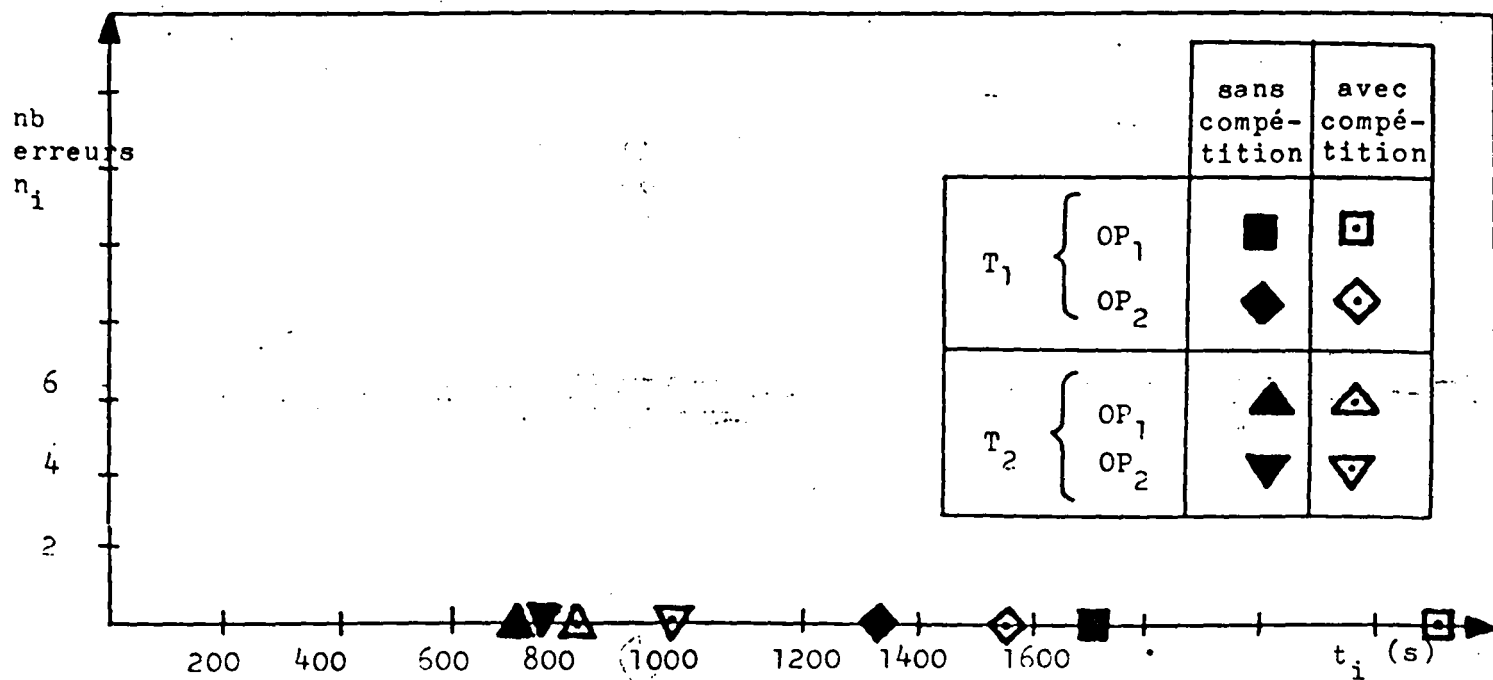


Figure II-13 Effet produit par une situation de compétition



+ Fatigue

On observe sur la figure II-14 une légère augmentation du temps d'exécution en début de soirée mais aucune faute sur l'ensemble des 8 interventions.

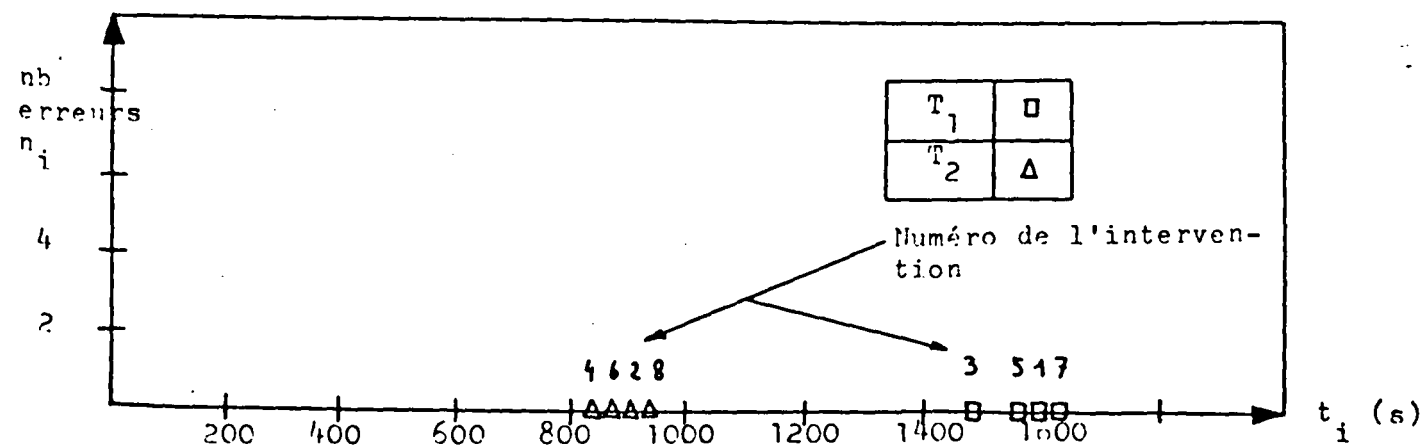


Figure II-14 Influence de la fatigue sur la performance développée par OP₁ sur T₁ et T₂

V CONCLUSION

Après avoir exposé les motifs nous ayant conduit à effectuer des essais sur des plateformes de simulation représentant des tâches-type, nous avons présenté les résultats obtenus.

Ceux-ci montrent que :

- La présence du système de micromanipulation permet à des opérateurs non entraînés à effectuer des tâches fines, d'en exécuter plusieurs à la suite sans commettre d'erreur.
- L'allongement observé des temps d'intervention, à type de commande équivalent, est meilleur que pour les manipulateurs industriels et peut encore être réduit.
- La difficulté d'intervention est rendue moins élevée, au prix d'une certaine tension ressentie par l'opérateur.
- 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.

Ces essais, outre le fait de relever les performances du système de micromanipulation qui donneront lieu ultérieurement à des travaux complémentaires, ont permis l'enregistrement de signaux nécessaires à l'étude d'un estimateur de performances qui est développé dans les chapitres suivants.

III

**SYSTEME DE
SURVEILLANCE DE
L'OPERATEUR**

I INTRODUCTION

La performance relative à une tâche donnée du système H/M dépend en premier lieu de la machine elle-même, qui fournit une performance de base $\vec{P}_{S_j^T}^k$ à laquelle vient s'ajouter une variation $\overline{\Delta P}(OP_n)_i$ due à l'opérateur.

Ainsi la connaissance de la machine ne suffit pas à évaluer la performance du système H/M. Il importe d'évaluer en ligne $\overline{\Delta P}(OP_n)_i$ dans le but de décider de l'évolution à donner à l'intervention. Pour cela, le choix d'une méthode d'observation de l'opérateur respectant les contraintes de travail, permet d'obtenir des indices que l'on espère fidèlement révélateurs de l'état de celui-ci et par conséquent de la performance d'exécution.

Remarque : dans la suite, nous ne nous intéressons plus qu'aux composantes de performance sur la tâche et prenons donc $G = \{\emptyset\}$.

II VARIABILITE DE LA PERFORMANCE DE L'OPERATEUR

II.1 PRINCIPALES CAUSES DES VARIATIONS DE PERFORMANCE

La non reproductibilité de la performance du système H/M provient de :

II.1.a Comportement flou de l'opérateur /RAOU 76/

Celui-ci n'est pas un système déterministe de type servo-mécanisme produisant toujours les mêmes effets pour les mêmes causes (conditions initiales, contexte identiques). Il réagit au contraire de manière discontinue en adoptant un comportement approximatif, son activité 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.

De plus, l'opérateur possède la faculté d'évoluer et de s'adapter à la situation en changeant les paramètres ou le modèle interne qu'il possède du système commandé.

II.1.b Facteurs humains

A ce comportement flou, vient s'ajouter le fait que l'opérateur est sensible à de nombreux facteurs : connaissance du système, effort déjà développé... affectant les capacités mentales, sensitives et musculaires et engendrant une forte probabilité de mauvaise performance du système H/M lorsque ces facteurs sont altérés.

II.2 TRAVAIL SUPERVISE /LEPE 85/

Obtenir un bon fonctionnement du système Homme/Machine implique un compromis dynamique entre les deux partenaires, cette approche imposant cependant à la machine d'être capable d'une certaine autonomie d'intervention.

Le compromis peut prendre diverses formes :

- L'opérateur n'est autorisé à réaliser que des actions choisies dans un menu de plus en plus restreint au fur et à mesure qu'il est de moins en moins efficace; le complément étant exécuté par la machine.
- Modification du coefficient de retour d'efforts permettant une adaptation à l'état de l'opérateur...

mais ne doit pas consister à donner à faire à la machine toutes les tâches dont elle est capable et à garder pour l'homme uniquement celles qu'elle ne peut pas accomplir; car une démotivation de l'opérateur augmente lorsqu'il est sollicité le risque de mauvaise performance.

La réalisation d'un système de supervision du système Homme/Machine impose que l'estimation de l'efficacité de l'opérateur soit effectuée en temps réel.

II.3 METHODES D'ESTIMATION

II.3a Types de relevés /WIER 79/

L'étude des différentes méthodes d'estimation en temps réel de l'état de l'opérateur permet de les classer en 4 groupes suivant la façon dont elles interfèrent avec l'activité de l'opérateur :

- Auto-évaluation effectuée en ligne par l'opérateur
.....
celui-ci communique à la machine, par l'intermédiaire de curseurs, quels sont les facteurs ressentis (fatigue...)
- Interaction avec l'activité de l'utilisateur
.....
 - relevé de la performance sur une tâche ajoutée
 - gel d'informations nécessaires à l'intervention et mesure du temps avant réclamation
- Mesures physiologiques
.....
l'observation s'effectue directement sur l'opérateur, impliquant une légère gêne due aux capteurs.

- . rythme cardiaque
- . activité musculaire
- . activité cérébrale
- . conductivité de la peau
- . rythme/volume respiratoire...

- Observation de l'activité de l'opérateur
.....

les mesures sont effectuées sur l'interface H/M, l'opérateur peut ne pas être au courant de l'observation pratiquée.

- . temps de communication
- . caractéristiques de la voix (ton, hauteur, puissance, débit)
- . tremblement des mains
- . crispation sur l'organe de commande
- . accélérations engendrées sur les commandes...

II.3b Choix de la méthode

L'estimateur devant être utilisé de façon opérationnelle, celui-ci ne doit pas entraver l'opérateur, ce qui nous limite à l'observation de l'activité de celui-ci.

Nous devons cependant remarquer que :

- Il n'existe pas de technique privilégiée qui donne à la fois le niveau d'expertise, de fatigue, de tension nerveuse et effort développé; chaque type de mesure déterminant à sa manière un ou plusieurs facteurs. Si l'on désire obtenir un reflet complet de l'opérateur, on doit alors considérer un grand nombre d'indices; or la restriction de mesures effectuée écarte certaines sources d'information diminuant donc la connaissance de l'opérateur et augmentant l'incertitude des résultats.

- On ne peut pas déterminer avec exactitude les causes des variations observées. Ainsi le relevé d'une crispation de l'opérateur sur les commandes peut être dû à un manque d'apprentissage ou à une situation stressante.

III OBSERVATION DE L'OPERATEUR

III.1 DISPOSITIF D'OBSERVATION (figure III-1)

La communication entre l'homme et la machine se faisant par l'intermédiaire de la console de commande, on relève la conduite développée par l'opérateur sur cet interface afin d'analyser la syntaxe et le support du langage gestuel de celui-ci.

Les variables enregistrées pendant les interventions sont les suivantes :

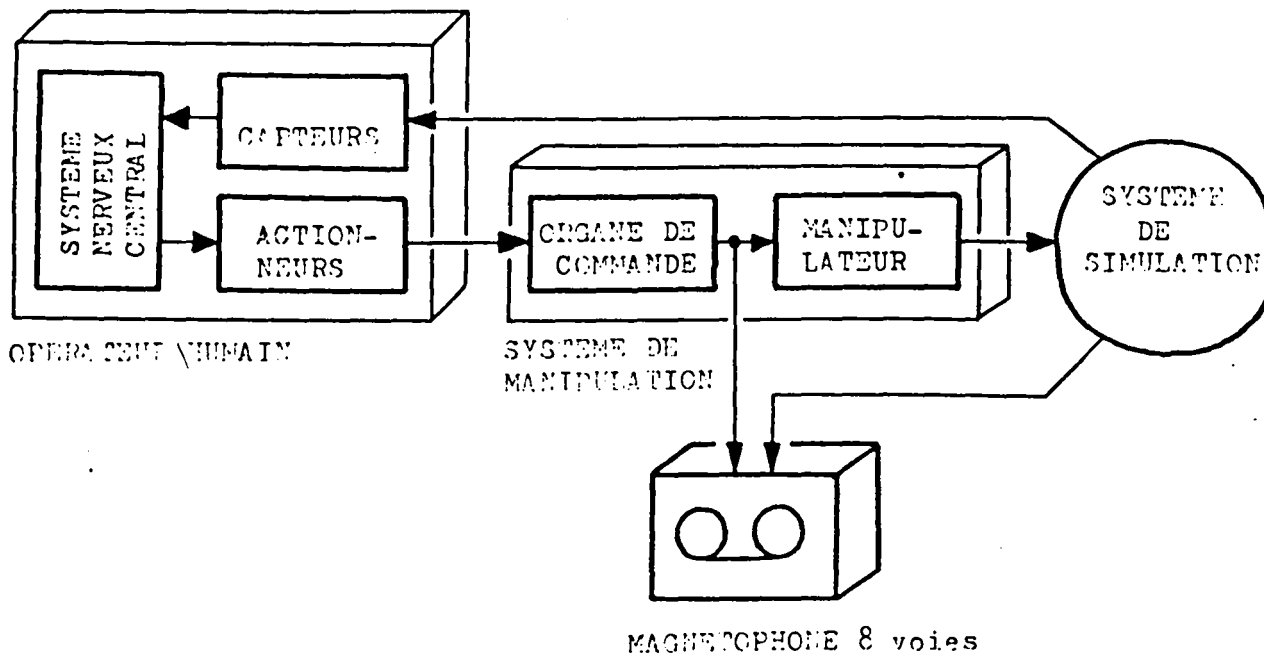


Figure III-1 Acquisition des signaux servant à l'étude de l'estimateur de performance

III.1a Variables de commande (figure III-2)

Sont enregistrées les tensions donnant :

- les positions des deux manches de commande
 - . X et Y du premier manche
 - . Z du second

- l'état (S) de l'inverseur commandant le poignet du micro-manipulateur ou bien le porteur.

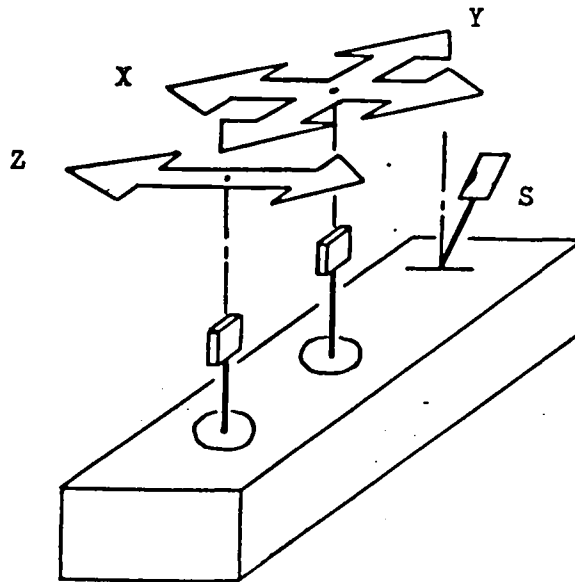


Figure III-2 Variables de commande relevées sur l'interface H/M

III.1b Efforts de serrage des manches de commande (E_1 et E_2)

Sur l'extrémité de chaque manche est placé un capteur donnant l'effort de serrage entre pouce et index exercé par l'opérateur.

Chaque capteur est constitué par (figure III-3a)

- . un conducteur en carbone muni d'alvéoles, collé entre
- . deux plaques conductrices alimentées en tension constante.

La variation de distance entre les deux plaques provoque une variation de la conductivité transversale de l'élément en carbone et donc une modification de la tension enregistrée /MUTE 83/.

La caractéristique d'un capteur est présentée à la figure III-3b; celui-ci étant bruité et possédant une inertie due à la charge/décharge, les valeurs portées sont celles obtenues après stabilisation.

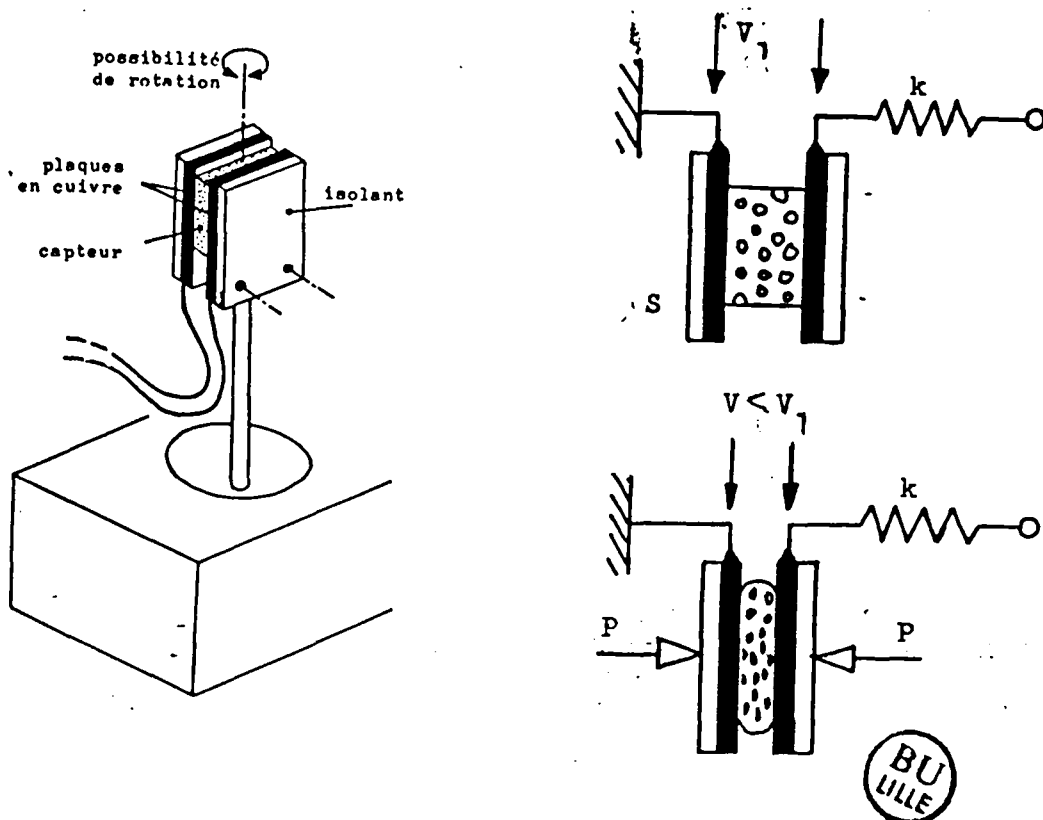


Figure III-3a Capteur tactile

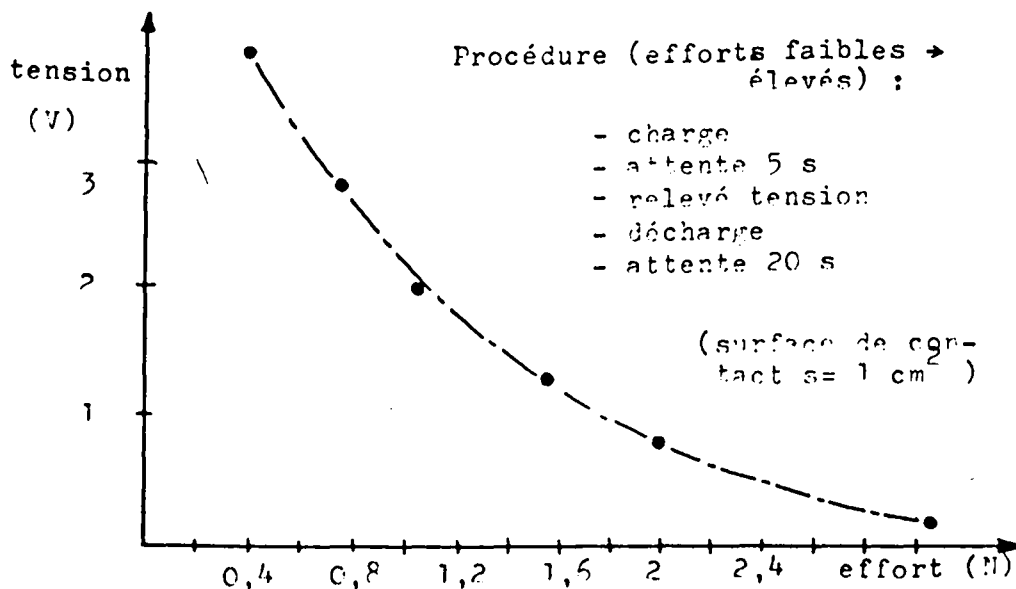


Figure III-3b Caractéristique d'un capteur

III.1.c Données concernant le banc d'essai

Afin de permettre l'étude de la syntaxe du langage se rapportant à la tâche, la variable nombre de fautes (N) est également relevée en parallèle avec les signaux précédents.

III.2 PARAMETRES CONSIDERES

Les signaux recueillis, dont une représentation est donnée figure III-4, permettent d'extraire deux types de paramètres :

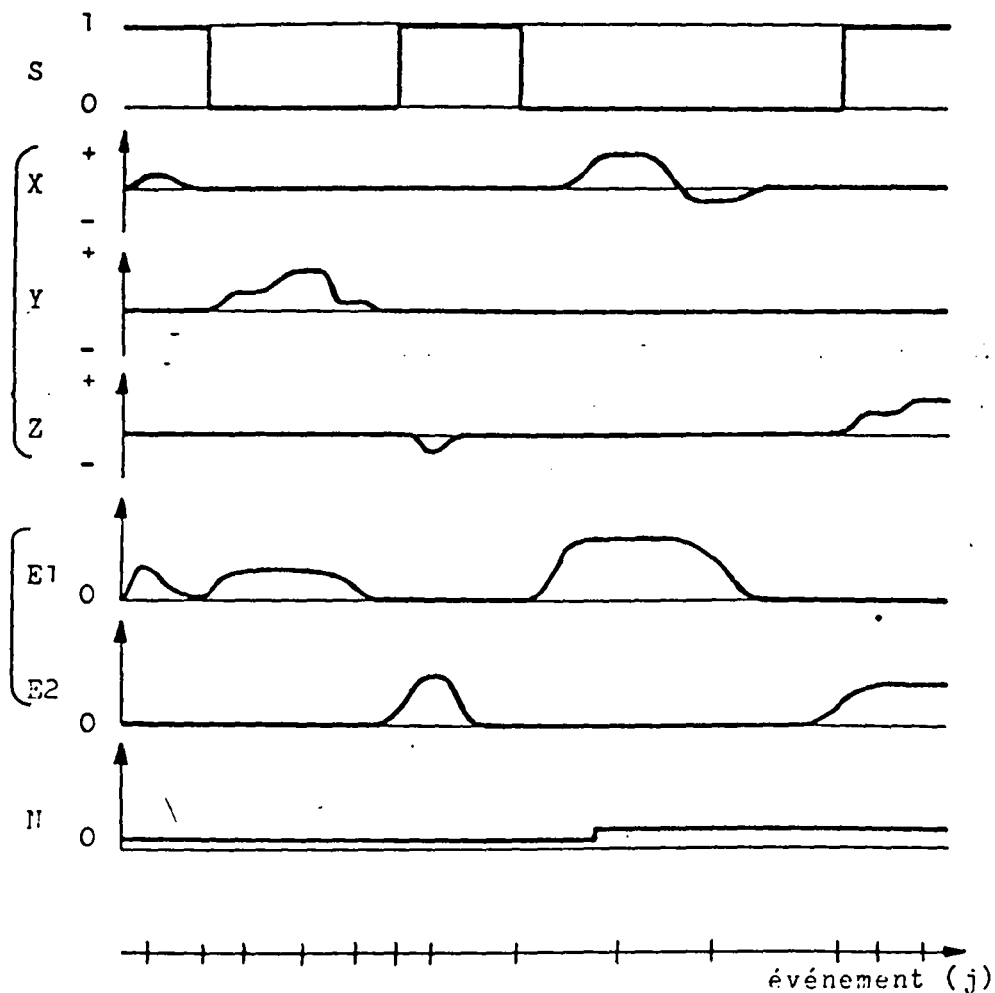


Figure III-4 Signaux recueillis sur la console et la plateforme de simulation

III.2.a Paramètres syntaxiques

La stratégie de conduite peut être mise sous la forme d'une phrase telle que :

$$x^+, \emptyset, z^-, \emptyset, s^{0+1}, \emptyset, x^+, \left\{ \begin{matrix} x^+ \\ y^- \end{matrix} \right\}, \emptyset, s^{1+0}, \emptyset, y^-, \left\{ \begin{matrix} y^- \\ x^- \end{matrix} \right\}, y^-, \dots$$

où \emptyset = aucune expression sur la console.

Nous cherchons alors le nombre de chaînes élémentaires rencontrées sur :

- une période d'intervention constante
- un intervalle de temps donné précédant une faute.

Les recherches portent sur le nombre de :

- actions
ex X^+ (une) ; $S^{0 \rightarrow 1}$ (une) ; $\begin{Bmatrix} X^+ \\ Y^- \end{Bmatrix}$ (deux)
- déplacements contradictoires successifs
ex X^+, \emptyset, X^-
- déplacements similaires successifs avec retour au point neutre
ex X^+, \emptyset, X^+
- déplacements similaires successifs sans retour au point neutre
(déplacements non francs des manches)
ex X^+, X^+
- actions inutiles sur l'inverseur
ex $S^{0 \rightarrow 1}, \emptyset, S^{1 \rightarrow 0}$
- actions combinées
ex $\begin{Bmatrix} X^+ \\ Y^- \end{Bmatrix}$ (une)

III.2.b Paramètres structurels

On caractérise chaque action j exercée sur la console par :

$$\vec{A}_j = [G, P, T, E, \Delta]_j^t \quad \text{où :}$$

- G : accélération engendrée sur le manche actionné (=0 si action sur le commutateur S)
- P : position stable atteinte par le manche (=0 si S)
- T : temps de maintien (=0 si S)
- E : effort tactile exercé sur le capteur correspondant (=0 si S)
- Δ : temps écoulé entre l'action précédente et celle-ci (action= déplacement d'un manche ou changement d'état de S).

Remarque : les manches étant identiques, on considère les paramètres dans l'ensemble sans chercher leur appartenance.

III.3 TRAITEMENT DES SIGNAUX RECUEILLIS

III.3.a Acquisition sur ordinateur

Le traitement et la représentation des signaux étant effectués sur un ordinateur SOLAR 16/65, les signaux préalablement enregistrés sur magnétophone sont dans une première phase numérisés sur 12 bits et transférés sur disque.

Le multiplexage-échantillonnage est géré par un sous-ensemble de l'ordinateur, activé par programme; la fréquence d'échantillonnage étant fixée après essais à 50 Hz, dans le but d'optimiser le rapport : $\frac{\text{perte d'information}}{\text{taille des fichiers}}$

La durée de chaque enregistrement étant prise égale à 90 secondes, le traitement des fichiers est effectué en procédant à un découpage compatible avec la capacité mémoire de l'ordinateur.

III.3.b Filtrage (Annexe 2)

a) Efforts tactiles E_1, E_2

Les valeurs recueillies étant non filtrées et les capteurs bruités, il est nécessaire d'effectuer un lissage des courbes d'effort en réalisant un moyennage linéaire à l'intérieur d'une fenêtre centrée sur la valeur à calculer y_n^m (figure III-5) :

$$y_n^m = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^{+p} y_{n+i}$$

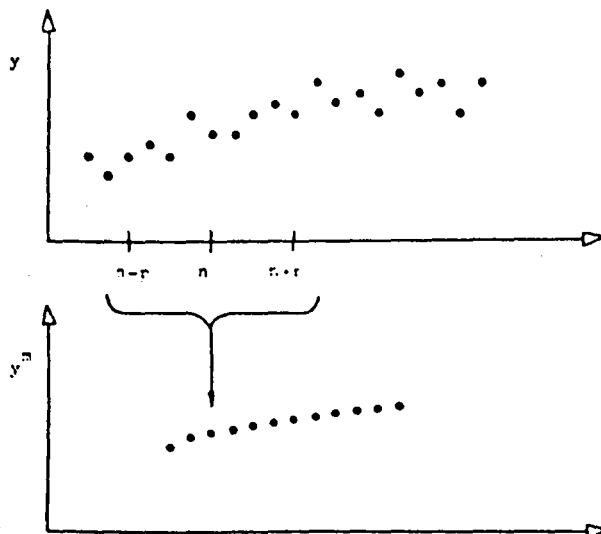


Figure III-5 Lissage des signaux recueillis

Remarques :

- Le temps de calcul peut être fortement réduit en posant :

$$Y = (2p+1) y^m$$

et en remarquant que $Y_{n+1} = Y_n + y_{n+1+p} - y_{n-p}$

- p est déterminé par les essais, de telle manière que les courbes résultantes ne présentent pas d'irrégularités, sans pour autant que l'information initiale soit complètement diluée.

b) Déplacements X,Y,Z
.....

Le relevé automatique de la stratégie de conduite de l'opérateur ainsi que la détermination des paramètres structurels nous amènent à calculer les vitesses et accélérations des manches.

Une technique de lissage linéaire est également retenue pour sa simplicité de calcul, le même procédé de détermination récursive permettant un calcul rapide /RAJA 79/ :

La minimisation par rapport à a_n et b_n de l'erreur quadratique moyenne

$$E_n = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^p (y_{n+i} - a_n \cdot i \cdot T_e - b_n)^2$$

entre le segment de droite de pente a_n et ordonnée b_n associé à la fenêtre $[n-p, n+p]$, permet d'aboutir à :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n^m = b_n = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^p y_{n+i} \\ \text{Vitesse}_n : v_n = a_n = \frac{3}{p(p+1)(2p+1)T_e} \sum_{i=-p}^p i \cdot y_{n+i} \end{array} \right.$$

où T_e : période d'échantillonnage

le changement de variables :

$$Y = (2p+1) y^m$$

$$V = \frac{p(p+1)(2p+1)T_e}{3} v_n$$

permettant un calcul récursif :

$$Y_{n+1} = Y_n + y_{n+1+p} - y_{n-p}$$

$$V_{n+1} = V_n - Y_n + p(y_{n+1+p} + y_{n-p}) + y_{n-p}$$

Remarque : le calcul de l'accélération est mené de la même manière sur les valeurs V déterminées, mais réalisé seulement lorsqu'un déplacement est détecté.

III.4 EXTRACTION AUTOMATIQUE DES PARAMETRES-OPERATEUR

III.4.a Détection d'événement

Dans le suivi des signaux, un événement est déterminé par :

a) Changement d'état de l'inverseur S

La scrutation de celui-ci se fait selon le principe illustré figure III-6. Les éventuels rebonds, rares mais faussant les résultats tant syntaxiques que structurels, sont rejetés en ignorant ce qui se passe pendant un intervalle ΔS après la détection d'une transition.

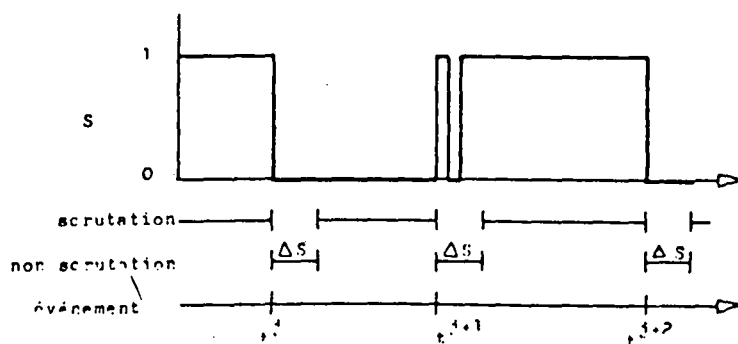


Figure III-6 Détection de changement d'état de l'inverseur

b) Transition entre vitesses nulle et non nulle d'un manche

Un domaine $(-\xi, +\xi)$ correspondant au seuil de vitesse minimale engendré par la main de l'opérateur en conditions normales, permet de considérer le manche au repos tant que la courbe de vitesse ne sort pas de ce domaine (figure III-7a).

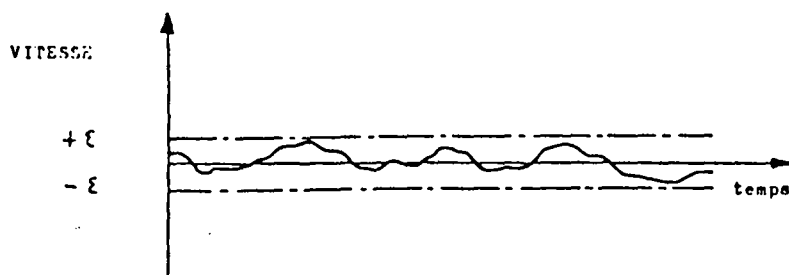


Figure III-7a Manche de commande au repos

Lorsque la courbe sort à l'extérieur de ces frontières, une confirmation de mouvement est à établir car :

- les courbes de vitesse, même après filtrage, conservent pour des mouvements réels nuls, des valeurs parasites pouvant dépasser la valeur Σ
- des couplages non volontaires sur les commandes existent et engendrent, pour des déplacements de manche pouvant être considérés nuls, des vitesses supérieures à Σ .

La confirmation porte sur la position (figure III-7b), la comparaison de la variation de position du manche aux instants de sortie et entrée de la courbe des vitesses dans le domaine $(-\Sigma, +\Sigma)$, avec une valeur Δy , permettant de décider simplement s'il y a ou non mouvement.

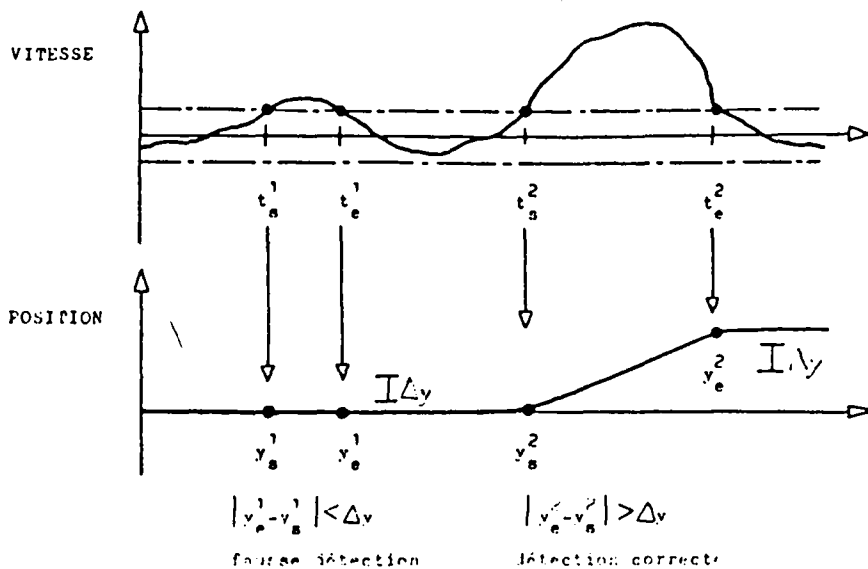


Figure III-7b Confirmation de mouvement d'un manche

Remarque :

l'action sur l'inverseur peut engendrer des mouvements accidentels sur les commandes, soit par couplage entre les mains soit parcequ'une d'elles vient buter sur un manche. Le refus de prise en compte de ces mouvements est réalisé en négligeant les déplacements intervenant dans un intervalle de temps ΔT après tout changement d'état de l'inverseur (figure III-7c).

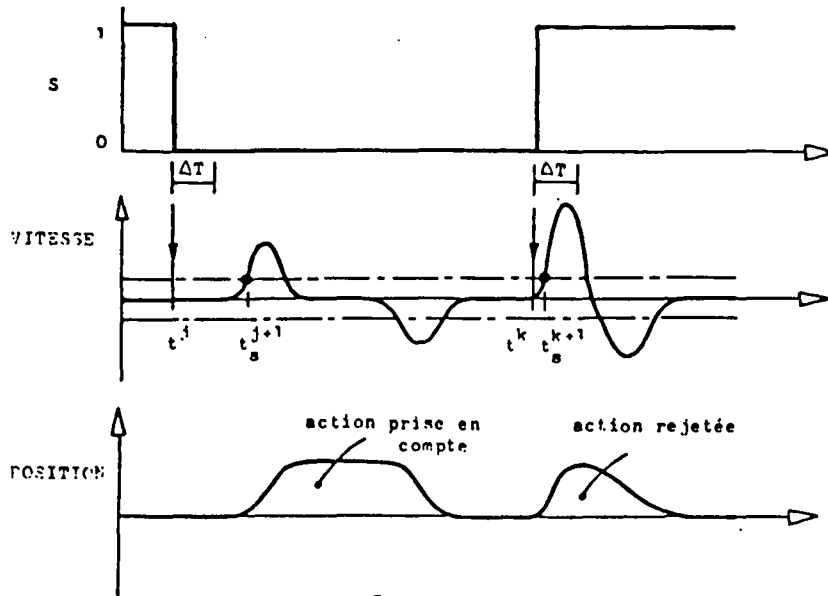


Figure III-7c Rejet de mouvements accidentels

III.4.b Relevé des paramètres

a) Accélérations (figure III-8a)

Seuls sont pris en compte les mouvements volontaires (ceux dont le sens s'écarte de l'origine), le paramètre extrait étant la moyenne des accélération et freinage :

$$g_j = \frac{1}{2} (|g_s^j| + |g_e^j|)$$

La recherche de g_s^j et g_e^j se fait en détectant les instants de sortie et entrée t_s et t_e de la courbe de vitesse dans $(\pm \xi)$, permettant le relevé de t_p afin de partager l'intervalle $[t_s, t_e]$ en deux zones $[t_s, t_p]$ et $[t_p, t_e]$ pour l'extraction de g_s, g_e .

Remarque :

la distinction entre une légère pause dans le mouvement de déplacement d'un manche et deux mouvements bien distincts (figure III-8b) se fait d'après un paramètre ΔU . Lorsque la détection d'un second déplacement (j+1) dans le même sens que le premier (j) est effectuée dans l'intervalle $[t_e^j, t_e^j + \Delta U]$, l'instant t_e^j est déplacé sur t_e^{j+1} , et une nouvelle scrutation est effectuée sur le nouvel $[t_e^{j+1}, t_e^{j+1} + \Delta U]$.

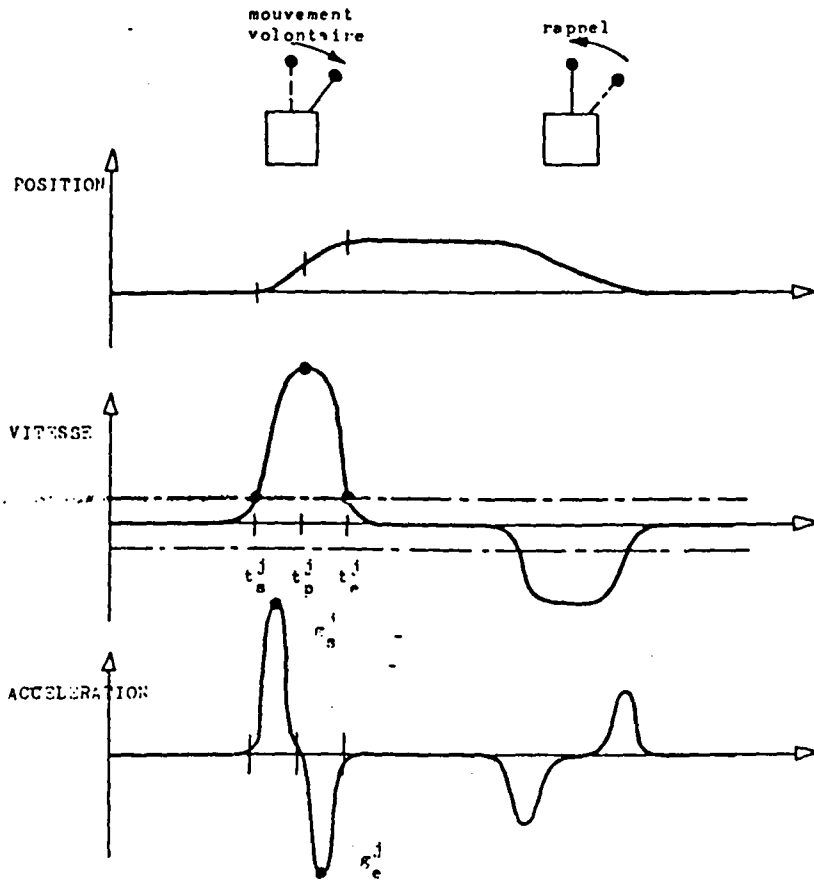


Figure III-8a Relevé de l'accélération

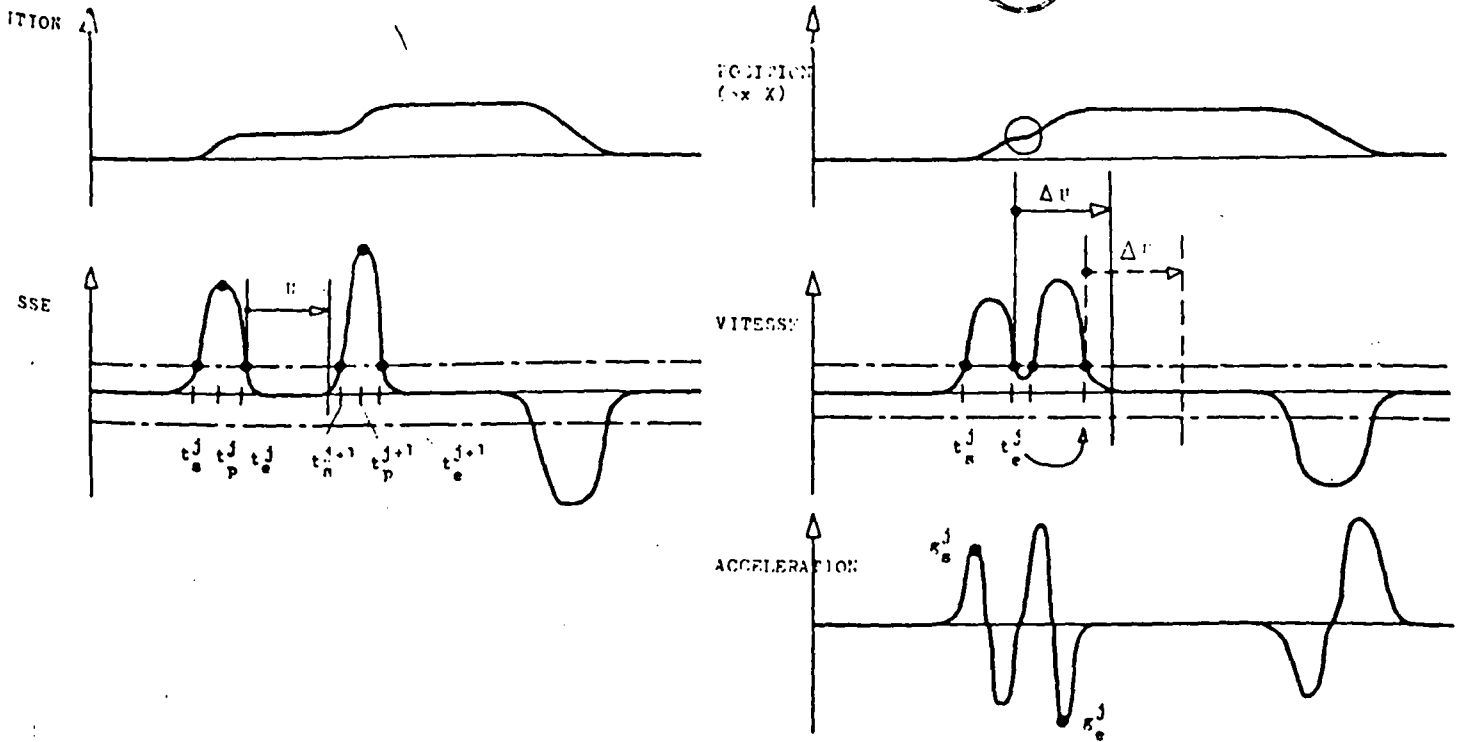


Figure III-8b Distinction entre allures donnant :

... $\emptyset, X^+, X^+, \emptyset$...

ou

... $\emptyset, X^+, \emptyset$...

b) Positions stables atteintes par les manches

On prend x : la position à l'instant t_e^j

si $|x| > \lambda$ alors $P_j = x$

sinon on considère que le manche est ramené à sa position stable.

c) Temps

En fonction de x , les instants t_p^j permettent de déterminer :

- le temps de maintien (T_j)
- le temps entre actions (Δ_j) (pour lequel on considère aussi les instants t^j d'action sur l'inverseur).

d) Efforts tactiles

Ils sont relevés pour t_e^j lorsque $|x| > \lambda$

e) Déplacements simultanés

Le seul paramètre affecté est Δ_{j+1} que l'on prend égal à zéro car on considère que l'opérateur optimise le temps de réalisation de deux actions exécutables l'une à la suite de l'autre (figure III-9).

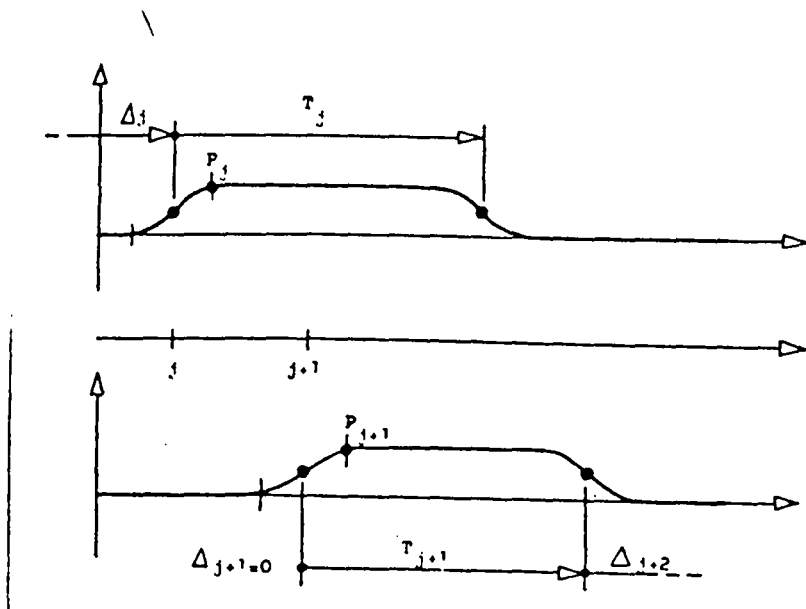


Figure III-9 Cas de déplacements simultanés

IV EXPLOITATION DES DONNEES

L'analyse porte, pour chaque opération, sur un intervalle de temps de 90 secondes compté à partir du départ de l'intervention.

IV.1 ANALYSE DES DONNEES SYNTAXIQUES

a) Les résultats obtenus sur les chaînes élémentaires sont donnés figure III-10.

On remarque qu'aucune tendance n'est décelable, ainsi :

- des performances très différentes possèdent des valeurs très similaires [a,e] , [b,c] ,
- des performances identiques ont des valeurs assez dissimilaires [d,e] .

b) La recherche de séquences caractéristiques précédant une faute n'est pas non plus constructive.

c) Conclusion :

Dans le cas des interventions considérées à partir d'une console de commande peu complexe, il apparaît que la fréquence d'apparition de séquences élémentaires de conduite n'est pas représentative de la performance réalisée.

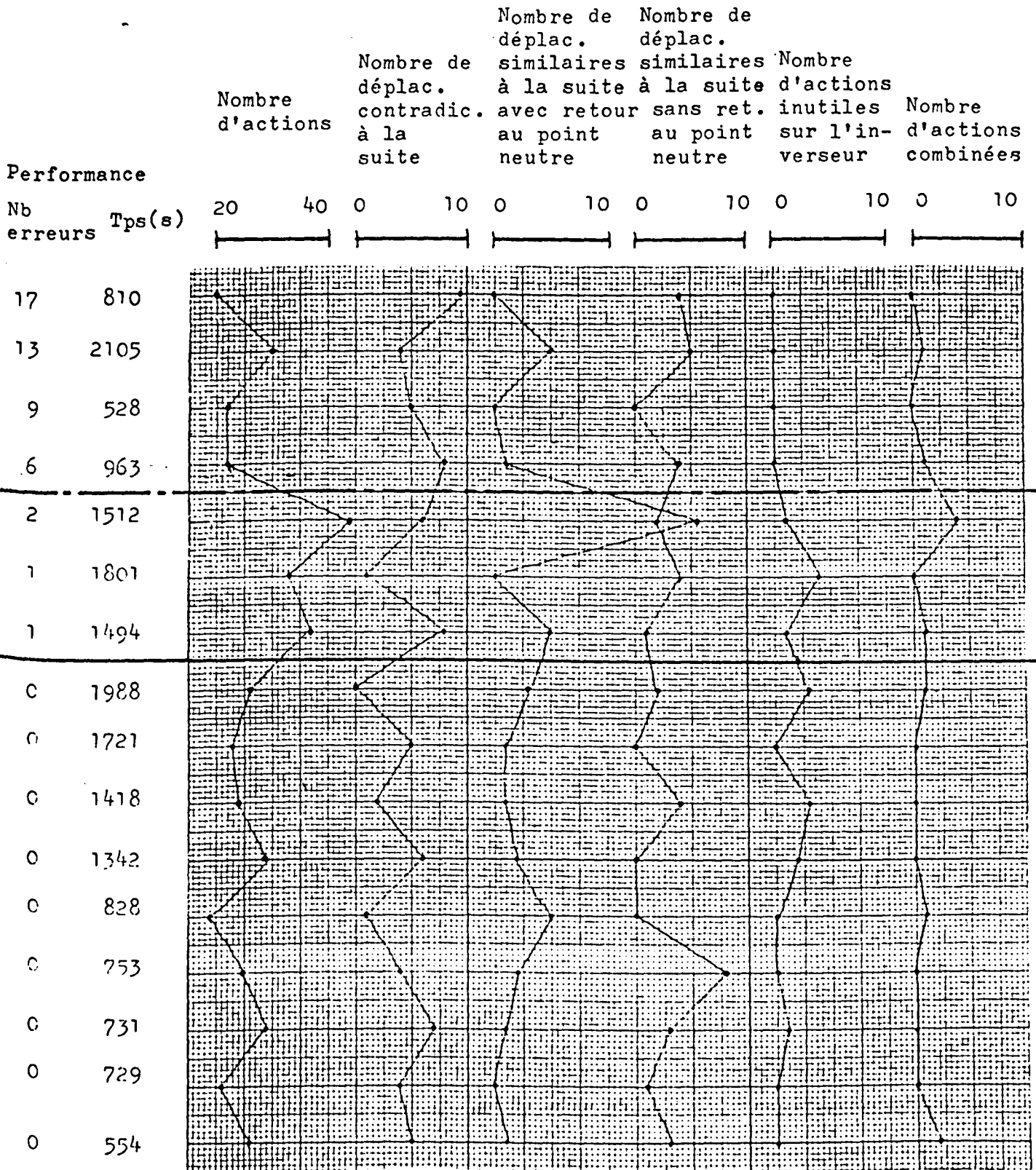


Figure III-10 Données syntaxiques



IV.2 ANALYSE DES DONNEES STRUCTURELLES

a) Le nombre de vecteurs $\vec{A}_j = [G, P, T, E, \Delta]_j^t$ recueillis sur l'intervalle d'analyse (une vingtaine) permet le traitement des composantes par des méthodes statistiques classiques :

$$m_c = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j$$
$$V_c = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - m_c)^2}{n}}$$

Les valeurs obtenues (figure III-11) ne permettent pas de dégager des règles liant les composantes à la performance. On constate seulement des tendances sur certaines composantes; ainsi V_E est souvent faible lorsque la performance est bonne et légèrement plus élevée lorsqu'elle est mauvaise.

b) Le tracé graphique des valeurs C_j fait apparaître certaines particularités très légèrement esquissées n'affectant pas de la même manière les diverses composantes, par ailleurs ces particularités ne sont pas corrélées de façon précise avec la performance.

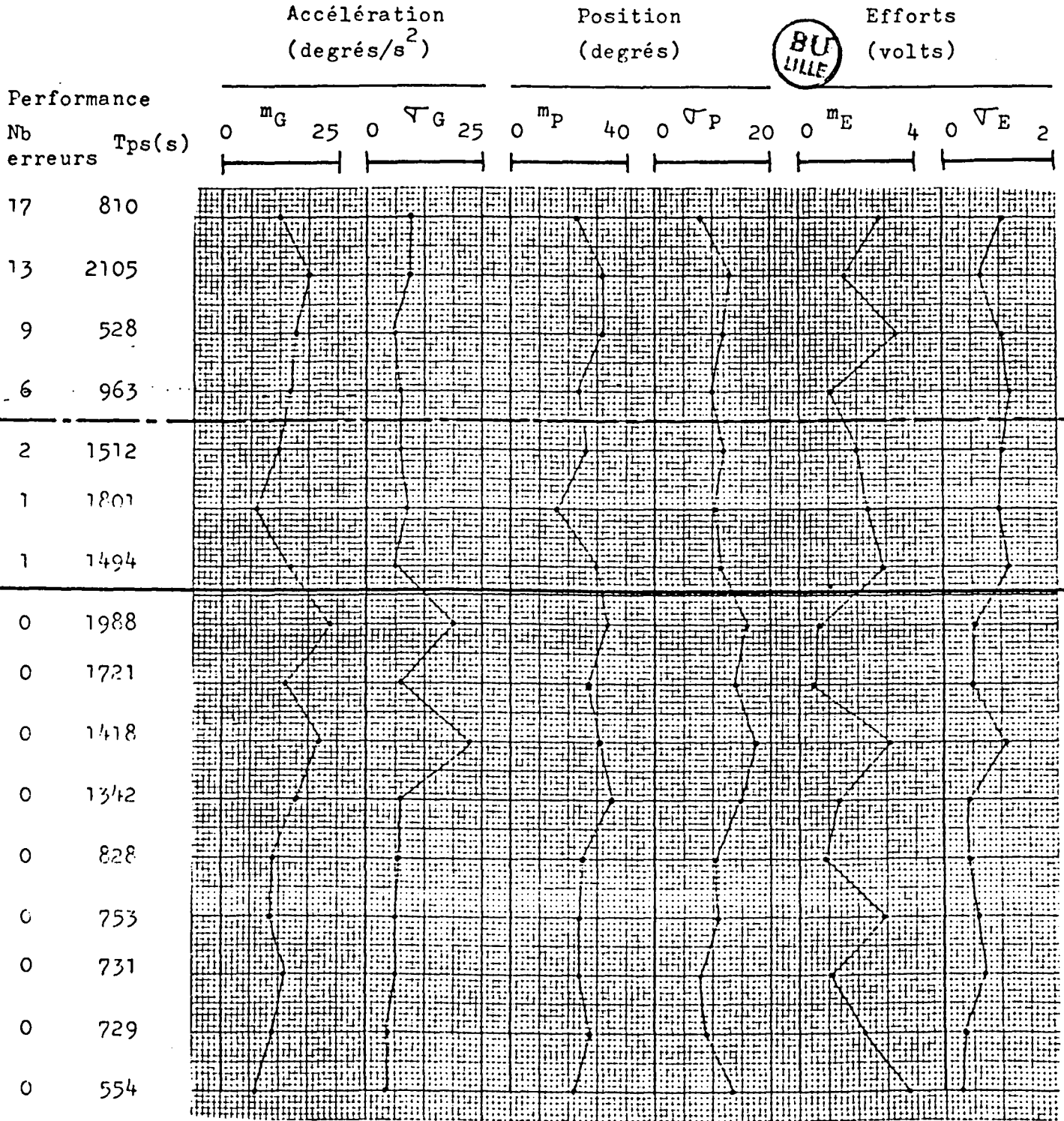
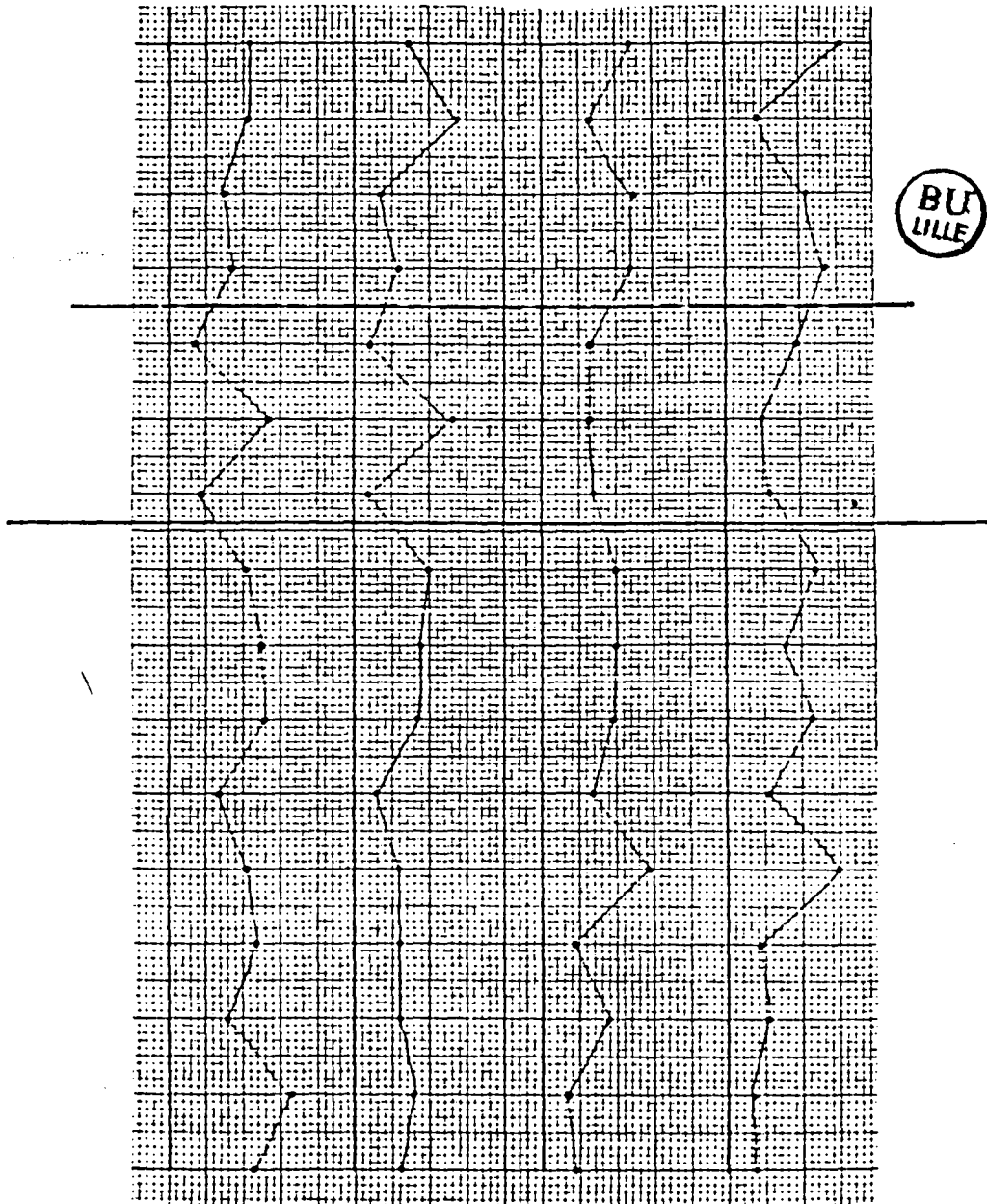
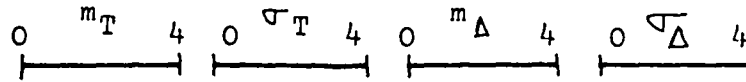


Figure III-11 Données structurales

Temps de
maintien
(secondes)

Temps entre
deux actions
(secondes)



(suite)

V CONCLUSION

L'analyse de différentes méthodes d'évaluation des facteurs humains conduit au choix d'une méthode basée sur l'observation du comportement gestuel de l'opérateur sur l'interface Homme/Machine, ce choix étant justifié par le fait que la méthode est complètement transparente pour l'opérateur.

Les données ainsi recueillies sur la console de commande ont permis d'extraire deux types de paramètres :

- des paramètres syntaxiques (enchaînement d'actions) qui ne permettent pas de caractériser la performance dans le cas considéré;
- des paramètres structurels pour lesquels une simple analyse statistique (calcul de m et σ) ne permet pas de mettre en évidence des relations avec la performance.

Cependant, il semble qu'une approche du type reconnaissance de formes pour l'analyse des données structurelles autorise l'extraction de caractéristiques sur chaque composante du vecteur \vec{A}_j ; ces caractéristiques pouvant ensuite être utilisées pour l'estimation de la performance. Cette approche fait l'objet du chapitre suivant.

IV

**MODELE
D'ESTIMATION DE
PERFORMANCE**

I INTRODUCTION

La représentation sous forme d'histogrammes normalisés des paramètres comportementaux de l'opérateur, notés C_j et recueillis sur la console, autorise la définition de caractéristiques liées à la performance.

La prise en compte des décisions résultant de l'observation de chaque C_j permet alors de délivrer une estimation d'autant plus crédible que la cohérence inter- C_j est satisfaisante. Par ailleurs, le suivi de ces estimations effectué en temps réel tout au long de l'intervention, rend possible l'élimination des estimations peu crédibles.

Ce chapitre présente un système de reconnaissance à deux niveaux d'apprentissage permettant d'extraire les paramètres les plus pertinents pour l'estimation des performances.

III RECONNAISSANCE DE STYLES DE CONDUITE

II.1 STRUCTURE DU DISPOSITIF DE RECONNAISSANCE

Le dispositif de reconnaissance envisagé possède la structure illustrée figure IV-1.

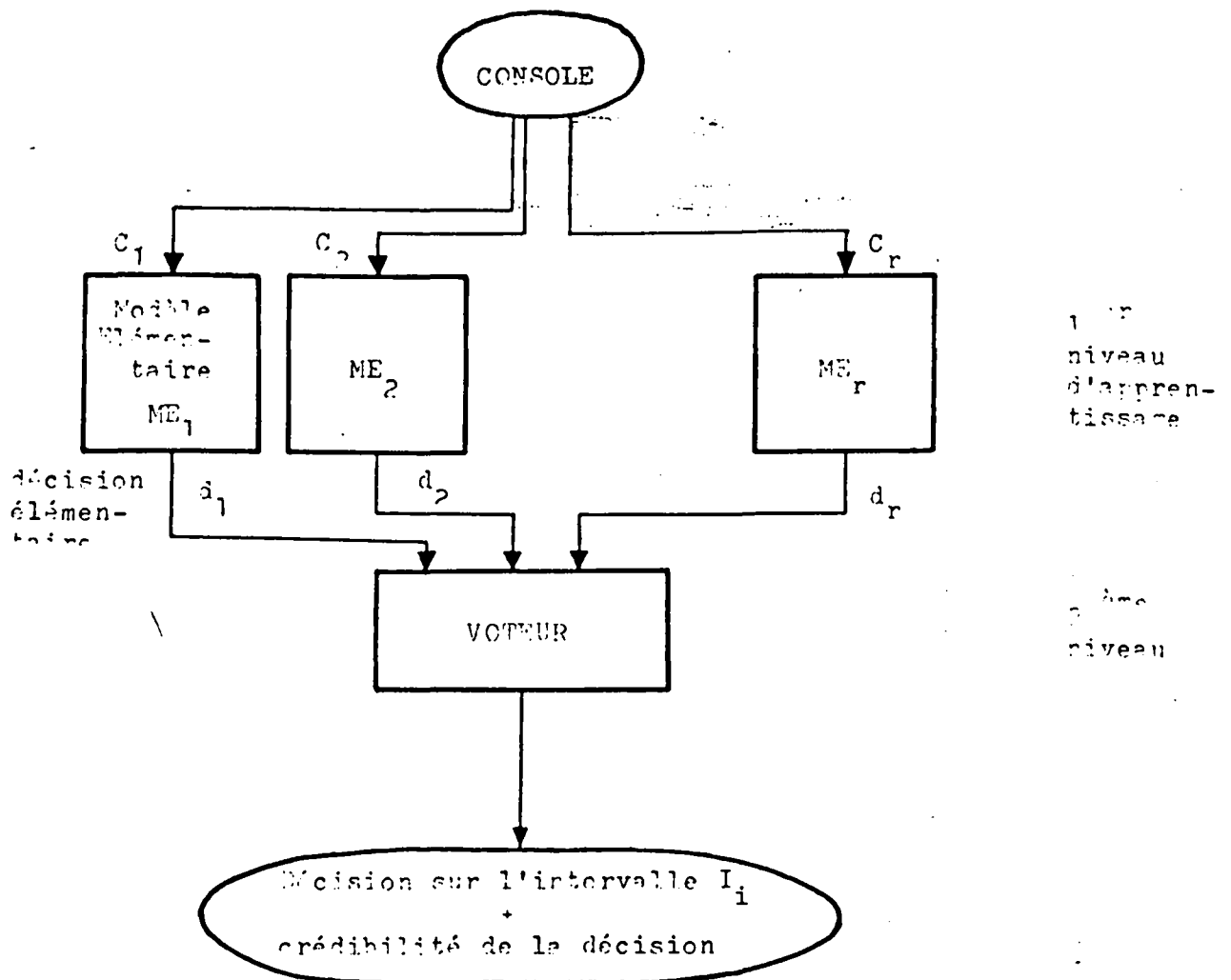


Figure IV-1 Structure du modèle global

Cette figure fait apparaître les éléments suivants :

- La console générant les paramètres comportementaux C_j ,
- Des modules élémentaires de prise de décision ME_j , chaque ME_j ayant pour entrée C_j et générant une décision d_j ,

- Un voteur qui élit la décision finale D_j parmi les d_j et attribue à D_j un coefficient de crédibilité défini en fonction des d_j .

En ce qui concerne les modules de prise de décision, les règles permettant de déduire d_j de C_j sont construites à partir d'un ensemble d'expériences, prototype observées lors de la phase d'apprentissage.

Remarque :

On peut affecter à chacune des décisions d_j un poids P_j selon la confiance que l'on accorde au processus de décision correspondant. Ce poids est défini lors de la phase de validation.

II.1.a Apprentissage

On considère un ensemble d'exemples prototypes E_j constituant l'ensemble d'apprentissage. Les processus de décision élémentaire associés aux C_j étant générés à partir de ces prototypes, il importe de choisir des exemples aussi représentatifs que possible du fonctionnement du système H/M. Ainsi, plus l'ensemble d'apprentissage est complet, plus le modèle résultant est performant.

Dans ces conditions, les règles de décision sont énoncées par un observateur humain (figure IV-2) en fonction des observations effectives opérées sur le paramètre C_j et des performances réelles relevées. Cette opération nécessite l'analyse des relevés de paramètres et la définition de classes de performance.

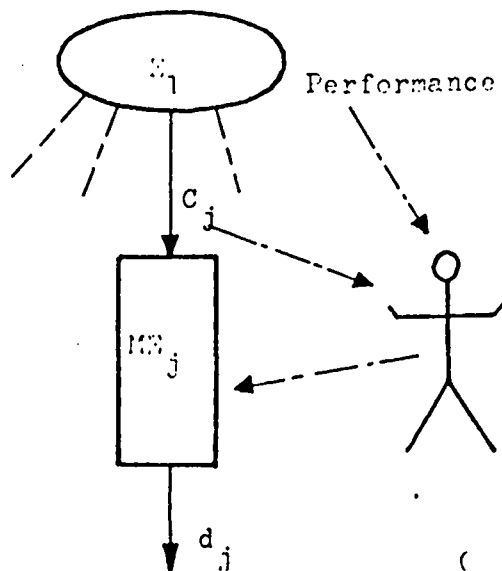


Figure IV-2 Définition d'un processus de décision élémentaire ME_j

Le voteur a quand à lui deux fonctions :

- celle d'agréger toutes les décisions élémentaires afin de générer une décision globale,
- fournir un estimateur de la qualité de l'agrégation, cet estimateur constituant le coefficient de crédibilité que l'on accorde à la décision globale.

II.1.b Validation

La validation du modèle ainsi obtenu s'effectue à partir d'un nouvel ensemble d'expériences E_2 tel que $E_2 \cap E_1 = \emptyset$. Son objectif est alors de classer les différents processus de décision élémentaires (ce qui revient à choisir parmi les paramètres C_j) selon la confiance que l'on peut leur accorder.

Pour cela, on envisage le processus suivant :

Chaque exemple de E_2 est soumis au dispositif défini figure IV-1. Pour chacun d'eux, on obtient une décision globale résultant de l'agrégation des décisions élémentaires. De plus la contribution de chacune des décisions élémentaires à la décision globale est évaluée en définissant un indice de proximité entre la décision élémentaire et le résultat vrai. Cet indice de proximité permet alors d'attribuer à chacune des décisions élémentaires un poids d'autant plus fort que cette distance est faible.

II.1.c Modèle définitif

Il est simplement obtenu en reprenant le modèle initial auquel sont ajoutés dans les branches correspondant aux décisions élémentaires d_j des poids P_j tels que $\sum P_j = 1$.

II-2 MODULE DE TRAITEMENT

Il extrait de la masse de données prélevées sur la console, un nombre restreint de paramètres pertinents sur lesquels s'effectue la décision . Il est divisé en deux niveaux (figure IV-3)

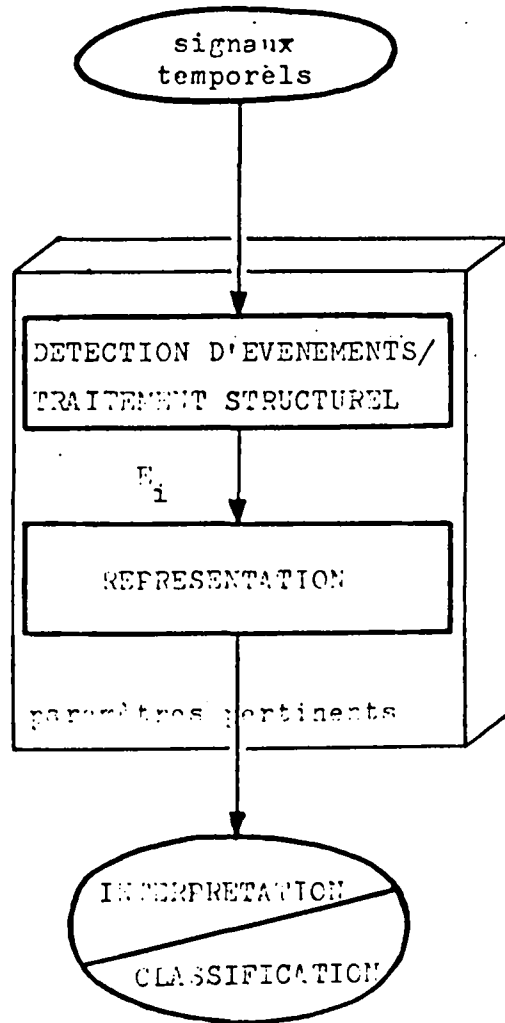


Figure IV-3 Traitement des signaux issus de la console de commande

II.2.a Traitement des signaux temporels prélevés

Pour chaque intervalle considéré I_i , un ensemble E_i de n_i vecteurs $\vec{A}_j = [G, F, T, E, \Delta]_j^t$ est obtenu, chaque vecteur correspondant à la détection d'un événement et caractérisant la structure du signal observé à ce moment là (figure IV-4).

La quantité de données ainsi prélevée étant importante

une compression doit être effectuée sans qu'il y ait destruction de l'information utile.

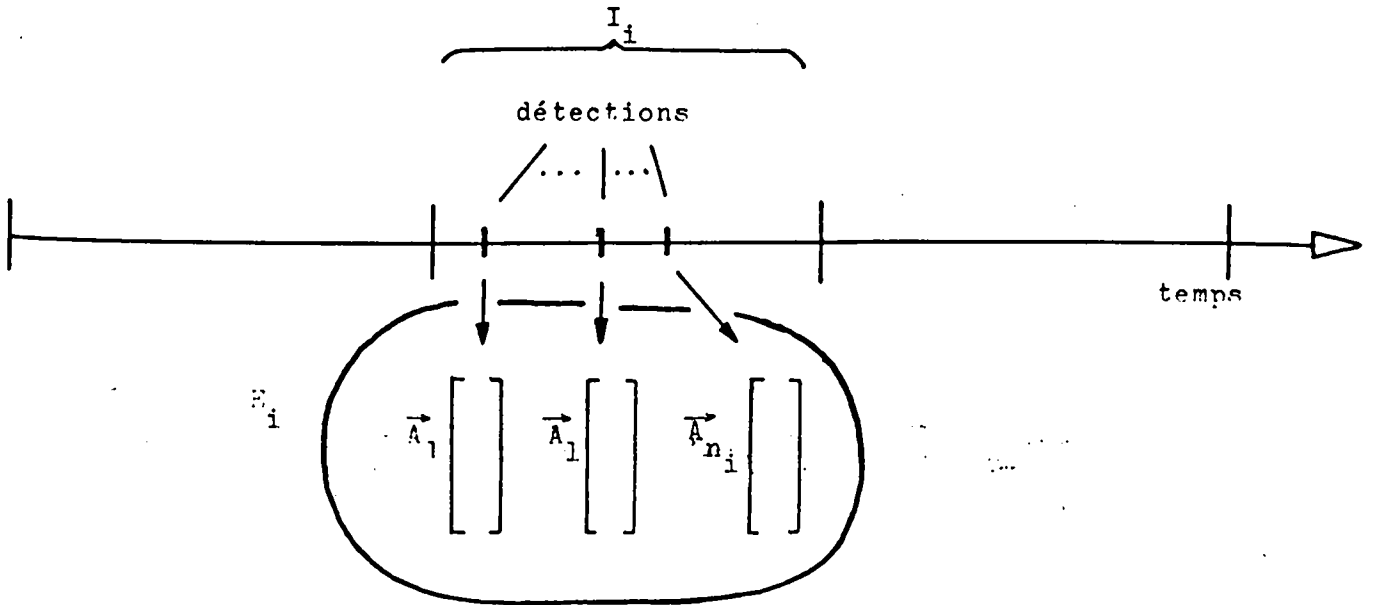


Figure IV-4 Traitement des signaux prélevés

II.2.b Représentation de l'information

\ Il existe deux types d'informations, suivant que :

- les données ont une signification temporelle et peuvent être mises sous forme de courbes (il existe un ordre d'antériorité/postériorité),
- celles-ci peuvent être considérées sans lien significatif avec le temps, seules les amplitudes étant prises en compte.

Dans le second cas, la compression de données est effectuée en utilisant la technique d'histogrammes qui est plus efficace que les calculs de moyenne et d'écart-type.

Les trois étapes de traitement des histogrammes sont :

a) Histogrammes bruts
.....

L'affectation des valeurs C_j , lorsque A_j parcourt E_i , à des domaines d'amplitude préétablis conduit à des histogrammes dont l'aire

est fonction de l'intervalle d'observation I_i (figure IV-5a).

b) Histogrammes normalisés

Les cardinaux des ensembles E_i n'étant pas toujours les mêmes, il est nécessaire de normaliser les histogrammes bruts afin de pouvoir les comparer, ce qui amène à la définition d'histogrammes relatifs (figure IV-4b).

c) Histogrammes quantifiés

Afin de simplifier les formes rencontrées, on adopte enfin un seuillage à plusieurs niveaux permettant au module de traitement de délivrer les informations utilisées par l'interpréteur.

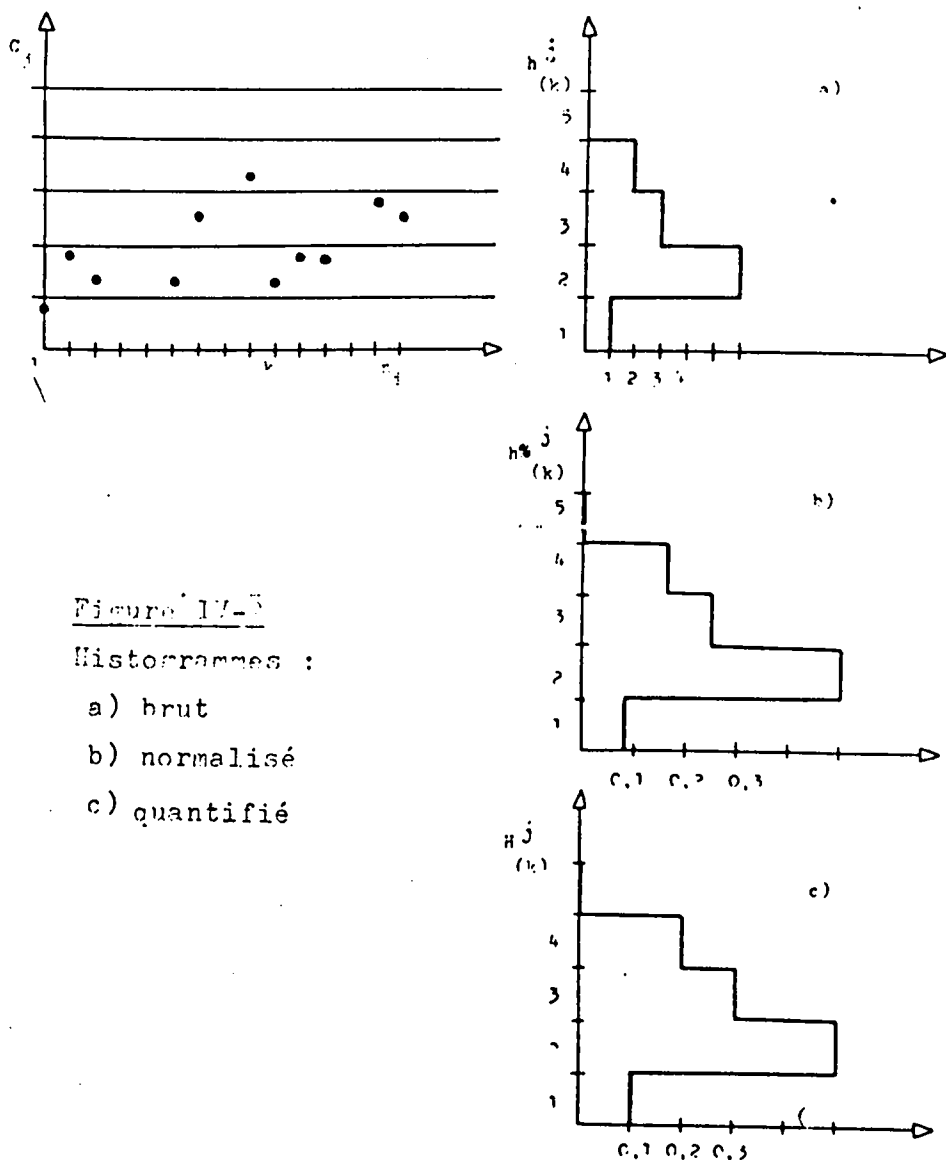


Figure IV-5

Histogrammes :

- a) brut
- b) normalisé
- c) quantifié

Ces trois étapes conduisent au développement suivant :

$h_{(k)}^j$ la valeur de la $k^{\text{ème}}$ raie de l'histogramme relatif au paramètre C_j ,
 n_j le nombre de valeurs considérées prises par le paramètre C_j dans l'intervalle I_i ,

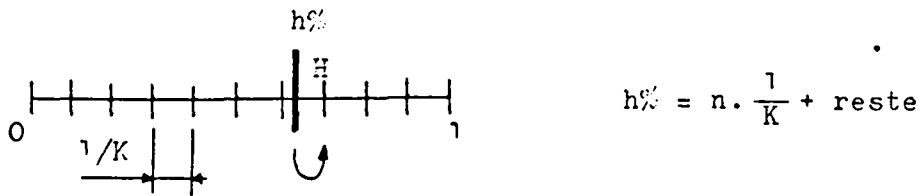
$h_{(k)}^{j\%}$ la valeur de la $k^{\text{ème}}$ raie de l'histogramme normalisé correspondant,

$H_{(k)}^j$ la valeur de la $k^{\text{ème}}$ raie de l'histogramme quantifié.

Dans ces conditions on obtient :

$$h_{(k)}^{j\%} = \frac{h_{(k)}^j}{\sum_{I_i} n_j} \quad \text{et} \quad h_{(k)}^{j\%} \in [0, 1]$$

Les valeurs $H_{(k)}^j$ sont définies sur un ensemble fini et discret de valeurs comprises entre 0 et 1, ceci dans un souci de simplification des étapes ultérieures. La procédure de discrétisation est définie comme suit :



On partage l'intervalle $[0, 1]$ en K pas de valeur $\frac{1}{K}$ et on affecte à $H_{(k)}^j$ la valeur $\frac{n+1}{K}$ dans laquelle n est défini par $n = \text{ENT} \left(\frac{h_{(k)}^{j\%}}{1/K} \right)$.

Remarque :

Le pas de l'histogramme et la valeur K constituent des paramètres de sensibilité définis par apprentissage.

II. 3 PREMIER CYCLE D'APPRENTISSAGE

II.3.a Interprétation

L'apprentissage peut être mené /INVE 84/:

- de manière automatique
- avec 'professeur'

Dans le premier cas, un algorithme permettant de déterminer le nombre de classes existant dans la base d'apprentissage ainsi que de partitionner la base sur ces classes est nécessaire. L'apprentissage ainsi mené est objectif et bien adapté lorsque la base est composée d'une multitude d'exemples.

Dans notre cas, la base ne comprenant pas un nombre très élevé d'exemples, les décisions élémentaires résultant de l'observation des paramètres C_j sont fournies par un observateur humain.

L'inconvénient en est la subjectivité, cependant s'agissant d'un comportement, les variations observées doivent pouvoir s'expliquer sur des bases physiologiques, donnant ainsi une certaine validation aux règles extraites. De plus, la présence de l'homme ainsi que sa souplesse d'interprétation visuelle permettent de délivrer des règles à partir de quelques tendances seulement et ainsi de pallier à un manque de représentativité de la base d'apprentissage; la validité des règles ainsi déduites à partir de quelques cas seulement est ensuite vérifiée dans la phase de validation.

II.3.b Particularités

L'observation des histogrammes des paramètres de comportement C_j permet d'extraire des tendances liées à la performance.

Des règles de décision du type :

Si forme d'histogramme alors type de performance

définies pour chaque paramètre C_j , constituent alors j modèles matérialisant les liens entre particularités et performances.

II.3.c Classes de performance

Le nombre de classes de performance est choisi arbitrairement. En principe deux grandes classes :

bon / mauvais



correspondant à :

aucune faute / faute(s).

Un découpage plus fin admettant six classes est réalisé :

très bon, bon, assez bon / assez mauvais, mauvais, très mauvais .

La liaison entre ces classes et les performances sur la tâche (nombre d'erreurs et temps d'intervention) est laissée à l'appréciation de l'observateur qui choisit ainsi la rigueur d'évaluation du système. On réserve cependant 'bon' pour les interventions sans faute, le qualificatif étant donné par le temps et 'mauvais' pour les opérations avec faute(s), le qualificatif étant fonction du nombre de fautes.

Exemples :

tâche	nb erreurs	temps	appréciation
T ₁	0	1300	TB
T ₁	0	2100	AB
T ₁	13	1300	TM
T ₂	0	900	AB
T ₂	0	500	TB

II.3.d Hypothèse simplificatrice

Le nombre relativement faible d'exemples constituant la base d'apprentissage impose de considérer l'hypothèse qu'à chaque niveau de performance (classe) est liée une forme globale de conduite et une seule.

Comme la forme globale de la conduite est constituée de formes individuelles (accélération, efforts...), nous pouvons penser que la rencontre d'une forme globale non répertoriée a pour effet le plus probable d'augmenter la discordance entre formes élémentaires, entraînant une suspension de décision, plutôt qu'une variation dans le même sens de toutes les formes individuelles amenant alors une erreur d'interprétation par manque de connaissances.

Cette hypothèse a pour but de simplifier la tâche de l'observateur, sa non existence exigeant une procédure de classification automatique.

II.4 MODELE PRELIMINAIRE

II.4.a Modèles élémentaires

Chaque modèle élémentaire correspondant à un paramètre C_j étant composé de six classes, l'observateur doit définir autant de règles de décision que de classes de performance.

Exemple :

Supposons que la tendance d'un paramètre par rapport à la performance s'exprime par les deux observations :

{ si histogramme plat alors performance plutôt mauvaise
si histogramme pointu alors performance plutôt bonne ,

il faut alors exprimer six règles en chiffrant les prémisses :

R_1^i si pic histogramme = 0,6 alors TB
 R_2^i si ----- = 0,5 alors B
 |
 R_6^i si $\frac{1}{\sqrt{}}$ ----- = 0,1 alors TM

L'ensemble des règles de décision constitue alors un filtre élémentaire au travers duquel passent ensuite les paramètres C_j des exemples opérationnels (figure IV-6).

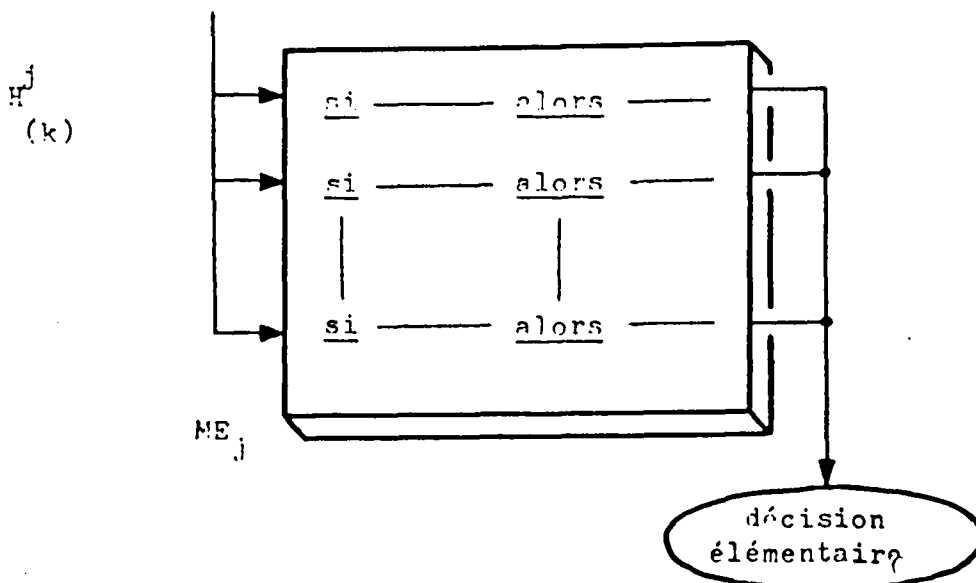


Figure IV-6 Modèle élémentaire

La réalisation d'un modèle élémentaire sous forme d'ensemble de règles en parallèle portant sur des formes d'histogrammes quantifiés est un moyen simple d'exprimer les particularités rencontrées.

II.4.b Modèle global

Chaque modèle élémentaire fournit une opinion qui n'est pas toujours le reflet exact de la performance réelle. Cependant l'ensemble des opinions émises permet de dégager une tendance générale dont la crédibilité est donnée par l'homogénéité des opinions individuelles. Si les opinions sont toutes très ressemblantes, les chances que la performance estimée soit très proche de la performance réelle sont grandes. Si par contre, il y a beaucoup de discordance entre opinions élémentaires aucune conclusion n'est alors sûre quant à la décision finale.

Le choix : - du type d'agrégation des décisions élémentaires,
- du critère de crédibilité,

est effectué à partir des exemples de la base et constitue le second niveau d'apprentissage

Lors de ce premier cycle d'apprentissage :

- la méthode d'agrégation retenue consiste en une moyenne des opinions élémentaires restantes après élimination des deux opinions extrêmes,

- la crédibilité de l'estimation effectuée pour l'intervalle I_i est donnée par la distance entre les deux opinions extrêmes restantes, celle-ci prenant un des trois états :

résultat		. sûr
		. assez sûr
		. à ne pas considérer.

Remarque :

L'agrégation des opinions individuelles, l'élimination des extrêmes, le fait que plusieurs modèles différents expriment la même tendance pour engendrer une bonne crédibilité, constituent une succession de filtres retardant l'estimation finale de la performance, de manière à ce que seule l'information de base qui se dégage du comportement soit conservée. En effet, chaque modèle élémentaire n'est pas fiable à 100% sur la base d'apprentissage, celle-ci n'étant qu'un échantillon de comportements.

II.5 VALIDATION

Dans cette phase, l'interpréteur constitué par les modèles élémentaires et les règles de combinaison des informations individuelles, est alimenté par des exemples significatifs n'ayant pas servi à sa constitution; les résultats des estimations effectuées permettant alors de chiffrer :

a) Deux grandeurs caractérisant le système global :

- la probabilité de fausse alarme : détection d'une mauvaise performance avec un fort coefficient de crédibilité alors que la performance réelle est bonne; pour cela des exemples relatifs à une bonne performance sont présentés au système,
- la probabilité de non détection d'une mauvaise performance : le test se fait alors sur des exemples d'interventions peu réussies.

b) L'utilité de chaque modèle élémentaire :

Soient ME_j : le modèle élémentaire correspondant au paramètre C_j
 N : le nombre d'échantillons considérés dans la base de validation E_2
 p_{r_i} : la performance réelle de l'échantillon i ($i=1, N$)
 $p_{e_i}^j$: la performance estimée par le modèle élémentaire C_j ,

$$\left(\begin{array}{l} \text{la performance étant traduite par } p \in E ; \\ E = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \text{ dans le cas considéré,} \\ \text{avec : } \begin{array}{c|cccccc} p & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline \text{perf.} & TB & B & AB & AM & M & EM \end{array} \end{array} \right)$$

INT : distance entre performances extrêmes (ici: 5)

Nous prenons :

$$\begin{aligned} \text{utilité du modèle élémentaire } u(ME_j) &= u(ME_j) \sum_{i=1}^N |p_{r_i} - p_{e_i}^j| \\ &= \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |p_{r_i} - p_{e_i}^j|}{\frac{1}{2} \text{INT} \cdot N} \right) \end{aligned}$$

Si un modèle élémentaire a une utilité $u(ME_j) \simeq 0$, sa participation est nulle pour l'estimation de la qualité du travail (il ne

(

donne aucune information). Si par contre $u(ME_j) \simeq 1$, il est alors à priori très sûr pour évaluer la performance et suffit presque à lui tout seul. S'il est négatif, il donne de l'information mais elle est erronée (dans le mauvais sens).

Remarque :

la recherche de l'utilité des sous-modèles permet de créer une boucle permettant d'affiner le système de surveillance de l'opérateur par affectation de poids à chaque décision élémentaire, selon l'utilité du paramètre correspondant.

II.6 SECOND CYCLE D'APPRENTISSAGE

Si les probabilités relevées

- de fausse alarme
- de non détection d'une mauvaise performance

du modèle préliminaire ne conviennent pas, un second modèle est créé en ne retenant que les paramètres efficaces; l'élimination des paramètres ayant une faible utilité se faisant sans modification des règles des modèles élémentaires restants.

Une redéfinition de l'agrégation et du critère de crédibilité est nécessaire, ainsi :

- toutes les opinions élémentaires sont prises en compte pour la délivrance de l'estimation de performance, les paramètres étant jugés suffisamment sûrs,
- la crédibilité n'est plus donnée que sous deux formes :

résultat		. crédible
		. pas crédible

L'efficacité de ce modèle final est enfin testée sur un dernier ensemble d'échantillons E_3 .

II.7 SUIVI DES ESTIMATIONS

L'estimation fournie par le modèle final sur un intervalle d'analyse I_i pouvant être erronée, un suivi temporel des opinions émises doit être effectué afin d'éliminer les fausses détections. Ce système de suivi constitue un dernier niveau de filtrage retardant la décision pour lui donner davantage de fiabilité (figure IV-7).

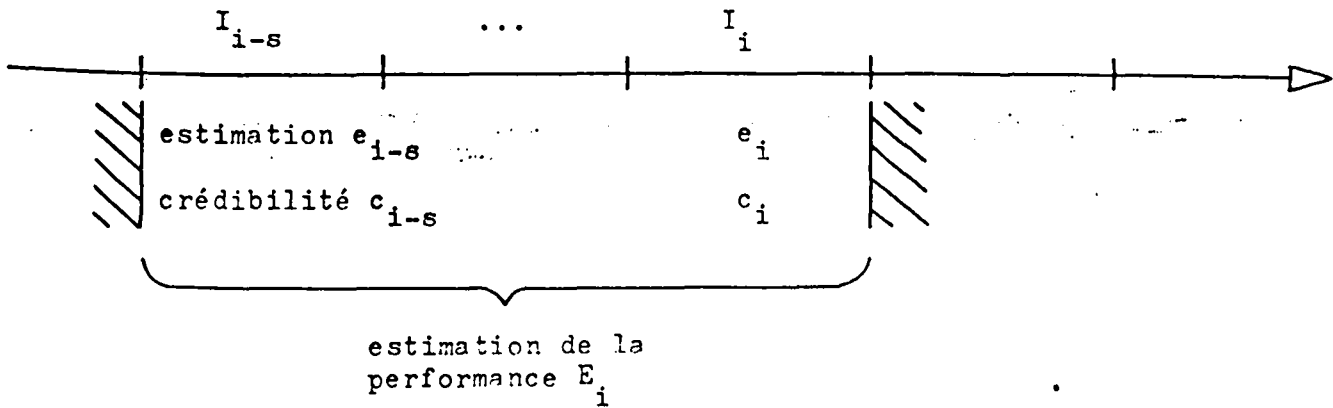


Figure IV-7 Suivi temporel des estimations délivrées sur chaque intervalle d'analyse

III APPLICATION AUX DONNEES RECUEILLIES

III.1 INTERPRETATION DES HISTOGRAMMES

L'ensemble d'apprentissage est constituée de 8 exemples correspondant à des entraînements et difficultés de travail différents (tableau IV-8), ces deux facteurs étant ceux qui affectent le plus la performance.

opérateur plateforme		conditions opératoires	désignation	performance nb err.	temps de l'obs.	appréciation
OP ₂	T ₂	entraîne- ment = 0	A ₁	17	810	TM
CP ₂	T ₁	tâche ajoutée	A ₂	2	1512	M
OP ₁	T ₁	e ≈ 0,5	A ₃	1	1801	M
OP ₂	T ₁	e ≈ 0,5	A ₄	1	1494.	AM
CP ₁	T ₁	tâche ajoutée	A ₅	0	1988	AB
OP ₁	T ₂	e = 0	A ₆	0	753	B
OP ₂	T ₂	e = 1	A ₇	0	731	B
OP ₁	T ₂	e = 1	A ₈	0	729	B

Tableau IV-8 Ensemble d'apprentissage

On relève ainsi les particularités sur les paramètres C_j :

III.1.a Accélération

La règle générale se déduit de l'annexe 3-a :

Si des accélérations élevées sont relevées alors mauvaise performance.

Cela revient à énoncer qu'un opérateur est d'autant plus efficace qu'il adopte un rythme de croisière amenant une dépense musculaire faible; le relevé d'accélérations fortes et irrégulières (plage plus large) montrant que celui-ci ne contrôle pas bien la situation.

III.1.b Temps de maintien

La règle générale se déduit du tableau de l'annexe 3-b et s'énonce :

Si des temps de maintien élevés sont relevés alors bonne performance.

Cela revient à constater que l'opérateur bien au point, ayant une bonne connaissance du micromanipulateur et de la plateforme, engendre des déplacements significatifs, alors qu'il a plutôt tendance à agir par tentatives successives lorsqu'il n'est pas très sûr de lui.

Remarque :

L'ajout d'une tâche à exécuter en parallèle engendre une diminution des temps de maintien maxi relevés.

III.1.c Temps entre actions

La règle extraite de l'annexe 3-c est :

Si aucun délai important n'est relevé alors bonne performance.

On peut penser que ce paramètre traduit la réflexion de l'opérateur : si la tâche demande de longs délais de réflexion sur la stratégie de commande, c'est qu'elle est complexe ou que l'opérateur n'est pas familiarisé avec le système, situations amenant une forte probabilité d'erreurs.

III.1.d Efforts sur les commandes

Règle (annexe 3-d) :

Si les efforts maximaux développés sur les commandes sont faibles alors bonne performance.

Ce paramètre est surtout sensible au niveau d'entraînement.

Il importe cependant de considérer que :

- des situations stressantes peuvent élever l'effort de serrage sans engendrer une baisse de performance,
- la fatigue fait décroître la crispation sur les commandes, alors que le risque de mauvaise performance augmente.

Le paramètre effort fait donc apparaître une certaine ambiguïté si l'on ne connaît rien sur l'opérateur.

III.1.e Positions atteintes par les manches

Aucune règle ne peut être extraite concernant ce paramètre (annexe 3-b), il n'est donc pas considéré pour le modèle préliminaire.

III.2 VALIDATION

III.2.a Résultats

L'application des règles extraites aux échantillons de la base de validation (tableau IV-9) , permet d'obtenir les résultats reportés dans le tableau IV-10 (annexe 4) :

- une fausse alarme est délivrée pour V_6
- pas de non détection de mauvaise performance
- crédibilité de l'ensemble des estimations de l'ordre de 0,5.

opérateur	plateforme	conditions opératoires	désignation	performance nb err.	temps	appréciation de l'obs.
OP ₂	T ₁	e = 0	V ₁	13	2105	TM
OP ₂	T ₂	e ≈ 0,5	V ₂	9	528	TM
OP ₂	T ₂	tâche ajoutée	V ₃	6	963	TM
OP ₁	T ₁	e = 1	V ₄	0	1721	AB
OP ₁	T ₂	tâche ajoutée	V ₅	0	828	AB
OP ₁	T ₁	e = 0	V ₆	0	1418	B
OP ₂	T ₁	e = 1	V ₇	0	1542	TB
OP ₁	T ₂	e ≈ 0,5	V ₈	0	554	TB

Tableau IV-9 Base de validation

		e_G	e_T	e_{Δ}	e_E	estimation crédibilité	
V_1	TM	5	4	2	5	M/AM	0,5
V_2	TM	4	4	4	5	AM	1
V_3	TM	4	3	5	5	M/AM	0,5
V_4	AB	4	1	3	1	B	0
V_5	AB	3	3	4	1	AB	1
V_6	B	4	2	4	5	AM	1
V_7	TB	5	4	2	2	AB	0
V_8	TB	1	2	1	5	B/TB	0,5

Tableau IV-10 Résultats obtenus sur la base de validation

III.2.b Utilité des paramètres C_j

Nous trouvons :

paramètre	utilité
temps entre deux actions	0,45
accélérations	0,4
temps de maintien	0,35
efforts	0,25

Cependant ces résultats ne sont à prendre qu'à titre indicatif, l'essai sur un nombre plus grand d'échantillons relatifs à d'autres facteurs (fatigue...) étant nécessaire pour la sélection des paramètres optimaux.

IV CONCLUSION

L'analyse des histogrammes associés aux données comportementales recueillies sur la console permet à un observateur d'extraire des relations forme d'histogramme \leftrightarrow performance et d'en déduire des règles de décision permettant de bâtir des modèles élémentaires ME_j , l'ensemble des décisions élémentaires fournies par les ME_j étant ensuite agrégé de façon à délivrer une estimation de performance pondérée d'un coefficient de crédibilité, sur l'intervalle analysé.

Nous montrons que pour la plupart des paramètres considérés, l'élément déterminant est la largeur de la bande à l'intérieur de laquelle s'inscrivent les valeurs du paramètre. Le relevé des valeurs maximales recueillies dans l'intervalle d'analyse remplace alors avantageusement le calcul d'histogrammes. Par ailleurs l'extraction des paramètres comportementaux demande peu de calculs et la création d'un système d'estimation de performance assez simple est alors envisageable.

La méthode ainsi développée, ayant permis la création d'un modèle validé sur quelques exemples, peut alors être utilisée pour la création d'un essai-opérateur basé, non plus sur une console découplant les mouvements mais sur un syntaxeur associant les six degrés de liberté et devant équiper le micromanipulateur pour des utilisations particulières.

CONCLUSION

Le travail présenté a pour but de permettre la réalisation de tâches de micromanipulation avec des performances accrues.

L'effort est axé sur deux points :

- l'aide à l'exécution,
- la surveillance de l'opérateur.

Il est en effet constaté que pour des tâches de microchirurgie, la précision obtenue actuellement est limitée par la main de l'opérateur, la réalisation d'interventions avec une précision accrue devant obligatoirement faire appel à des systèmes mécaniques. D'autre part, la qualité de l'intervention est très dépendante de l'opérateur qui commande le système et que l'on doit donc surveiller afin de prévenir une mauvaise intervention.

Dans une première partie, nous avons décrit un système de micromanipulation géré par ordinateur, le couplage ainsi réalisé ouvrant une grande porte à l'automatisation de certaines phases d'intervention ainsi qu'à la réalisation de systèmes intelligents. Une attention particulière a été portée à l'aspect sécurité passive et active, notamment par la réalisation d'un système de retrait de l'instrument en cas d'anomalie. L'ensemble de l'appareil a été conçu sous une forme ouverte, permettant ainsi l'utilisation dans des domaines divers et l'ajout d'ensembles fonctionnels.

L'efficacité du système est montrée sur banc d'essais, son utilisation permettant à un opérateur d'effectuer des interventions très fines sans commettre de faute et ce malgré des conditions de contexte défavorables. Nous observons un allongement du temps de l'intervention, qui peut être réduit par l'utilisation d'une interface H/M naturel et l'aide d'automatismes d'asservissement sur la zone de travail. On s'aperçoit en outre que la variation de la qualité d'intervention est surtout due à des facteurs affectant l'opérateur, engendrant ainsi le besoin d'un système de surveillance, développé dans la seconde partie.

Celui-ci est réalisé à partir de l'analyse du comportement de l'opérateur sur les commandes, ce qui a pour avantage de n'apporter aucune gêne. La mise sous forme d'histogrammes des valeurs relevées sur l'interface de commande permet de déterminer des traits caractéristiques de la performance développée; chaque paramètre (accélération engendrée sur les manches, temps entre deux actions, efforts d'agrippement...)

... donnant une estimation élémentaire qui est ensuite agrégée avec les autres, de manière à délivrer une estimation pondérée. L'étude d'échantillons de comportement ayant permis de déterminer que les éléments représentatifs de la performance sont les largeurs des bandes à l'intérieur desquelles se trouvent les valeurs des paramètres de comportement, l'application de la méthode à un interface H/M de type syntaxeur est envisagée.

Pour conclure, on doit préciser que le travail présenté constitue une base pour la micromanipulation et que de nombreuses études restent encore à mener afin de faire du système un partenaire pour l'humain, signalons :

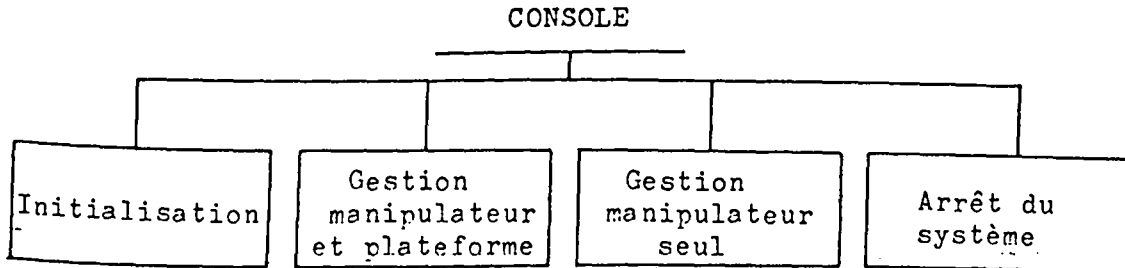
- la commande par la voix de certaines fonctions,
- l'automatisation de sous-tâches,
- la réalisation d'un système de supervision permettant une symbiose H/M,
- l'assevissement sur des zones opératoires mobiles,
- le travail en coopération avec d'autres bras...

ANNEXES

ANNEXE 1

Dans cette partie, nous montrons la simplicité de programmation introduite par le langage Transforth.

Le module CONSOLE qui assure la gestion du micromanipulateur et de la plateforme d'essais est donné par :



Sa définition en Forth est

```
: CONSOLE
  INIT GMP GM FI ;
```

et repose sur les modules INIT, GMP, GM, FI qui ont été définis précédemment (ils existent dans le dictionnaire).

\ Nous avons ainsi

- le module INIT

```
: INIT
  CRGT.ASS
  INIT.CAN RMC
  INIT.IP INIT.FC
  INIT.MAG INIT.CPT INIT.ERR
  LA ;
```

- le module GMP

```
: GMP
  BEGIN LA SELECT LED
  X B@
  IF ERREUR AFFI1
  ELSE FIGER AFFI2
  THEN
  X B@ 1 =
  UNTIL ;
```

- ...

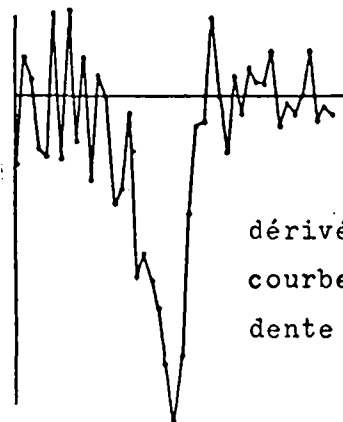
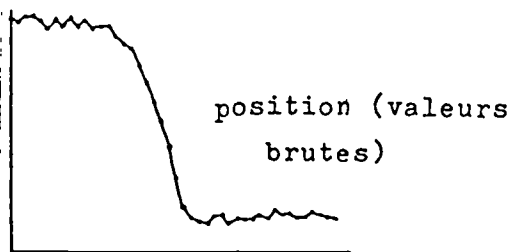
Dans lesquels CHRGT.ASS, INIT.CAN, RZC ... sont eux-mêmes prédéfinis et réalisent le chargement d'une zone mémoire à partir d'une disquette, l'initialisation de la carte de conversion analogique-numérique, la mise à zéro de la console...

Cette possibilité de combiner simplement plusieurs modules pour en former un grand servant à la création d'un module encore plus grand permet, après une phase initiale de développement des modules de base assez longue, d'avancer très vite et de considérer des problèmes complexes tout en utilisant peu de place mémoire, car les mots non utilisés peuvent être otés du dictionnaire.

a) Déplacement rapide

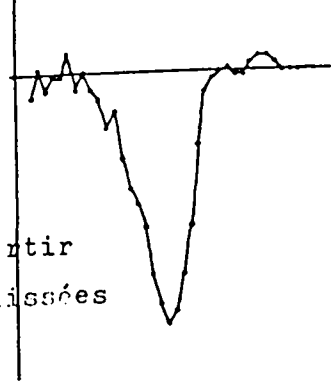
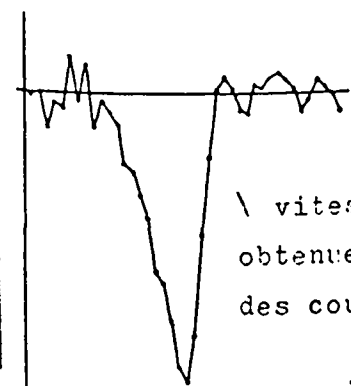
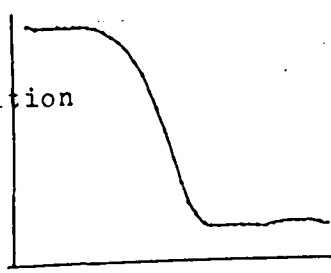
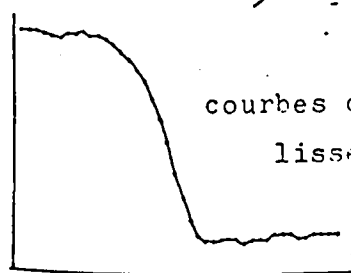
ANNEXE 2

Détermination du nombre de points $(2p+1)$ et $(2q+1)$ des fenêtres utilisées pour les lissages et le calcul des dérivées.



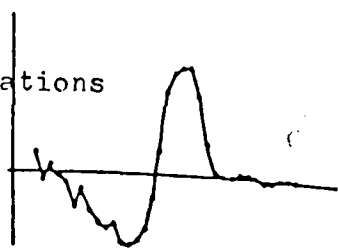
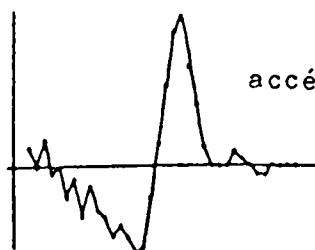
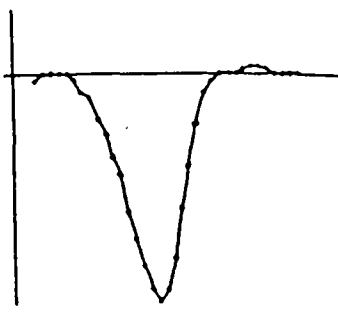
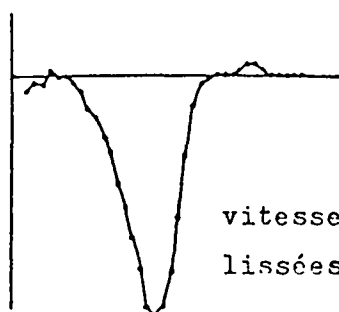
$p = 1$

$p = 2$

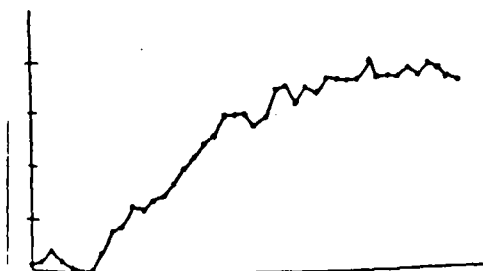


$q = 1$

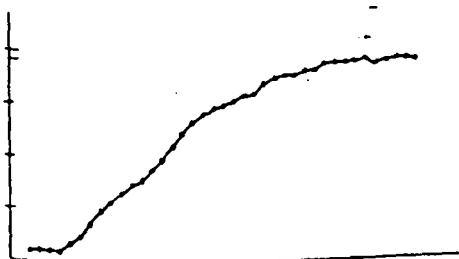
$q = 2$



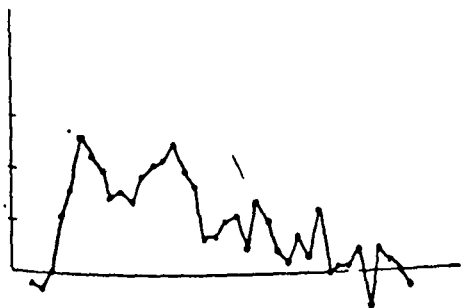
b) Déplacement lent



positions
(valeurs brutes)



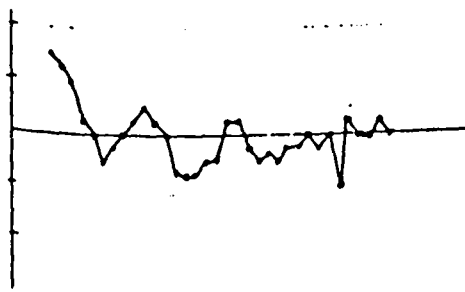
courbes
lissées (p=2)



dérivées

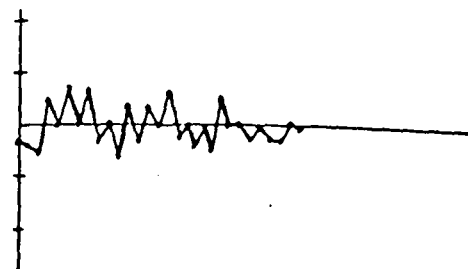
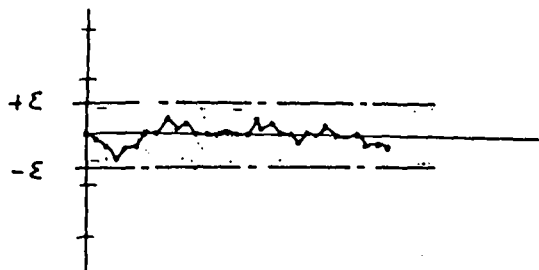
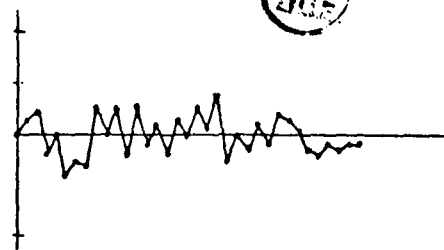
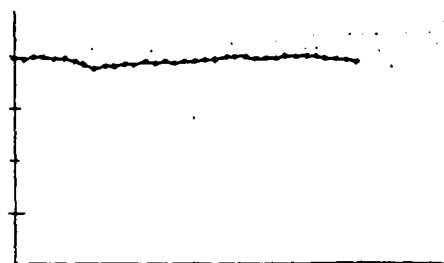


vitesses
lissées (q=2)



accélérations

c) Non déplacement



ANNEXE 3

HISTOGRAMMES D'APPRENTISSAGE DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT C_j

a) Accélérations (G)

(K: i^{ème} pas de l'histogramme)

accélération (deg/s ²)			25										estimat. élément. G
désign.	appréc.	K											
		c. op.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A ₁	TM	e = 0	0,1	0,5	0,4	0,1	0	0	0	0,2	0	0	M
A ₂	M	tâche aj.	0,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	
A ₃	M	e ± 0,5	0,5	0,4	0,1	0	0	0	0,1	0	0	0	AM
A ₄	AM	e ± 0,5	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0	0	0	AM
A ₅	AB	tâche aj.	0,1	0,3	0,3	0,5	0	0,2	0,1	0	0	0	(AM)
A ₆	B	e = 0	0,1	0,6	0	0,3	0,1	0	0	0	0	0	B
A ₇	B	e = 1	0	0,4	0,4	0,1	0,2	0,1	0	0	0	0	AB
A ₈	B	e = 1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,1	0	0	0	0	0	B

Règles R^G :

K _{max} (=0)	estimation
4 et -	T3
5	B
6	AM
7	AM
8	M
9 et +	TM



b) Temps de maintien (T)

tps de maintien (sec)			0								5								e _T	
désign.	appréc.	K	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8		
																				c. op.
A ₁	TM	e = 0	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0	0,2	0										(TB)
A ₂	M	tâche aj.	0,8	0,3	0	0	0	0	0	0										TM
A ₃	M	e ≈ 0,5	0,2	0,5	0,2	0	0	0	0	0										M
A ₄	AM	e ≈ 0,5	0,6	0,5	0	0	0	0	0	0										TM
A ₅	AB	tâche aj.	0,2	0,7	0,2	0	0	0	0	0										(M)
A ₆	B	e = 0	0	0,4	0,3	0,2	0	0,2	0	0										B
A ₇	B	e = 1	0,5	0,4	0,1	0,1	0,2	0	0	0										AB
A ₈	B	e = 1	0	0,2	0,5	0,2	0,5	0	0	0										AB

Règles R^T :

K _{max} (=0)	estimation
2 et -	TM
3	M
4	AM
5	AB
6	B
7 et +	TB



c) Temps entre actions (Δ)

tps entre ac. (sec)			0								5								e_{Δ}	
design.	appréc.	K		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7		8
		c. op.																		
A ₁	TM	e = 0		0,6	0,3	0,1	0	0	0	0	0,1									TM
A ₂	M	tâche		0,9	0,2	0,1	0	0	0,1	0	0									M
A ₃	M	a _j		0,8	0,3	0	0	0	0	0	0									TB
A ₄	AM	e ≤ 0,5		0,9	0,1	0,2	0	0	0	0	0									B
A ₅	AB	tâche		0,7	0,2	0	0,1	0,1	0	0	0									AM
A ₆	B	a _j		0,9	0,2	0	0	0	0	0	0									TB
A ₇	B	e = 0		0,6	0,4	0,1	0	0	0	0	0									B
A ₈	B	e = 1		1	0,1	0	0	0	0	0	0									TB

Règles R :

K _{max} (=0)	estimation
2 et -	TB
3	B
4	AB
5	AM
6	M
7 et +	TM

BU
LILLE

d) Efforts sur les commandes (E)

efforts (Volts)			0								2								e_E
design.	appréc.	c.op.	K																
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
A ₁	TM	e = 0	0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4									M
A ₂	M	tâche aj.	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2									M
A ₃	M	e ≈ 0,5	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1									M
A ₄	AM	e ≤ 0,5	0,1	0,1	0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,6									M
A ₅	AB	tâche aj.	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0									TB
A ₆	B	e = 0	0,1	0	0	0	0	0,3	0,7	0									AM
A ₇	B	e = 1	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0	0									AB
A ₈	B	e = 1	0	0	0,1	0,3	0,7	0,1	0	0									AB

Règles R^E :

K _{max} (=0)	estimation
8	M
7	AM
6	AB
5	B
4 et -	TB



Remarque :

la saturation des capteurs ne permettant pas le relevé d'efforts supérieurs à ceux correspondant à 4V, nous ne donnons pas la règle délivrant l'estimation TM.

e) Positions atteintes par les manches (P)

positions (degrés)			0				20			40	
désign.	appréc.	K		1	2	3	4	5	6	7	
		c.op.									
A ₁	TM	e = 0	0,2	<u>0,5</u>	0,5	0,1	0	0	0	0	
A ₂	M	tâche aj	0,2	<u>0,4</u>	0,3	0,2	0,2	0	0	0	
A ₃	M	e \leq 0,5	<u>0,8</u>	0,1	0,1	0,2	0	0	0	0	
A ₄	AM	e \leq 0,5	0,1	0,3	<u>0,5</u>	0	0,3	0	0	0	
A ₅	AB	tâche aj	0,2	0,1	<u>0,4</u>	0,2	0,2	0,2	0	0	
A ₆	B	e = 0	0,3	<u>0,4</u>	0,3	0,3	0	0	0	0	
A ₇	B	e = 1	0,2	<u>0,5</u>	0,4	0,1	0	0	0	0	
A ₈	B	e = 1	0,2	0,3	<u>0,7</u>	0,1	0,1	0	0	0	



BIBLIOGRAPHIE

- /ANDR 83/ G. ANDRE
Conception et modélisation de systèmes de perception proximi-
métriques. Application à la commande en téléopération.
Thèse de Docteur-Ingénieur, Rennes, Oct 1983.
- /ARA 84/ Rapport d'activités du pôle Téléopération Avancée.
Journées Automatique et Robotique Avancée, Toulouse, Sept 1984.
- /BERL 84/ R. BERLAND, R. COUDERC, G. FANNECHERE, J.F. POIRAUDEAU, S. ROUX
Un syntaxeur pour l'apprentissage de robots à trajectoires
continues.
Le Nouvel Automatismes, Nov/Dec 1984.
- /BOUR 84/ J.L. BOURRINE
Etude en stéréotaxie d'une implantation intratumorale de fila-
ments radioactifs.
Thèse de 3^{ème} cycle, Lille, 1984.
- /CCIF 82/ Ph. COIFFET
Les Robots. Modélisation et commande.
Tome 1, Hermès 1982.
- /DAVI 83/ A.F. DAVIS, G.J. NEVILL
Corrugated PVDF bimorphs as tactile sensors and micro-actuators.
A Research note.
Robotica, vol 1, 1983.
- /GIFI 82/ B. GIFI
Prise en compte de l'environnement local dans la commande de
robots manipulateurs.
Thèse d'Etat, Rennes, Juin 1982.
- /FOUR 83/ R. FOURNIER
Méthode de détermination des stratégies d'évolution d'un système
polyarticulé dans un environnement complexe.
Thèse de 3^{ème} cycle, Montpellier, 1983.

- /GAIL 84/ J.P. GAILLARD
L'organisation des informations visuelles en téléopération
assistée par ordinateur.
Rapport d'activités Téléopération Avancée, Journées ARA,
Toulouse, 1984.
- /GART 79/ W.B. GARTNER, M.R. MURPHY
Concepts of workload.
AGARD 246: Survey of methods to assess workload, Aug 1979.
- /GUFF 83/ P. GUFFOND
Indications de la vitrectomie dans l'extraction et les compli-
cations de l'extraction des corps étrangers intra-oculaires.
Thèse de Médecine, Lille, 1983.
- /HOFK 82/ V.D. HOFKIN
Human Factors in air traffic control.
AGARD 275, Apr 1982.
- /INVE 84/ M. INVERNIZZI
Surveillance d'un coeur de réacteur nucléaire par une méthode
de reconnaissance de formes.
4^{ème} Congrès Reconnaissance de Formes et Intelligence Artifi-
cielle, Paris, Jan 1984.
- /LAMB 83/ M. LAMBERT, Y. DEMARCO, P. MALLEJAC
RAMSON : un projet de robot rampant.
Journées ADI : Les Robots Automoteurs, Nov 1983.
- /LEPE 85/ B. LEPELERS
Sécurité du couplage H/M. Application à la conception d'un
micromanipulateur chirurgical.
Thèse de Docteur-Ingénieur, Lille, à paraître.
- /LHOT 84/ F. LHOTE, J.M. KAUFFMANN, P. ANDRE, J.P. TAILLARD
Les Robots. Constituants technologiques.
Tome 4, Hermès 1984

- /LICK 60/ J.C. LICKLIDER
Man-Computer symbiosis.
IRE Trans. on Human Factors in electronics, Mar 1960.
- /MATS 81/ K. MATSUSHIMA, H. KOYANAGI
Servo Micro-Manipulator Tiny-micro Mark 1
4th CISM IFTOMM, Zaborow, Pologne Sept 1981.
- /MCKE 79/ R.E. Mc KENZIE
Concepts of stress.
AGARD 246, Aug 1979.
- /MSVO 84/ Micromanipulateur Stéréotaxique pour Vitrectomie Oculaire.
- Rapport interne, Centre d'Automatique de Lille, Fev 1984.
- /MUTE 83/ B. MUTEI, A. PRUSKI
Capteur sensoriel pour robot industriel.
Congrès d'Automatique, Besançon, Nov 1983.
- /PERU 84/ E. PERUCHON, J.P. MICAILLEF
Recherche d'une méthode d'évaluation des systèmes manipulateurs.
Rapport d'activités Téléopération Avancée, Journées ARA,
Toulouse, 1984.
- /QUET 81/ N. QUETIN
Organes de commande manuelle : étude bibliographique "Préévaluation
d'une poignée à 6 ddl".
Rapport CNES 80/816, Aout 1981
- /RAJA 79/ C.V. RAJAGOPALAN
Segmentation des suites temporelles.
Thèse de Docteur-Ingénieur, Lille, 1979.
- /RAOU 76/ A. RAOULT
Pilot workload analysis.
Int. Symp. on Monitoring Behavior and Supervisory Control,
Bershtesgarden, Mar 1976.

- /STRA 72/ B.R. STRAATSMA
Stereotaxic intraocular surgery. Use in vitreous and posterior
segment surgery.
Arch. Opht. vol 88, Sept 1972.
- /THRI 83/ M.W. THRING
Robots and Telechirs.
Wiley, 1983.
- /UMET 80/ Y. UMETANI, H. SUZUKI
Piezo-electric micromanipulator in multi-degrees of freedom with
tactile sensibility.
Proc. of 10th ISIR, 1981.
- /VERT 84/ J. VERTUT, Ph. COIFFET
Les Robots. La Téléopération.
Tome 3A, Hermès 1984.
- /WIER 79/ W.W. WIERWILLE, R.C. WILLIGES, S.G. SCHIFLETT
Aircrew workload assessment techniques.
AGARD 246, Aug 1979.
- /ZEIS 79/ Micromanipulateur à asservissement électrique pour le déroule-
ment du mouvement en coordonnées sphériques.
Brevet Zeiss 79/30830.

