

50376
1981
164

N° d'ordre : 265

50376
1981
164

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR INGÉNIEUR

par

Ahmed HABCHI

Ingénieur E.N.P.A.

INTEGRATION DU CONTROLE D'UN ROBOT PAR UN OPERATEUR HUMAIN



Soutenue le 8 mai 1981 devant la Commission d'Examen

MM.	P. VIDAL	Président et Rapporteur
	M. NOUGARET	Examineur
	P. LOPEZ	Examineur
	L. POVY	Examineur
	J.M. TOULOTTE	Examineur
	C. PAVLIN	Invité
	D. JOLLY	Invité

A ma femme

A mes enfants

Avec ma profonde affection

AVANT - P R O P O S

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été effectué au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1.

Nous adressons notre plus vive reconnaissance à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL pour la confiance qu'il nous a accordée et l'accueil qu'il nous a réservé dans son Laboratoire. Que Monsieur VIDAL veuille bien accepter nos remerciements pour avoir dirigé nos recherches et pour l'honneur qu'il nous fait en assurant la présidence de notre jury.

Que Monsieur LOPEZ, Professeur au Laboratoire d'Automatique du Havre, trouve ici l'expression de notre profonde gratitude pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à nos travaux en acceptant de participer à notre jury de thèse.

Nous exprimons nos remerciements à Monsieur NOUGARET, Professeur au Laboratoire d'Automatique de Grenoble, pour l'intérêt qu'il nous manifeste en acceptant de juger ce travail et de participer à notre jury de thèse.

Que Monsieur Lucien POVY et Monsieur Jean-Marc TOULOTTE, Professeurs au Centre d'Automatique de Lille, trouvent ici notre reconnaissance pour la confiance qu'ils nous accordent en participant à notre commission d'examen.

.../...

Nos vifs remerciements s'adressent également à Monsieur PAVLIN, Ingénieur en Chef de la Société BERTIN, à Plaisir, pour sa participation à la commission d'examen.

Que Monsieur JOLLY, Assistant au Centre d'Automatique de Lille 1, soit assuré de notre profonde gratitude pour l'intérêt qu'il nous a témoigné dans notre travail et pour les nombreux conseils qu'il nous a donnés tout au long de notre étude.

Que soient remerciés tous les membres du Centre d'Automatique et plus spécialement Madame LELONG Michèle, Madame PIGNON Annick, Monsieur VEINNANT Gabriel et Monsieur HOUZE Jean, qui ont collaboré à la réalisation de cet ouvrage.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mon profond respect à Monsieur A.KHELEF, Ministre du Commerce et ancien secrétaire général du Ministère des Industries Légères Algériennes, Monsieur AITSIMOHAMMED, Monsieur BELARBI, anciens Directeurs Généraux de la S.N.M.C., Monsieur BELANI, Directeur Général de S.N.M.C. de même que l'ensemble des responsables de S.N.M.C. pour le soutien qu'ils n'ont cessé de m'apporter durant cette étude. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon total dévouement.

Je tiens à rendre hommage à Monsieur S. GHOZALI, ancien Ministre de l'Energie, et à l'ensemble des responsables de la S.O.N.A.T.R.A.C.H. pour avoir contribué efficacement au financement d'une partie de mon séjour au Centre d'Automatique.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CHAPITRE I VUE D'ENSEMBLE DES DIFFERENTS MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

INTRODUCTION	p.1
I.1 - ETUDE DES PRINCIPES DE COMMANDE	p.2
I.2 - EVOLUTION SCHEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE	p.17
CONCLUSION	p.23
BIBLIOGRAPHIE	p.24

CHAPITRE II ETUDE DES SYSTEMES DE COMMANDE AVEC SUPERVISION DE L'HOMME

INTRODUCTION	p.28
II.1 - DESCRIPTION GENERALE DU MODE SEMI-AUTOMATIQUE	p.29
II.2 - ETUDE DU MODE MIXTE	p.32
II.3 - ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT	p.47
CONCLUSION	p.50
BIBLIOGRAPHIE	p.52

.../...

CHAPITRE III CRITERES DE DECOUPLAGE-RECOUPLAGE ET PROBLEMES POSES DURANT CETTE PHASE

INTRODUCTION	p.53
III.1 - QUELQUES CAS CONCRETS DE CONTROLEUR HOMME-MACHINE	p.55
III.2 - ETUDE SYSTEMATIQUE DU MODE MIXTE	p.61
III.3 - GRANDEURS D'ENTREE INTERVENANT DANS LA PHASE DE DECOUPLAGE-RECOUPLAGE	p.65
III.4 - ELABORATION DU CRITERE DE DECOUPLAGE LOCAL	p.68
CONCLUSION	p.78
BIBLIOGRAPHIE	p.80

CHAPITRE IV REFLEXIONS SUR LA PERSPECTIVE D'IMPLANTATION LOGICIELLE DU CONTROLEUR HOMME-ROBOT

INTRODUCTION	p.82
IV.1 - CHOIX ET ETUDE DES CRITERES D'APPLICATION A LA RESOLUTION DU DILEMME	p.83
IV.2 - ETUDE ET CHOIX DE QUELQUES METHODES PERMETTANT LA QUANTIFICATION DES CRITERES	p.87
IV.3 - ETUDE EN SIMULATION DE L'INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES	p.95
IV.4 - PERSPECTIVES D'APPLICATION DU MODE MIXTE	p.113
CONCLUSION	p.115
BIBLIOGRAPHIE	p.116

CHAPITRE V ETUDES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION	p.118
V.1 - DIFFERENTS TYPES DE TRAJECTOIRES ENTRE DEUX POINTS	p.119
V.2 - MISE EN OEUVRE DE LA COMMANDE EN POSITION DU ROBOT HALL	p.123
V.3 - SIMULATION DE DECOUPLAGE SOFTWARE	p.131
V.4 - DECOUPLAGE PAR CAPTEURS INFRAROUGES	p.134
V.5 - RECOUPLAGE PAR DIALOGUE	p.149
CONCLUSION	p.154
BIBLIOGRAPHIE	p.155
CONCLUSION GENERALE	p.156

INTRODUCTION GENERALE

L'avènement des robots sur le marché industriel et médical est une conséquence de l'évolution de l'automatisation.

En effet, le contrôle de processus industriel par ordinateur a augmenté le rendement des usines et a diminué certaines tâches pénibles et dangereuses. Mais il a été constaté des goulots d'étranglement qui obligent parfois les concepteurs à "multiplier" les machines et prévoir des capacités de stockage tampon importantes, pour tenir compte des opérateurs humains dans la boucle de processus.

Une discipline nouvelle, la robotique, s'est alors développée.

Elle s'est orientée vers deux domaines distincts :

- INDUSTRIEL : pour augmenter le degré d'automatisation
- MEDICAL : pour "prolonger" ou remplacer certaines fonctions humaines.
Ces déficiences ne sont d'ailleurs nullement étrangères à l'utilisation des machines automatiques.

La commande de ces différents robots est passée par plusieurs stades que l'on a coutume de décomposer en :

- . *manuelle*
- . *semi-automatique*
- . *automatique*

.../...

Cette évolution dans les modes de conduite ne peut à notre sens, nullement être considérée comme une amélioration technologique devant surpasser la génération antérieure, mais comme une véritable complémentarité.

Le mode automatique ne doit pas être préféré systématiquement au mode semi-automatique. L'adaptabilité des téléthèses par exemple est liée à la nécessité de commandabilité par le sujet. Il est prouvé qu'une téléthèse automatique est moins bien acceptée.

En outre une multiplicité de différents modes de conduite permettra :

- d'augmenter la fiabilité des robots intégrés dans des complexes industriels ou une grande sécurité de marche est demandée.
- d'adapter chaque mode de conduite à une situation particulière tenant compte de critères socio-économiques et ergonomiques.

Nos travaux se sont donc orientés vers le mode semi-automatique que nous avons classé en deux variantes :

- semi-automatique au sens commande
- mixte au sens dilemme dans le pilotage à partager entre l'homme et le robot

Le mémoire relatant l'ensemble de cette étude est structuré comme suit :

Le premier chapitre donne une vue d'ensemble des différents modes et principes de commande en robotique. Cela permet de situer notre travail et montrer l'influence des publications antérieures sur la recherche effectuée.

Un deuxième chapitre est consacré à l'étude du mode semi-automatique. Il est présenté de façon descriptive et il est ensuite placé dans le contexte d'une structure hiérarchisée. Cela nous permet de le comparer avec des modes plus courants et ainsi mieux percevoir les différences et ressemblances.

Le troisième et quatrième chapitre s'attachent à donner une résolution possible du dilemme de conduite Homme/Robot. D'abord par l'étude des différents critères pouvant influencer sur la prise de décision, puis par le choix de la méthode et enfin par la quantification de ces critères. On constate en effet que l'adoption du concept du mode mixte repose sur la démonstration d'une possibilité de solution au problème de l'interaction Homme/Robot posé sous son aspect dynamique.

Une étude expérimentale sur ce mode de conduite ne peut être envisagée sans que l'on n'ait définitivement résolu les problèmes soulevés dans ce mémoire. La poursuite de cette recherche passe alors nécessairement par la conception du superviseur, des différentes routines d'évolution et leur mise en oeuvre dans une structure hardware multi-processeur.

De plus une simulation est difficile à réaliser par le manque de loi générale dans le comportement d'un opérateur humain face à une tâche quelconque.

En revanche des manipulations ont été effectuées sur la variante semi-automatique; les résultats et les conclusions obtenus en ce qui concerne :

- le choix du mode de télémanipulation
- les algorithmes de pilotage à distance et d'évolution automatique
- l'étude et la réalisation de la phase de découplage-recouplage
- l'identification des divers paramètres du robot
- le choix des outils de commande
- la mise en place de la structure hardware

peuvent être transposés sur les deux réalisations actuellement en cours d'étude.

- *Robot de chargement - déchargement dans les abattoirs*
- *Pince à trois doigts orientée vers la saisie de pièces en vrac.*

Ces études expérimentales sont consignées dans le chapitre V.

CHAPITRE I

VUE D'ENSEMBLE DES DIFFÉRENTS MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

INTRODUCTION

Les concepteurs de robot ont eu, pour tâche principale, à rechercher et obtenir un mécanisme imitant le comportement d'êtres "intelligents" vivants. Durant cette étape on s'est ainsi beaucoup intéressé à la coordination entre la perception et la commande des mouvements du bras d'un robot (projet main-oeil), on a pu définir alors des générations de manipulateur. (générations 1, 1.5, 2, 2.5, 3). Dans ce qui suit, nous nous intéresserons au couplage Homme-robot et nous définirons trois modes de conduite dont les frontières sont rapportées à cette liaison plus ou moins lâche selon les capacités "intellectuelles" du manipulateur mécanique. Ces modes de conduite seront divisés en un certain nombre de variantes directement liées au principe de commande utilisé.

- Mode manuel

Dans ce type de pilotage l'homme est en permanence dans la boucle de commande en temps réel ou différé.

- Mode semi-automatique

L'homme intervient de temps en temps pour guider, corriger ou débloquer le système.

- Mode automatique

Dans ce cas l'homme ne sert qu'à initialiser le système.

I.1 - ETUDE DES PRINCIPES DE COMMANDE

I.1.1. - Commande manuelle

Elle symbolise un comportement maître-esclave qui en fonction du temps où a lieu cette symbiose permet de définir deux variantes :

- commande directe avec copie
- commande par télémanipulation ou indirecte avec copie

a) Commande directe avec copie

Son principe de fonctionnement en boucle ouverte est du même type que celui du robot HALL utilisé pour nos essais. Quelques modifications peuvent apparaître dans le support de stockage des informations et dans le principe de la lecture et la reproduction des mouvements.

Les supports d'enregistrement sont en général de deux types :

- . cassette
- . disque souple

Bien que les avantages et les inconvénients entre ces deux périphériques ne soient pas très nets, on peut noter que le disque souple a un excellent temps d'accès, une possibilité d'appel aléatoire par piste (intéressante pour une structure par sous programmes), un temps de lecture rapide, un faible encombrement et prix, et une compatibilité quasi-totale des dispositifs commercialisés.

En revanche la fiabilité de la cassette en milieu industriel est meilleure.

L'apprentissage de la tâche est effectuée selon un échantillonnage spatial et temporel plus ou moins rapproché selon le degré d'interpolation effectué à la reproduction. L'inconvénient de cette méthode de programmation réside essentiellement dans la gêne qu'éprouve l'opérateur à déplacer un ensemble mécanique lourd et rigide et parfois l'impossibilité pour lui de travailler à proximité du robot (milieu hostile).

La méthode d'apprentissage par télécommande élimine ainsi les inconvénients précités.

b) Commande par télémanipulation avec ou sans recopie

Les variantes concernent l'éloignement physique entre le robot et le centre de télémanipulation et le principe de commande utilisé .

- pilotage en coordonnées robot
- pilotage en coordonnées cartésiennes

Toutefois il est toujours intéressant quelque soit la variante utilisée de prendre en considération les masses, les inerties, les forces et les couples mis en jeu dans le déplacement de la structure esclave. Le "bras" maître peut alors être muni d'un retour d'effort. Celui-ci permet ainsi de restituer les mouvements stockés en tenant compte du comportement gestuel naturel de l'opérateur et d'assurer une commande dynamique des asservissements sans réseau correcteur automatique.

Notons par ailleurs que l'utilisation des microprocesseurs dans le mode de conduite manuel a apporté des avantages supplémentaires dans la reproduction de la tâche enregistrée tels que | A O I P | | 5 |

- restitution des mouvements mémorisés à vitesse ralentie, réelle ou accélérée tout en posant les problèmes de commande dynamique
- mise au point de programme par insertion suppression et assemblage de sous-tâches enregistrées.

La télémanipulation à grande distance est effectuée par onde. Une caméra et des capteurs donnent en permanence la position du robot. Une étude a été faite par LEVERANCE | 15 | sa description a été mise dans le mode semi-automatique car le robot en plus de la commande à distance possède un niveau réflexe automatique.

Ce type de commande nécessite par ailleurs un certain parallélisme spatial entre le bras maître et esclave pour éviter l'effet de désorientation de l'opérateur. Dans le cas d'une télé-manipulation à grande distance, cet effet justifie un réajustement permanent en direction des images reçues. A cet effet nous pouvons noter l'importance du capteur céphalique décrit dans le chapitre II pour ce type de tâche. Des expériences ont montré que l'opérateur est tolérant à des défauts d'orientation allant jusqu'à 60°. Ce phénomène est possible par ses facultés d'adaptation innées.

Une commande par coordonnées robot est donnée au chapitre V de ce mémoire.

I.1.2. - Mode semi-automatique

Ce mode a été le moins étudié à cause de la difficulté de communication, ou en raison de la pénalisation du système sous l'aspect de son autonomie, critère important à l'heure actuelle.

Une commande semi-automatique à grande distance a été développée par [15]. Le robot de l'Université du Wisconsin consiste en un chariot équipé d'un manipulateur à six degrés de liberté muni de capteurs de position, vitesse, de détecteurs d'obstacles et d'une caméra.

Le pilotage est effectué par un opérateur humain disposant d'une interface constituée par un moniteur TV, un clavier, une CRT et une console avec manches à balai. L'ensemble des ordres de l'opérateur sont transmis par onde sur deux lignes unidirectionnelles en full duplex.

L'opérateur est assisté par deux mini-ordinateurs :

- un mini-ordinateur de site qui réalise deux fonctions

* *Traitement et envoi de commande*

* *Réception, traitement et visualisation des informations capteurs.*

- un microprocesseur de bord orienté vers les tâches ci-après

- * Codage des informations capteur en vue de leur transmission
- * Décodage des ordres du calculateur de site
- * Contrôle de l'activité réflexe du système en cas de défauts sur la ligne ou à cause du temps de transmission
- * Détection d'erreur

Un schéma bloc du système est montré sur la figure (1.1)

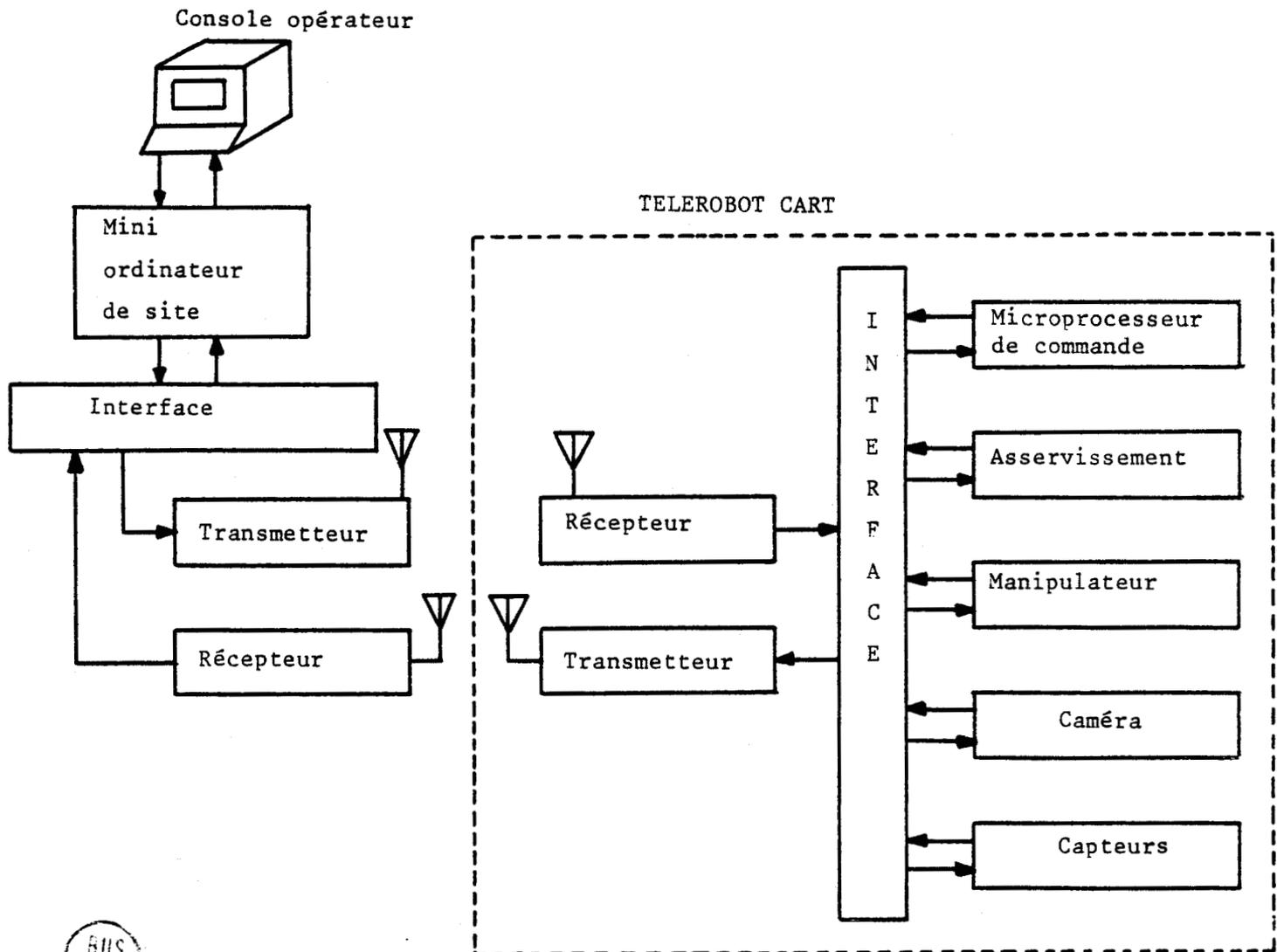


Figure (1.1) : SCHEMA BLOC DU TELEROBOT RALPH

I.1.3. - Mode automatique

Ce mode constitue le principal thème des publications actuelles. Sa concrétisation résumerait en effet à lui seul le concept de l'intelligence artificielle. La mise en oeuvre de ce mode de conduite repose sur trois niveaux principaux interconnectés (figure 1.2)

- perception
- communication
- commande

a) Perception

Le domaine de la perception est tributaire des progrès effectués par la théorie de la reconnaissance des formes tant dans le choix des méthodes, leur mise en oeuvre (digitalisation d'image, filtrage, restauration) que dans la technologie des capteurs employés (vision optique , acoustique, stéréognosie ...). Une des principales difficultés à l'heure actuelle dans la perception des objets est liée à leur représentation tridimensionnelle qui amène nécessairement une équivoque qui se traduit par une erreur de décision. La difficulté est alors souvent contournée par l'existence dans la majeure partie des cas étudiés d'un ensemble fini d'objets à analyser.

b) Communication

Quelque soit le degré de perfectionnement d'un robot, il nécessite un dialogue avec l'homme ne serait-ce que pour donner l'objectif final. De plus certains robots appartenant à cette dernière classe doivent posséder en plus du qualificatif intelligent la notion de souplesse et d'universalité. Ces deux derniers facteurs sous entendent que la mise en oeuvre d'un robot sur une nouvelle tâche soit brève, facile et accessible. Cette faculté d'adaptation peut être directement liée à la puissance et à la simplicité du langage utilisé dans la communication entre l'homme et la machine.

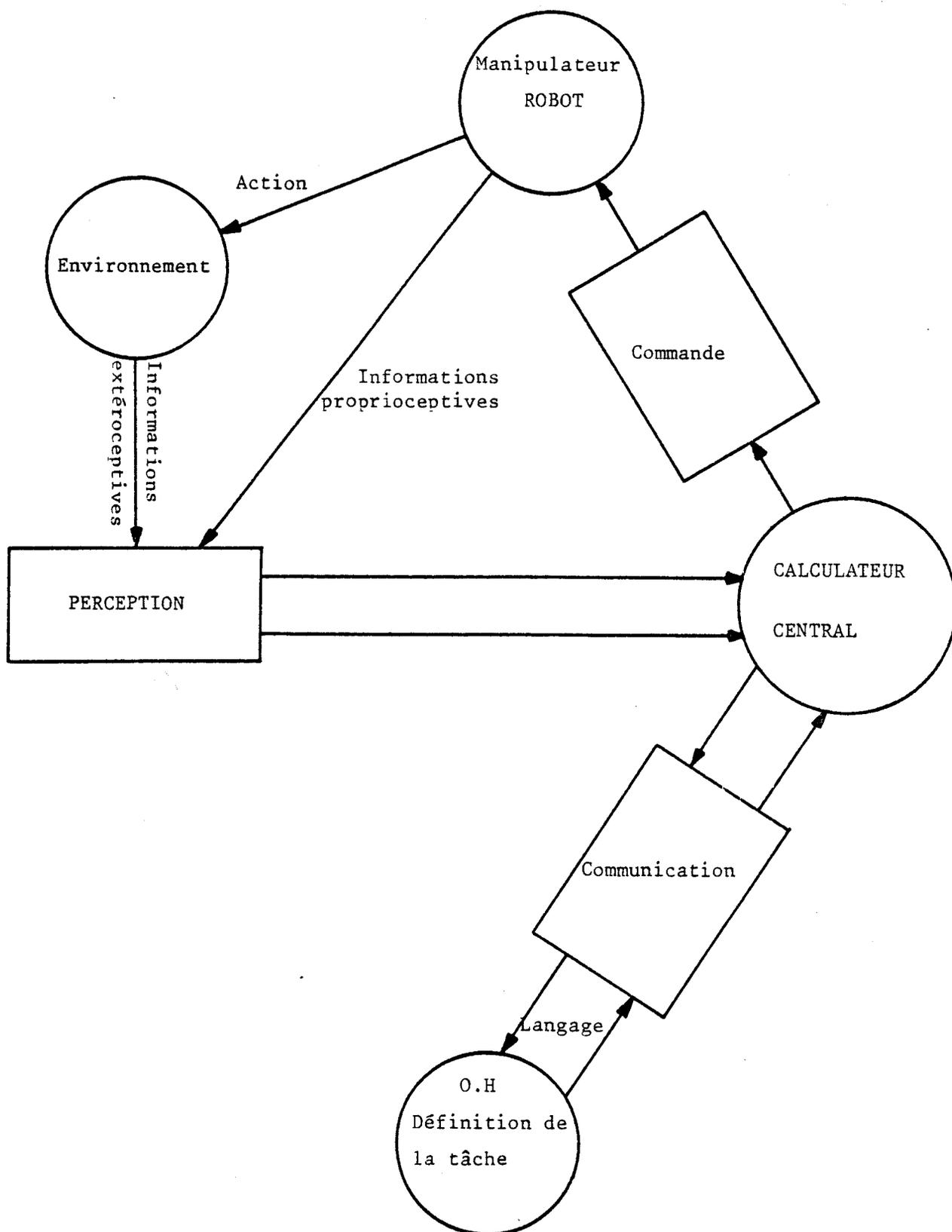


Figure (1.2) NIVEAUX INTERCONNECTES D'UN ROBOT AUTONOME



Ainsi le temps de programmation d'une tâche sera d'autant plus réduit que le langage est plus évolué.

Un certain nombre de langages intervenant à trois différents stades de la hiérarchie de commande d'un robot s'est donc développé .

- Niveau objectif | Tâche | *
- Niveau objet | Sous-tâche | *
- Niveau effecteur | algorithmique | *

Le niveau objectif :

la tâche à exécuter est décrite dans son ensemble telle qu'elle serait décrite à un opérateur humain "exécutant". Un tel langage permet la manipulation de nombreux objets à partir d'une seule instruction. Ces tâches peuvent intéresser quatre secteurs fondamentaux d'avenir pour les robots.

- * *Manutention et stockage*
- * *Contrôle de qualité de pièces*
- * *Montage d'ensembles*
- * *Intervention sur machines*

Le niveau objet :

Il correspond à la description d'une sous-tâche en rapport avec les tâches des secteurs décrits précédemment. Il peut être défini comme l'ensemble des opérations élémentaires à effectuer sur l'ensemble des objets constituant la tâche globale. Ces "super primitives " peuvent être par exemple (*SAISIR, PLACER, INSERER, VISSER ...*)

Le niveau effecteur :

Les langages intervenant à ce niveau permettent de donner des ordres de déplacement ou primitives au robot. Les instructions de ce type de langage seront par exemple (*ALLER de A à B, OUVRIR la pince, SUIVRE contour ...*)

* | | niveaux hiérarchiques équivalents décrits dans les chapitres ultérieurs de ce mémoire.

Un langage intervenant directement sur les actionneurs pourrait également être défini. Il interviendrait sur les différents degrés de liberté du robot. Nous n'avons pas retenu ce type de langage car son utilisation est fastidieuse et ne cadre donc pas avec la notion de souplesse précitée.

En dehors des difficultés de mise en oeuvre, il nous semble que le problème primordial de la formalisation d'un langage réside essentiellement dans la conception d'un vocabulaire et d'une syntaxe non spécifiques à une tâche donnée et d'instructions non redondantes de façon à ne pas limiter l'écriture d'un programme et à le rendre aussi compact que possible.

Les tableaux (1.3) (1.4) (1.5) donnent différents langages de robotique développés à l'heure actuelle.

Ces derniers sont classés selon leur niveau de puissance. On a également cru intéressant de rajouter le laboratoire ou la société concepteur, l'expérimentation dont ils ont fait l'objet et l'orientation générale du jeu d'instructions.

c) Commande

Le terme commande a été pris ici au sens large, il rassemble la décision dans la manière d'évoluer et l'évolution proprement dite qui est liée au problème de l'automatique classique (asservissement et contrôle de trajectoire). Elle repose sur deux concepts essentiels :

- . *cinématique*
- . *dynamique*

La commande cinématique dépend particulièrement du nombre de degré de liberté du robot et du type de commande désirée ou possible (position, vitesse). Elle repose sur les principes ci-dessous :

Niveau de puissance	Nom du langage	Laboratoire ou Société concepteur	Expérimentation	Orientation du jeu d'instructions	Particularités
OBJECTIF	PLANNER	MIT. Artificiel Intelligence LABORATORY CAMBRIDGE U.S.A.	Déplacement d'une boîte parmi 2, situées respectivement dans 2 salles différentes, vers la salle où se trouve le ROBOT SHAKEY	Générateurs de plans successifs élaborés à partir de : * modèle initial décrit par des prédicats (situé dans, communiquent par ...) * opérateur de haut niveau représentant une action exécutable par le robot (Aller de S_1 à S_2) * Objectif: formulation de la tâche à accomplir (1 boîte doit être dans la salle 1)	bien qu'étudié depuis 1970, aucune manipulation de robotique basée sur ce principe n'est encore opérationnelle
OBJET	AUTOPASS	IBM - Centre de recherche JT WATSON FLORIDE U.S.A.	Implantation expérimentale au centre d'IBM sur montage d'assemblage mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - changement de position (placer, insérer, pousser, déplacer...) - opération sur les outils (opérer avec outil, serrer, monter outil) - fixation d'objet (fixer, riveter, attacher) - Divers (vérifier, enclencher, déclencher périphérique) 	fait une simulation de l'exécution du montage et peut demander au programmeur de détailler certaines instructions qu'il donne en niveau effecteur
	LAMA	MIT - AIL CAMBRIDGE U.S.A.			
	RAPT	UNIVERSITE D'EDIMBURG R.F.A.	Expériences sur montage d'ensemble	<ul style="list-style-type: none"> - Description d'objet (face, trou ...) - déplacement (déplacer, trouver, aligner) - description de sous ensemble 	<ul style="list-style-type: none"> * énoncé des informations au niveau objet, programme au niveau effecteur * extension de l'APT machines outils



Figure (1.3) : Répertoire des langages de programmation robot au niveau objectif et objet.

Niveau de puissance	Nom du Langage	Laboratoire ou Société concepteur	Expérimentation	Orientation du Jeu d'instructions	Particularités
EFFECTEUR	AL	Laboratoire d'intelligence artificielle de STANFORD	UNIMATION	<ul style="list-style-type: none"> - Liaison entre référentiels locaux - Mouvement avec spécification (durée, force ...) - Contrôle (itération, procédure saut, déclaration, macro) - temps réel (synchronisation, simultanéité, traitement de défaut) - arithmétique 	<ul style="list-style-type: none"> - structure similaire à l'ALgol - extension du wave avec possibilité de contrôle de 2 bras
	ALFA	GTE LABORATORIES USA	Transfert de tubes TV entre 2 convoyeurs asynchrones	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle temps réel (comptage, attente, capteurs) - saut - mouvement - sécurité (alarme, arrêt) 	
	LAMA-S	IRIA Projet SPARTACUS		<ul style="list-style-type: none"> - Mouvement - Changement de référentiel - Contrôle (saut, retard) - entrées-sorties (capteurs) - arithmétique - définition de variable 	exécution séquentielle ou parallèle de tâche, langage évolutif par définition de macro-instructions en APL



Figure (1.4) : Répertoire des langages de programmation robot au niveau effecteur

naissance	nom du langage	Société concepteur	type	instructions	
EFFECTEUR	MAL	Institut d'Electrotechnique et Electronique de MILAN	PARTIEL.ROBOT SIGMA OLIVETTI	<ul style="list-style-type: none"> - Edition - Génération de trajectoire - Entrées-Sorties (capteurs) - Appels sous-routines - Contrôle et synchronisation 	Implantation multiprocesseur avec exécution de tâches parallèles et synchronisées
	PAL	PURDUE UNIVERSITY USA		EN COURS DE DEVELOPPEMENT	L'objectif est de tenir compte de façon plus explicite des informations reçues dans l'élaboration des trajectoires (trajectoire lissée)
	POINTY	STANFORD AIL USA	LABORATOIRE	<ul style="list-style-type: none"> - AL - instruction supplémentaire pour l'interaction H/Robot 	Instrument d'aide à la programmation en langage AL Description de l'univers par pointage des objets
	SIGLA	OLIVETTI TURIN ITALIE	MONTAGE PARTIEL DE MACHINES A ECRIRE	<ul style="list-style-type: none"> - Edition - Contrôle (arrêt, périphérique, attente, moteur) - entrées-sorties (capteurs) - appels sous-routines 	Contrôle de plusieurs bras mobiles
	VAL	UNIMATION INC CALIFORNIE USA	Chargement et palétisation ROBOT PUMA	<ul style="list-style-type: none"> - Edition - Mouvement - Arithmétique - Contrôle et saut ... - entrées/sorties capteurs 	Compensation de position de l'extrémité pour différentes dimensions et formes de l'outil
	WAVE	STANFORD AIL USA	PARTIEL	<ul style="list-style-type: none"> - Edition - Trajectoire - E/S (capteurs) - contrôle (saut et test) 	

Figure (1.5) - Répertoire des langages de programmation robot au niveau effecteur

soit $x_1, x_2 \dots x_m$ les coordonnées spécifiant la position et l'orientation de l'organe terminal et \vec{X} le vecteur à m composante appartenant à l'espace euclidien E^m .

$\vec{\theta}$ le vecteur de l'espace euclidien à n dimensions E^n et dont les composants regroupent les degrés de liberté du système.

On peut alors écrire :

$$X = F(\theta) \quad | \quad 1.1 \quad |$$

L'élaboration d'une commande par coordonnée cartésienne consiste à trouver à chaque instant la relation $\theta = F^{-1}(X)$. | 1.2 |

L'existence de la fonction F^{-1} est liée à plusieurs hypothèses et particulièrement à la notion de redondance.

α) si $m = n$

Il existe alors une véritable bijection dans | 1.1 |. L'expression de F^{-1} , si les calculs mathématiques le permettent, peut être trouvée; il s'agit dans ce cas d'une commande en position. En revanche si la complexité de l'équation | 1.1 | rend impossible le calcul de F^{-1} on utilise une relation variationnelle entre l'incrément ΔX du vecteur de la tâche et l'incrément $\Delta \theta$ du vecteur des variables généralisées. Dans ce cas la commande est appelée commande en vitesse. Elle se traduit par les équations suivantes :

$$\frac{dX}{dt} = \dot{X} = J(\theta) \dot{\theta} \quad | \quad 1.3 \quad |$$

avec $J(\theta)$ matrice jacobienne du système telle que

$$| J |_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} \quad \begin{array}{l} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m \end{array}$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \dot{X} \quad | \quad 1.4 \quad |$$

ou encore

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix} J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \\ \\ \Delta x_m \end{bmatrix} \quad | 1.5 |$$

avec $\Delta x_1 \dots \Delta x_m$ accroissements faibles.

$\beta) n > m$

Il s'agit dans ce cas d'un manipulateur redondant. Plusieurs méthodes permettent de trouver une fonction F^{-1} unique | 19 |.

$\gamma) n < m$

L'espace d'évolution du robot est inférieur à l'espace des positions possibles.

La solution consiste à trouver la position réalisant au mieux l'objectif fixé. Cette contrainte se traduit par le choix d'une fonction de coût à optimiser.

La commande dynamique permet de tenir compte des forces et des couples dus aux vitesses et accélérations engendrées par les déplacements des divers degrés de liberté du manipulateur mécanique. Sa mise en oeuvre nécessite la connaissance du modèle dynamique du manipulateur. La modélisation de ce système articulé peut être obtenue par l'intermédiaire de quatre groupes de formalisme | 19 |.

- le formalisme des équations de Newton et d'Euler
- le formalisme des équations de Lagrange
- le formalisme du travail virtuel de d'Alembert
- le formalisme des équations de Gibbs Appel

Les consignes sur les actionneurs reposent sur l'optimisation d'une fonction de coût choisie par le concepteur et adaptée à la situation. Les fonctions qui ont été le plus étudiées concernent :

- . *l'énergie cinétique dans le cas de déplacement rapide*
- . *l'énergie potentielle lorsque des charges importantes sont déplacées à faible vitesse.*

Le niveau décision permet de munir les robots de capacités de résolution leurs permettant de décider d'eux-mêmes de leur action en cas d'imprévu et ce en fonction des objectifs à atteindre. Bien que cette approche ne soit pas très développée, elle a fait l'objet de simulation | 4 | ou d'expérimentation | 9 | .

De ce fait les manipulateurs automatiques sont classés en deux groupes distincts au niveau commande

- les manipulateurs non adaptatifs
- les manipulateurs adaptatifs.

La première classe regroupe les manipulateurs devant effectuer d'une manière pré-établie un ensemble de commande. C'est le cas des robots actuels intégrés dans des chaînes de manutention. Les problèmes soulevés par ce type de manipulateur sont essentiellement liés à l'élaboration d'une trajectoire optimale, l'état final étant imposé et l'état initial connu. C'est pour cette raison qu'il est souhaitable de prendre pour cette classe des manipulateurs non redondants.

La seconde regroupe les manipulateurs capables de s'adapter à un environnement perturbé par la présence d'obstacles. RENAUD |19| montre l'importance d'avoir pour cette classe des manipulateurs redondants. Cela est nécessaire si on tient compte de l'encombrement du bras. Cette redondance pose nécessairement au niveau de la trajectoire d'évolution des problèmes dans la coordination des degrés de liberté du robot. Les méthodes employées pour imposer une trajectoire unique ont été évoquées précédemment.

La conception de la commande permettant au robot de jouir d'une certaine souplesse d'évolution et d'adaptation repose généralement sur certains concepts heuristiques. C'est le cas du projet Argos du Centre d'Informatique de Toulouse [4] dont l'objectif a été d'étudier le comportement de robots évoluant en milieu partiellement ou totalement inconnu. Ainsi en définissant des opérateurs informatiques tels que "regarder", "toucher", "marcher", "planifier", les auteurs simulent les mouvements d'un robot dans un espace parsemé d'obstacles qui décide de lui-même les procédures de contournement adéquates.

Si cette simulation permet de tirer des conclusions relatives à la stratégie globale d'évolution du robot, elle présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte un certain nombre d'hypothèses non négligeables sur le plan pratique (encombrement du robot, déplacement tridimensionnelle.)

Le laboratoire de Rennes s'est proposé de construire un robot chariot muni d'un bras télescopique tournant, évoluant dans un environnement plan inconnu. La stratégie est basée sur les réponses binaires d'un capteur tactile monté sur le bras rotatif et d'un arceau de sécurité rigide autour de la partie inférieure du chariot dont l'impact en cas de choc est détecté par un système opto-électro-nique. Un algorithme réaliste (déplacement dans le sens opposé au choc) tenant compte du but, des directions de chaque choc, permet au robot par l'intermédiaire de primitives translation d'éviter des obstacles de forme concave ou convexe à condition que le robot puisse trouver un chemin suffisamment large pour son passage.

Cet exemple montre de façon explicite la difficulté de mise en oeuvre déjà signalé. En effet du fait de l'encombrement du bras les capteurs tactiles utilisés ne permettent pas de traiter les obstacles dans leur ensemble. La solution consistant à entourer le robot d'une peau artificielle sensible permettrait peut être de résoudre le problème indépendamment des difficultés de commande qu'elle soulève.

Il existe également des solutions reposant sur une modélisation mathématique des objets et des obstacles qui permettent d'obtenir cette faculté d'adaptation | 25 |.

- Déplacement "labyrinthique" dans un univers modélisé sous forme de primitives géométriques correctement assemblés.
- Remplacement des objets par des formes géométriques circonscrites (sphères, cuboïdes, polyèdres) qui permet de calculer l'intersection entre le volume occupé par les obstacles et le volume de l'objet manipulé lors d'un déplacement élémentaire. Une intersection nulle permet de confirmer la trajectoire élémentaire (en général segment de droite) élaborée.

I.2 - EVOLUTION SCHEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE

Nous pouvons résumer les différentes tendances progressives de la robotique par les schémas des figures (1.6) (1.7) (1.8) . Il est à noter que cette évolution dans le contrôle homme-tâche est la conséquence de deux nouvelles disciplines :

- *l'ergonomie*
- *la robotique*

I.2.1. - Exécution de la tâche par l'homme

" Régulateur homme"figure (1.6)

Cette étape a permis une connaissance de l'homme sous l'aspect ergonomique et fonctionnel. On a pu, de cette façon tirer certaines conclusions sur le comportement intelligent de l'homme qui ont été

transposées à la conception de robot autonome.

I.2.2. - Exécution de la tâche par une combinaison homme-robot figure (1.7)

"Régulateur homme-machine"

L'opérateur humain intervient en tant que superviseur (reconnaissance d'un environnement complexe, consigne de haut niveau, correction de décisions inadaptées faites par le calculateur de processus). Pour des raisons de sécurité, les décisions de l'opérateur peuvent être surveillées par un calculateur qui joue le rôle de superviseur dans le pilotage manuel.

Ce mode de fonctionnement se rencontre surtout en milieux hostiles et ou éloignés et lorsque l'environnement et ou la tâche à effectuer sont complexes. Dans le cas de système à auto-apprentissage, le régulateur effectuant le contrôle participera graduellement et de façon autonome à l'exécution de la tâche. Ici l'homme "supervise, initie et inhibe". On voit qu'il joue le rôle de maître et est en dehors de la boucle de contrôle directe.

I.2.3. - Exécution de la tâche par un robot

"Régulateur robot" figure (1.8)

Le passage du premier mode de fonctionnement au second à tendance à diminuer la fatigue sensorielle et motrice de l'opérateur, mais sa présence pénalise l'évolution du système qui n'est plus tout à fait autonome.

Le passage du second mode de fonctionnement au troisième va justement, dans ce sens. Cependant à l'heure actuelle, malgré certaines tentatives de générateurs de plans d'action basés sur un formalisme heuristique, les performances de ces systèmes restent très limitées.

Nous nous proposons maintenant de décrire un contrôleur homme-machine dans lequel l'homme est "subdivisé" en deux grands concepts :

* homme superviseur (H.S.)

* homme capteur (H.C.)

- l'homme superviseur symbolise l'ensemble de ses facultés intellectuelles lui permettant de contribuer à la prise de décision de haut niveau.
- l'homme capteur représente l'ensemble de ses capacités motrices et sensorielles nécessaires au pilotage du robot dans un environnement quelconque.

Ces deux notions vont permettre l'introduction de deux variantes au sein du contrôleur Homme-machine.

- mode semi automatique : il est représenté sur la figure (1.9). On constate qu'il ne comprend que deux niveaux hiérarchiques internes. Algorithmique et asservissement. La partie décision est entièrement réalisée par l'homme superviseur (définition de la tâche, décision réfléchie...)
- mode mixte : Au lieu d'avoir une structure maître-esclave comme dans la figure (1.7), la structure adoptée dans le mode homme capteur-machine est une structure maître-maître, dans laquelle le dilemme est résolu par le calculateur en fonction de critères spécifiques, tels que nature de la tâche, l'ergonomie et l'environnement.

Ce modèle de conduite sera dénommé " mode mixte " figure (1.10)

Figure(1.1) : REGULATEUR HOMME

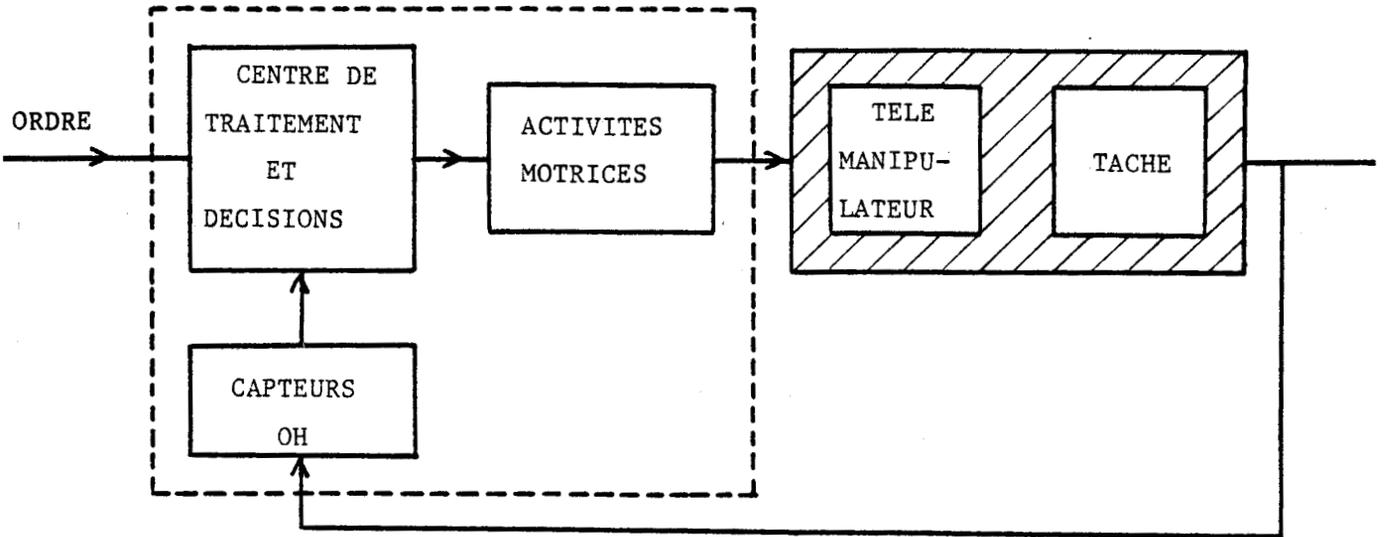


Figure (1.2) : REGULATEUR HOMME-MACHINE

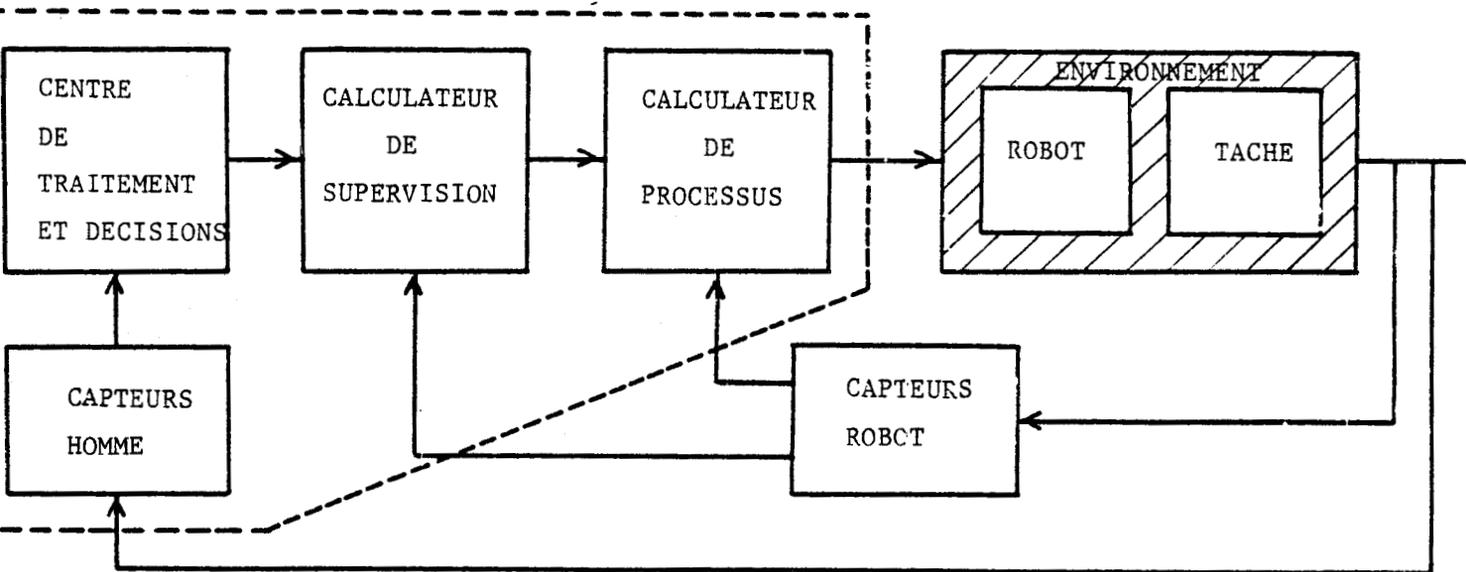
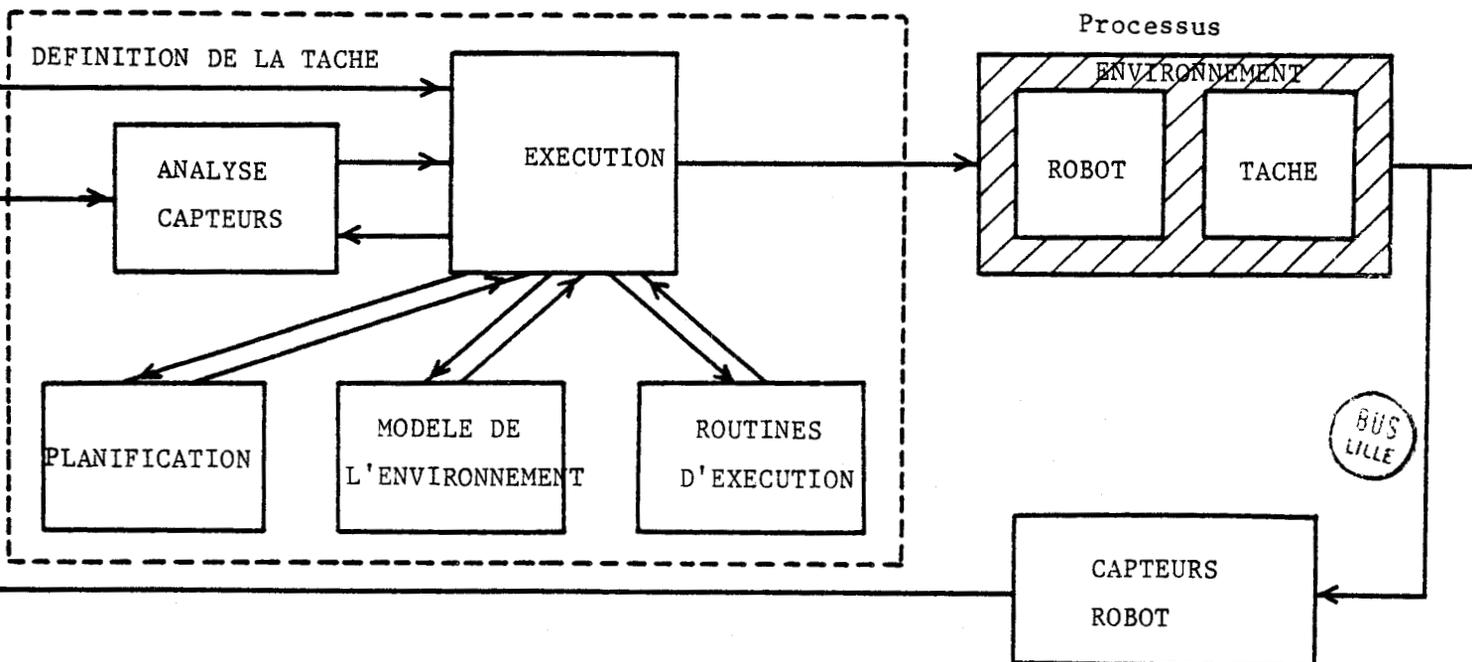


Figure (1.3) : REGULATEUR ROBOT



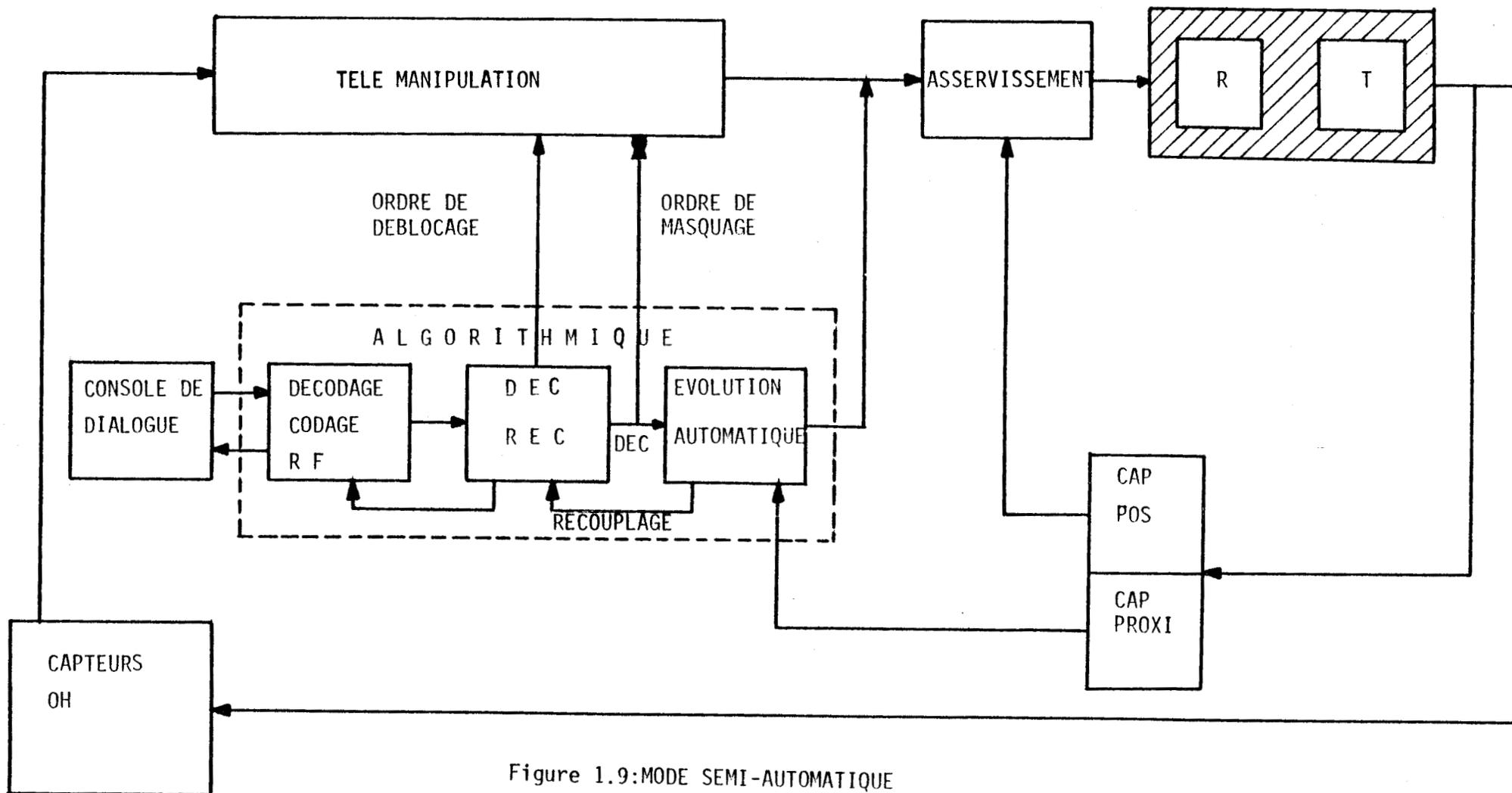
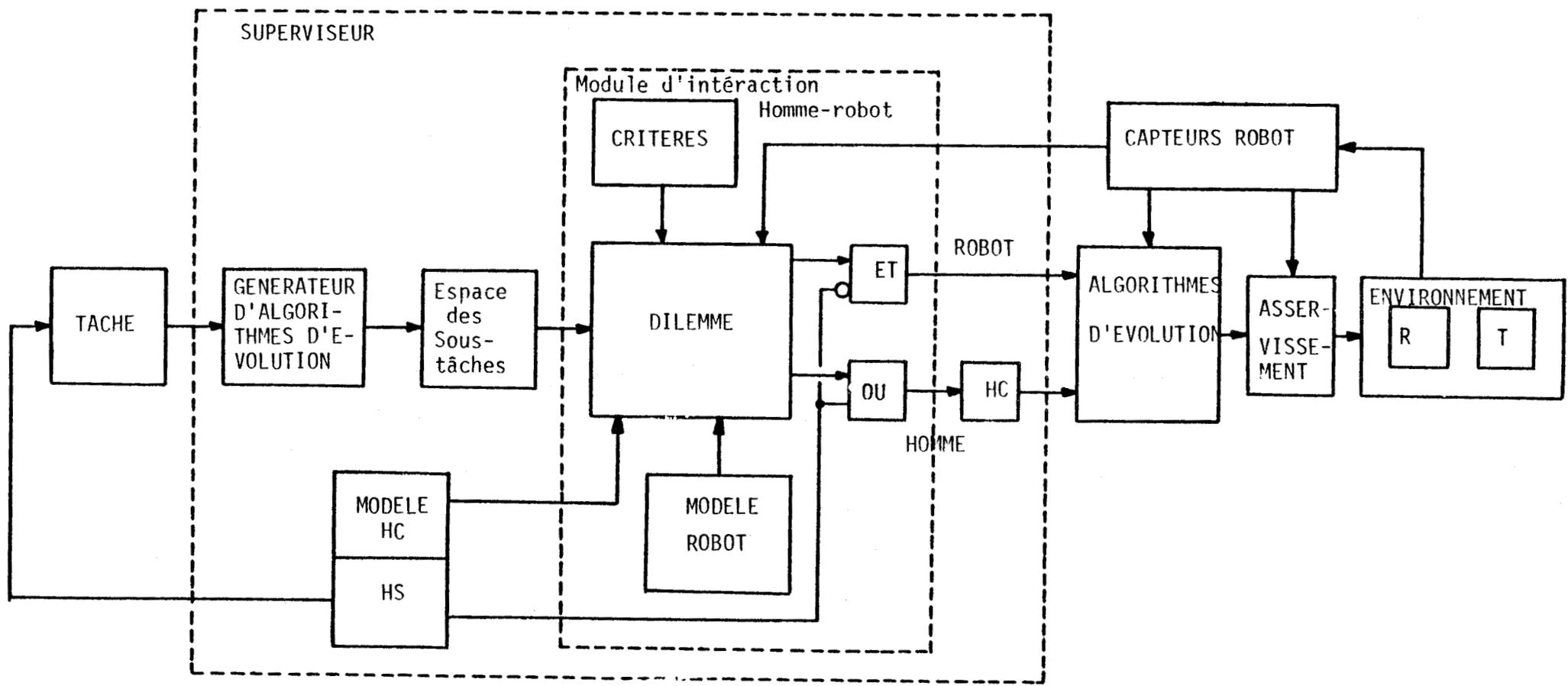


Figure 1.9:MODE SEMI-AUTOMATIQUE





HC Homme-captain
HS Homme-superviseur

Figure 1.10 : Mode mixte



CONCLUSION

Le comportement d'êtres vivants intelligents est donc assez bien imité. Une synthèse des travaux de publication pourrait constituer le premier volet de l'intelligence artificielle qui permettrait une adaptation et une prise de décision face à un environnement évolutif. Le deuxième volet de l'intelligence qui n'a pas encore été abordé est celui de la "conception créative". Celui-ci sera probablement développé dans les prochaines décénies.

Nous remarquons également que très peu de publications ont été consacrées au mode semi-automatique en général. Les prochains chapitres apporteront ainsi une contribution en robotique dans l'étude des systèmes de commande avec supervision de l'homme.

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

- 1 - AUDO S., F. KOZAWA, K. ENOMOTO, A. TSUCHIMASHI, T. KOGAWA,
N. WORKS (1978)

 " *Computer controlled industrial robot for painting* "
 Symposium robotique Stuttgart 689-700

- 2 - BAUSANO T., A. BURONZO (1979)

 " *Sigla - Olivetti robot programming language* "
 Méthodes et langages de programmation des robots industriels
 Séminaire IRIA Juin 1979

- 3 - BLEAN R.W, G.J GLEASON (1977)

 " *Computer assisted manipulator training* "
 Congrès on decision on control New-Orleans : 731-734

- 4 - CAROL M., B. FADE, H. FARRENY (1976)

 " *Etude en simulation des stratégies de contrôle d'un robot* "
 Automatisme Mai 1976 : 162-171

- 5 - DAVID J. (1979)

 " *Analyse des procédés d'apprentissage d'un robot à peindre* "
 A.O.I.P.
 Séminaire IRIA Rocquencourt France : Méthodes et langages
 de programmation des robots industriels.

- 6 - FOURNIER A. (1980)

 " *Génération de mouvements en robotique* "
 Applications des inverses généralisées et des pseudo-inverses
 Thèse d'Etat - Université du Languedoc.

- 7 - FU K.S. (1971)

 " *Learning control systems and intelligent control systems* "
 IEEE Transaction on automatic control 70-72 Février

- 8 - GINI G., M. GINI (1978)
" Object description with manipulator "
The Industrial robot Mars 1978 32-34

- 9 - JULIERE M. L. MARCE, H. PLACE
*" Réalisation d'un robot mobile capable d'atteindre un
objectif dans un univers parsemé d'obstacles "*
Rapport scientifique final. A.T.P. CNRS 1980

- 10 - KHALIL W., A. LIEGOIS, A. FOURNIER (1980)
" Commande dynamique de robots "
RAIRO Automatique/Systems Analysis and Controlled 189-201

- 11 - KHATIB O., M. LIBRE, R. MAMPEY
" Fonction décision commande d'un robot industriel "
Rapport scientifique final - A.T.P. CNRS 1978

- 12 - KURAU A. (1979)
*" Why the programming language PEARL could be a useful
tool for programming a computer controller manipulator "*
Séminaire IRIA Rocquencourt France
Langages et méthodes de programmation des robots industriels.

- 13 - LATOMBE J.C., A. LUX (1979)
" Intelligence artificielle et robotique industrielle "
Le Nouvel Automatismes Mai 1979- 37.44

- 14 - LATOMBE J.C. (1979)
*" Une analyse structurée d'outils de programmation pour
la robotique industrielle "*
Séminaire IRIA Rocquencourt France

- 15 - LEVERANCE C., R.A. NORTHOUSE (1977)
" A microprocessor based telerobot "
Congres on decision on control New-Orléans : 66.71

- 16 - LEWIS R.A. (1977)
" Adaptative control of robotic manipulator "
JET propulsion laboratory TR 5 3 : 30 : 743-748

- 17 - PAUL R. (1979)
*" Manipulator programming language development in the
United states "*
Séminaire IRIA Rocquencourt France

- 18 - POPPLESTONE R.J., A. P. AMBLER, I. BELLOS (1978)
" Rapt : A language for describing assemblies "
the Industrial Robot Septembre 1978 131-137

- 19 - RENAUD M.
*" Contribution à l'étude de la modélisation et la commande
des systèmes mécaniques articulés "*
Thèse de Docteur Ingénieur U.P.S TOULOUSE (1975)

- 20 - SHIMANO B. (1979)
" VAL : An industrial robot programming and control system "
Séminaire IRIA Rocquencourt France
Langage et méthodes de programmation des robots industriels

- 21 - VIDAL P., D. JOLLY , P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI,
M. EDEL (1980)
" Hierarchical control and man-robot structure "
3° Congresso brasileiro de automatica Rio de Janeiro Septembre 1980

- 22 - VIDAL P., D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI
" Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain "
Rapport Scientifique final ATP CNRS 1980

- 23 - WANG S.J. (1976)
" A reprogrammable industrial robot control system "
IEEE Man and Cybernetic vol SMC 6 n° 570-579

- 24 - WHITNEY D.E, (1969)
 " *Resolved motion rate control of manipulators and human
 prostheses* "
 IEEE Man-Machine Systems vol 10 n°2 47-52

- 25 - WILL P. (1979)
 " *Very high level languages for robots* "
 Séminaire IRIA Rocquencourt France
 Langage et méthode de programmation des robots industriels

- 26 - WILL P.M., J.D. GROSSMANN (1975)
 " *An experimental system for computer controlled mechanical
 assembly* "
 IEEE transactions on computers vol.C n°9 879-887

- 27 - ZAMBUTO D.A., J.E. CHANEY (1976)
 " *An industrial robot with mini computer control* "
 the industrial robot décembre 1976 : 155-163

CHAPITRE II

ÉTUDE DES SYSTÈMES DE COMMANDE AVEC SUPERVISION

INTRODUCTION

Les systèmes de commande avec supervision se situent entre les systèmes de commande incluant l'homme dans la boucle et les systèmes purement autonomes. La symbiose Homme-robot est rendue nécessaire pour les raisons ci-dessous qui sont en faveur de l'une ou l'autre des composantes:

- * le manque de fiabilité de l'opérateur dans les tâches complexes ou répétitives.
- * la présence d'un environnement hostile ou dangereux.
- * la difficulté de mise en oeuvre d'un véritable contrôleur robot autonome.
- * l'utilisation des meilleures facultés et possibilités de l'homme et de la machine.

Nous allons développer ce type de commande sur deux modes de conduite.

- mode semi-automatique

- mode mixte

Dans le premier l'homme intervient pour simplifier la technologie et la commande du robot.

Dans le second l'opérateur intervient comme une ressource complémentaire devant débloquer le système. Ce mode, vu les difficultés qu'il entraîne est décrit de façon générale et est placé dans le contexte d'une structure hiérarchisée. En effet sa complexité mettant divers problèmes en jeu nécessite le partage de la stratégie d'ensemble en sous-problèmes. C'est cette décomposition en niveaux de complexité croissante qui sera dénommée structure hiérarchisée. Ces deux présentations permettent de bien le situer avant de le comparer aux autres systèmes de commande.

II.1 - DESCRIPTION GENERALE DU MODE SEMI-AUTOMATIQUE

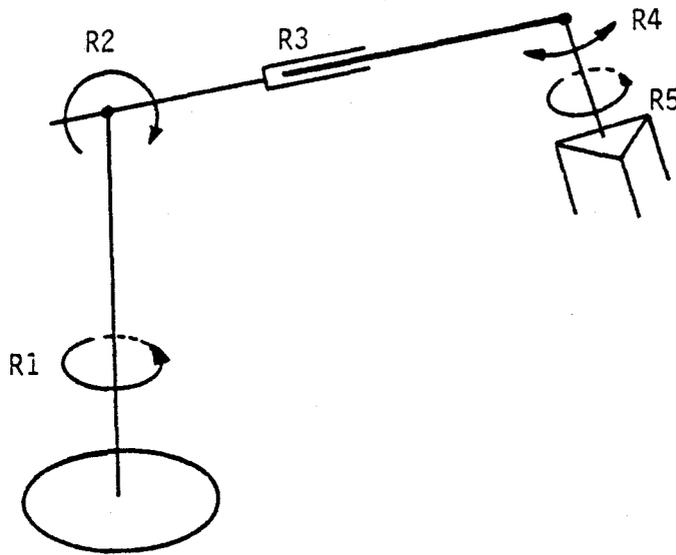
Afin d'éviter l'opération complexe de génération de modèle réactualisé en permanence une approche en vue de la saisie d'un objet par exemple, pourra d'abord être effectué par des capteurs de commande dirigés par un opérateur humain jusqu'au moment où des capteurs de proximité de précision prendraient la relève. Ce principe de commande sera appelé mode semi-automatique. Ainsi les grands mouvements, les contournements d'obstacles sont exécutés manuellement alors que les tâches ne nécessitant que des informations issues d'une zone restreinte sont exécutées automatiquement. L'approche faite par l'homme se conçoit comme une génération de plans d'action à distance, comme nous pourrions le faire à partir de capteurs à grands rayons. L'intervention humaine ne pénalise pas nécessairement la durée d'exécution de la tâche finale, mais simplifie généralement dans bien des cas la technologie de l'ensemble. Une telle introduction de l'homme dans la structure de commande nous amène à considérer deux phases principales de conduite des manipulateurs.

II.1.1. - Phase de conduite à distance

Il s'agit d'une approche vers une zone de travail qui est faite de différentes façons :

a) manuelle

L'opérateur pilote le robot par l'intermédiaire de potentiomètres selon trois déplacements principaux intégrés dans deux manches à balai et un potentiomètre linéaire tel que le montre le schéma ci-dessous :



Ces deux manches à balai agissent respectivement sur le bras en site et azimuth, sur le poignet en site et rotation. Le potentiomètre linéaire agit uniquement sur l'extension du bras.

Il est à noter que d'autres supports de télémanipulation manuelle auraient pu être choisis (clavier, boutons poussoirs ...).

b) céphalique

Les mouvements de la tête d'un opérateur permettent de commander deux sinon trois degrés de liberté de manière indépendante (droite-gauche, haut-bas, avance-recule par exemple). Les autres organes moteurs restent ainsi libre.

Plusieurs sortes de commande ont été développées : en position, vitesse, pas à pas etc ...

c) vocale

Elle est dans son aspect commande effectuée à partir d'un décodage de la parole (sept mots clés gauche-droite, haut-bas, avant-arrière, stop), analogue à la commande céphalique.

II.1.2. - Phase de conduite locale

Durant cette phase on utilise des algorithmes de recherche automatique d'objet dans un espace limité à la zone d'action des capteurs de proximité. Cette recherche automatique peut se décomposer en deux fonctions (pouvant être intimement imbriquées).

- déplacement
- positionnement poignet

La fonction positionnement est donnée par les capteurs de la pince ainsi que par une caméra-solide.

La fonction déplacement est assurée par l'intermédiaire d'un module transformation de coordonnées et de suivi d'objet.

II.1.3. - Principe de découplage

Ainsi si l'on suppose, effectuée, l'une des procédures indiquées précédemment à savoir que le robot se dirige vers la zone de travail, il faut que ses capteurs de proximité puissent le rendre autonome à un instant donné. Cela consiste à ne plus prendre en compte les consignes humaines à partir du moment où toutes les détections au sens large sont enregistrées. En pratique cela revient à examiner périodiquement l'état des différents capteurs de proximité et à les comparer avec leurs seuils

(distance, valeur logique, facteur de vraisemblance) respectifs évalués auparavant. Dès que les résultats obtenus correspondent à toutes les détections nécessaires à la manipulation, on quitte le programme d'approche. Cette étape sera dénommée phase de découplage. Nous donnons ci-après le principe et l'organigramme qui en découlent fig.(2.1) (2.2) et(2.3)

Il est à noter que l'organigramme de découplage est basé sur la réalisation simultanée de n évènements vrais selon une origine cyclique quelconque. Pour vérifier la condition de simultanéité, on suppose que le temps de calcul permettant de tester les n conditions C_i est suffisamment court de façon à ne pas altérer une ou plusieurs propositions affirmatives antérieures relatives à l'ensemble $\{ C_0, C_1 \dots C_{n-1} \}$.

Une réalisation pratique de ce mode de conduite a été effectuée sur le robot HALL. Les résultats ont été consignés dans le chapitre V de ce mémoire.

Les figures (2.4) (2.5) montrent les interactions entre les différentes phases décrites et les modes de transition entre-elles selon qu'il s'agisse d'une commande en position ou en vitesse.

II.2 - ETUDE DU MODE MIXTE

II.2.1. - Etude descriptive

Au lieu de limiter l'intervention de l'homme à l'approche et au contournement d'obstacles, nous avons pu concevoir un mode de conduite où la décision d'intervention est partagée entre le robot et l'homme. Ce mode est appelé mode mixte. Si le partage du travail dans le mode semi-automatique a été effectué en ne tenant compte que de l'aspect technologique, on ne peut le faire dans le mode mixte sans prendre en compte l'aspect ergonomique devant la participation active de l'opérateur. Nous avons développé un principe permettant

Figure(2.1)Principe du mode semi-automatique

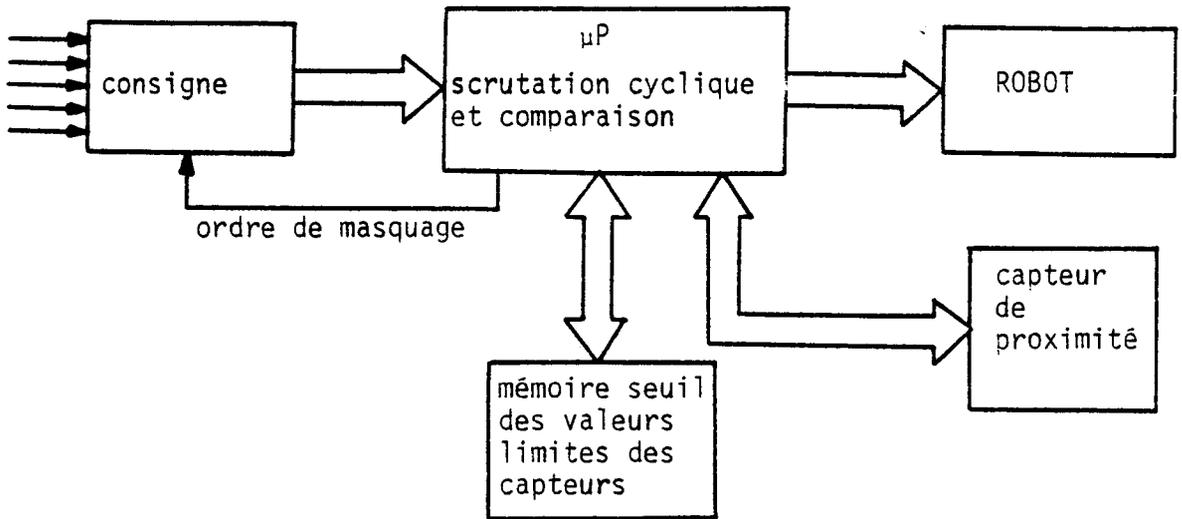
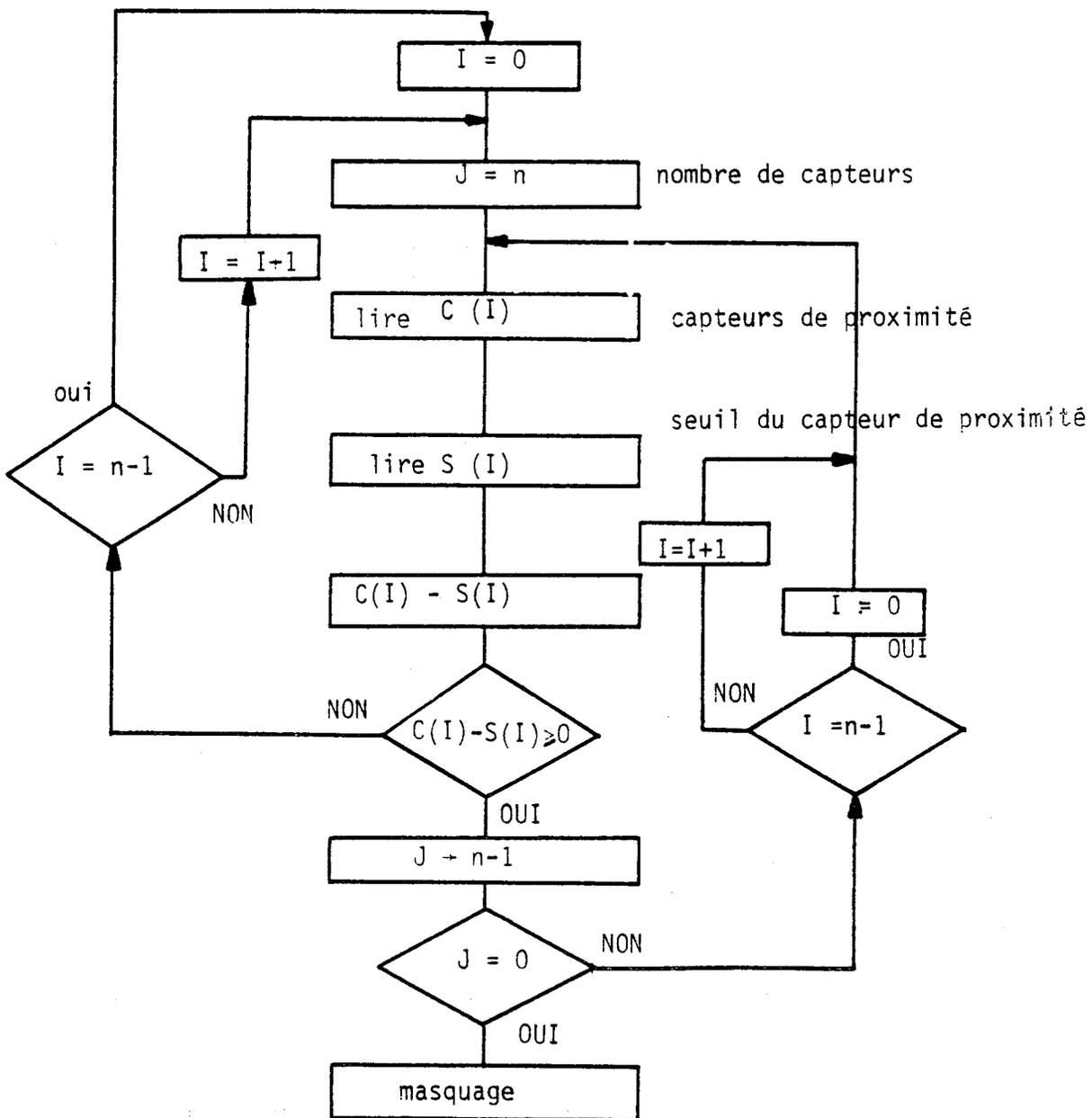


Figure (2.2) : ORGANIGRAMME DE DECOUPLAGE



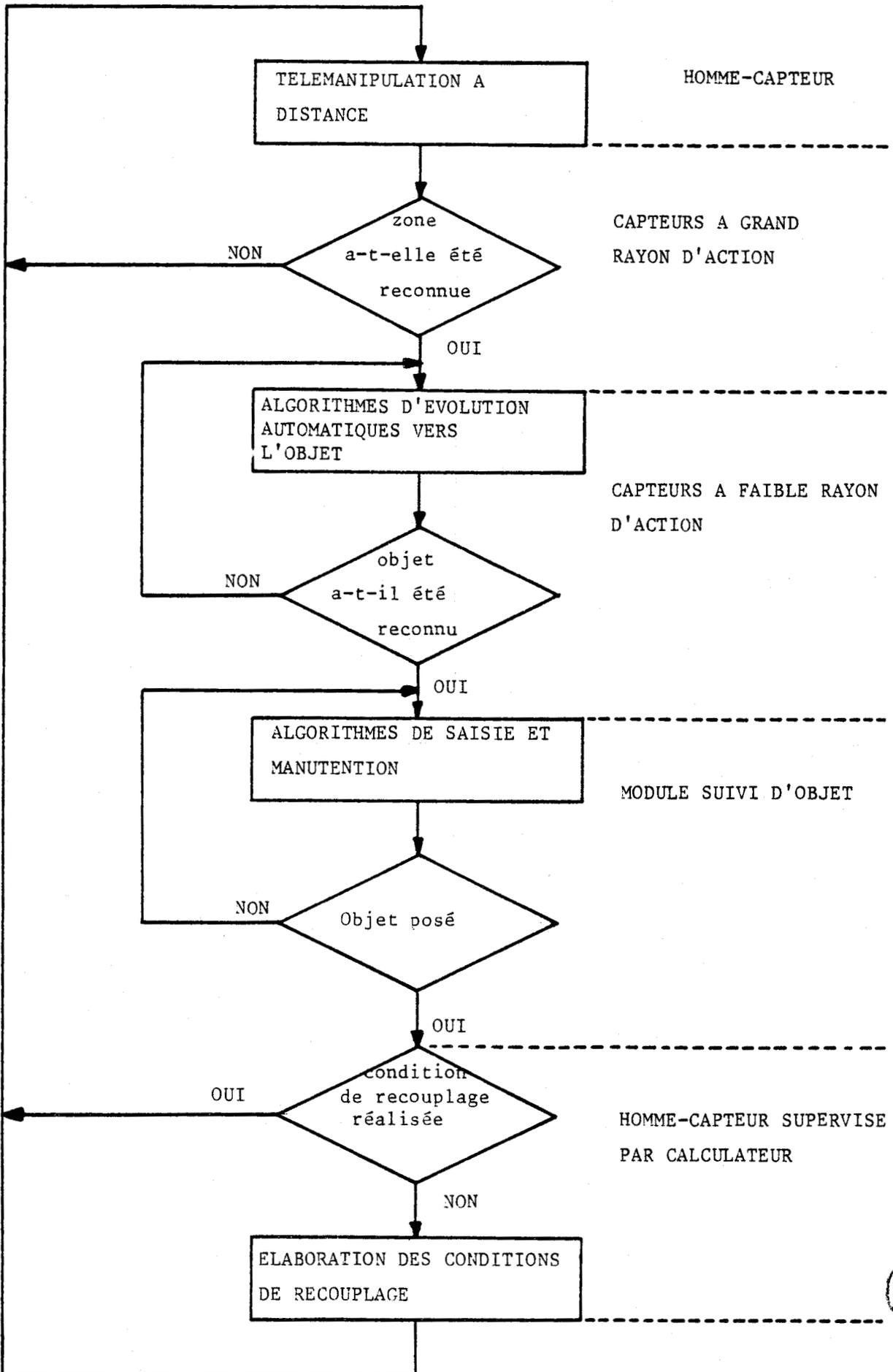


Figure (2.3) ORGANIGRAMME GENERAL DU MODE SEMI-AUTOMATIQUE

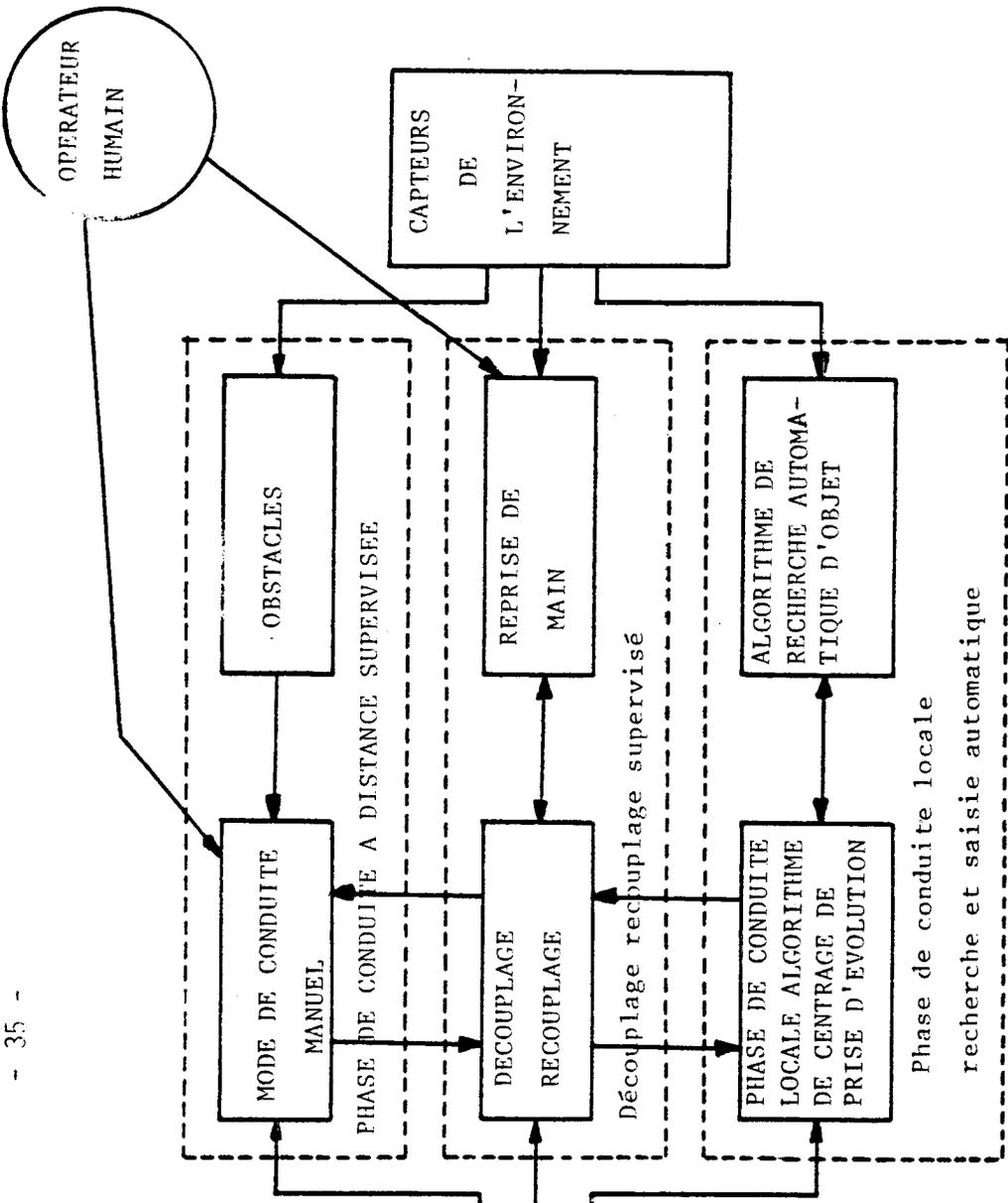


Figure (2.4) : PHASES D'ACTION

BUS LILLE

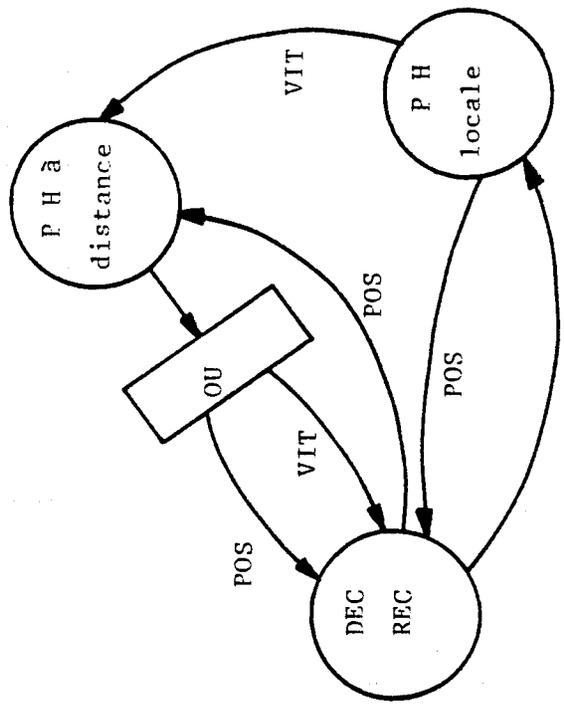
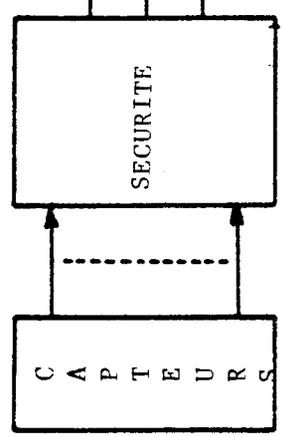


Figure (2.5) : TRANSITIONS ENTRE PHASES

de résoudre le dilemme homme-robot du mode mixte. C'est par une combinaison d'informations issues de capteurs d'environnement pris au sens large et d'états du système homme-machine que des algorithmes d'évolution peuvent être élaborés. Parmi ces capteurs, nous incluons les capacités sensorielles de l'homme. Les différentes phases de conduite sont les mêmes que celles décrites dans le mode semi-automatique. La différence réside essentiellement dans le passage d'une phase de conduite à l'autre. Au lieu de prendre comme critère le maximum de distance de vision des capteurs et le taux de fiabilité de reconnaissance, le critère sera élaboré en tenant compte d'un certain nombre de paramètres appartenant aux deux composantes. Ainsi toute tâche sera réalisée par un ensemble de " va et vient " entre l'opérateur et la machine. Si nous comparons un ensemble de capteurs élaborés, nous permettant d'assurer une vision dans tout le domaine d'action du manipulateur, fonctionnant en autonome, l'intégration de l'opérateur dans la boucle de commande du mode mixte allège la structure hardware et software et augmente l'universalité du système. En effet, lors de la phase de conduite locale, les facultés de supervision de l'homme sont plus à même d'intervenir face à des événements imprévus. La présence du dilemme homme-robot nécessite la présence d'un module d'interaction devant guider ce choix. Ce module décidera du passage d'un mode de conduite à un autre. Cette étape appelée phase de découplage - recouplage sera développée dans les prochains chapitres.

II.2.2. - Etude de la structure hiérarchisée

a) Structure software

La structure proposée comporte un superviseur utilisant les capacités motrices et sensorielles du robot. Ces dernières assurent la modélisation dynamique de l'environnement au fur et à mesure de son évolution. Il est possible ainsi d'atteindre progressivement le but fixé. Le logiciel est constitué d'un ensemble de programmes

étagés en autant de niveaux allant de l'acquisition de données issues des capteurs aux fonctions de décision puis d'exécution.

On peut ainsi distinguer trois niveaux hiérarchiques principaux :

- *superviseur*
- *algorithmique*
- *asservissement ou impression*

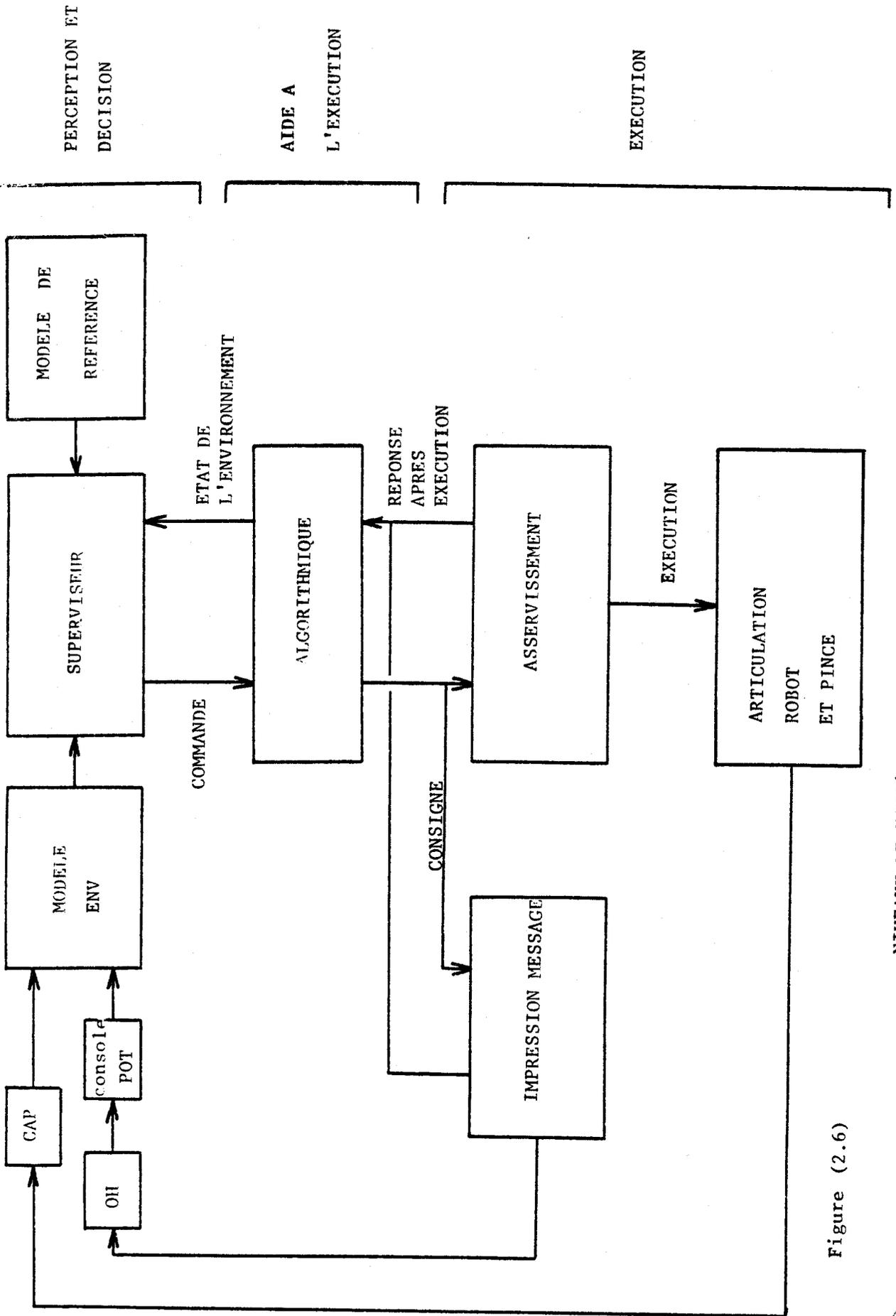
Ces niveaux sont montrés sur la figure (2.6).

α) Superviseur

C'est une combinaison software/opérateur humain superviseur (H.S) devant élaborer les directives principales nécessaires aux processus de niveaux inférieurs. Il doit tenir compte du modèle de l'environnement, du modèle de référence et des décisions de l'homme. Ainsi, est affectée à ce niveau la fonction " Perception et Décision ".

Le software est élaboré à partir d'un langage de haut niveau tenant compte de la présence de l'opérateur humain dans la boucle de processus. Ce langage est baptisé " langage universel d'interaction homme-robot " (L U I H/R). Il intervient selon deux niveaux parmi la hiérarchie précédemment définie.

- niveau objet : A ce niveau le langage intervient pour effectuer la
===== planification de l'objectif souhaité. Il est décodé avant d'être compilé. Son exécution dépend du partage des tâches effectuées par l'homme en télémanipulation à grande distance ou en phase de conduite locale et des possibilités d'évolution automatique du robot.



NIVEAUX DE HIERARCHISATION

Figure (2.6)



Les instructions sont du type :

* Instructions de télémanipulation à distance

- Aller vers la zone X
- Déplacer le manipulateur jusqu'à la rencontre d'un obstacle
- Aller jusqu'à rencontrer la pièce X
- Si l'obstacle est contourné faire action Y

* Instructions de manipulation d'objets

Les instructions de la zone locale sont du même type que celles des langages décrits auparavant si ce n'est la restriction des mouvements effectués dans cette zone.

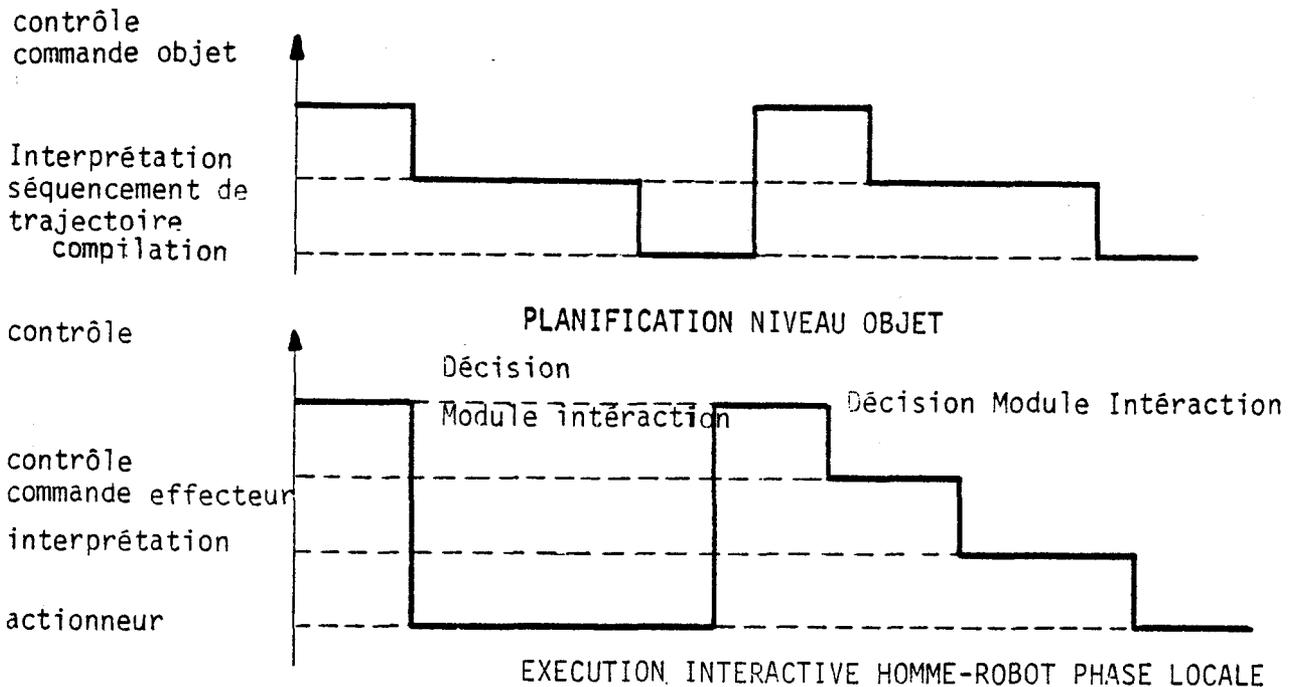
* Instructions de contrôle et déclaration

Elles comprennent les instructions classiques de ce type et incluent des déclarations mentionnant qu'une partie de programme va directement être effectuée en langage effecteur par l'opérateur.

- niveau effecteur : A ce niveau le langage intervient pour effectuer la
===== part de la tâche incombant à l'opérateur dans la zone locale. Ce langage effecteur est directement interprété et exécuté en temps réel. Il comprend des instructions de déplacement classiques tenant compte du contrôle visuel que peut faire directement l'opérateur ou par l'intermédiaire de réponse de capteurs sur la pince.

- Déplacement en ligne droite jusqu'à l'ordre STOP
- Fermeture de la pince avec serrage So

L'échelonnement de ce langage dans le temps est le suivant :



On a choisi un langage au niveau effecteur dans la phase de conduite locale au lieu d'une télémanipulation directe car il est plus précis, mieux contrôlable, plus intelligent, et moins routinier.

Le superviseur comprend quatre modules, de décision ou perception, principaux.

α-1) Générateur de plan d'action

Ce module regroupe :

le modèle d'environnement qui est interprété à partir des :

- capteurs de l'environnement
- positions du robot
- console potentiométrique

Le modèle de référence définit l'ensemble des combinaisons d'évolution préétablies et/ou prédites de façon heuristique. Le séquenceur de tâches décompose l'objectif en un certain nombre de tâches par l'intermédiaire du modèle de référence. Ce séquenceur tient compte de la sécurité du matériel tout en donnant une autonomie au système dans l'élaboration des plans d'action. Ce séquenceur vérifie en permanence la fin de la tâche pour prévoir la tâche d'enchaînement. Ces tâches peuvent être séquentielles ou parallèles.

$\alpha-2$ Module acquisition

Il reflète l'état du robot et de l'environnement. Il est donc fonction des divers capteurs dont on dispose.

Cet environnement peut être le reflet direct de la mesure du capteur ou son image obtenue par l'extraction de propriétés et paramètres appropriés (description des contours d'un objet ...).

$\alpha-3$ Module interaction homme-robot

Il décide du passage du mode de conduite à distance au mode local et inversement : découplage - recouplage.

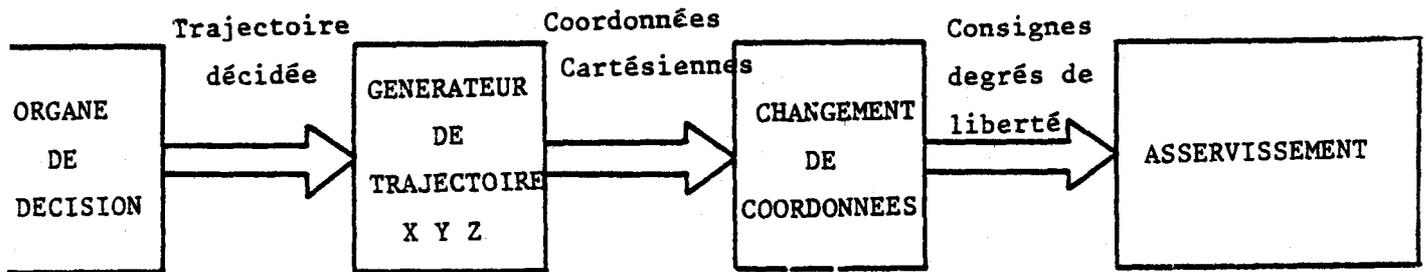
Il avise l'opérateur des décisions prises et permet le branchement à des routines d'impression donnant les actions nouvelles à exécuter de façon à atteindre l'objectif fixé.

$\alpha-4$ Module des critères d'évolution

En fonction de l'état de l'environnement, il génère les grandes lignes du déplacement, ex. : à gauche, à droite, avancer en ligne droite, déplacement selon une trajectoire spécifique ...

L'élaboration d'une trajectoire se fait alors en deux étapes :

- élaboration d'une suite cadencée de valeurs $x, y, z, \psi, \theta, \lambda$ dont les évolutions sont définies par la valeur des paramètres de la trajectoire décidée.
- conversion de ces valeurs en consignes robot. Cette étape est élaborée par l'intermédiaire du transformateur de coordonnées dans le niveau algorithmique.



Les problèmes posés par cette génération sont essentiellement liés à des problèmes de langage et de grammaire.

En effet, il faut définir un ensemble d'éléments de trajectoire pouvant, par regroupement, constituer n'importe quelle trajectoire souhaitée et d'autre part, savoir quels sont les paramètres à fixer pour déterminer complètement chacun de ces éléments.

L'étude actuelle repose sur l'idée que l'on peut à priori définir suffisamment une trajectoire par une suite de vecteurs vitesse respectivement liés aux points de passage impératifs. Ceci permettrait de limiter à un seul type les informations à recevoir en provenance du niveau supérieur et faciliterait donc les échanges entre processeurs. L'ensemble des vecteurs de commande sont surveillés. En cas d'obstacle, une procédure de contournement est mise en oeuvre.

β) Algorithmique

Il comprend quatre modules :

- commande en position
- commande en vitesse
- routine de visualisation
- évolution automatique

C'est un niveau dans lequel les différentes formes de mouvement du manipulateur sont mémorisées ou élaborées. Il est donc constitué par un ensemble de programmes traitant les données générées par le modèle de l'environnement de façon à fournir les consignes directement exécutables, aux actionneurs et organes de visualisation.

Si les trois premiers modules n'appellent pas de remarques particulières, le module d'évolution automatique peut être défini comme la décomposition d'une trajectoire en éléments simples "incréments" donnés aux asservissements qui, vus dans leur ensemble, correspondent à la directive donnée par le superviseur. Ce niveau peut agir sur chacune des articulations de façon séparée ou imbriquée. Il peut également agir directement sur les actionneurs ou par l'intermédiaire d'un transformateur de coordonnées.

γ) Mode interruptif

C'est une procédure réservée exclusivement à la sécurité ou à une demande spontanée devant être satisfaite immédiatement (telle que mise en marche, enregistrement d'un point de l'espace d'évolution...).

L'organisation de cet ensemble logiciel est donnée sur la figure (2.7.)

b) Structure Hardware

Le Hardware peut être défini comme l'ensemble du matériel nécessaire à une implantation du logiciel.

Celle-ci comprend donc :

- . la structure multi microprocesseur
- . les capteurs

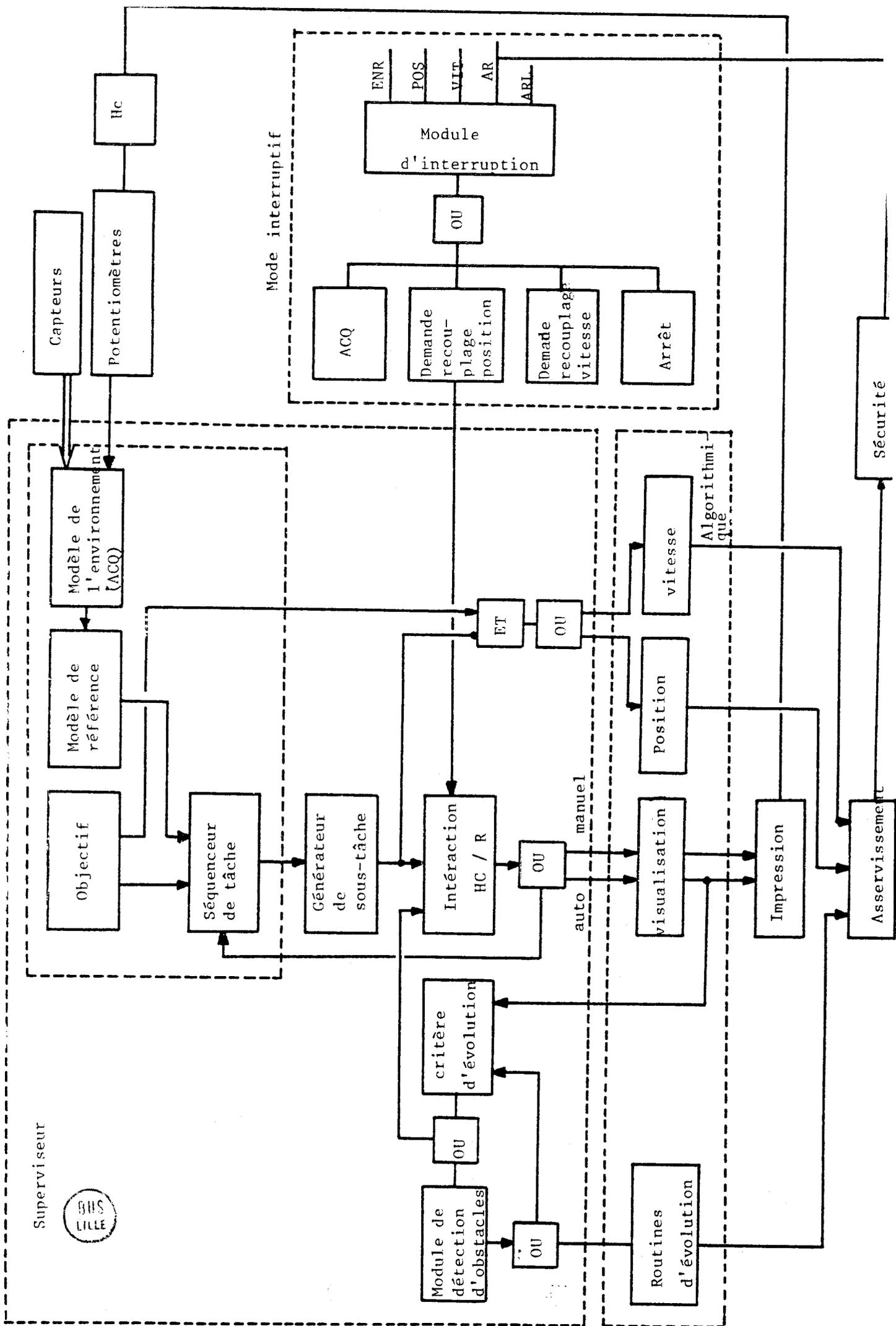
α) Structure multiprocesseur

Elle comprend :

- . définition des microprocesseurs à utiliser
- . nombre et hiérarchisation

La hiérarchisation des microprocesseurs utilisés a été définie antérieurement, le nombre dépend de l'aspect temps réel des tâches à exécuter et de leurs modularités.

Dans notre cas, seul l'aspect temps réel sera pris en considération dans un premier temps. Ainsi, on voit que la structure comprendra trois niveaux hiérarchiques différents avec un certain nombre de microprocesseurs à niveaux parallèles.



β) Capteurs

Les capteurs sont divisés en deux groupes :

- Capteurs de sécurité

Ils peuvent directement arrêter le processus sans l'aide du superviseur.

- Capteur d'environnement

Il n'arrête le processus que selon la prédiction du modèle de référence.

γ) Problèmes posés

L'étude actuelle dans ce domaine porte essentiellement sur la conception d'un ordinateur de site à structure multiprocesseur et permettant essentiellement :

- . l'implantation simple et quasi immédiate de programmes développés sur M.D.S.
- . une intervention logicielle de faible portée et d'exécution facile (changement de paramètres)

Cette conception multiprocesseur basée sur un ensemble de cartes modulaires INTEL pose tous les problèmes liés à cette structure que nous énumérons ci-dessous :

- Priorité allouée à chaque microprocesseur
- Accès mémoire simultané
- Modification du contenu d'une zone mémoire pendant son utilisation par un autre microprocesseur
- Synchronisation des processeurs

II.3 - ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT

Nous donnons un tableau où sont consignés différents critères usuels en robotique. Ces critères après avoir été définis sont quantifiés par l'intermédiaire d'une notation floue. Sans commentaire particulier, les signes adoptés ont la signification suivante :

+ critère en faveur, - en défaveur, \simeq neutre. Cette notation permet de tirer les avantages et inconvénients de chaque mode. Il est en effet difficile de faire un classement ordonné de ces différents modes. On constate alors que les modes incluant l'homme dans la boucle présentent une certaine universalité et souplesse d'utilisation. Ces performances sont dues au fait que l'opérateur peut modifier la stratégie et différer l'objectif à atteindre en fonction de l'environnement connu grâce à un retour visuel et tactile. Ce dernier est obtenu par l'intermédiaire d'un retour d'efforts qui permet de faire apprécier à l'opérateur les caractéristiques dynamiques des objets à déplacer. De plus l'homme peut transposer sa stratégie d'évolution et son expérience au système. Cela est dû à la représentation spatiale qu'a l'opérateur dans l'évolution temps réel du système.

Le mode mixte en dépit de difficultés supplémentaires au niveau de la commande a l'avantage de pouvoir jouir d'une bonne universalité, précision et fiabilité.

En revanche, ces systèmes présentent l'inconvénient de nécessiter la présence d'un opérateur humain d'où l'ennui parfois la fatigue s'il n'est pas tenu compte de ces critères dans l'élaboration de la commande. De plus se présentant comme une amplification des possibilités humaines, ils peuvent s'appliquer à certaines téléthèses mais sont inutilisables dans la commande des orthèses ou prothèses médicales.

Les systèmes purement automatiques à l'opposé des précédents n'incluent l'homme dans la boucle que pour initialiser le programme

Autonomie	Capacité du robot à engendrer ses propres plans d'actions et ainsi évoluer sans action de l'opérateur humain une fois que l'objectif lui ait été assigné.
Coût de la commande	Côut du software et du hardware nécessaire à l'élaboration du mode de conduite concerné. Le signe + signifie un bon coût.
Universalité	Aptitude du robot à effectuer une multitude de variétés de tâches
Souplesse	Facilité à passer d'une tâche à une autre
Précision	Exactitude avec laquelle est accomplie la tâche compte tenu des capteurs et algorithmes de commande utilisés
Fiabilité	Sureté et probabilité de fonctionnement du robot sans défaillance
F.M.O.	Facilité éprouvée quant à l'implantation logicielle et hardware de la commande
T.E.T.	Temps passé pour exécuter l'objectif demandé
C.T.E.	Coefficient temporel d'efficacité - rapport pour un opérateur donné entre le temps d'exécution de la tâche par l'intermédiaire du manipulateur et le temps d'exécution à la main lorsque la tâche est réalisable par les deux composantes
Sécurité de réalisation	Sécurité du matériel et du robot lors de l'exécution de la tâche



CRITERES	TELEMANIPULATION	SEMI-AUTOMATIQUE	MIXTE	AUTOMATIQUE
Autonomie	-	~	~	+
Coût de la commande	+	~	-	-
Universalité	+	+ pour tâche orientée - pour tâche non orientée	+	f (coût de la commande) ~
Souplesse	+	+ pour tâche orientée - pour tâche non orientée	~	~
Précision	-	+	+	+
Fiabilité	+	+	+	+
F.M.O.	+	~	-	-
T.E.T.	<u>Homme</u> précision demandée	+ pour une cadence faible	+ pour tâches simples	f (tâche) + pour tâches simples
C.T.E.	f (tâche)	f (variante)	A déterminer	+ pour objet simple et préalablement connu
Sécurité de réalisation	f(fatigabilité OH)	~	~	f (environnement) + pour environnement non évolutif

TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTS MODES DE CONDUITE



d'exécution de la tâche. Toutefois la difficulté de mise en oeuvre d'un contrôleur véritablement universel fait que leur application est réservée à quelques manipulations limitées et étudiées en conséquence.

CONCLUSION

La description du mode semi-automatique l'oriente plus particulièrement vers des manipulations de saisie et de pose d'objets à des endroits prévus à l'avance destinés à des fins d'assemblage, rangement ou transfert. Les principales difficultés de mise en oeuvre de ce mode résident essentiellement dans la conception d'algorithmes d'évolution automatique assez universels et d'algorithmes de reconnaissance des formes fiables. De plus un choix de capteurs simples et efficaces devra être fait de façon à ne pas grèver le coût de l'ensemble des automatismes qui n'est certes pas le moindre mais surtout ne pas compliquer l'entretien de la machine et profiter au maximum de la présence des capacités humaines tout en restant dans un contexte ergonomique valable. Ce mode de conduite est actuellement en cours de réalisation sur la saisie de pièces en vrac et la saisie de quartiers de viande.

Pour la saisie de pièce, l'organe de préhension est constitué d'une pince à trois doigts équipée d'un jeu de détecteurs de proximité moyenne distance (\approx 10 cm) à ultra son et de capteurs pneumatiques à faible portée (quelques mm). L'objectif de la manipulation est de réaliser une saisie automatique en 2 secondes à partir de la détection de présence de l'objet par les capteurs de proximité moyenne distance.

En ce qui concerne la saisie de quartiers de viande, une première étude a été consacrée à la définition d'un organe de préhension adéquat, qui permet à l'heure actuelle d'effectuer une saisie manuelle. La seconde étape consistera à faire l'étude et la réalisation de l'automatisation de la préhension dans sa phase terminale.

Bien que le mode mixte ait été étudié indépendamment de toute application immédiate, on remarquera que son utilité peut être assurée dans les tâches variées, complexes, non répétitives de petites et moyennes séries et surtout en milieu hostile, dangereux, fatigant, sale ... En effet ne serait-il pas mieux d'être derrière un manipulateur à l'abri de l'ambiance industrielle nuisible que de faire soi-même la dure besogne.

Le problème purement fondamental a été donc posé comme suit. La présence de l'opérateur humain étant de toute façon requise (phase de conduite à distance) n'y a-t-il pas des situations pendant la phase dite de conduite locale où l'opérateur serait plus performant que le robot ? C'est ainsi que nous avons été amené à faire l'analyse figurant dans les deux prochains chapitres.

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

- 1 - VIDAL P., JOLLY D., AUTECHAUD P., DESODT P., HABCHI A.,
EDEL M. (1980)
*" Hierarchical control and man robot structure 3° congresso
brasileiro de automatica Rio de Janeiro 16 à 19 setembro 1980"*

- 2 - VIDAL P., JOLLY D., AUTECHAUD P., DESODT P., HABCHI A.
" Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain "
Rapport scientifique final
ATP CNRS Avril 1980

CHAPITRE III

CRITÈRES DE DÉCOUPLAGE - RECOUPLAGE DU MODE MIXTE ET PROBLÈMES

POSÉS DURANT CETTE PHASE.

INTRODUCTION

Durant cette phase nous devons résoudre le dilemme posé par le passage entre les deux modes de conduite (manuel - automatique) mais aussi assurer éventuellement la correspondance spatiale entre la position du manipulateur et les consignes qu'il reçoit à cet instant.

L'objectif de ce chapitre est de montrer les fonctions réalisées par le module d'interaction Homme-robot et d'exposer le principe permettant de résoudre ce dilemme. C'est ainsi qu'un organigramme basé sur l'organisation logicielle décrite précédemment montre le séquençement des différentes étapes permettant d'atteindre l'objectif fixé. On montre particulièrement sur ce graphe, l'importance que revêt ce module dans un environnement parsemé d'obstacles, de même qu'on peut voir l'influence de la réponse des capteurs de la phase de conduite locale sur le choix du mode de conduite. Le caractère intrinsèque de la réponse de ces capteurs dans le processus considéré nous a conduit à définir le mode mixte comme la réunion de trois systèmes distincts et interconnectés.

- système non découplable (S_1)
- système à vision opérateur nulle (S_2)
- système à dilemme (S_3)

Dans le but d'apporter une contribution à la résolution du problème posé par le dernier système, nous avons été amenés à répertorier quelques cas concrets de contrôleurs Homme/calculateur intelligents. Les différentes approches présentées par la bibliographie ont été classées en :

- résolution statique
- résolution dynamique

Nous avons voulu adopter en ce qui concerne le partage des ressources du mode mixte une approche dynamique pour les multiples avantages qui sont exposés dans ce chapitre. Toutefois, nous nous sommes aperçus qu'aucune des méthodes employées jusque là et que l'on a résumées très brièvement, ne peut être appliquée à notre cas particulier. Nous nous sommes donc orientés vers une méthode sans précédent pour ce type de problème. Celle-ci a donc l'inconvénient de poser de multiples problèmes annexes que nous avons énumérés. Nous donnons les solutions générales que nous préconisons au chapitre IV consacré à la perspective d'implantation logicielle du contrôleur dont l'esquisse est donnée ci-après.

La conception de ce module est alors basée sur un certain nombre de paramètres caractérisant les possibilités et les facultés de l'homme et du robot.

Dans un premier temps, nous allons répertorier l'ensemble des facteurs influant sur la décision finale puis décrire le principe fondamental permettant de l'élaborer.

Le problème de correspondance spatiale entre la fin du mouvement de conduite locale et la console de télémanipulation dans le cas d'une commande en position est placé en marge des problèmes spécifiques posés par la méthode considérée. Le principe utilisé pour le solutionner est décrit après avoir énuméré les autres solutions envisageables et donné la raison de ce choix.

III.1 - QUELQUES CAS CONCRETS DE CONTROLEUR HOMME-MACHINE

Le nombre d'ordinateurs utilisés comme éléments "décisionnels" a considérablement augmenté ces dernières années. Le concept Homme-machine est alors pratiquement devenu synonyme du concept Homme-calculateur. En effet dans les secteurs de pointe rares, sont les applications où actuellement l'homme est en contact direct avec la machine en tant que telle. Les domaines d'application où a lieu cette coexistence sont très variés (automobile, aviation, industrie, médical). Cette véritable coopération entre les deux éléments en présence, ne peut exister sans poser le problème des fonctions à allouer à chacun. Les différentes méthodes utilisées pour répondre à cette question peuvent être classées en

- . méthode statique
- . méthode dynamique

La méthode statique est basée sur l'attribution d'un rôle cohérent à l'homme et à la machine prise ici au sens large. Ce rôle a été bien défini par LICKER | 3 | qui propose le partage suivant :

- l'homme définit l'objectif, formule les hypothèses, détermine les critères et évalue les résultats.
- le calculateur effectue le travail de routine tel que traitement des données, simulation de modèle, présentation des résultats en vue d'une décision humaine.

Il est clair que ce partage des tâches exclut toute notion d'intelligence du calculateur. Même si un meilleur partage des tâches était envisagé, sa simplicité de résolution liée essentiellement aux desiderata et au bon sens de l'homme, lui confère surtout des inconvénients :

* Du fait de la fixité de la méthode, le problème n'est que partiellement résolu. Il reste entièrement posé lors d'un changement de l'environnement initial. En effet il est rare que soient envisagés dans ce cas des évènements aléatoires qui dépassent d'ailleurs largement les capacités de résolution du calculateur répondant à la définition précédente. Il apparaît donc difficile d'enlever à l'homme les tâches de supervision.

* Non optimisation des ressources dont dispose le système.

* Dégradation des performances de l'homme si on ne tient pas compte de son indice de surcharge.

L'approche dynamique devrait remédier à l'ensemble de ces inconvénients, mais pose évidemment un certain nombre de difficultés liées à sa mise en oeuvre.

- * communication Homme-calculateur
- * choix de la méthode appropriée
- * évaluation des performances de chacun des éléments du système.

III.1.1. - Exposés des systèmes Homme-calculateur à résolution statique

a) Contrôle de processus industriel

Le problème du passage d'un mode de conduite à un autre a été déjà posé dans la commande et la régulation industrielle. Il s'agit par exemple de passer d'un mode de régulation manuel hardware à une régulation D.D.C. . Dans ce cas, le passage se fait par décision de l'opérateur une fois qu'il s'est assuré que les conditions de passage

étaient favorables (opportunité de l'opération, stabilisation du processus, faisabilité etc ...). Le calculateur a pour tâche transitoire d'éviter les à-coups dans le procédé s'il existe une différence entre les valeurs de la variable de procédé et du point de consigne. Ce transfert provoquera automatiquement un changement dans la sortie, correspondant à un taux de l'action intégrale, réglé pour amener le procédé à la valeur du point de consigne. Le transfert inverse provoquera le maintien de la sortie à la valeur établie avant le transfert.

Le partage des tâches est ici établi comme suit :

l'opérateur définit l'action et la supervise, le calculateur exécute les tâches de soutien et l'action proprement dite de façon autonome.

b) Robotique

Dans le cadre de la robotique, le problème de l'interaction Homme-robot n'a été posé que de façon implicite. Nous avons tout de même répertorié deux thèmes intéressants :

α) le pointy | 5 | -----

La puissance des langages de haut niveau s'est vite heurtée à la complexité de la description de l'univers tout en simplifiant l'écriture des programmes d'assemblage. Dans le but de mettre le langage AL à la portée d'un opérateur industriel un système "d'assistance scientifique", le pointy a été mis à sa disposition. Celui-ci a pour rôle de l'aider à décrire les objets entourant le robot. La répartition des tâches entre l'opérateur et le robot "outil de mesure" est faite selon la règle suivante : l'utilisateur définit les aspects importants du processus d'assemblage c'est-à-dire la meilleure façon de définir l'objet, de même que les étapes d'assemblage, tandis que la lecture de la position du bras, la définition des positions de l'objet, le calcul des transformations entre les différents systèmes de référence et la génération des instructions correspondantes en AL sont confiés au pointy.

β) Etude d'un langage mélodique de commande pour la

communication Homme-robot | 1 |

Bien que le thème principal développé par le Laboratoire d'Automatique de Besançon s'insère plutôt dans le cadre de la communication Homme-robot, nous pensons que cette voix pose justement le problème "adjacent" de leur interaction. C'est la raison pour laquelle nous ne nous intéresserons pas à la réalisation technologique de ce langage qui, signalons le, est basée sur une description syntaxique aussi bien en ce qui concerne le langage opérateur que le langage de reconnaissance de l'automate lié au robot. Le support physiologique des messages est réalisé à partir du signal laryngien capté au moyen d'un glottomètre. Si le support théorique choisi pour sa mise en oeuvre est très satisfaisant, ce langage défini pour une coopération Homme-robot semble bien avoir les avantages décrits par son concepteur mais possède des inconvénients sur le plan ergonomique. L'inconvénient majeur est basé sur un principe fondamental de l'ergonomie:

" la double tâche est à proscrire "

si l'auteur utilise un support de communication autre que la main, il s'agissait de ne pas entraver sa tâche propre. Or la sélection des actes qu'il doit faire, sont des actes effecteurs. A partir de cette hypothèse, il est difficile de concevoir la réalisation d'une tâche coopérative (Homme-robot) sans provoquer une surcharge de l'opérateur durant un poste de travail. Cet inconvénient pourrait sûrement être pallié par la définition d'un langage opérateur de niveau supérieur.

III.1.2. - Exposés des systèmes Homme-calculateur à résolution
dynamique

Les méthodes dynamiques ont été étudiées dans l'aéronautique dans le but de résoudre les problèmes posés par l'interaction entre le

pilotage automatique et humain. Cette orientation découle des très bonnes performances de l'autopilotage, particulièrement en ce qui concerne son autonomie, la réalisabilité de l'ensemble des tâches qui étaient jadis effectuées par le pilote et l'accessibilité à une analyse des phénomènes engendrés. (arrivée des évènements, actions adéquates ...)

Les progrès de la technologie et la complexité des avions actuels entraînent en effet une augmentation des tâches de surveillance et de commande jusqu'à amener le pilote à la limite de la surcharge. Une aide était donc nécessaire afin de le suppléer.

C'est la raison pour laquelle l'approche dynamique dans ce cas a surtout été posée en terme de modélisation de l'homme, confronté à des tâches de pilotage. Cette approche est tout de même à dominante secondaire statique. (aiguillage préférentiel des tâches de contrôle).

La résolution dynamique de ce problème étudiée par CHU et ROUSSE
| 3 | | 10 | | 13 | repose sur l'application de la théorie des files
d'attente au processus considéré. Ce processus d'interaction a été
considéré par les auteurs comme un phénomène d'attente de type
(M/G/2 : (GD/K/K)) qui dénote un système à queue avec un processus
d'arrivée de Poisson, une distribution de service exponentielle, de
serveurs, discipline de service général, K places d'attente, K clients
| 4 | | 7 | | 8 | nous rappelons que les serveurs dans ce cas, sont
l'homme et le calculateur, les clients sont les évènements qui déclenchent
une action.

Le principe d'allocation de rôle qui prédomine dans cette théorie peut être traduit par le règlement suivant "premier arrivé", premier servi", tout en considérant dans le cas spécifique exposé par les auteurs une priorité de préemption des tâches de contrôle (guidage) par rapport aux tâches de surveillance (cadrons). La voie choisie pose deux questions fondamentales.

- communication Homme-calculateur, calculateur-Homme, pour éviter les interférences entre les deux systèmes et par conséquent une dégradation conflictuelle des performances du processus.

- la recherche d'une loi qui élabore la nécessité de l'assistance du calculateur à un instant précis.

Si la résolution du premier problème se passe de commentaire particulier (solution visuelle pour l'homme, comparaison des actionneurs aux instants i et $i+1$ pour le calculateur) le second a nécessité la mise en oeuvre d'une longue simulation qui a permis d'obtenir un seuil S et s optima permettant d'effectuer la mise en ou hors service du calculateur.

En effet les travaux de CHU démontrent que le calculateur devra être opérationnel à un instant donné tel que $N = C_1 n_1 + C_2 n_2 + \dots + C_k n_k \geq S$ et hors service pour $N \leq s$, $C_1, C_2 \dots C_k$ étant des constantes non négatives exprimant les priorités relatives des différents évènements et $n_k = 0, n_k = 1$ indiquent respectivement l'absence ou la présence d'un évènement. Ce seuil variable selon le processus considéré (cadence d'arrivée, performance du pilote) a été déterminé pour un processus simplifié ($C_1 = C_2 = \dots = C_k = 1$, deux niveaux de cadence d'arrivée) en utilisant la théorie des phénomènes d'attente.

Si ce raisonnement est parfaitement adapté au processus d'aviation en considérant la similarité dans la loi de répartition des phénomènes, et la performance d'exécution équivalente des deux composantes aux exceptions soulevées par les auteurs (vitesse dans l'exécution de la tâche, surcharge du pilote, priorité d'une file vers un serveur spécifique), ce raisonnement ne peut nullement être envisagé dans le cas du mode mixte et ce du fait de sa conception même. Nous rappelons en effet que le mode mixte a été étudié en vue de palier au manque d'universalité, des robots actuels.

La résolution de l'interaction ne peut être étudiée que dans le cadre d'une méthode basée sur un choix multicritère. Néanmoins un parallélisme peut être établi entre les deux conceptions, notamment

en ce qui concerne la philosophie d'ensemble et les problèmes secondaires soulevés. Ces remarques seront exposés dans la conclusion de ce chapitre.

III.2 - ETUDE SYSTEMATIQUE DU MODE MIXTE | 12 |

Le mode mixte est considéré comme la réunion de trois systèmes distincts et interconnectés.

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \quad |3.1|$$

III.2.1. - Système non découplable (S_1)

Les capteurs peuvent donner des renseignements insuffisants sur l'environnement immédiat du bras manipulateur et dans ce cas, l'opérateur humain a toute liberté pour piloter celui-ci.

III.2.2. - Système à vision opérateur nulle (S_2)

Le pilotage devra être exécuté par le robot dans la mesure où les organes sensoriels de celui-ci lui fournissent suffisamment d'informations pour qu'il puisse réaliser la tâche demandée. Une exécution automatique d'une tâche dans le cas du système (S_2) laisse supposer une approbation subjective de l'opérateur humain et l'exécution par celui-ci d'une planification programmée de l'objectif souhaité, si

CAP = ensemble des informations binaires des divers capteurs de l'environnement permettant de débiter la tâche de façon automatique

R_T = coefficient de réalisabilité indiquant la faisabilité de l'opération et son taux de réussite

OH = signal subjectif binaire de l'opérateur demandant l'exécution de la tâche.

S_{RT} = valeur du coefficient R_T défini par le programmeur décideur et évaluant le risque d'aboutissement de la tâche de façon automatique

$$R = 1 \text{ si } R_T > S_{RT} \quad |3.2|$$

$$R = 0 \text{ si } R_T \leq S_{RT} \quad |3.3|$$

Le critère de découplage est du type :

$$CAP \wedge R \wedge OH = 1 \quad |3.4|$$

III.2.3. - Système à dilemme

Dans le cas du dilemme Homme-robot, deux notions fondamentales sont définies :

a) Critère de découplage global

Ce critère est intimement lié à un facteur de réalisabilité.

Dans l'exécution d'une tâche, on peut aisément supposer qu'elle soit décomposable en un certain nombre de sous-tâches et ce par l'intermédiaire d'un générateur de plans d'action et/ou d'un interpréteur | 2 | . Ainsi à chaque sous-tâche est affecté un coefficient r_i^T considéré comme un doublet.

$$r_i^T = \langle f_i^T, t_i^T \rangle \quad |3.5|$$

avec

f_i^T = fonction indiquant la faisabilité de l'opération. C'est une fonction logique possible, non possible qui dépend essentiellement de la puissance des algorithmes et des limites technologiques des capteurs utilisés.

t_i^T = coefficient exprimant en % le taux de réussite qui dépend du modèle des capteurs.

On définit alors le coefficient de réalisabilité d'une tâche T décomposée en m sous-tâches comme :

$$R_T = \frac{\sum_{i=1}^m k_i r_i^T}{m} \quad |3.6|$$

où k_i est un coefficient de pondération fixant l'importance relative d'une sous-tâche à l'intérieur d'une tâche.

Le critère de découplage global en reprenant les hypothèses précédentes, peut-être formalisé de la façon suivante :

$$D_G = CAP \wedge R = 1 \quad |3.7|$$

Ce critère exprime qu'un dilemme Homme/robot peut exister et dont la résolution n'est donnée que par un critère de découplage local.

b) Critère de découplage local

Ce critère évalué au début de chaque sous-tâche permet de quantifier l'aptitude des deux composantes du dilemme à la réalisation de la sous-tâche et d'attribuer son exécution à l'élément le plus qualifié. Ce choix est défini par une méthode de décision multi-critères, implantée dans un module software d'interaction Homme/robot faisant intervenir les différents paramètres des grandeurs d'entrée E_v, O_r, T et le comportement évolutif de l'homme dans une tâche dynamique. Ces paramètres sont explicités plus loin.

Ce critère est formulé comme suit :

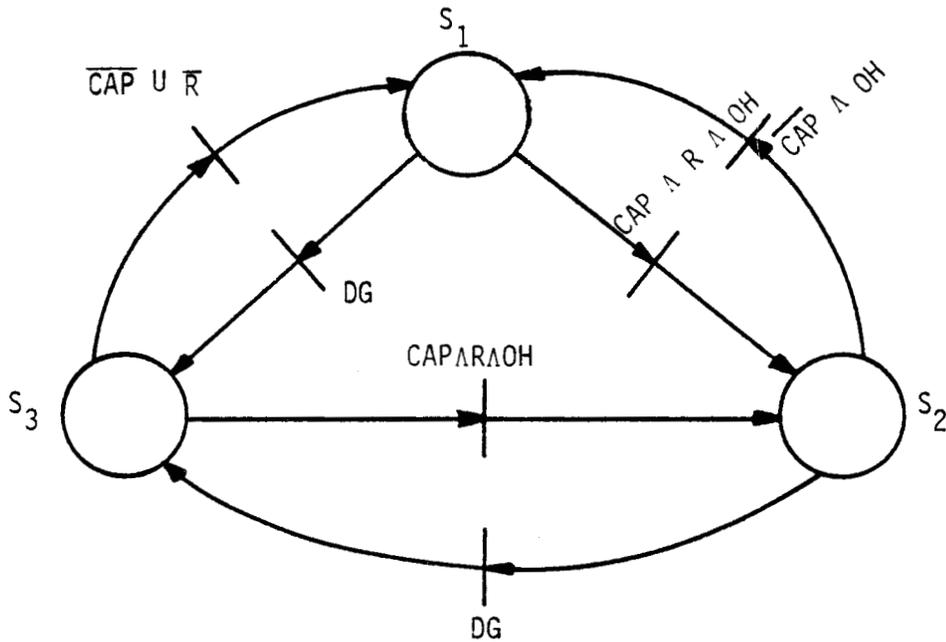
$$\text{Cap} \wedge d = 1 \text{ (exécution robot)} \quad |3.8|$$

$$\text{Cap} \wedge d = 0 \text{ (exécution homme capteur)} \quad |3.9|$$

d signal binaire évalué à partir de la méthode de décision multi critère .

Cap étant l'ensemble des informations binaires permettant de débiter la sous-tâche de façon automatique.

Les interconnexions entre les systèmes S_1, S_2, S_3 de même que le franchissement des transitions permettant d'atteindre un système à partir de l'autre, sont montrés sur la figure ci-dessous et ce en fonction des critères prédéfinis.



INTERCONNECTIONS ENTRE S_1, S_2, S_3

Il est évident que le transfert d'un système à un autre nécessite la vérification préalable par le calculateur d'un certain nombre de conditions de sécurité. (fin de l'objectif planifié, correspondance spatiale).

La figure (3.1) montre l'organisation du système en fonction de l'architecture software exposée au chapitre 2. On voit sur ce graphe la façon dont est réalisé un objectif en tenant compte des différents systèmes exposés.

Le module d'interaction joue un rôle prépondérant si un obstacle inconnu perturbe l'environnement initial. Cela est indispensable si on le définit comme un véritable arbitre dynamique. Si un obstacle est repéré par le module de détection (modélisation géométrique des objets et évolution planifiée de la trajectoire) celui-ci essaye de le contourner en utilisant l'ensemble des procédures adéquates, lorsque l'ensemble des solutions envisageables ont été épuisées; un branchement est effectué sur le module d'interaction qui "passe la main" à l'opérateur en lui indiquant les mesures de sécurité à remplir et à exécuter pour rendre effectives ses décisions de télémanipulation.

III.3 - GRANDEURS D'ENTREE INTERVENANT DANS LA PHASE DE DECOUPLAGE

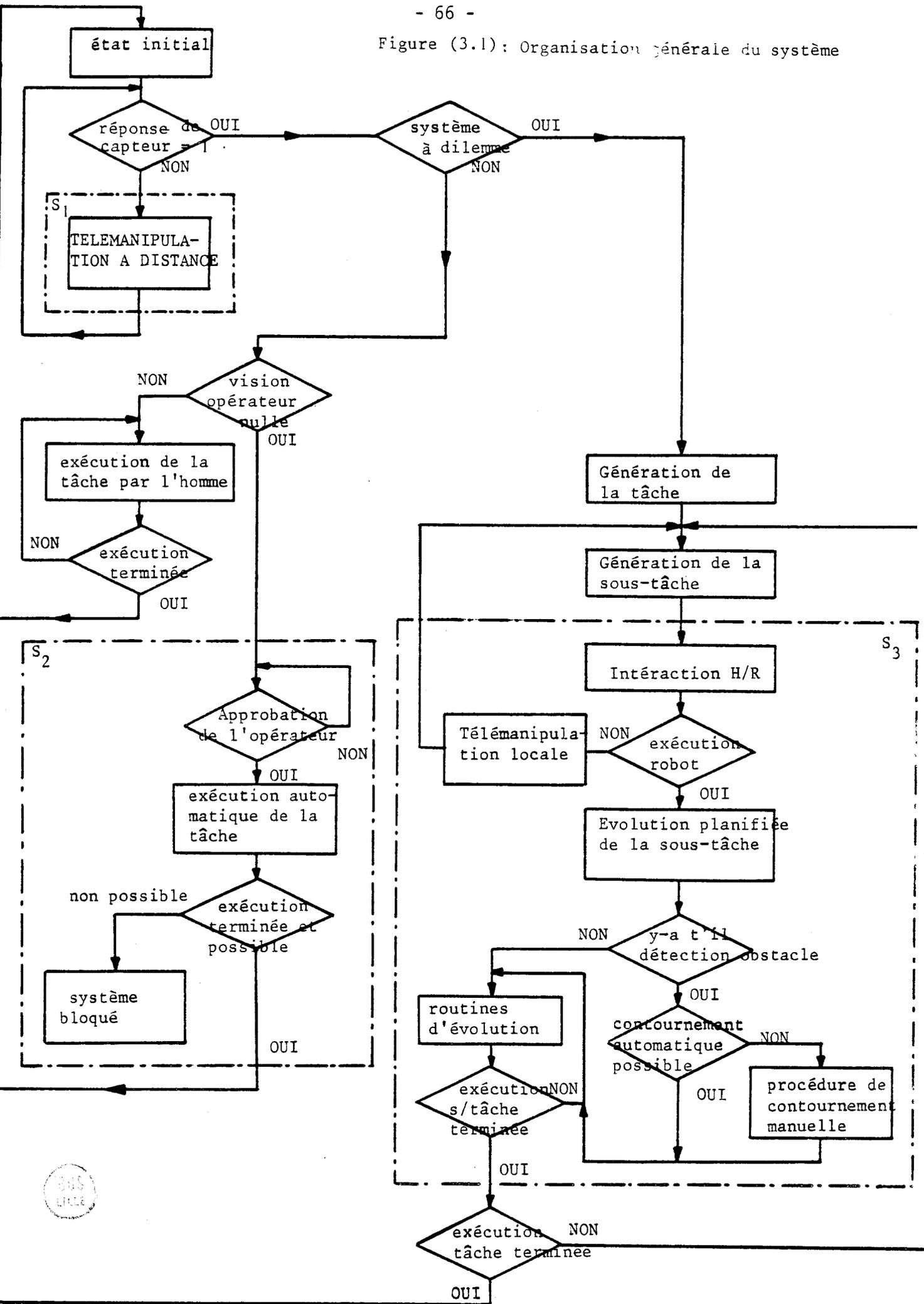
----- RECOUPLAGE | 11 | -----

Le découplage est défini comme le passage d'une phase manuelle à une phase automatique.

Le recouplage réalise la fonction inverse du découplage.

La conduite du manipulateur dans la phase automatique utilise les informations de divers capteurs suivant des domaines d'actions différents, ce qui détermine la succession des routines d'évolution. En effet à défaut de système de vision idéal pour une situation donnée (f (objet) distorsion dans une certaine zone, traitement complexe ...)

Figure (3.1): Organisation générale du système



T = - précision
 - réalisabilité

Signalons par ailleurs que cette énumération n'est nullement exhaustive.

Nous pourrions être tentés de rechercher une fonction à optimiser tenant compte de l'état de l'environnement et de la tâche à réaliser et trouver ainsi le critère de découplage parfaitement adapté à la situation. Toutefois une préétude nous a permis de constater que les variables ne sont nullement indépendantes. Ainsi par exemple la position de l'objet à saisir (définissant l'axe du regard) agit sur la fatigabilité de l'opérateur qui elle-même influe sur le temps d'exécution de la tâche....

Nous avons été alors amené à tenir compte de l'ensemble des paramètres décrits en faisant intervenir leur pondération à l'intérieur du processus considéré.

III.4 - ELABORATION DU CRITERE DE DECOUPLAGE LOCAL

III.4.1. - Formulation mathématique | 6 | | 9 |

a) Définitions des divers paramètres

Ces paramètres sont :

E = ensemble constitué par les éventualités possibles
(Homme (H), Robot (R))

H,R = éléments de E

E_j = ensemble fini complètement ordonné des appréciations
possibles pour le critère j (échelle de notation)

γ_j (H) appréciation portée sur l'élément H pour le critère j (fatigabilité, précision, réalisabilité ...)

γ_j (R) appréciation portée sur l'élément R pour le critère j

P_j = indice d'importance du critère j

c = seuil de concordance défini par le décideur

d = indice de discordance

Remarquons que ces deux dernières notions sont précisées ci-dessous.

Il s'agit à partir de ces hypothèses de trouver un classement ordonné entre H et R c'est-à-dire l'élément le plus qualifié pour effectuer la s/tâche. On dit alors que H surclasse R ou R surclasse H, propositions qui sont respectivement notées H S R, R S H.

b) Fonction de surclassement

Mathématiquement on dit que H surclasse R par exemple, si d'une part le poids cumulé des critères où H est meilleur que R, est grand relativement à celui des critères où R est meilleur que H. D'autre part il n'existe pas de critères selon lequel R est franchement meilleur que H. Cette définition se vérifie à partir d'une notion de concordance et non discordance.

a) Définition de la concordance

Si l'on reprend les définitions des paramètres exposés en (a), considérons la trichotomie de l'ensemble J des indices des critères définis pour H et R.

$$J^+ (H,R) = J \text{ tq } \gamma_j (H) > \gamma_j (R) \quad |3.12|$$

$$J^= (H,R) = J \text{ tq } \gamma_j (H) = \gamma_j (R) \quad |3.13|$$

$$J^- (H,R) = J \text{ tq } \gamma_j (H) < \gamma_j (R) \quad |3.14|$$

si l'on pose

$$P^+ (H,R) = \sum_{j \in J^+ (H,R)} P_j \quad |3.15|$$

somme des poids des critères selon lesquels H est meilleur que R .

$$P^= (H,R) = \sum_{j \in J^= (H,R)} P_j \quad |3.16|$$

somme des poids des critères selon lesquels H est aussi bon que R.

$$P^- (H,R) = \sum_{j \in J^- (H,R)} P_j \quad |3.17|$$

somme des poids des critères selon lesquels H est moins bon que R.

On appelle condition de concordance une condition de type $C (P^+, P^=, P^-) \geq c$ ou C est une fonction croissante de P^+ et décroissante de P^- . |3.18|

β) Définition de la discordance

Si h_j et r_j sont un ensemble de modalité appartenant à E_j , on dit que le couple de modalité (h_j, r_j) est discordant si on ne peut en aucun cas accepter le risque de décider que H présentant la modalité h_j selon γ_j surclasse R représentant la modalité r_j .

On posera alors que $(h_j, r_j) \in D_j$. L'ensemble D_j appelé ensemble de discordance est ainsi défini par le décideur. Il s'agit donc pour une échelle donnée (formule de notation) d'un seuil d'indifférence. On dira par exemple pour une notation de 0 à 10 que les deux éventualités (H,R) sont aussi bonnes l'une que l'autre si la différence de leur note est en valeur absolue inférieure ou égale à 2, pour un critère donné.

γ) Définition de la fonction de surclassement

La relation de surclassement est donc basée sur les deux notions de concordance et discordance définies. Ainsi on dit que $H \succ R$ si le couple satisfait à la fois à la condition de concordance et de non discordance.

Cette relation de surclassement signifie qu'il y a un nombre suffisant de critère en accord avec cette assertion et parmi les critères en désaccord il n'y en a pas un qui le soit vraiment trop.

c) Relation pratique

Les relations de surclassement sont définies par l'union des équations ci-après.

α) Relation de concordance

$$\frac{P^+(H,R) + P^-(H,R)}{P} \geq C \quad \frac{P^+(H,R)}{P^-(H,R)} > 1 \quad |3.19|$$

$$\text{avec } P = P^+ + P^- + P^=$$

β) Relation de discordance

Pour tout critère selon lequel R est meilleur que H les relations de discordance sont définies par exemple par :

$$| \text{Note (R)} - \text{Note (H)} | \leq d \quad |3.20|$$

ou

$$\text{Note (R)} \wedge \text{Note (H)} \geq d \quad |3.21|$$

Ces relations de discordance peuvent également être définies par un tableau de discordance pour chacun des critères impliqués.

III.5.2. - Problèmes posés par le formalisme de surclassement et l'étude systématique du mode mixte

Les problèmes soulevés par le principe exposé ont été classés comme suit :

- *choix et quantification des critères influant sur la décision finale*
- *représentation concrète de la notion de découplage global*
- *affectation des coefficients de pondération aux critères de décision*
- *équivoque dans la décision élaborée par la méthode précitée*
- *interdépendance entre les critères.*

a) Choix et quantification des critères influant sur la décision finale

Une fois le choix des paramètres effectués, certains peuvent être facilement quantifiés en utilisant des instruments ou des capteurs bien adaptés, il est difficile d'étendre ce raisonnement rigoureux à l'ensemble des facteurs liés à l'homme. On se heurte automatiquement à un double problème : psychologique et technologique. La solution envisagée est orientée vers l'élaboration d'un modèle de l'opérateur humain face à une tâche de pilotage et de supervision. Ce modèle devra être adaptatif étant donné qu'il existe les différences physiologiques et physique sur chaque individu.

En ce qui concerne le robot, la notion de réalisabilité d'une sous-tâche peut paraître nouvelle au lecteur, en fait bien qu'exprimée de façon non explicite elle apparaît dans le système développé par P.WILL | 14 |.

b) Représentation concrète de la notion de découplage global

Cette notion repose sur la réalisabilité de l'objectif planifié. C'est la raison pour laquelle nous renvoyons le lecteur au système développé par P.WILL | 14 | . Nous pouvons toutefois associer cette notion, au concept de "passe" dans les ordinateurs. L'objectif est ici réalisé en deux passes. La première consiste en une analyse des instructions et de l'environnement pour tenter de découvrir si toutes ou parties des tâches peuvent être réalisées par le robot. Ceci nous conduit là aussi à la nécessité de définir un seuil permis et l'ensemble des tâches discordantes. Ceux-ci sont rajoutés par le planificateur au moyen d'un code (tâches de précision...). La seconde passe caractérise le découplage local bien explicité auparavant.

c) Affectation des coefficients de pondération

L'inconvénient de cette affectation réside principalement dans la subjectivité de leur définition. Cet inconvénient est d'autant plus grand que ces coefficients influent beaucoup sur la décision et que l'homme est en général un mauvais estimateur. Une étude en simulation exposée au chapitre IV permettra de démontrer cette affirmation intuitive. Une grande attention devra donc être réservée à la résolution de ce problème. En attendant le développement d'un algorithme permettant d'affecter ces coefficients après analyse sémantique des instructions, nous supposerons qu'ils sont attribués par le programmeur dans la planification de l'objectif.

d) Equivoque de décision

Le fait que les indices de concordance sont exprimés sous forme d'inégalités, conduira nécessairement parfois à une ambiguïté (H,R tous deux qualifiés, ou non qualifiés à exécuter la tâche). Dans ce cas précis, une procédure levant l'indétermination devra être élaborée.

e) Interdépendance entre les critères

Nous avons signalé au paragraphe 3.4 que les critères sur lesquels nous nous basons pour élaborer la décision dans le partage dynamique des tâches, étaient fortement corrélés. Il est clair que l'opérateur Σ choisi pour résoudre le dilemme, suppose une indépendance entre les critères. Σ devra être remplacé par l'opérateur adéquat lors de la mise en oeuvre de notre processus. Notons également que ces opérateurs seront certainement différents selon que l'on s'intéresse à la composante H ou R. Toutefois le fait de prendre en considération dans la suite de l'exposé l'opérateur Σ n'altère nullement les conclusions qui seront énoncées au chapitre IV : celles-ci sont facilement transposables.

III.6 - CONSIDERATION DE CORRESPONDANCE SPATIALE LORS DU RECOUPLAGE | 11 |

Si le passage de la phase d'évolution automatique à la phase manuelle dans une commande en vitesse ne pose aucun problème de correspondance spatiale, la reprise en main du robot par l'opérateur dans une commande en position est assujettie à un écart entre la consigne donnée par les manches à balais et la position du manipulateur à cet instant.

Pour résoudre ce problème, trois solutions ont été envisagées :

- déplacer le robot en douceur vers la consigne donnée par les manches à balais.
- motoriser les manches à balais pour suivre l'évolution de la phase automatique.
- établir à l'intérieur du module d'interaction homme-robot un dialogue permettant d'annuler l'écart par une action manuelle sur les manches à balais contrôlée par le calculateur.

Pour des raisons de sécurité et de mise en oeuvre pratique, c'est la troisième solution que nous avons retenue.

Elle repose sur le principe suivant :

Soit \vec{v}_R le vecteur représentant la position spatiale du robot à l'instant de la demande de recouplage.

Soit \vec{v}_B le vecteur représentant la position des manches à balai au même instant.

La condition de recouplage peut être exprimée par les relations

$$\vec{v}_R - \vec{v}_B \leq \vec{\epsilon} \quad |3.22|$$

$$\| \vec{v}_R - \vec{v}_B \| \leq \| \vec{\epsilon} \| \quad |3.23|$$

Si \vec{v}_R a pour composantes pr_1, pr_2, \dots, pr_i

\vec{v}_B a pour composantes pb_1, pb_2, \dots, pb_i . Il est nécessaire

que ces deux inégalités soient vérifiées pour pouvoir effectuer un découplage dans de bonnes conditions. La dernière tient compte de la période d'échantillonnage, des paramètres relevés et de la vitesse d'exécution du calculateur.

$$|pr_1 - pb_1| \leq \epsilon_1 \wedge |pr_2 - pb_2| \leq \epsilon_2 \wedge \dots \wedge |pr_i - pb_i| \leq \epsilon_i \quad |3.24|$$

u

$$Te \ll Tro \quad |3.25|$$

Tro étant le temps de réaction d'un opérateur pour effectuer une action sur un manche à balai

Te étant le temps mis par le calculateur pour vérifier la relation.

ε_i étant un seuil choisi en fonction des conditions de sécurité et des approximations de mise à l'échelle du calculateur.

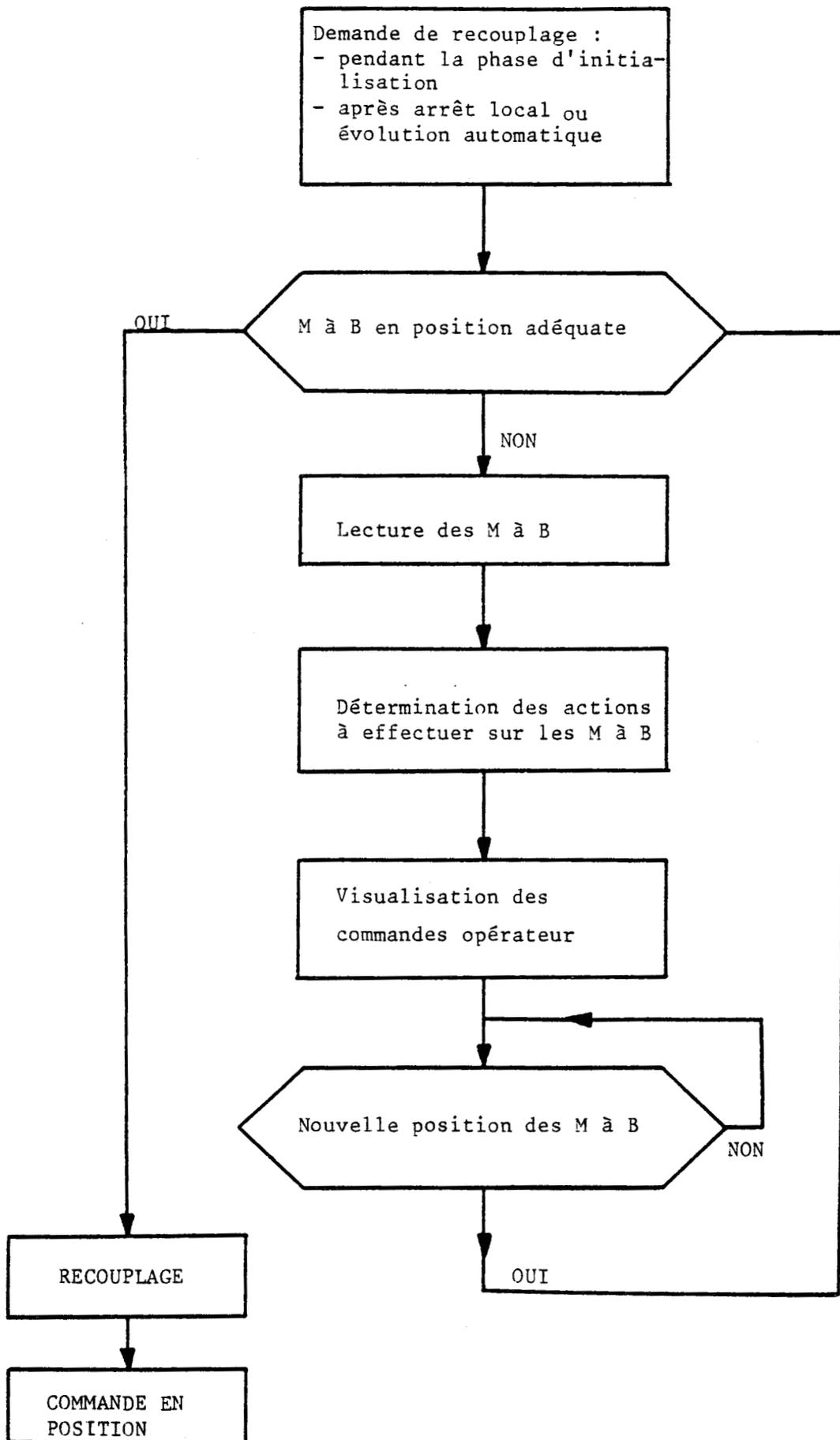
REMARQUE

- T_e est négligeable si la vitesse du calculateur est élevée et le nombre de degrés de liberté du robot réduit.

- La relation |3.25| est indispensable pour éliminer les déplacements incontrôlés du robot.

- Cette solution a fait l'objet d'une mise en oeuvre pratique dans le cas du mode semi-automatique concerné par ce problème. L'ensemble des programmes développés sont commentés dans le chapitre V, le principe est montré sur la figure (3.2).

Figure(3.2) ORGANIGRAMME DE PRINCIPE RECOUPLAGE PAR DIALOGUE



CONCLUSION

L'apparition relativement récente des robots et surtout leurs insertions très limitées dans des applications concrètes, n'a pas encore soulevé le problème fondamental de la relation Homme-robot. Dans le futur, lorsque le "robot actuel" sera réellement en mesure de remplacer l'homme esclave, nous pensons que le problème de l'interaction dans ce domaine se posera en terme de surchage d'un opérateur superviseur face au contrôle d'une multitude de robot. De cette idée découlera nécessairement comme pour le pilote d'avion, la nécessité d'une "assistance artificielle".

Une autre remarque que l'on voulait également faire, concerne le mode semi-automatique exposé dans le cadre de ce mémoire. Il est maintenant clair que la résolution adoptée dans le cadre de ce mode de conduite repose sur une approche statique. Cette approche est de toute façon admise implicitement en robotique, elle est sûrement liée à la notion de maître-esclave qui prédomine jusqu'à présent les relations Homme-robot. Le lecteur pourra d'ailleurs faire ce rapprochement avec la description des différents modes de conduite exposés dans le chapitre I de ce mémoire.

Les dernières observations porteront sur une similarité dans la philosophie de CHU et celle adoptée pour le mode de conduite mixte. Ce parallélisme peut être établi comme suit :

- Paramètres influant la décision finale

Bien que ces paramètres soient traités différemment, leur nature est presque identique (fatigabilité, temps d'exécution, cadence de production ...)

- Affectation des coefficients de pondération

CHU fait intervenir dans sa loi comme pour la formulation du mode mixte des coefficients de pondération qu'il faudra définir ou calculer.

- Ne disposant pas de la totalité des travaux de CHU, nous n'avons pas trouvé les relations éventuelles liant les seuils S et s . Ceci nous a amené à nous poser la question de l'équivoque dans la décision élaborée (cas de $N < S$ et $> s$). Le cas traité dans la publication | 3 | avec $s = 0$ levait évidemment toute ambiguïté.

C'est la raison pour laquelle la méthode développée par CHU et celle exposée dans le cas du mode mixte ne peuvent encore être implantées dans un processus réel, mais elles permettent néanmoins d'exposer une approche de solution et de faire un tour d'horizon sur les difficultés rencontrées.

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

- 1 - P. ANDRE , F. LHOTE (1978)
*" Structure et Reconnaissance d'un langage mélodique de
commande pour la communication Homme-Robot "*
Congrès AFCET - IRIA *" Reconnaissance des formes et traitement
des images - Février 1978 "*

- 2 - A.J. BARBERA, J.S. ALBUS , M.L. FITZGERALD (1979)
National Bureau of Standards (U.S.A.)
" Hierarchical control of robots using microcomputers "
9ième Symposium International de Robotique Industriel
WASHINGTON U.S.A. 13-03 au 15-03-1979

- 3 - Y.Y. CHU, W.B. ROUSSE (1979)
*" Adaptive allocation of decision making responsibility
between Human and computer in multitask situations "*
I.E.E.E. Transactions on systems man and cybernetics
vol. SMC 9 n°12 1979

- 4 - R. FAURE
" Les phénomènes d'attente "
Précis de recherche opérationnelle DUNOD 151-164

- 5 - G. GINI, M. GINI (1978)
" Object description with a manipulator "
The industrial robot Mars 1978

- 6 - D. JOLLY, A. HABCHI (1981)
" Etude d'un mode mixte en robotique "
Congrès AFCET Automatique 81
Nantes 27.29 Octobre (Résumé accepté)

- 7 - A. KAUFMANN, R. FAURE
" Patience et longueur de temps "
Initiation à la recherche opérationnelle
DUNOD 53-70

- 8 - S. KARLIN
" Processus de files d'attente "
Initiation aux processus aléatoires
DUNOD 470-503

- 9 - H. THIRIEZ
" Simulation et analyse multicritère "
Initiation au calcul économique
DUNOD 133-146

- 10 - W.B. ROUSSE (1977)
" Human - computer interaction in multitask situation "
I.E.E.E. Transactions on systems man and cybernetics
vol. SMC 7 n°5 - 1977

- 11 - P. VIDAL, D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT , A. HABCHI, M. EDEL
(1980)
" Hierarchical control and man-robot structure "
3° Congresso Brasileiro de Automatica
RIO DE JANEIRO 16 a 19 Setembro 1980

- 12 - P. VIDAL, D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI
" Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain "
Rapport scientifique final ATP CNRS Avril 1980

- 13 - S. WALDEN (1978)
*" A Queing model of pilot decision making
in a multitask flight managment situation "*
I.E.E.E. Transaction on systems man and cybernetics
vol SMC 8 n°12

- 14 - P. WILL (1979)
" Very high level languages for robots "
IRIA Séminaire langages et méthodes de programmation des robots
industriels.

CHAPITRE IV

REFLEXIONS SUR LA PERSPECTIVE D'IMPLANTATION LOGICIELLE

DU CONTROLEUR HOMME-ROBOT

INTRODUCTION

Le caractère relativement nouveau de l'Automatique humaine, qui a pour but l'identification des modèles de l'opérateur humain conduit aux faits suivants :

- le comportement de l'homme face à une tâche spécifique quelconque est encore mal connu.
- ses réactions sont assez difficiles à prévoir .

Ces constatations entraînent dans notre cas spécifique, la nécessité d'étudier plus précisément la quantification des facultés mises en jeu. Le court laps de temps dont nous disposions pour mener cette étude, et la nouveauté de cette intégration de l'homme dans la boucle de commande, ne nous a pas permis d'aplanir toutes les difficultés. Nous nous bornerons donc à donner dans les paragraphes de ce chapitre, un bref aperçu des techniques à mettre en oeuvre en soulignant les difficultés qui peuvent apparaître. Nous pourrons montrer ainsi la "pauvreté" des résultats immédiatement exploitables.

Une étude en simulation permet en revanche d'étayer les conclusions consignées dans le chapitre précédent.

Cette philosophie d'ensemble de l'implantation logicielle du contrôleur Homme-robot devra donc être considéré beaucoup plus comme étude à réflexions qu'à finalité démonstrative.

IV.1 - CHOIX ET ETUDE DES CRITERES D'APPLICATION A LA RESOLUTION

----- DU DILEMME -----

IV.1.1. - Fatigabilité

Il s'agit d'évaluer en temps réel l'indice de charge de l'opérateur humain. Cet indice que l'on a dénommé fatigabilité varie dans le temps et est fonction de deux facteurs principaux.

a) Facteur "d'ambiance "

Il caractérise l'influence du milieu ambiant sur la fatigue de l'opérateur. (milieu thermique, sonore, lumineux, vibratoire). Nous supposons donc que les conditions optimales "d'ambiance" sont réunies selon les solutions préconisées par l'ergonomie.

b) Facteur lié au travail demandé

Il provient essentiellement de deux sources :

- physique : posture de travail adopté (debout,assis); contraction des muscles dans une attention soutenue (travail de précision par exemple)
- mentale : charge de décision, rythme d'intervention.

IV.1.2. - Réalisabilité

Nous renvoyons le lecteur au chapitre 3 pour sa définition.

IV.1.3. - Indice de vigilance

Le niveau de vigilance est comme la fatigue, lié à deux facteurs.

a) Ambiance

Il doit être le résultat d'un environnement optimum (éclairage, bruit, température, humidité, vibration). Aussi un éclairage réduit ou une pièce obscurcie, une stimulation régulière ou monotone qui tendent à bercer ou endormir, devront être évités.

b) Facteur lié à l'intervention de l'opérateur

Afin de conserver un minimum d'éveil et d'attention de l'opérateur, un certain nombre de sous-tâches ne seront pas toujours données de façon préférentielle au robot.

IV.1.4. - Précision

Pour le robot, la précision d'une sous-tâche dépend du ou des capteurs utilisés et des algorithmes de traitement et de commande.

Pour l'homme, intégré dans le processus considéré, elle dépend de son organe visuel, utilisé comme comparateur direct, ou comme interpréteur "d'instrument de bord".

Dans le premier cas, la précision est donnée par le modèle non linéaire de l'oeil caractérisé par deux composantes.

a) Le pouvoir séparateur - composante frontale

C'est l'aptitude à déceler les petits objets et distinguer les détails. Il varie suivant leurs formes, la répartition spectrale de l'énergie radiante, la luminosité du fond et leur contraste. Dans des conditions d'ambiance normale, il est de 1 minute d'angle.

b) La vision en profondeur - composante sagittale

Elle est due au mouvement de vergence ou mouvement disjonctif des yeux. Ainsi, les yeux sur un plan sagittal, au lieu de fixer un point, ne peuvent fixer qu'une zone. Cette erreur n'est pas encore définie avec précision.

Afin d'enlever toute subjectivité et imprécision de quantification, nous voyons que la vision en tant qu'organe de comparaison direct devra être évitée. En effet une telle quantification introduit des paramètres inconnus. Par exemple dans une sous-tâche de grande précision le temps de télémanipulation est difficile, voire impossible à évaluer puisqu'on doit introduire sur le temps global un facteur multiplicatif inconnu dû à un temps de fixation plus long et un contrôle musculaire supplémentaire.

IV.1.5. - Contournement d'obstacle

En cas d'obstacle imprévu, dans une sous-tâche après épuisement des méthodes de contournement prévues, la procédure sera effectuée par l'homme. Ce passage donné par le module d'interaction (homme-robot), est fait sur la base de l'indice de discordance afférent à ce critère.

IV.1.6. - Temps d'exécution de sous-tâche demandée

Pour le robot, il est évalué en fonction du point de départ et d'arrivée, des lois de mouvement du robot et des vitesses limites.

Pour l'opérateur, elle est fonction de 2 paramètres :

- du temps d'activité intrinsèque, temps écoulé entre le début de l'apparition du signal devant déclencher cette activité et la fin de la réponse motrice de l'opérateur (début d'action sur le robot).
- temps d'exécution de la tâche en télémanipulation.

IV.1.7. - Asservissement avec la tâche en amont

Si un tel système est intégré dans une chaîne d'équipements, nous définirons le coefficient d'asservissement par le rapport ci-dessous :

$$a = \frac{T_e^{\text{phm}} + T_e^{\text{ph aut.}} + T_t}{T_c^{\text{amont}}} \quad |4.1|$$

T_e^{phm} = Temps exécuté en télémanipulation (temps cumulé)

$T_e^{\text{ph aut.}}$ = Temps exécuté par le robot de façon automatique (temps cumulé)

T_c^{amont} = Temps d'exécution de la tâche juste en amont de celle à effectuer par le système Homme-robot. (temps de transport + sortie du produit) Il s'agit d'un temps critique.

T_t = Temps évalué pour la sous-tâche à réaliser. (temps cumulé après ajustement des temps des sous-tâches antérieures).

Ce rapport bien que n'intervenant pas directement dans les critères du dilemme en tant que tels est à évaluer pour tenir compte de la cadence de production. En cas de dépassement avant la fin de l'objectif planifié ($a > 1$), la valeur de ce coefficient permet d'intervenir de façon proportionnelle sur les vitesses des équipements en amont. De cette façon les goulots d'étranglement sont évités et le temps d'exécution de la prochaine sous-tâche optimisé. L'opérateur est avisé de cette modalité pour améliorer ses performances. Cette opération, compte tenu de l'ambiance industrielle sous l'aspect psychologique pourra différencier la fatigabilité "flégnatique" de la fatigabilité réelle.

IV.2 - ETUDE ET CHOIX DE QUELQUES METHODES PERMETTANT LA QUANTIFICATION ----- DES CRITERES -----

IV.2.1. - Quantification des critères relatifs à l'homme

a) Fatigue

α) Méthodes existantes =====

Jusqu'à maintenant les ergonomistes se sont basés sur la mesure d'un certain nombre de paramètres physiologiques pour développer quelques méthodes qui rendent compte de l'état de fatigue de l'opérateur humain.

- *électroencéphalogramme*

Cette mesure montre l'activité électrique cérébrale. Elle est basée sur l'exploitation de la mesure de l'onde α (8,13 Hz) qui rend compte de la détente sensorielle du sujet.

- arytmie sinusale

C'est la mesure du rythme cardiaque. La croissance de la charge mentale est en relation directe avec la régularité du rythme cardiaque.

- électromyogramme

Elle décèle et enregistre les mouvements des muscles et en particulier ceux de la nuque. Elle permet d'évaluer l'attention nécessaire à une prise d'information. En effet, la position de la base de la nuque et l'immobilité sont révélateurs d'une attention soutenue.

- électro-oculogramme

Le principe est basé sur l'existence d'une différence de potentiel entre la face antérieure et postérieure de l'oeil. Cette méthode surtout utilisée aux USA apparaît comme une mesure de l'état de l'éveil.

- potentiels évoqués cérébraux

C'est la réaction électrique cérébrale à un certain nombre d'éclairs lumineux ou tops sonores. La fatigue mentale ralentit la réaction et de ce fait l'amplitude diminue.

- fréquence cardiaque

Cette mesure est en corrélation avec la consommation d'oxygène dans des conditions opératoires précises. Elle alerte en cas de surcharge mais ne permet pas de déterminer l'origine.

Si ces mesures sont très pratiques pour certaines expériences statistiques, elles ne peuvent nous satisfaire dans le cadre de notre système.

β) Principe de quantification préconisé

=====

La quantification de la fatigabilité est évaluée par la mise en place d'un protocole de "pièges" pouvant rendre compte de l'évaluation de ce critère durant la phase active de l'opérateur. Une telle méthode permet ainsi d'éviter l'inconvénient psychologique et celui relatif à l'aspect temps réel que comportent celles énumérées ci-dessus.

- *formulation mathématique*

Si nous supposons une certaine corrélation entre certaines observations et la fatigue, considérons les paramètres suivants :

$$H_{\ell} = | \bar{v}_{1,i} \dots \bar{v}_{j,i} \dots \bar{v}_{n,i} |^T \quad |4.2|$$

le vecteur observation à l'instant i correspondant à l'exécution de la sous-tâche ℓ , avec

$$\bar{v}_{j,i} = \frac{\sum_k v_{j,i}^k}{k} \quad \begin{array}{l} k \text{ nombre d'observations relatives à la} \\ \text{composante } v_j \text{ entre les instants } i-1 \text{ et } i \\ \text{séparant deux sous-tâches consécutives.} \end{array} \quad |4.3|$$

$$H_m = | \bar{v}_{1,m} \dots \bar{v}_{j,m} \dots \bar{v}_{n,m} |^T \quad |4.4|$$

le vecteur fatigue modèle moyen sans surcharge de l'opérateur.

$$H'_m = | \bar{v}'_{1,m} \dots \bar{v}'_{j,m} \dots \bar{v}'_{n,m} |^T \quad |4.5|$$

le vecteur fatigue modèle moyen avec surcharge de l'opérateur.

F_j est la fonction qui lie $\bar{v}'_{j,m}$ et $\bar{v}_{j,m}$ à tout instant,

$$\bar{v}'_{j,m} = F_j(\bar{v}_{j,m})$$

La connaissance de l'ensemble des fonctions F_j , évaluées de façon expérimentale, permettra l'élaboration d'un vecteur quantificateur de la fatigue à tout instant par voie de conséquence; la note F_{i+1} attribuée à la fatigabilité est obtenue en faisant la moyenne arithmétique de l'ensemble des notes concernées. Celles-ci sont déterminées, à partir de chacune des observations du vecteur quantificateur après avoir vérifié leur cohésion, en comparant l'ensemble des résultats obtenus à un facteur de dispersion des notes défini par le programmeur décideur.

Ainsi on peut écrire

$$\bar{F}_{i+1} = \frac{\sum_{j=1}^n f_{i+1}}{n} \leftarrow \begin{array}{l} \text{note évaluée à partir de chacune} \\ \text{des observations du vecteur} \\ \text{quantificateur} \end{array} \quad |4.6|$$

↑
note attribuée à la
fatigue à l'instant
 $i + 1$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (f_{i+1} - \bar{F}_{i+1})^2} \rightarrow \sigma \text{ défini} \quad |4.7|$$

En cas de dispersion, la note attribuée à la fatigabilité sera celle qui remplit les conditions précitées à l'instant antérieur à celui où la quantification est demandée.

- remarque sur l'étude des observations

N'ayant fait aucune étude expérimentale sur la fatigabilité d'un opérateur intégré dans le processus prédéfini, nous citons à titre d'exemple quelques observations qui nous semblent facilement mesurables. Elles sont en corrélation avec la fatigue si nous supposons que les opérateurs sont relativement entraînés.

- * temps de réaction après impression d'un message
- * nombre d'erreurs d'impression de caractère lors de l'envoi d'une commande

- * temps séparant deux caractères appartenant à un même mot
- * temps de télémanipulation entre deux points.

b) Réalisabilité

Le coefficient maximum sera attribué à l'exécution par l'homme s'il est fait abstraction de facteurs de qualité tels que temps d'exécution et précision. Ces derniers sont d'ailleurs quantifiés à part entière.

c) Indice de vigilance

La quantification de ce critère est basée sur le rythme des consignes visuelles destinées à l'opérateur et apparaissant sur l'écran. Jusqu'à un rythme de 20 impressions/h | 3 | la priorité est donnée au robot. Lorsque le rythme d'apparition des messages est inférieur à ce seuil, la priorité est donnée à l'opérateur à performance équivalente.

d) Précision

La quantification dans ce cas comme cela a été déjà évoqué auparavant, est directement liée aux capteurs de comparaison utilisés (oeil, capteurs physiques) et aux algorithmes de commande du robot pour réaliser la sous-tâche demandée.

e) Temps d'exécution de la sous-tâche demandée

L'évaluation de ce temps est basée sur les deux paramètres précités.

- *temps d'activité intrinsèque*

Cette activité est décomposable en plusieurs mouvements élémentaires effectués par l'homme. L'ensemble des temps moyens

mis lors de l'exécution de ces mouvements ont été évalués en TMU (Time Measurement Unit) par certains ergonomistes [7].

$$1 \text{ TMU} = 0,00001 \text{ h} \quad |4.8|$$

Si nous considérons par exemple un opérateur humain assis, son activité intrinsèque se décompose comme suit :

* Temps de lecture du message imprimé sur la console

Il est évalué par la formule :

$$T_{\text{lecture}} = \frac{1,08 \times (7,3) \times (N)}{1,58} = 5,05 N \quad |4.9|$$

où N est le nombre de mots lus ou à lire.

Ce temps de lecture a été évalué sur une moyenne d'opérateur.

Il dépend en général de la complexité du sujet à lire, de la longueur de la ligne imprimée (optimum pour 8,64 cm), de la forme et dimension des caractères. Nous ne tenons pas compte de ces variables pour notre cas.

Nous signalons par ailleurs, que ce temps est basé sur le temps de fixation et de déplacement des yeux (saccades).

Ces saccades sont au nombre de trois :

- interfixation : elle concerne le déplacement du regard entre les fixations dans une même ligne.
- balayage de retour : il s'agit du déplacement du regard lors d'un retour à la ligne.

- régression : saccade effectuée par manque de concentration ou de connaissance suffisante du sujet.

* Temps de décision

Ce temps peut être évalué par la relation :

$$TR \text{ (ms)} = 270 \ln (n + 1) \quad |4.10|$$

avec n = nombre de discrimination demandée avant réaction.

* Activité motrice

C'est l'activité effectuée par l'homme pour atteindre le ou les manches à balai en position assise.

Pour une certaine sous-tâche, elle est décomposable en mouvement élémentaire prise parmi trois concepts de mouvements qui sont :

- . atteindre
- . saisir
- . lâcher

Le temps d'exécution de ces mouvements varie en fonction du type de mouvement à exécuter (ex. : atteindre un objet parmi d'autres, atteindre un objet isolé occupant une position légèrement variable d'un cycle à l'autre, etc ...).

L'ensemble des temps d'exécution de ces divers mouvements existe sur des tables standards M.T.M. (Methods Time Measurement). Il s'agit seulement d'évaluer l'amplitude des mouvements à faire. Selon la position de l'opérateur, d'autres types de mouvement peuvent être exigés.

Signalons que lors de l'exécution de ces mouvements, certains peuvent être simultanés et/ou combinés (faits par deux ou plusieurs membres ou exécutés en même temps).

Là aussi, un certain nombre de règles permettent d'évaluer le temps d'exécution de ces mouvements. [7].

* Temps de télémanipulation

Si les points de départ et d'arrivée sont connus, on peut calculer ce temps en se basant sur les lois de mouvement du robot, les vitesses et accélérations limites, et les performances de chaque opérateur. Ce dernier point est ajusté selon ses activités antérieures.

γ - Majoration du temps de télémanipulation due à la
=====

précision
=====

Si une grande précision est demandée à la sous-tâche à effectuer, une majoration du temps calculé est à prévoir. Elle peut être due à la nécessité d'avoir un temps de fixation plus long et un contrôle musculaire supplémentaire.

IV.2.2. - Quantification des critères relatifs au robot

La quantification de ces critères est basée essentiellement sur la connaissance du modèle des capteurs et des algorithmes utilisés. Cette quantification repose donc sur des données beaucoup plus concrètes.

IV.2.3. - Quantification des critères généraux

Parmi ces critères intervient le coefficient d'asservissement. On constate que l'ensemble des temps évoqués dans le calcul sont mesurables (P.I.T. pour les paramètres H/R; vitesse des équipements en amont du robot).

IV.3 - ETUDE EN SIMULATION DE L'INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES

Cette étude en simulation a pour but de montrer l'influence des différents paramètres (c, d, P_j) sur la décision finale élaborée par la méthode exposée dans le chapitre 3. Elle étaye ainsi les remarques sur le soin à apporter dans l'attribution de ces paramètres. Les N critères choisis sont supposés indépendants ou corrélés avec une notation tenant compte de cette interdépendance. Cette supposition justifie le choix de l'opérateur Σ adopté pour traiter cette simulation. Nous nous sommes basés sur les équations |3.19|. |3.21| pour classer le système à dilemme en quatre sous-systèmes. Le choix d'un sous-système est directement lié à la nature du processus à commander.

IV.3.1. - Système à dilemme complémentaire (S.D.C.)

Ce système est représenté par l'organigramme de la figure(4.1). Il s'agit d'un système sans équivoque de décision.

Sur cet organigramme, l'hypothèse de la concordance est systématiquement testée sur la composante H et ceci pour chacune des sous-tâches qui compose ce processus. Si cette condition n'est pas vérifiée, l'exécution de la sous-tâche sera automatiquement attribuée à la composante R. On peut alors associer à ce sous-système

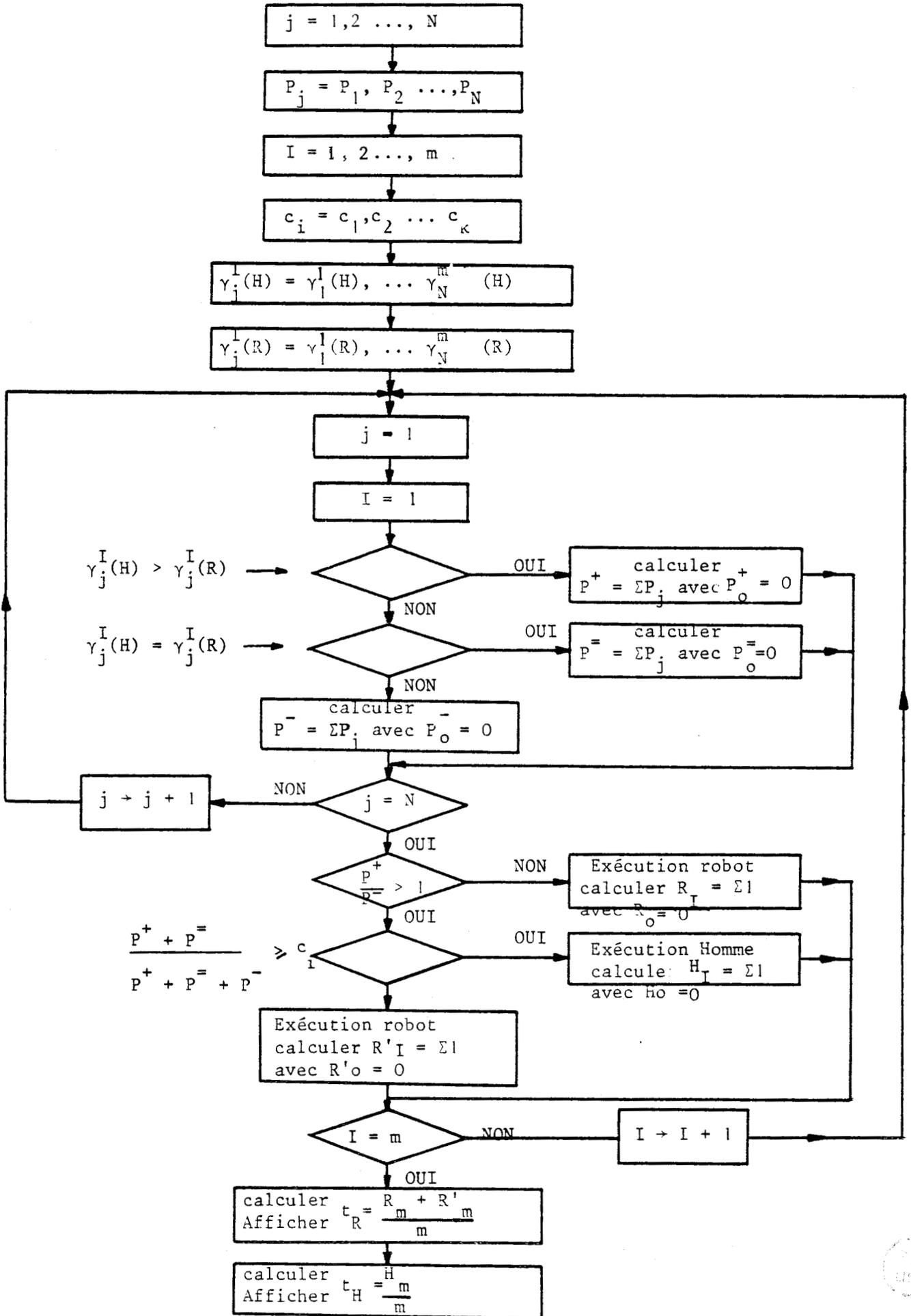


Figure (4.1) : Organigramme donnant le taux de répartition des composantes H,R du dilemme pour différents $c_i, P_j, Y_j^I(H), Y_j^I(R), m$ donnés pour le sous-système à dilemme complémentaire S.D.C.

une certaine universalité à l'une des composantes, et une notion de suppléance à l'autre. Notons également que la condition de discordance peut être introduite de façon additionnelle dans ce sous-système. Elle conduit à une réduction du taux d'allocation de la composante H, et donc à une augmentation de celui de R.

IV.3.2. - Système à dilemme avec équivoque de décision pour défaut de concordance (S.D.E.D.C.)

Il s'agit d'un système où la concordance des critères est systématiquement testée pour les deux éléments en présence. Cette restriction nous conduit à un taux d'équivoque variable selon la valeur des coefficients précités. L'organigramme afférent à ce système est montré sur la figure(4.2) .

IV.3.3. - Système à dilemme avec équivoque de décision pour discordance (S.D.E.D.D.)

L'équivoque de décision qui apparaît ici résulte du paramètre de discordance. Ce système est montré sur la figure(4.3) .

Ainsi dans ce sous-système, les composantes sont complémentaires en ce qui concerne la condition de concordance. La restriction concerne la composante H considérée comme suppléante de R. De même cette restriction pourrait être étendue à la composante R.

IV.3.4. - Système à dilemme avec équivoque de décision pour discordance et défaut de concordance (S.D.E.D.D.C.)

Il s'agit d'un système où sont rassemblées les deux conditions

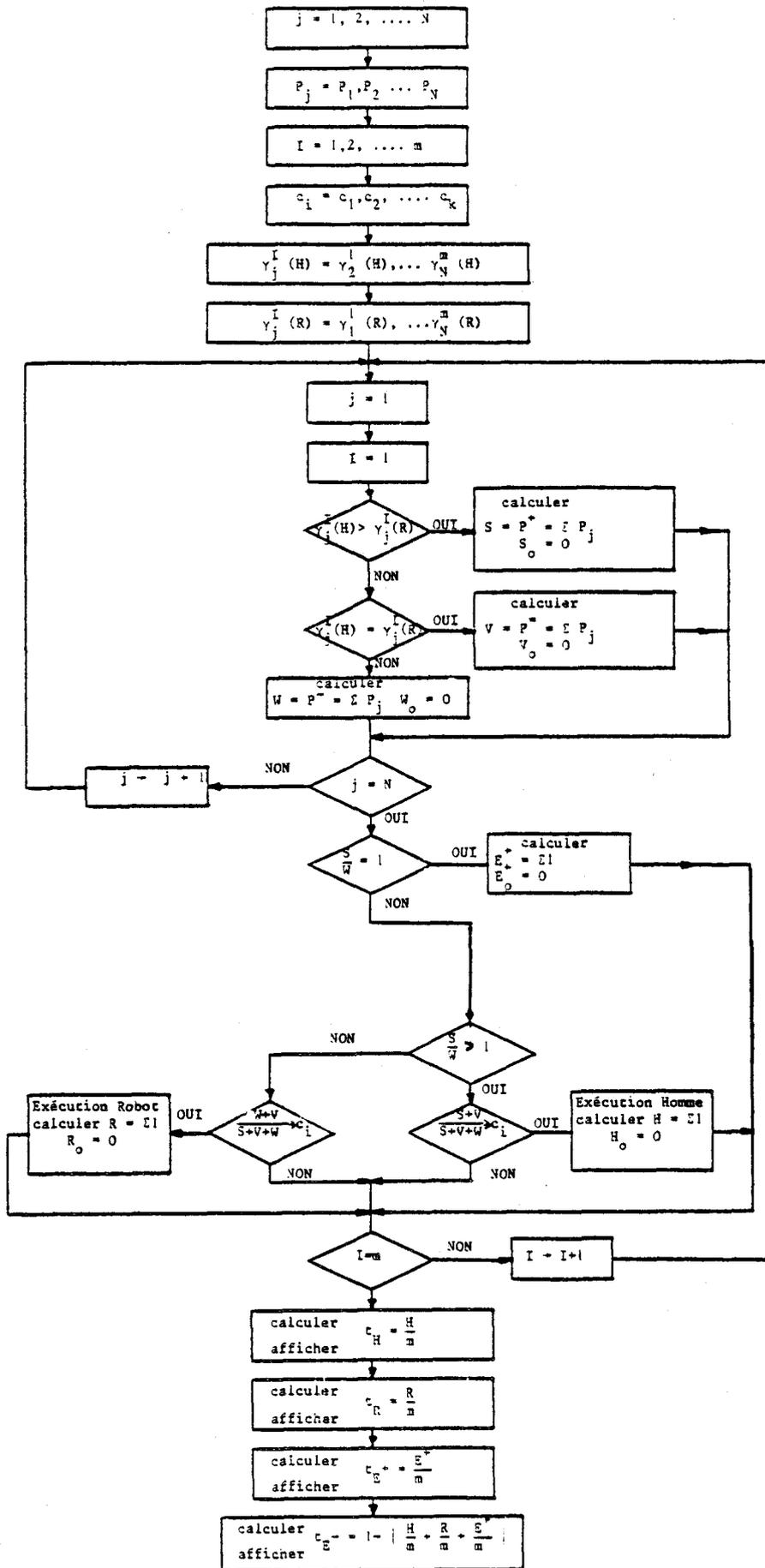


Figure (4.2) ORGANIGRAMME DONNANT LE TAUX DE REPARTITION DES COMPOSANTES H, R, E⁺, E⁻ DANS UN SYSTEME A DILEMME AVEC EQUIVOQUE POUR DEFAUT DE CONCORDANCE AVEC DIFFERENTS c_i, P_j et Y_j^I(H), Y_j^I(R) et m donnés



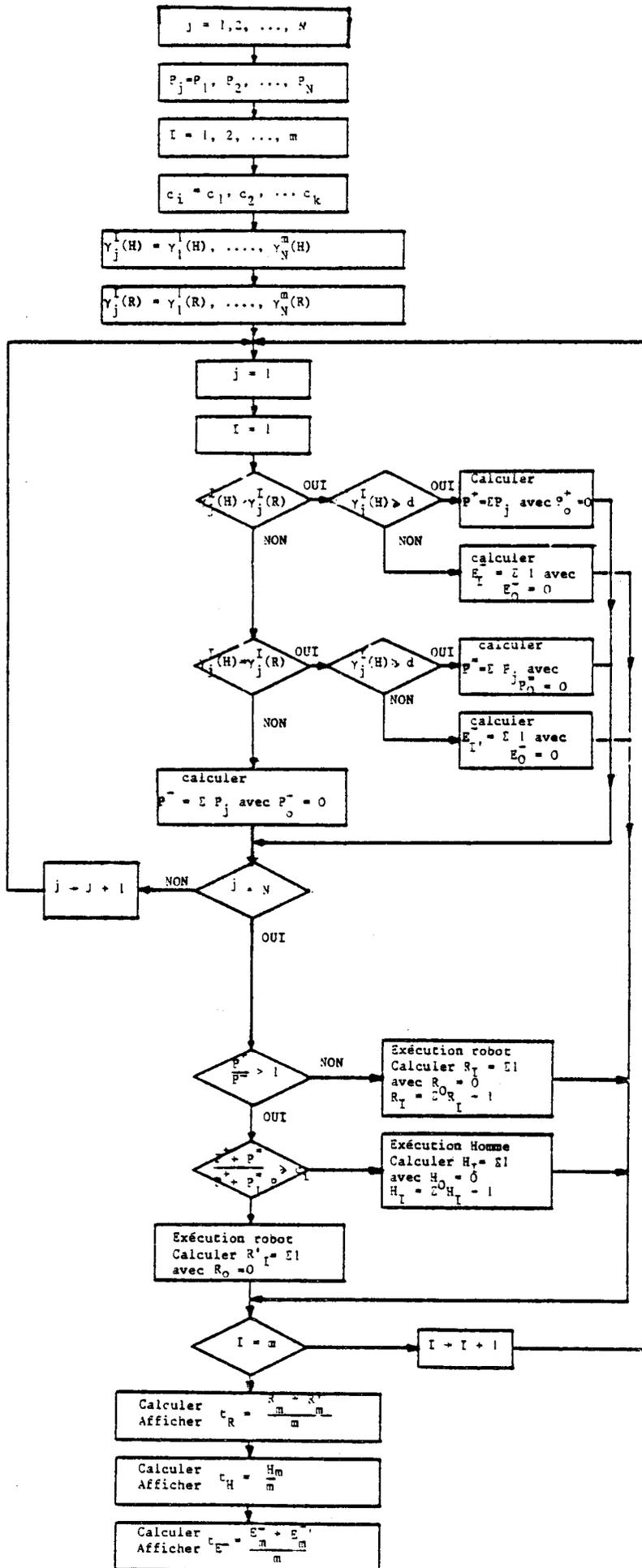


Figure (4.3) ORGANIGRAMME DONNANT LE TAUX DE REPARTITION DES COMPOSANTES H,R,E⁻ DANS UN SYSTEME A DILEMME AVEC EQUIVOQUE DE DECISION POUR DISCORDANCE S, D, E, D, D.

restrictives ce qui conduit nécessairement à un taux d'équivoque plus important. Dans l'organigramme (4.4) qui représente ce sous-système la condition de discordance, n'est vérifiée que par la composante H. Comme nous l'avons signalé précédemment, celle-ci peut être étendue à la composante R.

IV.3.5. - Objet de la simulation

Les courbes relevées concernent :

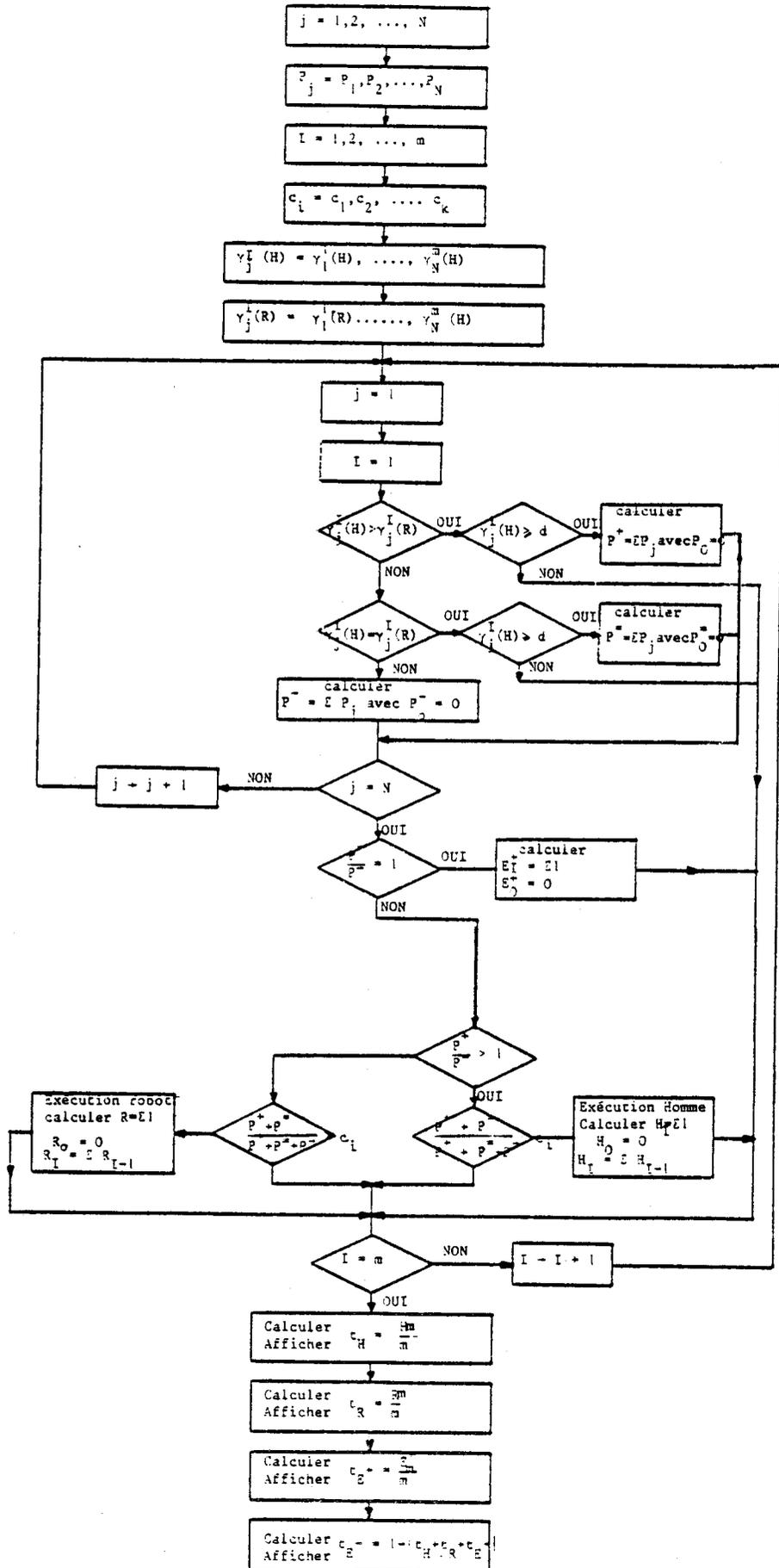
- le taux de répartition homme t_H en fonction du paramètre de concordance c pour différents P_j .
- le taux de répartition robot t_R en fonction de c pour différents P_j .
- le taux d'équivoque positive t_E^+ en fonction de c . t_E^+ caractérise une aptitude égale au sens des équations |3.20| |3.22| des deux composantes à effectuer une sous-tâche.
- le taux d'équivoque négative t_E^- en fonction de c . t_E^- caractérise une inaptitude égale des deux composantes à effectuer une sous-tâche.

Il est à noter que le paramètre c est choisi supérieur ou égal à 0,5. Ce fait découle des équations |3.19| .

D'autre part nous signalons la propriété évidente suivante.

$$P^+(H,R) = P^-(R,H) = \sum_{j \in J^-(R,H)} P_j \quad |4.11|$$

avec



Figure(4.4) ORGANIGRAMME DONNANT LE TAUX DE REPARTITION DES COMPOSANTES H,R,E⁺,E⁻ DANS UN SYSTEME A DILEMME AVEC EQUIVOQUE DE DECISION POUR DISCORDANCE ET DEFAUT DE CONCORDANCE S.D.E.D.D.C.



$$J^-(R,H) = J \text{ tq } \gamma_j (R) < \gamma_j (H)$$

$$J = \{ j_1, j_2 \dots j_N \}$$

Cette relation est utilisée dans la détermination des résultats concernant le système 2.

L'ensemble des programmes relatifs à cette simulation sont écrits en BASIC. Ils sont le reflet des organigrammes (4.1)

4.2 . Pour l'ensemble de ces essais une distribution aléatoire identique des notes est supposée. Elle comporte 10 critères et 10 sous-tâches. Il est évident que cette répartition n'a aucune importance dans cette simulation, dans la mesure où l'on désire examiner la variation des paramètres relative à une distribution constante, de façon à tirer les conclusions sur leur influence.

IV.3.6. - Conclusions pragmatiques

Les conclusions se rapportant aux deux sous-systèmes exposés en 4.4.1. et 4.4.2. sont rassemblées dans les tableaux (4.19) (4.20). L'ensemble des courbes annexées, résultant de cette simulation exceptées t_E^+ sont des fonctions en escalier. Dans le cas du sous-système 1 la courbe $t_H = f(c)$ est définie mathématiquement comme suit.

Soit P_1, \dots, P_p l'ensemble des paliers deux à deux disjoints, on définit $t_H = f(c)$ en faisant correspondre à tout P_i un point a_i d'un espace vectoriel F borné, sur le corps des réels. La fonction f qui ne prend qu'un nombre fini de valeur dans l'espace F . Elle est constante sur tout P_i . D'autre part, si les fonctions caractéristiques des P_i sont définies comme suit :

$$\varphi_{P_i}(c) = 0 \quad \text{si } c \notin P_i; \quad \varphi_{P_i}(c) = 1 \quad \text{si } c \in P_i \quad |4.12|$$

On aboutit aux relations suivantes qui permettent de définir $t_H = f(c)$ pour un système S.D.C.

$$\left\{ \begin{array}{l} f(c) = \sum_{i=1}^p \varphi_{P_i}(c) \cdot a_i \\ \\ p = \sum_1^m M_I^{\neq} + \sum_1^m M_I^= + 1 \end{array} \right. \quad |4.13|$$

$\sum_1^m M_I^=$ la somme du nombre de valeurs différentes de la fonction $C_I = \frac{P^+ + P^=}{P^- + P^= + P^-}$

relative à chaque sous-tâche telle que $\frac{P^+}{P^-} > 1$

$\sum_1^m M_I^=$ la somme du nombre de valeur égale de la fonction $C_I = \frac{P^+ + P^=}{P^+ + P^= + P^-}$

relative à chaque sous-tâche telle que $\frac{P^+}{P^-} > 1$

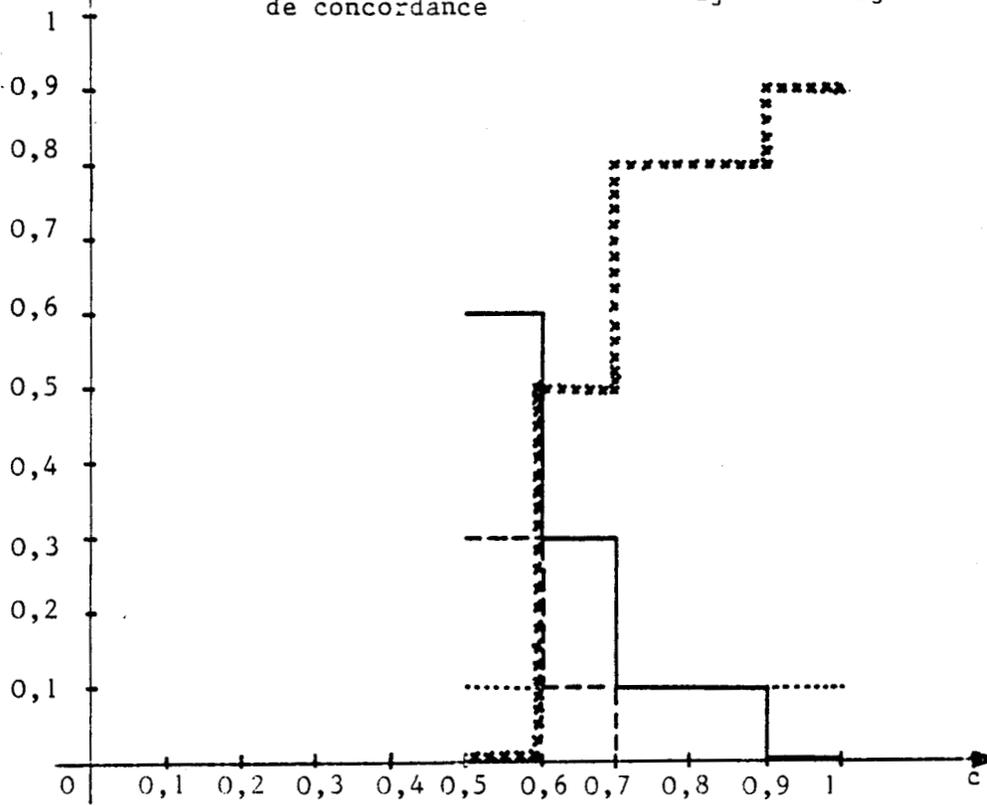
C_I valeur de la fonction de concordance relative à la sous-tâche I telle que $\frac{P^+}{P^-} > 1$.

Une définition analogue peut être adoptée pour t_R, t_E^-

t_H, t_R
 $t_E + t_E^-$

Système à dilemme avec
équivoque pour défaut
de concordance

$$\frac{\sum P_j^+}{\sum_j} = 1; \quad \frac{\sum P_j^-}{\sum_j} = 1; \quad \frac{\sum P_j^0}{\sum_j} = 1$$



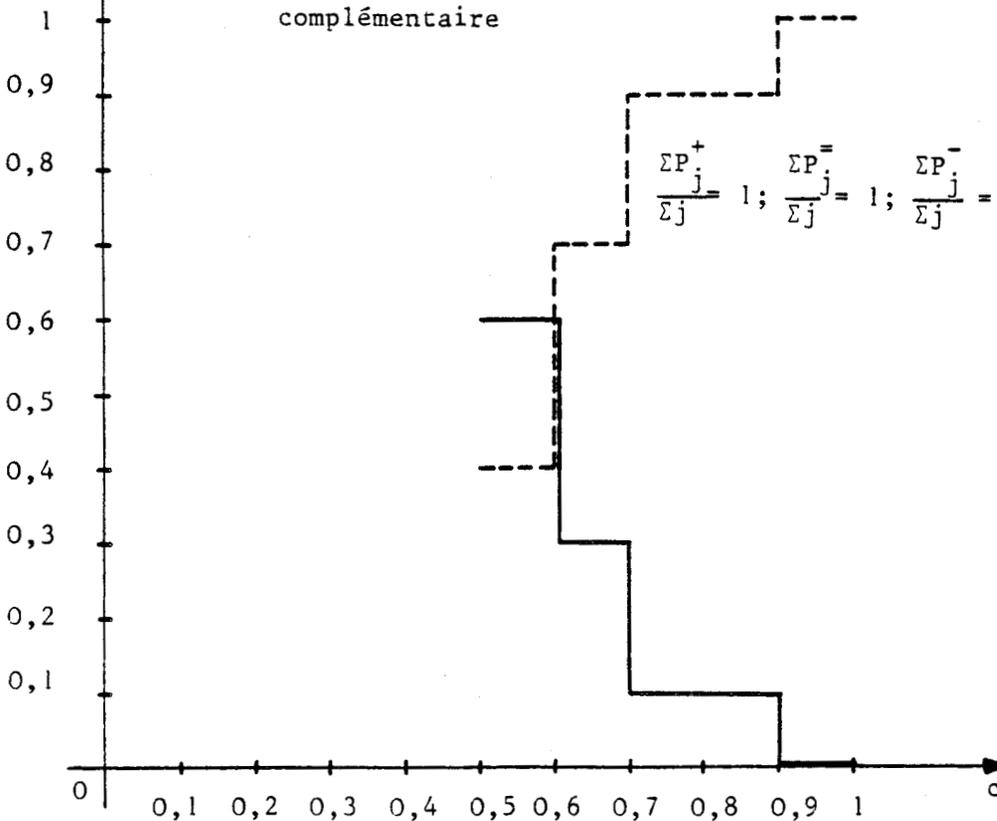
$\sum_j P_j^+ \leftarrow$ somme des poids des critères $\in J^+$

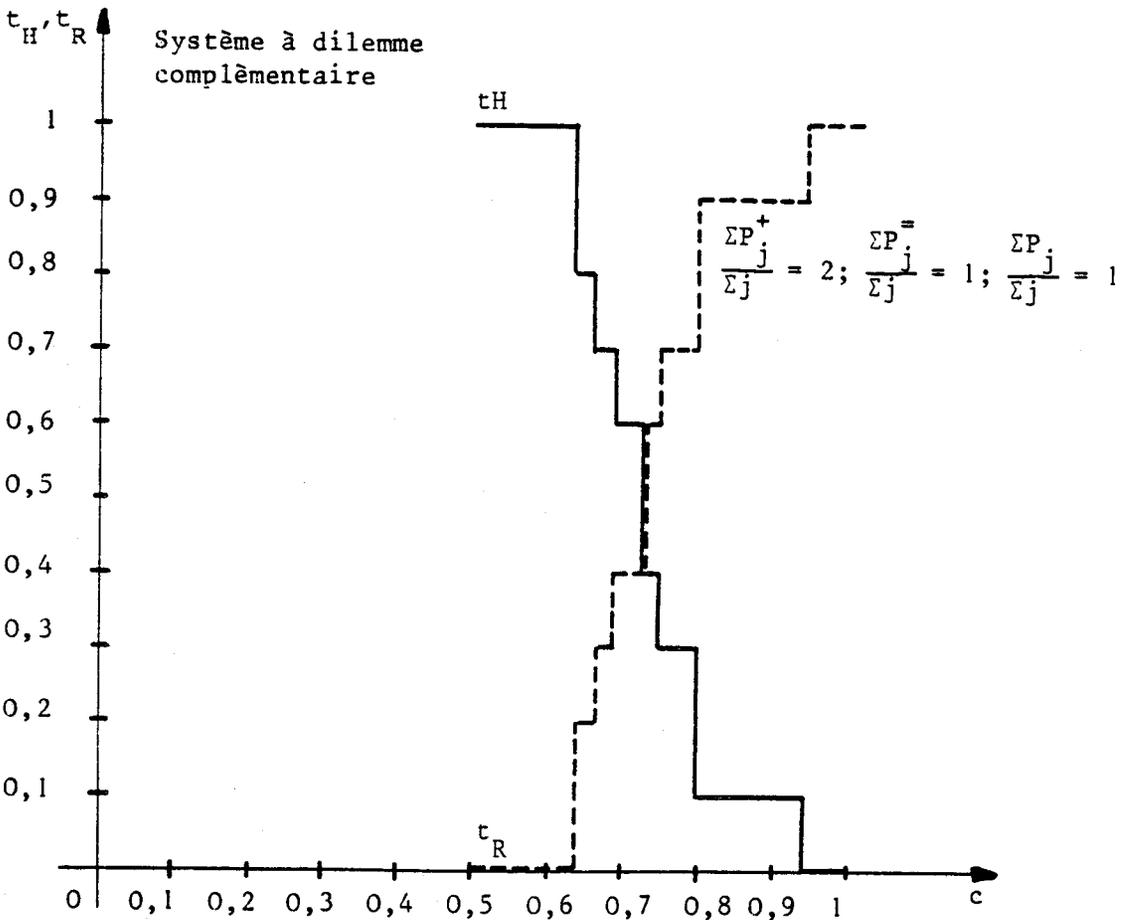
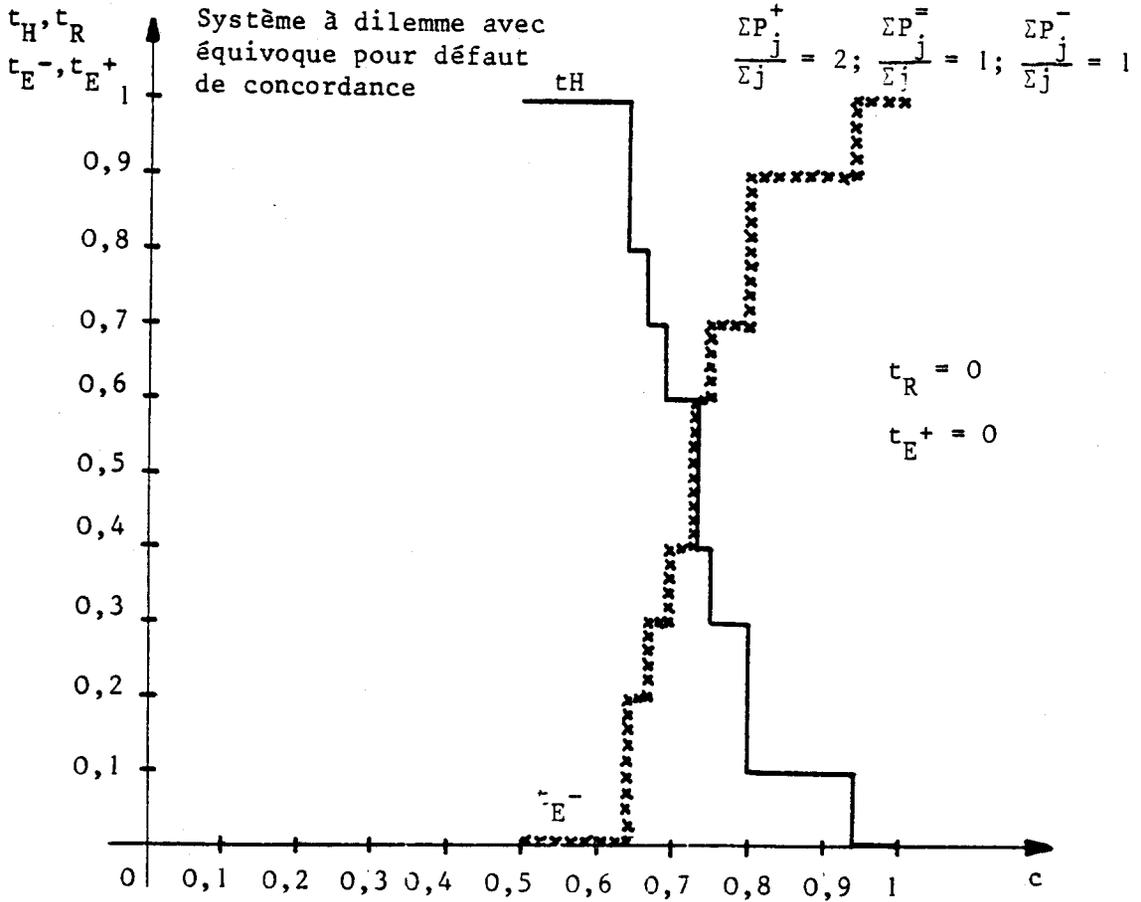
$\sum_j \leftarrow$ nombre de critère $\in J^+$

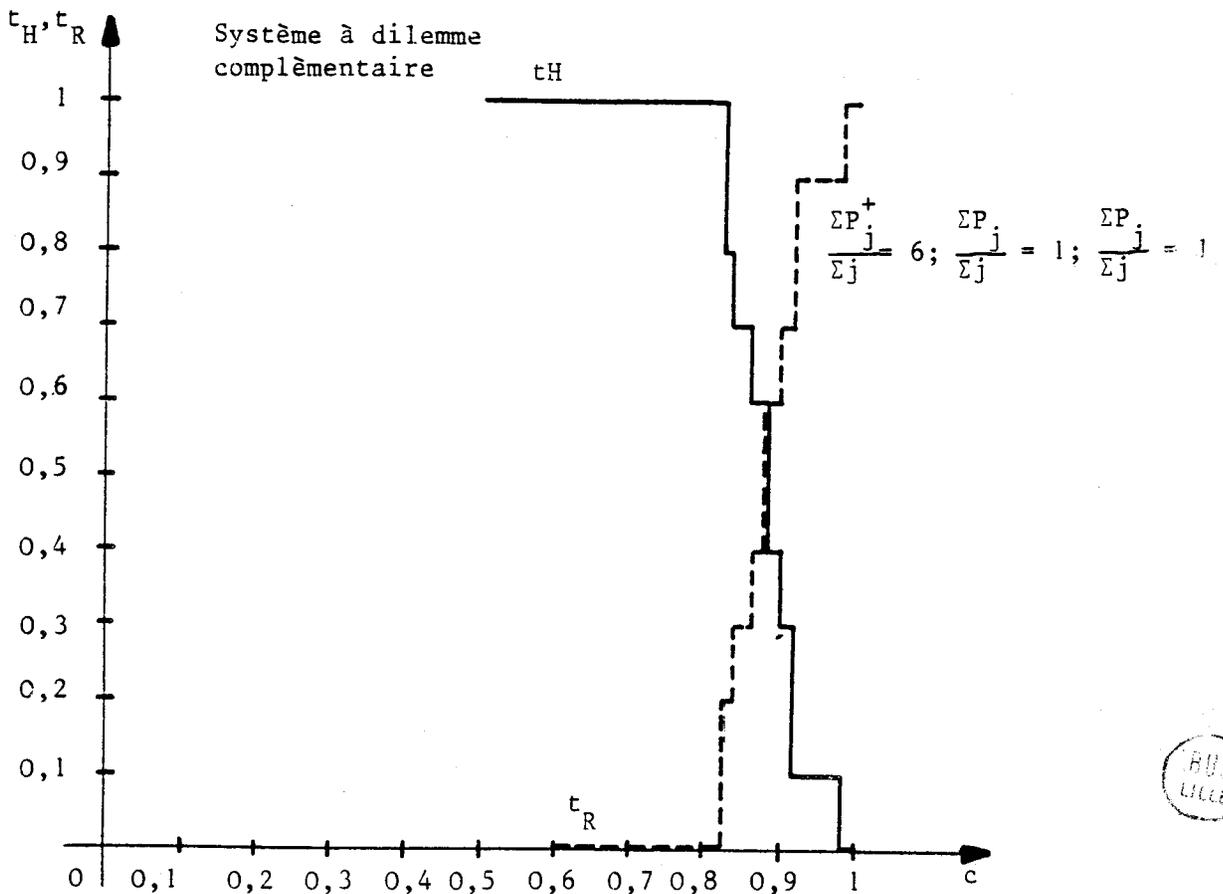
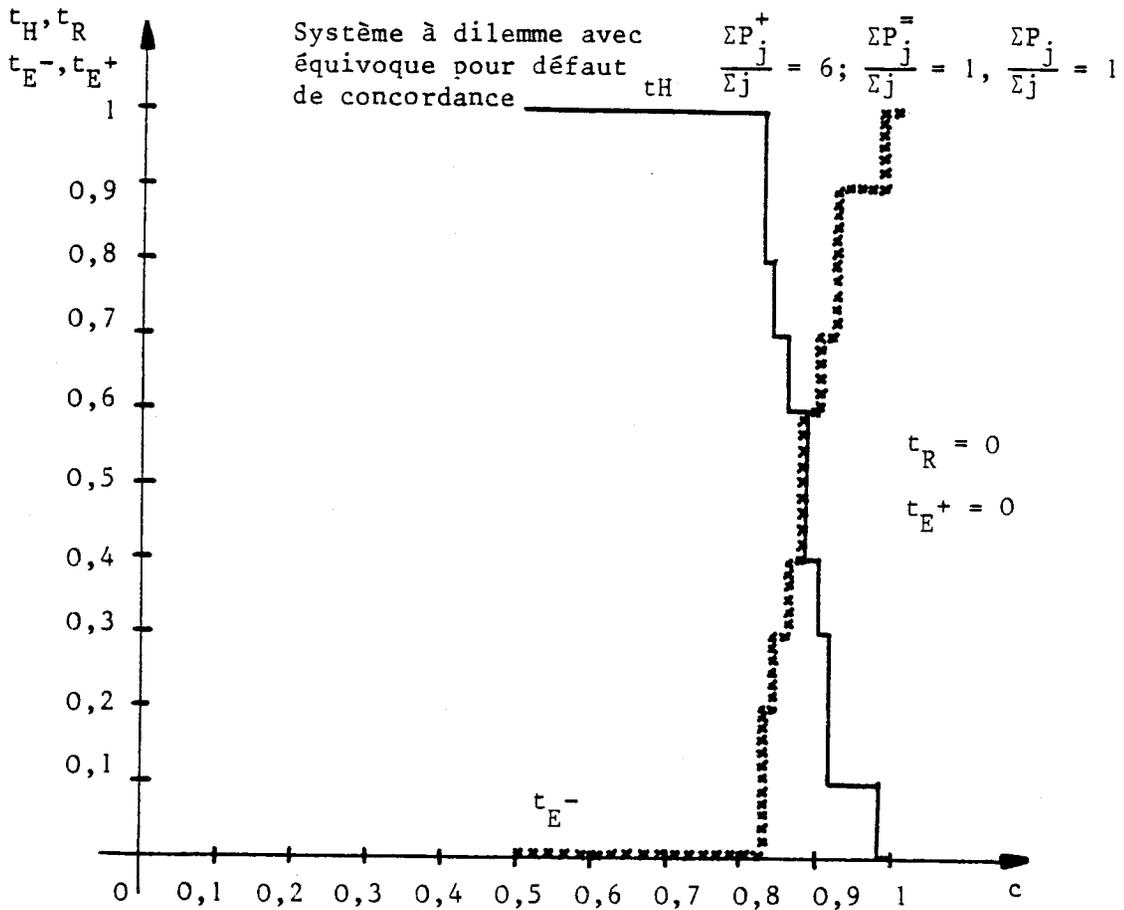
t_H, t_R

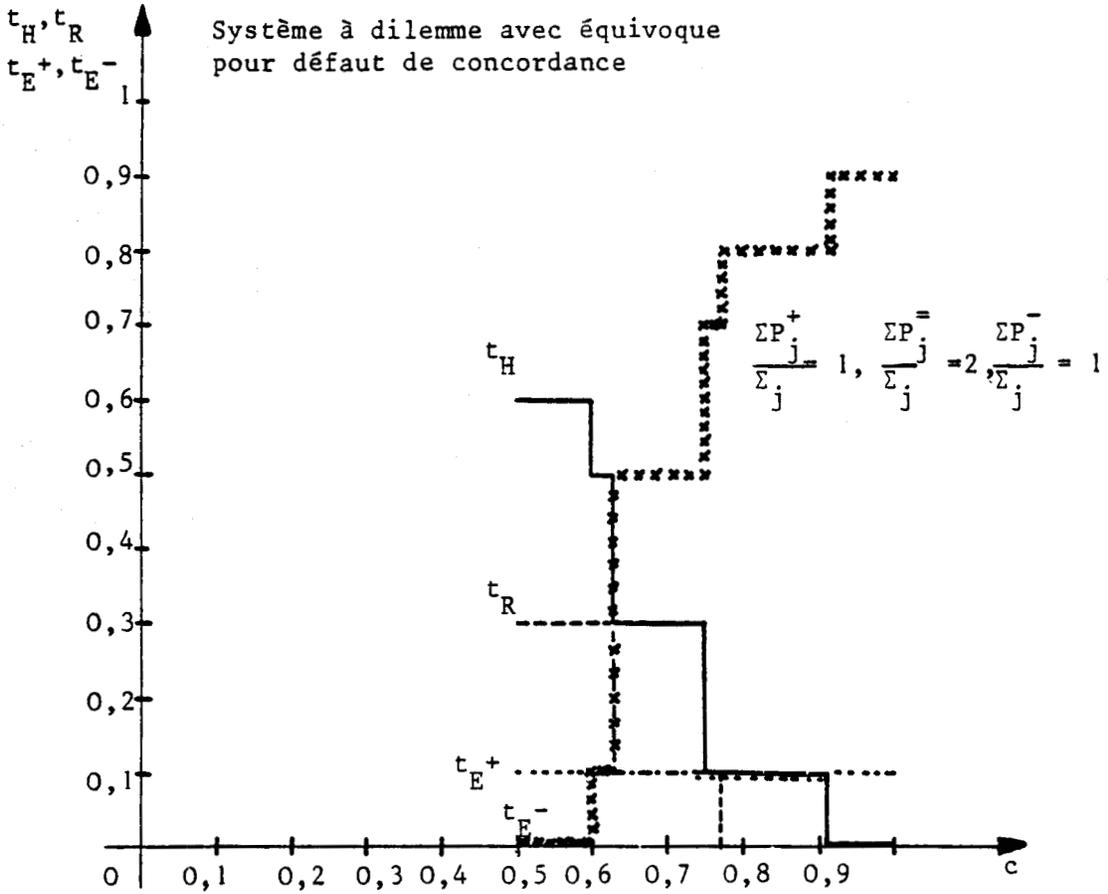
Système à dilemme
complémentaire

$$\frac{\sum P_j^+}{\sum_j} = 1; \quad \frac{\sum P_j^-}{\sum_j} = 1; \quad \frac{\sum P_j^0}{\sum_j} = 1$$



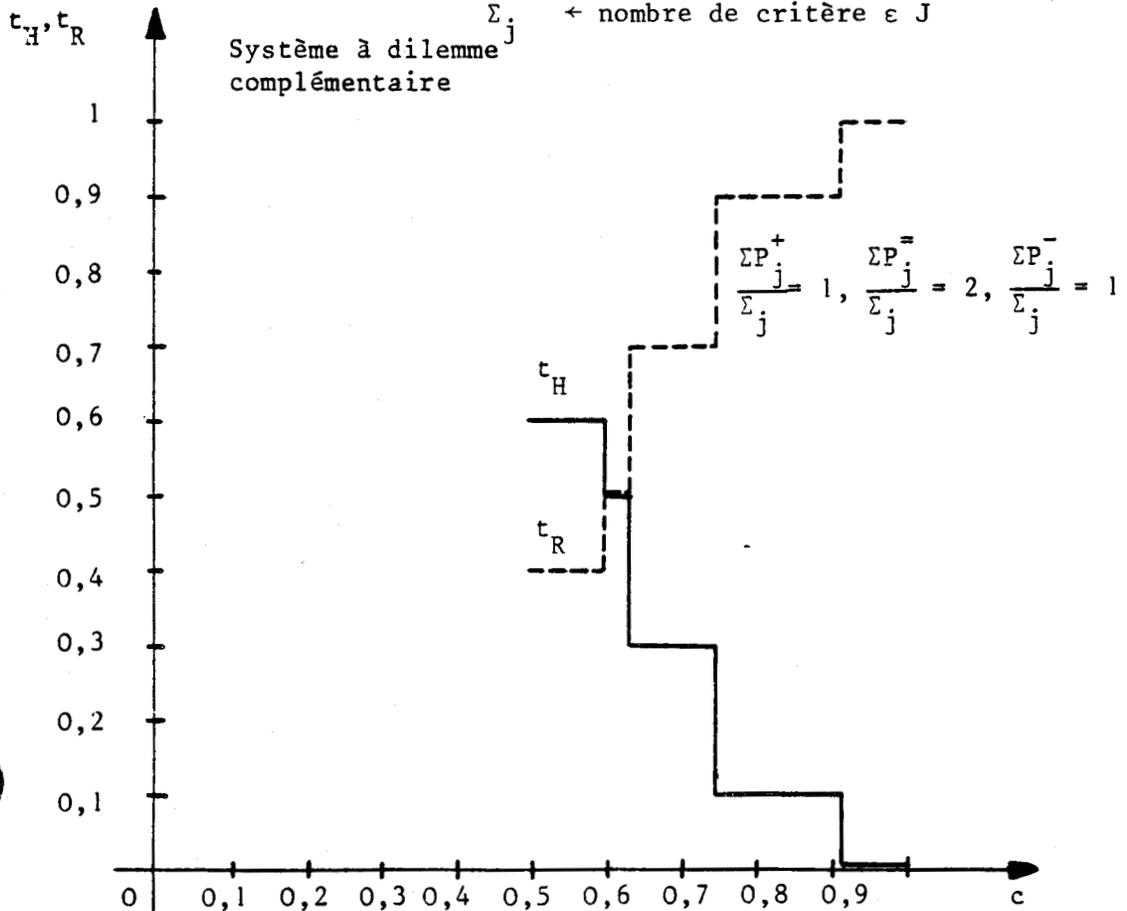


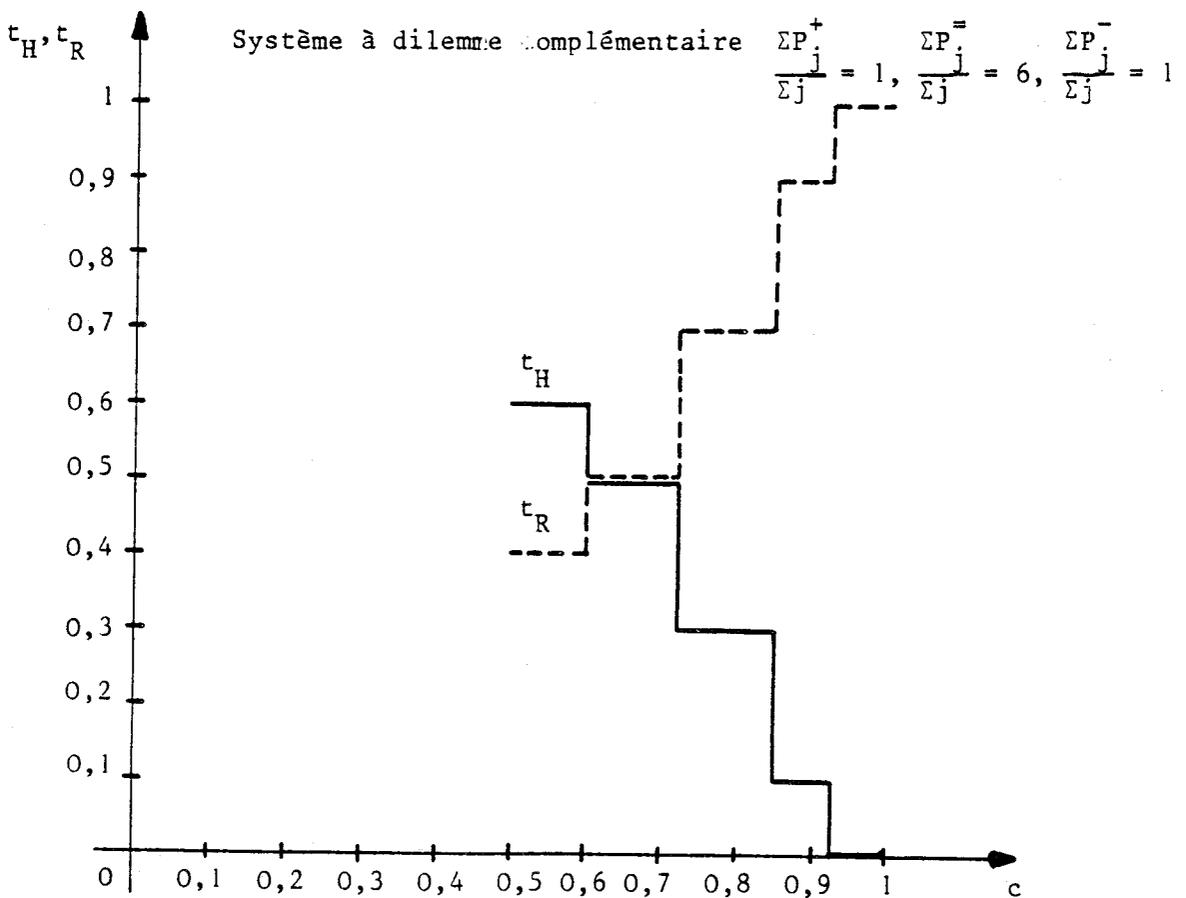
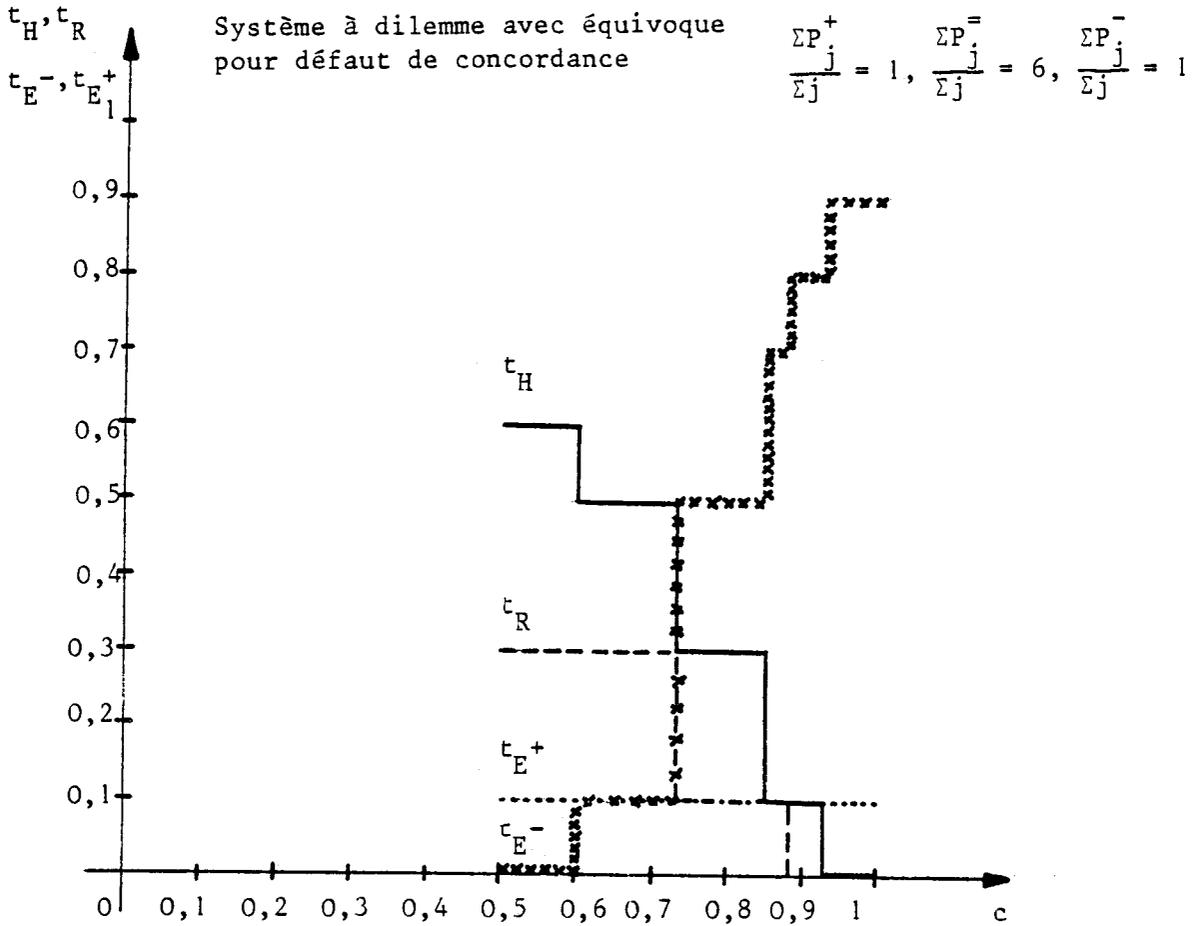


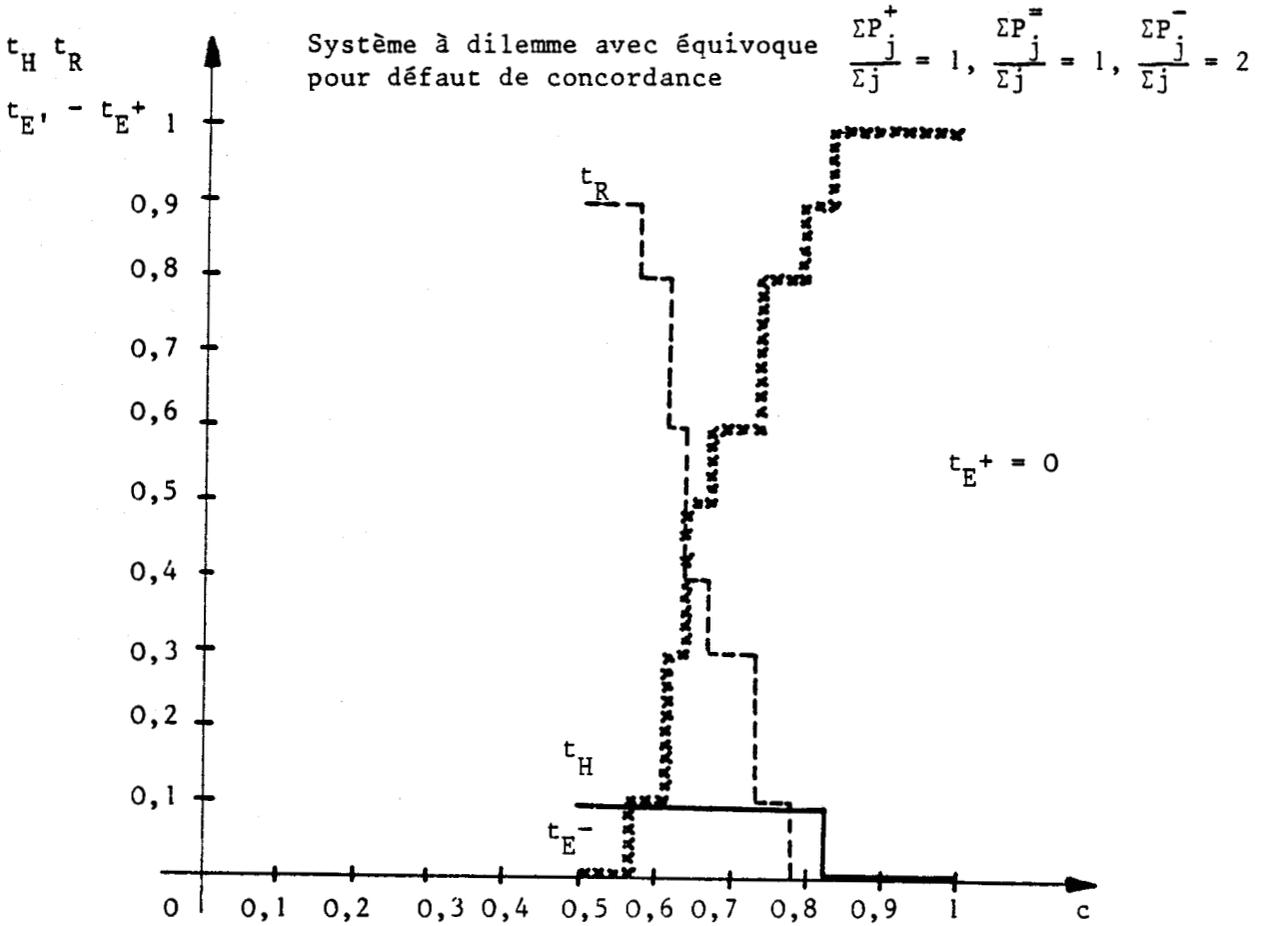


$\sum P_j^- \leftarrow$ somme des poids des critères ϵJ^-

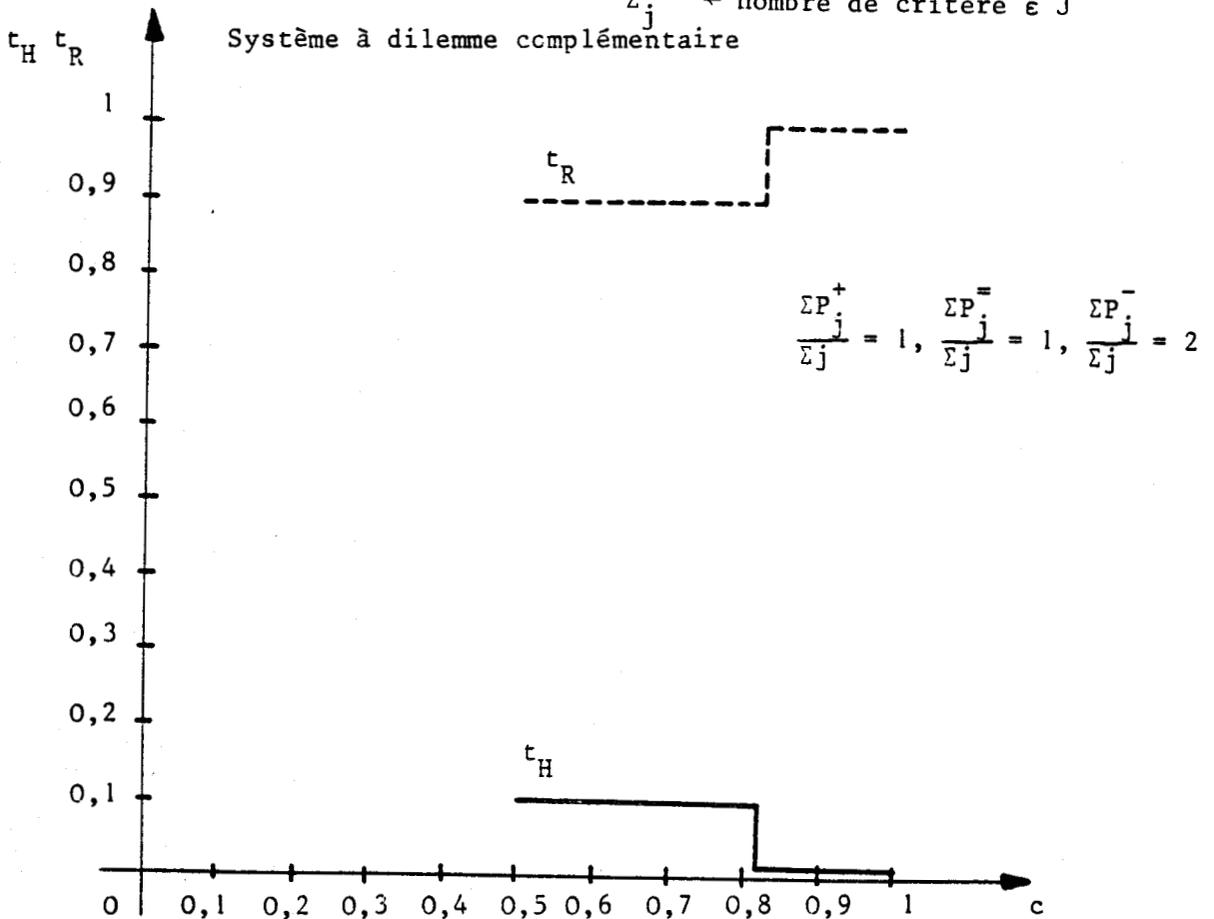
$\sum_j \leftarrow$ nombre de critère ϵJ^-

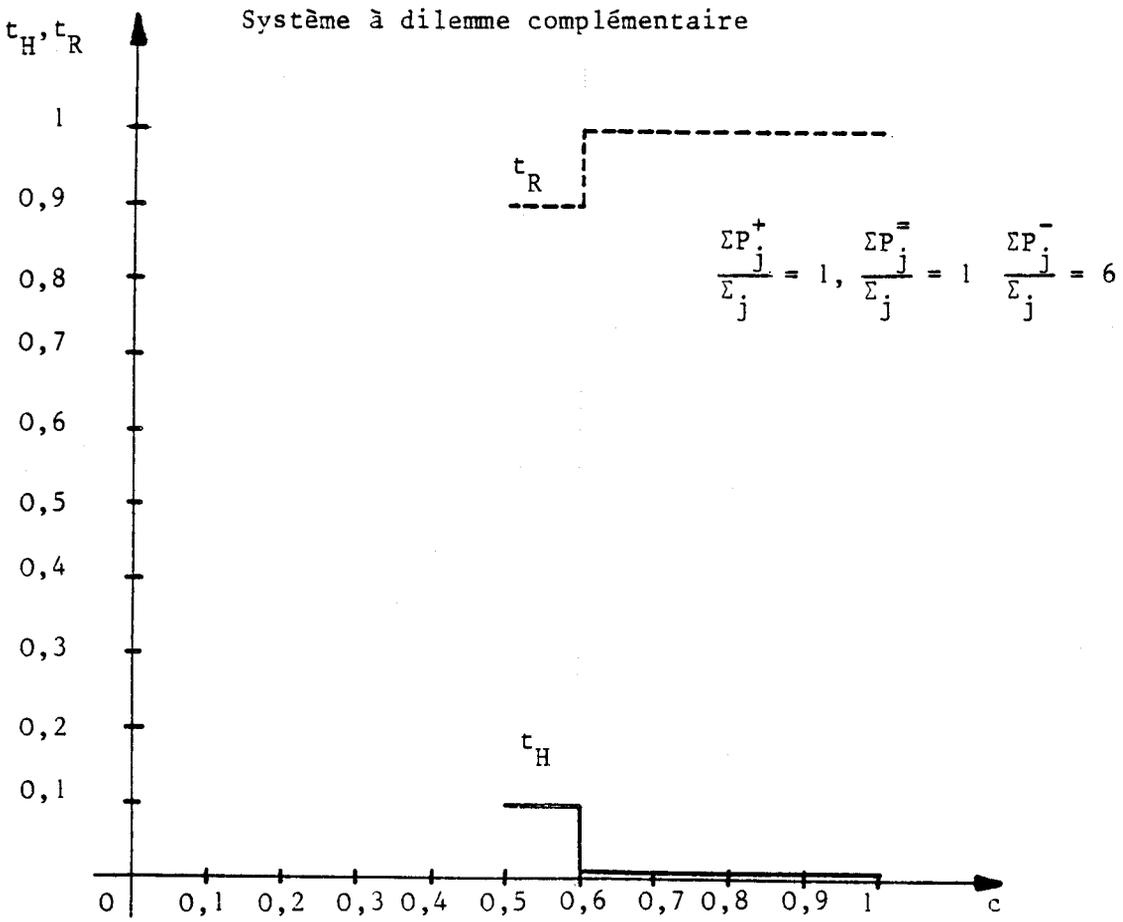
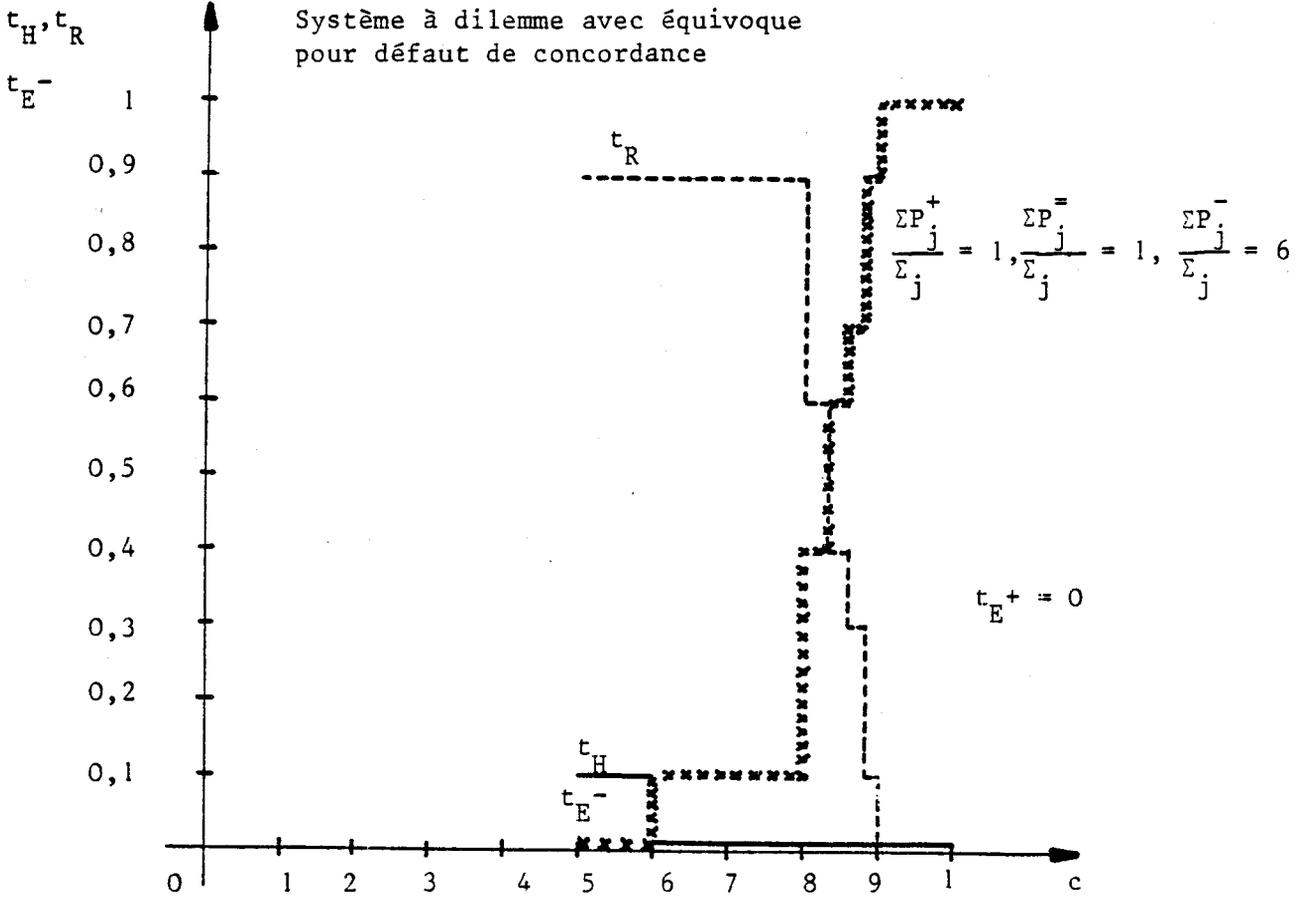






$\Sigma P_j^- \leftarrow$ somme des poids des critères ϵJ^-
 $\Sigma_j \leftarrow$ nombre de critère ϵJ^-







SYSTEME A DILEMME COMPLEMENTAIRE S.D.C.

Influence du paramètre de concordance c	INFLUENCE DES COEFFICIENTS DE PONDERATION P_j	
	Influence de la croissance de P_j^+	Influence de la croissance de P_j^-
<p>t_H est une fonction décroissante de c</p>	<p>* le changement du nombre de palier est dû à l'élimination des sous-tâches telles que $\frac{P_j^+}{P_j^-} < 1$</p>	<p>* le nombre de paliers a changé à cause de l'absence de note égale dans une sous-tâche ϵ à un sous-ensemble de sous-tâche ayant eu auparavant une valeur égale de la fonction de concordance. Cette constatation fait en sorte que le premier palier est d'égale valeur quelque soit l'accroissement de P_j^-.</p>
<p>t_R est une fonction croissante de c</p>	<p>* On note une augmentation de la largeur du palier P_1 et une diminution de celle de P_p et des paliers intermédiaires. Cela est dû à l'accroissement général de la valeur de la condition de concordance.</p> <p>* Si on considère un palier comme une marge d'indécision possible celle-ci diminue à partir de P_2 au fur et à mesure que les poids ϵ à P_j augmentent</p> <p>* t_H est une fonction croissante en palier de P_j sur un intervalle fixé.</p> <p>* un palier "point" peut être transormé en palier véritable.</p>	<p>* contrairement donc à un raisonnement intuitif la hauteur des paliers de t_H et t_R n'est pas une fonction constante de P_j^-</p>
	Influence de la croissance de P_j^-	Influence de la croissance de P_j^+
	<p>* le nombre de paliers de t_H et t_R a diminué du fait de l'allocation immédiate à R des sous-tâches telles que $\frac{P_j^+}{P_j^-} < 1$</p> <p>* lorsque les courbes ont le même nombre de paliers, P_j^- diminue alors que P_j^+ et les paliers intermédiaires augmentent. t_H et t_R sont respectivement une fonction décroissante et croissante en palier de P_j^- sur un intervalle fixé</p>	

SYSTEME A DILEMME AVEC EQUIVOQUE DE DECISION POUR DEFAUT DE CONCORDANCE S.D.E.D.C

INFLUENCE DU PARAMETRE DE CONCORDANCE	INFLUENCE DES COEFFICIENTS DE PONDERATION P_j		
	Influence de la croissance de P_j^+	Influence de la croissance de $P_j^=$	Influence de la croissance de P_j^-
<ul style="list-style-type: none"> * le nombre de paliers des fonctions t_H, t_R, t_E^- est le même * t_H est une fonction décroissante de c * t_R est une fonction décroissante de c * t_E^- est une fonction croissante de c * t_E^+ est une fonction constante de c * $t_H = t_H$ SDEDC SDC 	<ul style="list-style-type: none"> * t_H est une fonction croissante en paliers de P_j^+ sur un intervalle fixé * $T_E^- = TR$ et SDEDC SDC par voie de conséquence $TH = TH$ SDEDC SDC 	<ul style="list-style-type: none"> * t_E^+ reste constante quelque soit l'accroissement de $P_j^=$ * le nombre de paliers a changé par rapport à $\sum \frac{P_j^+}{j} = 1$ du fait de l'absence de note égale dans une sous-tâche ϵ à un sous-ensemble à valeur de concordance égale 	<ul style="list-style-type: none"> * t_E^+ devient = 0 du fait du changement de P_j^- * lorsque le nombre de paliers entre t_R et t_H devient égale selon un accroissement équivalent au système S.D.C. $t_H = t_H$ SDEDC SDC alors que $t_R \neq t_R$ SDEDC SDC étant donné la présence de la fonction t_E^-



IV.4 - PERSPECTIVES D'APPLICATION DU MODE MIXTE

Les applications du mode mixte se justifient de façon générale dans l'ensemble des processus où l'homme est d'une nécessité absolue pour des raisons de sécurité ou de limites technologiques (milieu hostile, éloigné ...) . L'objectif de ce mode est alors de tirer le maximum de profit de cette "symbiose forcée".

Cette orientation générale nous amène à préconiser une structure du type mode mixte au processus d'interaction micro robot-chirurgical, actuellement en cours de développement au Centre d'Automatique.

En effet l'introduction de l'instrumentation "micro robotisée" en milieu chirurgical, si elle doit apporter la contribution de dextérité, et de précision attendue, posera nécessairement le problème de la répartition des tâches à allouer au chirurgien et au micro-manipulateur. De plus une telle instrumentation ne peut être conçue sans lui adjoindre les notions élémentaires d'intelligence rattachées aux concepts de la robotique.

Une structure mode mixte, moyennant les études complémentaires évoquées dans ce mémoire est parfaitement adaptée à une telle situation.

La complexité, la non répétitivité des sous-tâches, la constante évolution de l'environnement d'un tel processus nous incite à recommander un partage dynamique entre les ressources en présence dans "l'espace d'influence" des capteurs du micro-manipulateur.

Cette préconisation se justifie d'autant plus que le résultat final dépend souvent de la perfection avec laquelle ont été exécutées l'ensemble des sous-tâches relatives à l'opération chirurgicale (découpe, suture ...).

Il est évident que dans ce processus la notion de sous-tâche devra être parfaitement définie. Cette définition tiendra compte en particulier d'une certaine cohérence en matière chirurgicale.

Un tel processus peut alors également être considéré comme la réunion de trois systèmes.

- système non découplable

pilotage du micro robot par le chirurgien, en toute sécurité.

- système à dilemme

partage dynamique des tâches dans l'espace d'influence des capteurs du robot (précision, réalisabilité, fatigabilité ...)

- système à vision nulle du chirurgien

tâche réalisée par le micro robot avec accord objectif du chirurgien planifiant le travail demandé.

CONCLUSION

Les réflexions évoquées ont permis de dégager les points qui devront faire l'objet d'une recherche beaucoup plus approfondie, tout en se rapprochant de certains résultats acquis.

L'étude en simulation permet d'étayer les remarques exposées au paragraphe III.5.2. c et démontre là aussi la nécessité de développer un algorithme dynamique de quantification des paramètres P_j , c, d définis.

D'autre part cette étude aurait pu être étendue aux deux derniers systèmes à dilemme prédéfinis. Cette extension n'a pas été envisagée dans le cadre de notre travail, il sera cependant souhaitable de compléter nos résultats et de tirer ainsi des conclusions plus générales par rapport à celles exposées dans ce chapitre.

Une réduction de l'équivoque t_E -concernant les sous-systèmes 2,3,4 peut être envisagée en admettant une marge de désaccord pour la concordance et la discordance. Ainsi on peut fixer que le plus grand désaccord à l'intérieur d'une sous-tâche vérifie les conditions suivantes.

$$\frac{\text{Max } \{ \gamma_j^I (H) - \gamma_j^I (R) \}}{\text{Max } h E_j} \leq d \min j \in J^+ (H,R) \text{ et } J^- (H,R)$$

↑
hauteur de l'échelle de notation la plus haute

$$C_I \geq c \min$$

↑
concordance minimale admissible

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

- 1 - BELLONE L.
" Amélioration de la condition de l'homme au travail "
Les Editions d'Organisations

- 2 - DE MONTMOLLIN M. (1967)
" Les systèmes Hommes-machines "
P.U. F

- 3 - KARGER D.W., F.H BAYA
" La mesure rationnelle du travail "
MASSON

- 4 - LAVILLE A.
" L'ergonomie "
Que sais-je ? 1. 128
P.U.F

- 5 - LERNER A. Ya.
" Fundamentals of cybernetics "
A PLENUM / ROSETTA EDITION

- 6 - MALVACHE N.
" Systèmes Homme-machine et robotique "
Support de cours D.E.A U.S.T.L. 1 1977-1979

- 7 - MAYNARD, STERGEHERTEN, SCHWAB
" M.T.M. "
GAUTHIER - VILLARS

- 8 - REGNIER J.
" L'amélioration des conditions de travail dans l'industrie "
MASSON

- 9 - RAOULT J.C.
 " *Etude de l'opérateur humain en tant qu'élément d'un système asservi* "
 Thèse es sciences Université de Toulouse 1962

- 10 - VIDAL P., D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P.DESODT, A. HABCHI
 " *Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain* "
 Rapport scientifique final Avril 1980
 A.T.P 3737

- 11 - WOODSON W.E D.W CONOVE (1978)
 " *Guide de l'ergonomie* "
 Les Editions d'Organisation

CHAPITRE V

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

INTRODUCTION

Bien que les programmes mis au point puissent être réimplantés dans une structure software concrète, en considérant leur modularité, les expériences réalisées ne visaient qu'à illustrer les principes exposés auparavant et notamment, les phases de découplage et recouplage.

D'autre part, la variété des types de trajectoires possibles dans la phase de conduite locale; l'importance que revêt leur choix compte tenu de leurs inconvénients et avantages intrinsèques, nous ont amenés à les présenter. Ces principes ont été en partie introduit dans nos essais.

Les programmes écrits en langage assembleur ou en PLM ont été mis au point à l'aide d'un système de développement MDS 231 qui a servi également à l'expérimentation temps réel.

Ils concernent plus particulièrement :

- La Mise en oeuvre d'une commande en position par coordonnées robot
- Le Découplage software
- Le Découplage par capteurs infrarouges
- Le Recouplage par dialogue

V.1 - DIFFERENTS TYPES DE TRAJECTOIRES ENTRE DEUX POINTS

V.1.1. - Mouvement point par point

Dans ce type de mouvement, seule la position finale est contrôlée. Chaque degré de liberté est alors libre de se déplacer jusqu'à sa position finale sans se préoccuper des actions opérées sur les autres articulations du robot. Lorsque une articulation a atteint sa position finale, elle la mémorise et attend que les autres aient complétées leurs mouvements. Le point visé est atteint quand toutes les articulations du manipulateur sont arrêtées. Ce processus peut être formalisé par les équations suivantes :

si $M_0 | \theta'_1, \theta'_2 \dots \theta'_m |$ sont les coordonnées robot du point de départ.

$M_d | \theta_1, \theta_2 \dots \theta_m |$ sont les coordonnées robot du point désiré.

$\vec{i}_1, \vec{i}_2 \dots \vec{i}_m$ les vecteurs unitaires définis par les directions des m degrés de liberté du robot.

On a :

$$\overrightarrow{M_0 M_d} = \sum_{i=1}^m N_i p_i \vec{i}_i \quad | 5.1 |$$

avec

$$p_1 = \frac{|\theta_1 - \theta'_1|}{N_1} \quad N_1, N_2 \dots N_m \text{ sont fonctions de l'échantillonnage adopté.} \quad | 5.2 |$$

$$p_m = \frac{|\theta_m - \theta'_m|}{N_m}$$

V.1.2. - Mouvement par interpolation

Dans ce type de mouvement, la position origine et la position arrivée sont contrôlées. L'interpolation est faite de façon à ce que la position d'arrivée soit atteinte au même instant par chacun des degrés de liberté du robot. Le temps nécessaire pour exécuter le mouvement d'ensemble est égal au temps que met l'articulation la plus lente pour exécuter son déplacement.

Aussi en reprenant les hypothèses précédentes, il est possible de formaliser ce type de mouvement par les équations suivantes :

$$\overrightarrow{M_O M_d} = N \sum_{i=1}^m p_i \vec{i}_i \quad | 5.3 |$$

avec

$$p_1 = \frac{|\theta_1 - \theta'_1|}{N} \quad | 5.4 |$$

"

$$p_m = \frac{|\theta_m - \theta'_m|}{N}$$

$$N = \max_{i=1 \dots m} N_i$$

N_i est défini en adoptant la même loi d'échantillonnage pour chacune des articulations.

V.1.3. - Mouvement par coordonnées cartésiennes

Ce type de mouvement est généré en appliquant une fonction d'interpolation à la position cartésienne finale désirée. Celle-ci doit ensuite être transformée rapidement de façon à être directement exécutable par les actionneurs du robot. L'utilité de ce type de mouvement apparaît lorsque l'organe terminal du manipulateur doit se déplacer, par rapport à un objet externe (alignement de pièce insertion ...) ou sous le contrôle d'un capteur (caméra, capteurs infra-rouge).

Ce mouvement est basé sur le formalisme suivant
si $X \in E^m$ représente l'espace de la tâche en coordonnées cartésiennes
 $\theta \in E^n$ l'espace de l'ensemble des configurations manipulateur possibles.

$$\text{Nous avons } X = F(\theta) \quad | \text{ 5.5 } |$$

où F est une fonction vectorielle en général non linéaire.

Pour passer du repère tâche au repère actionneur, deux types de méthode sont utilisées.

$$\theta = F^{-1}(X) \quad | \text{ 5.6 } |$$

si F^{-1} existe, la commande se fera en position

$$\Delta \theta = | J^{-1} | \Delta X \quad | \text{ 5.7 } |$$

$$\text{avec } | J |_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial \theta_j} \quad \begin{matrix} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m \end{matrix} \quad | \text{ 5.8 } |$$

Dans ce cas la commande se fera en vitesse.

V.1.4. - Analyse comparative des divers types de déplacement

Afin d'adapter le mouvement type selon la situation envisagée, le tableau (5.1) rassemble les inconvénients et les avantages de chaque catégorie de mouvement. Les conclusions consignées dans ce tableau seront particulièrement utiles lors du passage à la pratique.

Les deux premières méthodes sont donc intéressantes chaque fois que les accélérations de l'organe terminal et sa trajectoire n'a pas grande importance. Mais quand cette trajectoire doit être suffisamment connue, ou précise (informations capteurs, prévision d'obstacles...), les mouvements par coordonnées cartésiennes peuvent être utilisés de façon plus avantageuse.

POINT par POINT		INTERPOLATION		COORDONNEES CARTESIENNES	
Inconvénients	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients	Avantages
<ul style="list-style-type: none"> - Méconnaissance totale de la position instantanée de l'organe terminal - Accélération et décélération de chaque articulation peuvent transmettre des vibrations à l'organe terminal - Trajectoire entre deux points d'égales distances différentes selon leur position dans l'espace 	<ul style="list-style-type: none"> - utilisation maximale des variables dynamiques de chaque articulation (vitesse, accélération) leurs mouvements étant indépendants - Déplacement minimal de chaque articulation - Déplacement rapide - Mise en oeuvre facile 	<ul style="list-style-type: none"> - Trajectoire complexe surtout pour les manipulateurs possédant plusieurs articulations en rotation. - Trajectoire entre deux points d'égales distances différentes selon leur position dans l'espace 	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement minimal de chaque articulation - Trajectoire de l'organe terminal prévisible (vitesse et accélération connue et contrôlée) - Mise en oeuvre simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement non minimal de chaque articulation. - Mouvement difficile à optimiser étant donné la complexité des relations dynamiques (v, γ) entre chacune des articulations et celles de l'organe terminal - Mise en oeuvre parfois complexe - Moyen de calcul important devant respecter l'aspect temps réel des commandes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trajectoire géométrique prévisible indépendante de la position des points dans l'espace

Figure (5.1) Tableau comparatif des différentes méthodes d'élaboration de trajectoire entre deux points.



V.2 - MISE EN OEUVRE DE LA COMMANDE EN POSITION DU ROBOT HALL

V. 2.1 - Principe

Cette commande répond au principe donné sur la figure(5.2), sa mise en oeuvre pose deux problèmes :

- a) avoir un pilotage sans à coups, stable, rapide et devant remédier aux multiples défauts de rigidité mécanique du robot. Ce critère de conduite prend de l'importance dans la phase de découplage afin que les informations enregistrées par les capteurs aient un sens.
- b) contrôler la phase d'initialisation de façon à respecter la sécurité des hommes et du matériel et éviter une détérioration mécanique du robot.

La commande en position pour chacun des degrés de liberté peut être représentée par une équation du type

$$Y(t) = G X(t) + B \quad | \quad 5.9 \quad |$$

$Y(t)$ = position du robot à l'instant t

$X(t)$ = position des potentiomètres console à l'instant t

G et B = coefficient de mise à l'échelle de commande des servo-valves.

Chaque position des manches à balai est donc représentative de la fonction position robot dans l'espace, ce qui a l'inconvénient de poser le problème b signalé plus haut.

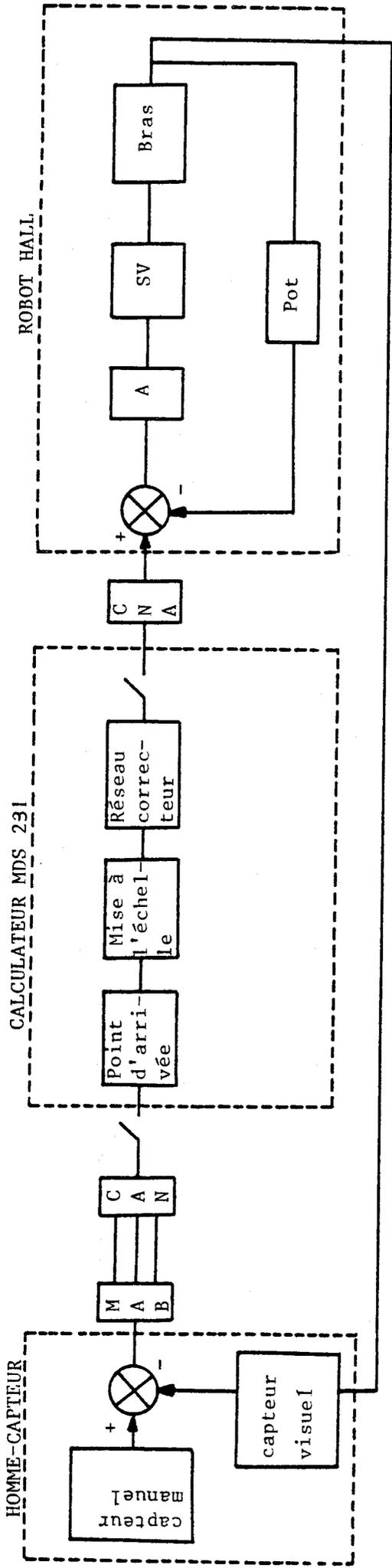
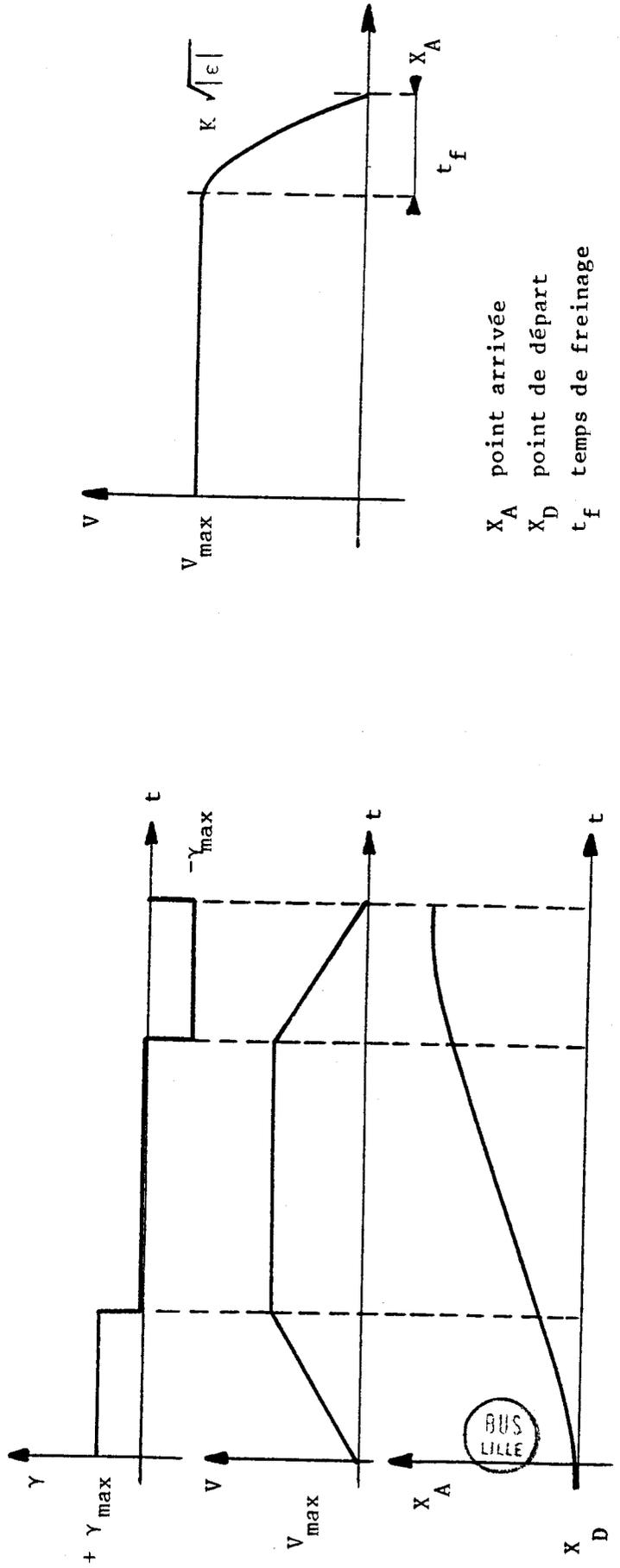


Figure (5.2) : COMMANDE EN POSITION



X_A point arrivée
 X_D point de départ
 t_f temps de freinage

Figure (5.3) : Lois de mouvement à décélération continue

V. 2.2 - Elaboration de la commande

Pour élaborer une commande devant respecter les critères cités, deux solutions peuvent être envisagées :

- * commande en asservissement
- * commande par décélération continue.

Pour des raisons de compromis entre le résultat envisagé et le temps de mise en oeuvre, demandant en particulier un certain degré d'identification du robot plus ou moins approfondi, seul le deuxième principe a fait l'objet d'une étude.

Ainsi, si le critère d'optimisation de trajectoire fixé est la rapidité, avec une arrivée à vitesse nulle, il est classique d'effectuer une conduite à accélération maximale pour se stabiliser à vitesse constante puis freiner le plus tard possible de façon à ne pas avoir de dépassement par rapport au point d'arrivée. Les lois idéales sont montrées sur la figure(5.3) .

Si les deux premières phases ne dépendent que des caractéristiques limites du manipulateur (γ_{\max} , v_{\max}), il est en revanche important de connaître lors de la troisième phase la relation optimale entre la vitesse et l'écart restant à parcourir pour tenir compte des critères précédents dans l'élaboration de la commande. C'est pourquoi nous avons été amenés à chercher la loi de vitesse du système en fonction de l'écart par rapport à l'arrivée, en tenant compte des lois de mouvement de la figure (5.3) et en considérant comme instant de référence l'instant d'arrivée,

$$\text{pour } t < 0 \quad \gamma = - \gamma_M \text{ (avec } \gamma_M > 0)$$

$$v(0) - v(-t) = \int_{-t}^0 \gamma \, dt = - \gamma_M t$$

à l'arrivée $v(0) = 0$

$$v(-t) = \gamma_M t$$

si x_A représente le point d'arrivée

$$x_A - x(-t) = \frac{1}{2} \gamma_M t^2 = \frac{|v(-t)|^2}{2 \gamma_M} \quad | 5.10 |$$

Soit

$$v(t) = \sqrt{2 \gamma_M |x_A - x(t)|} \quad | 5.11 |$$

avec

$v(t)$ = vitesse de déplacement au temps t

γ_M = accélération maximale

x_A = *point d'arrivée*

$x(t)$ = point courant

Pour avoir une arrivée à vitesse nulle, en un temps minimal la vitesse doit en conséquence dans la troisième phase être proportionnelle à la racine carrée de l'écart restant à parcourir.

V. 2.3 - Réalisation pratique

Deux réseaux correcteurs ont été mis en oeuvre.

α : Filtrage numérique

Ce réseau consiste en un filtrage des commandes manuelles. Ainsi trois constantes définies par le programmeur, permettent de paramétrer ce filtrage.

C = constante fixant la vitesse réalisable par l'opérateur sans correction (commande lente)

ϵ = pas intégré

τ = durée des pas

Ainsi si A_t représente la consigne donnée à la servo-valve à l'instant t. $A_{t+\tau}$ la consigne à l'instant t + τ la consigne A_c élaborée par le réseau correcteur est donnée par les lois ci-dessous.

$$A_{c_{t+\tau}} = A_{t+\tau} \text{ si } A_{t+\tau} - A_t \leq C \quad | 5.12 |$$

$$A_{c_{t+\tau}} = A_t + k \epsilon_1 \text{ avec } \epsilon_1 > 0 \text{ si } A_{t+\tau} - A_t > C \quad | 5.13 |$$

$$k = 0 \text{ si } A_{t+\tau} - A_t = 0$$

$$k = + 1 \text{ si } A_{t+\tau} - A_t > 0$$

$$k = - 1 \text{ si } A_{t+\tau} - A_t < 0$$

La position Y(t) du robot prend alors la forme

$$Y(t) = X(t_0) + G \int_0^t \delta \left(\frac{dx}{dt} \right) dt + B \quad | 5.14 |$$

avec

X(t₀) = position initiale des manches à balai

$$\delta \left(\frac{dx}{dt} \right) = 0 \text{ si } X_{t+\tau} - X_t = 0 \quad | 5.15 |$$

$$\delta \left(\frac{dx}{dt} \right) = + \epsilon \text{ si } X_{t+\tau} - X_t > 0 \quad | 5.16 |$$

$$\delta \left(\frac{dx}{dt} \right) = - \epsilon \text{ si } X_{t+\tau} - X_t < 0 \quad | 5.17 |$$

ϵ est variable selon que l'on se trouve dans le cas | 5.12 | ou | 5.13 |.

Si ce réseau correcteur permet d'éviter les à coups il le fait au détriment d'une forte limitation de vitesse de déplacement du robot.

b - Approche du réseau à décélération continue

Ce réseau permet une bonne approximation des courbes de la fig. (5.3) surtout en ce qui concerne la décélération et l'arrivée à vitesse nulle. En reprenant les hypothèses antérieures, la consigne élaborée par le réseau correcteur est de la forme :

$$A_{c_{t+\tau}} = A_t + k K \sqrt{|A_{t+\tau} - A_t|} \quad | 5.18 |$$

$k = 0, 1, -1$ selon le signe de $A_{t+\tau} - A_t$

K, τ sont des paramètres fixés expérimentalement de façon à donner une vitesse de déplacement satisfaisante au robot. La position spatiale du robot est alors régie par l'équation

$$Y(t) = X(t_0) + k G \int_0^t K' \left(\frac{d \sqrt{|X_{t+\tau} - X_t|}}{dt} \right) dt + B \quad | 5.19 |$$

K' se rapporte au coefficient K donné à la commande.

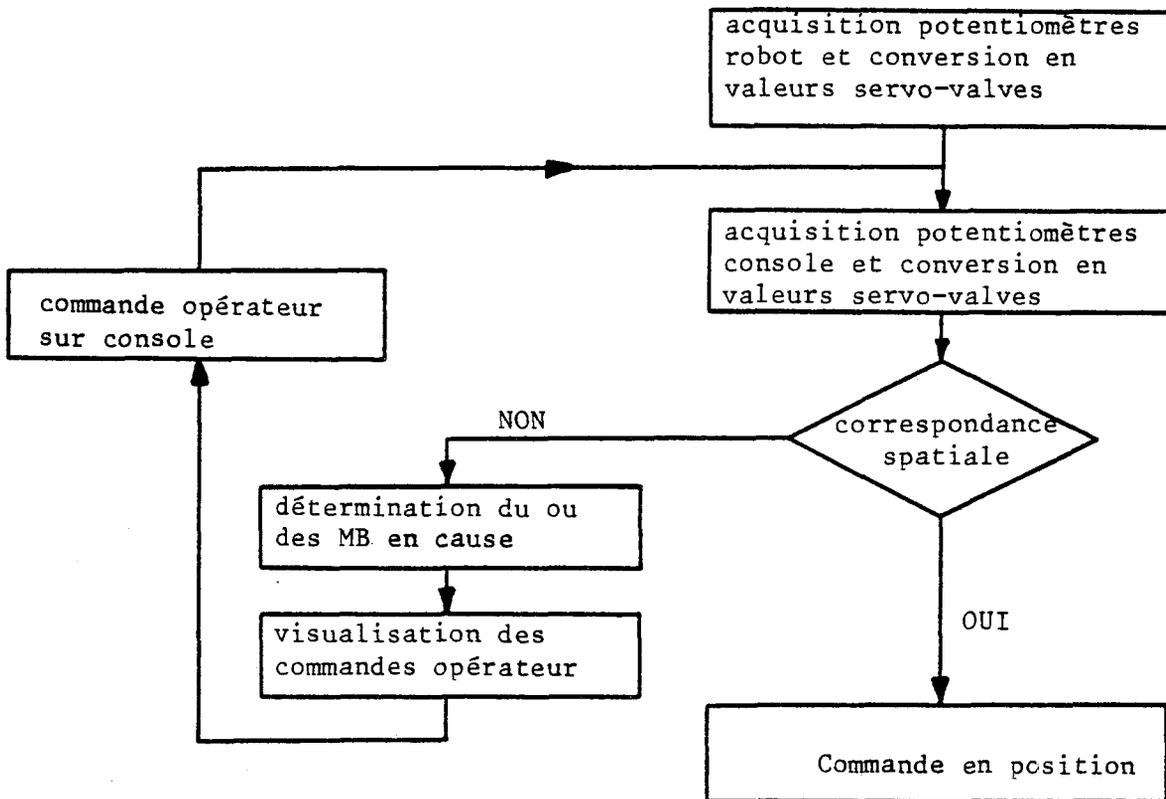
Les essais de commande en position effectués à l'aide de ce réseau correcteur ont été satisfaisants tant du point de vue vitesse de déplacement du bras, qu'amélioration des oscillations dues à la non rigidité mécanique du bras.

c - Initialisation du robot commandé en position

Les problèmes de correspondance spatiale posés à l'initialisation peuvent être résolus par les méthodes ci-après :

- * Déplacement du robot vers la position indiquée par les manches à balai console, par retard programmé.
- * Déplacement du robot vers la position indiquée par les manches à balai console, par mode interruptif.
- * Déplacement des potentiomètres vers la position du robot par des actions opérateur supervisées par le calculateur.
- * Faire coïncider l'origine des déplacements des manches à balai avec la position du robot à l'initialisation.

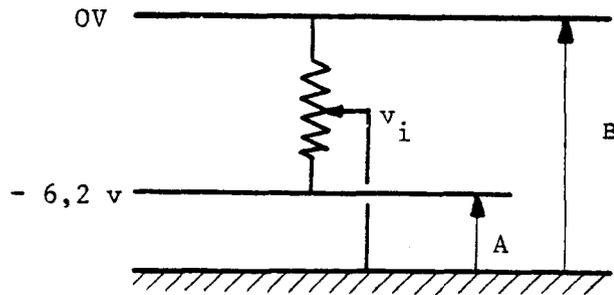
Si les raisons de sécurité ont éliminé les deux premières solutions. La dernière l'a été beaucoup plus par souci de comparaison. En effet celle-ci a été souvent adoptée dans un pareil cas. Elle a par ailleurs l'inconvénient de poser le problème de repositionnement des manches à balai lorsque ceux-ci se trouvent en butée.



MB : manche à balai

Les remarques concernant l'algorithme de dialogue seront faites dans le chapitre afférent au découplage; ce problème étant identique dans le cas d'un arrêt local et de la reprise en main par l'opérateur après évolution automatique du robot.

L'acquisition des informations issues des potentiomètres, qui donnent la position de chacun des degrés de liberté du robot, tient sa spécificité dans le câblage effectué en vue d'améliorer la précision de la mesure. Les références de ces mesures étant prises par rapport à deux niveaux rigoureusement calibrés. Ce câblage est montré sur la figure ci-dessous :



La position des potentiomètres est donc donnée par le rapport α_p

$$\alpha_{pi} = \frac{B - v_i}{B - A/100} \leftarrow \text{coefficient donnant la précision désirée}$$

La conversion position des potentiomètres robot en consigne servo-valve est donnée par l'expression

$$C_{sv} = a \alpha_p + b \quad | \quad 5.21 \quad |$$

C_{sv} = consigne servo-valve

α_p = rapport donnant la position des potentiomètres

a,b = coefficients identifiés pour chacun des degrés de liberté par rapport à des références connues.

Le tableau (5.4) donne les valeurs numériques des coefficients a et b identifiés.

Ces valeurs numériques ont été relevées à l'aide d'un volt-mètre digital. Elles sont en correspondance directe avec les consignes des servo-valves mesurées par le calculateur à travers les cartes de conversion A/N. En considérant le système parfaitement linéaire, il est ainsi possible d'identifier les coefficients a et b. (le calcul est réalisé sur 16 bits pour obtenir une précision acceptable au moment de l'élaboration de la commande du manipulateur).

V.3 - SIMULATION DE DECOUPLAGE SOFTWARE

Cette simulation a été envisagée de façon à répertorier les problèmes annexes éventuels posés dans les différentes phases du mode semi-automatique. La manipulation consiste à atteindre un point, enregistré préalablement, dans les coordonnées robot, à l'aide de cette procédure semi-automatique. La zone de découplage est définie par un volume délimité par un écart de position limite dans chaque axe du robot. Afin de tester l'efficacité du recouplage par dialogue, la télémanipulation est effectuée en vitesse alors que la reprise en main par l'opérateur se fait en position. C'est en effet dans cette situation que se pose le problème de correspondance spatiale. Le principe de cette procédure est illustrée sur la figure(5.5.)

Degrés de liberté	Potentiomètres Robot		100 x ρ_{pi}		Servo - valves		a	b
	mini	maxi	mini	maxi	mini	maxi		
Poignet vertical	32165	23491	2,72	45,2	32843	35405	60,3	32769
Poignet horizontal	32509	23533	1,03	45	32813	35356	57,83	32753
Bras horizontal	32276	22413	2,17	50,5	32836	35389	52,82	32721
bras vertical	32705	29484	0,07	15,8	32807	35356	162,04	32795
Elongation	32437	18350	1,38	70,4	32813	35356	36,84	32762
A = - 6,2 V	12336							
B = 0V	32720							

Figure (5.4) Calcul de la correspondance position potentiomètre - consigne servo-valve

$$C_{sv} = a \rho_{pi} + b$$

$$\rho_{pi} = \frac{B - V_i}{B - A} / 100$$



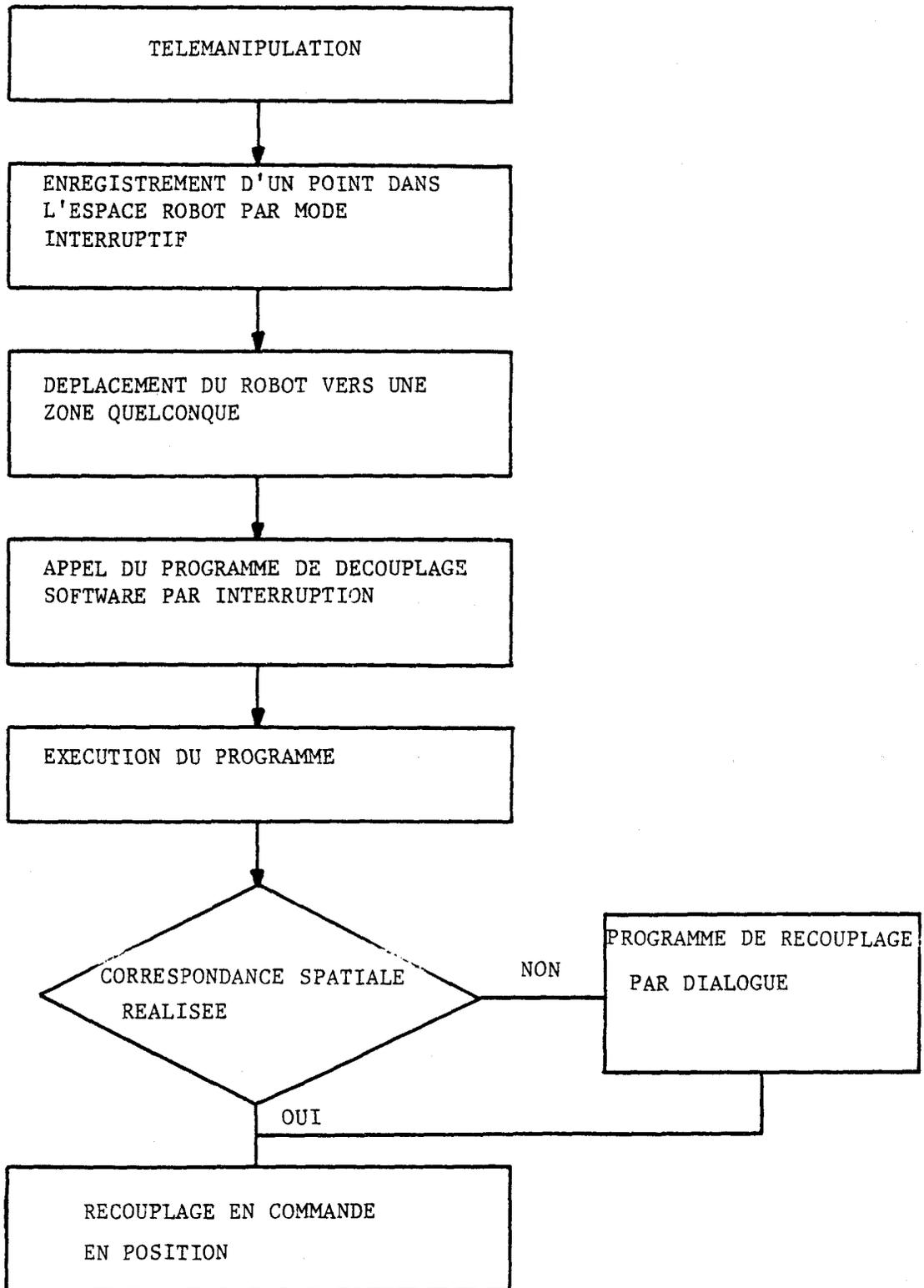


Figure (5.5) DECOUPLAGE SOFTWARE



La réalisation pratique n'appelle pas de remarque particulière, nous signalons toutefois que

- l'algorithme élaboré dans la phase de conduite locale a été effectué selon une trajectoire point par point conformément aux stipulations figurant dans le tableau.
- la procédure d'enregistrement du point dans l'espace robot par mode interruptif tient compte de la priorité de l'interruption de l'arrêt local et de la sauvegarde du contexte du programme de télémanipulation.
- *le découplage est effectué sans problème pratique particulier.*

V.4 - DECOUPLAGE PAR CAPTEURS INFRAROUGES

V.4.1. - Description de la manipulation envisagée

L'objet est placé sur un support de couleur noire mate, ainsi les capteurs n'y seront pas sensibles.

L'initialisation du robot donne ensuite le contrôle à l'opérateur humain soit en commande en vitesse, soit en commande en position par l'intermédiaire d'un sélecteur situé sur la console manuelle. L'opérateur dirige la pince vers l'objet à saisir. Celui-ci ne contrôle pas les mouvements du poignet, la pince reste verticale et la rotation de la pince est figée. Lorsqu'un des trois capteurs détecte la présence de l'objet, il y a découplage. L'opérateur n'est plus dans la boucle, le robot passe en phase de conduite locale qui est automatique.

Une procédure de reconnaissance décrite par P.AUTECHAUD, [3] identifie l'objet; ensuite l'opération de centrage permet la saisie. L'objet étant identifié, est rangé dans un casier préalablement défini.

V.4.2. - Principe

a) Description et organigramme =====

Nous utiliserons pour la mise en oeuvre de cet algorithme, quatre capteurs infrarouges, 3 à grands champs d'action (quelques dizaines de cm) pour guider les mouvements du bras, 1 à faible rayon d'action pour détecter la proximité de l'objet (quelques cm).

Ainsi, la condition d'évolution automatique peut être donnée par la valeur du quadruplet,

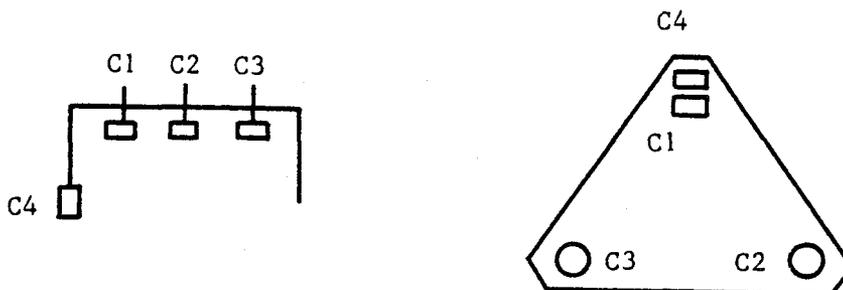
$$C = \{ INF1, INF2, INF3, INF4 \} \quad | \quad 5.22 \quad |$$

représentant l'état de l'environnement et où les signaux des capteurs INF1, INF2, INF3, INF4 peuvent prendre les valeurs 0 inactif, 1 actif, x indifférent (0 ou 1).

Nous supposons, tel que signalé précédemment, le plan de travail horizontal et de couleur noir (non détecté par les capteurs à grands rayons d'action).

Afin d'avoir le maximum d'efficacité du capteur, la pièce est supposée plane et le poignet perpendiculaire au plan de travail.

La disposition des capteurs sur la pince est la suivante :



L'organigramme à réaliser est donné par la figure (5.6).

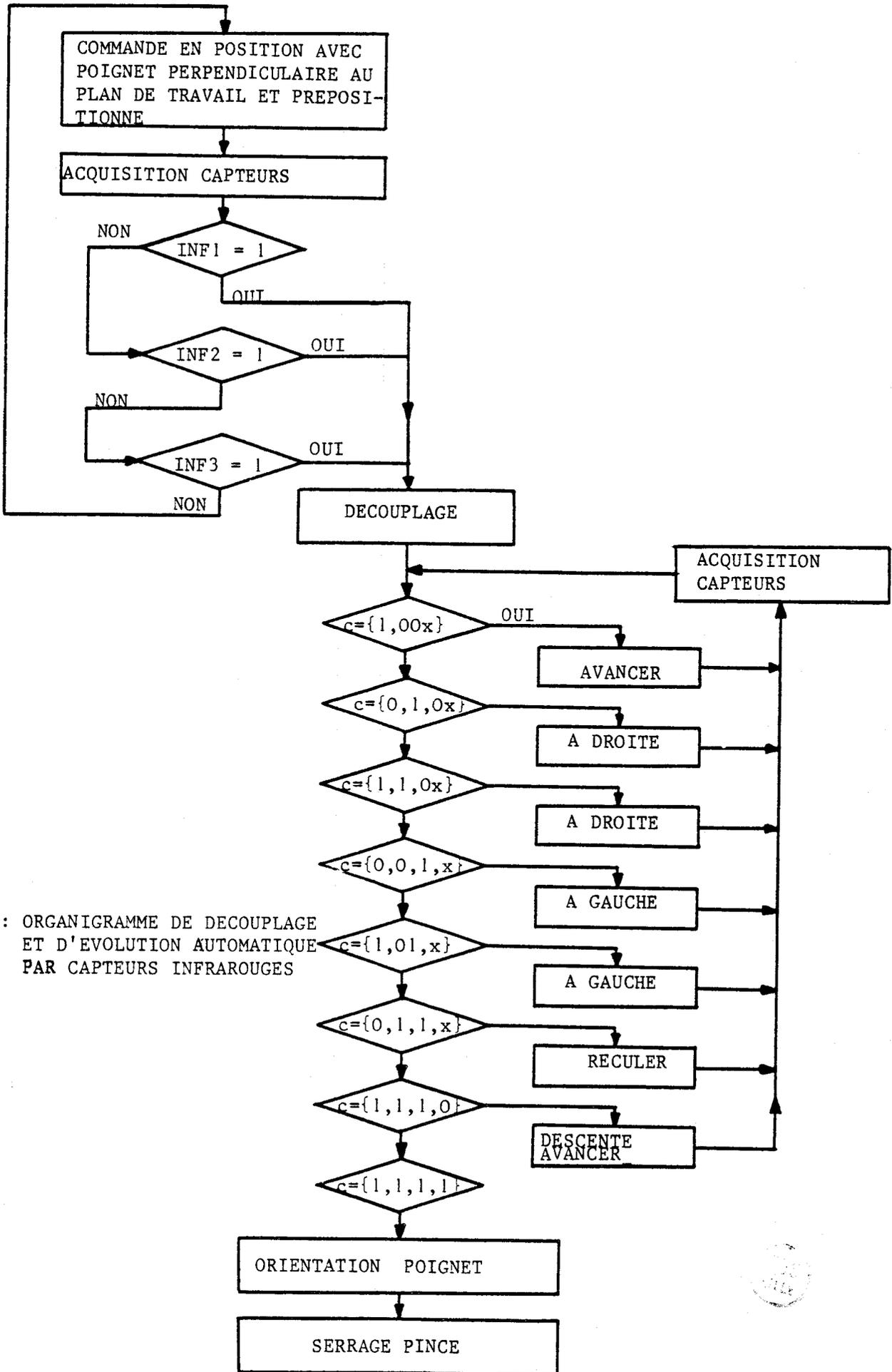


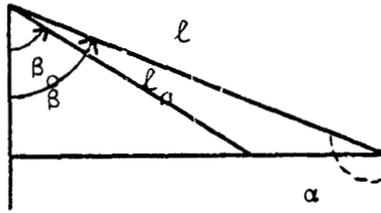
Figure (5.6) : ORGANIGRAMME DE DECOUPLAGE ET D'EVOLUTION AUTOMATIQUE PAR CAPTEURS INFRAROUGES

b) Décomposition des mouvements d'évolution automatique
 =====

α - Avancer :

La relation pour avancer en ligne droite à hauteur constante est donnée par :

$$l = \frac{l_0 \cos \beta_0}{\cos \beta} \quad | \quad 5.23 \quad |$$



Ce mouvement consiste donc à donner des incréments d'avance sur β et calculer la nouvelle valeur de l correspondante. L'algorithme de calcul du cosinus est sur 8 bits. Pour des raisons de stabilité mécanique, il était nécessaire de donner des incréments au robot d'une résolution approchée sur 12 bits.

Le calcul de la commande servo-valve correspond au degré de liberté élongation l obtenu en faisant une linéarisation du cosinus sur sa partie basse, est donné par la relation ci-dessous :

$$l_{ac} = l_{oh} + \left| \frac{(l^+ - l_{oh}) \beta_b}{256} \right|_E + l_{ob} + \left| \frac{(l^+ - l_{oh}) \beta_b}{256} \right|_D \times 256 \quad | \quad 5.24 \quad |$$

avec

β = angle de rotation courant du bras du robot décomposé en partie haute β_h et en partie basse β_b

ℓ_o = valeur initiale de l'élongation au moment du calcul décomposé en partie haute ℓ_{oh} et en partie basse ℓ_{ob}

ℓ^+ = partie haute de l'élongation pour un incrément unitaire de la partie haute par rapport à β_o valeur de l'angle de rotation du bras du robot au moment du calcul et décomposé en partie haute β_{oh} et en partie basse β_{ob}

$$\ell^+ = \frac{\ell_{oh} \cos \beta_{oh}}{\cos \beta^+} \quad \text{avec } \beta^+ = \beta_{oh} + \beta_{ob}$$

$$\left\lfloor \frac{(\ell^+ - \ell_{oh}) \beta_{ob}}{256} \right\rfloor_E = \text{valeur entière du calcul de } \frac{(\ell^+ - \ell_{oh}) \beta_{ob}}{256}$$

$$\left| \frac{(\ell^+ - \ell_{oh}) \beta_{ob}}{256} \right|_D = \text{valeur décimale du calcul de } \frac{(\ell^+ - \ell_{oh}) \beta_{ob}}{256}$$

ℓ_{ac} = valeur sv calculée de l'élongation sur 12 bits dans un mouvement d'avance et exprimée selon une formulation dérivée de [5.24] telle que

$$\ell_{ac} = \ell_{ac h} + \ell_{ac b}$$

$\ell_{ac h}$ partie haute, $\ell_{ac b}$ partie basse

β - Reculer :

Ce mouvement ne diffère du précédent que dans le calcul de l'approximation de la valeur de l'élongation sur 12 bits.

$$l_{rc} = l_{oh} - \left| \frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256} \right|_E + l_{ob} - \left| \frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256} \right|_D \times 256$$

| 5.25 |

avec

l^- = partie haute de l'élongation pour un "décrément" unitaire sur β_{oh}

$$l^- = \frac{l_{oh} \cos \beta_{oh}}{\cos \beta^-} \quad \text{avec } \beta^- = \beta_{oh} - 1_h$$

$$\left| \frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256} \right|_E = \text{valeur entière du calcul de}$$

$$\frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256}$$

$$\left| \frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256} \right|_D = \text{valeur décimale du calcul de}$$

$$\frac{(l_{oh} - l^-) (256 - \beta_b)}{256}$$

l_{rc} = valeur servo-valve calculée de l'élongation sur 12 bits dans le mouvement "reculer" et exprimée selon une formulation dérivée de | 5.25 | telle que $l_{rc} = l_{rc h} + l_{rc b}$
 $l_{rc h}$ partie haute, $l_{rc b}$ partie basse

γ - Relation de normalité au plan de travail

La relation de normalité au plan de travail est donnée par :

$$\alpha = \pi - \beta$$

| 5.26 |

Cette relation est calculée sur 12 bits.

δ - A gauche à droite

Le déplacement à gauche à droite, est un déplacement en arc de cercle. Ce mouvement est corrigé par le capteur C_1 .

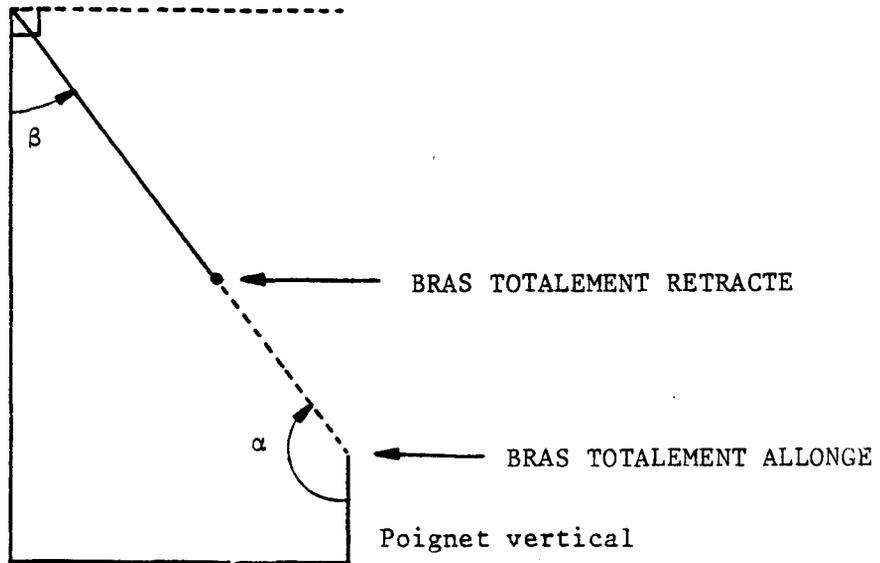
ε - Descente verticale

Ce mouvement est fait en incrémentant β et en corrigeant par un mouvement d'avance.

V.4.3. - Réalisation pratique

a) Détermination des paramètres de travail

La réalisation pratique a nécessité l'évaluation de la correspondance des valeurs des consignes servo-valve et des dimensions réelles du robot, données ci-après :



valeur SV Hexa	β	SV	Elong	SV	Poignet α
80 00	47°	80 00	102 cm	87 10	133°
88 00	90°	8C 00	187 cm	89 B0	90°

Le principe de l'algorithme permettant d'obtenir un mouvement d'avance est donné sur la figure (5.7). De même que nous représentons les courbes $l = \frac{l_0 \cos \beta_0}{\cos \beta}$ représentant l'accroissement de longueur du robot en fonction de l'accroissement de l'angle β du robot à partir d'un l_0 initial et β_0 initial. Elles permettent au lecteur d'évaluer l'erreur commise dans le mouvement d'avance.



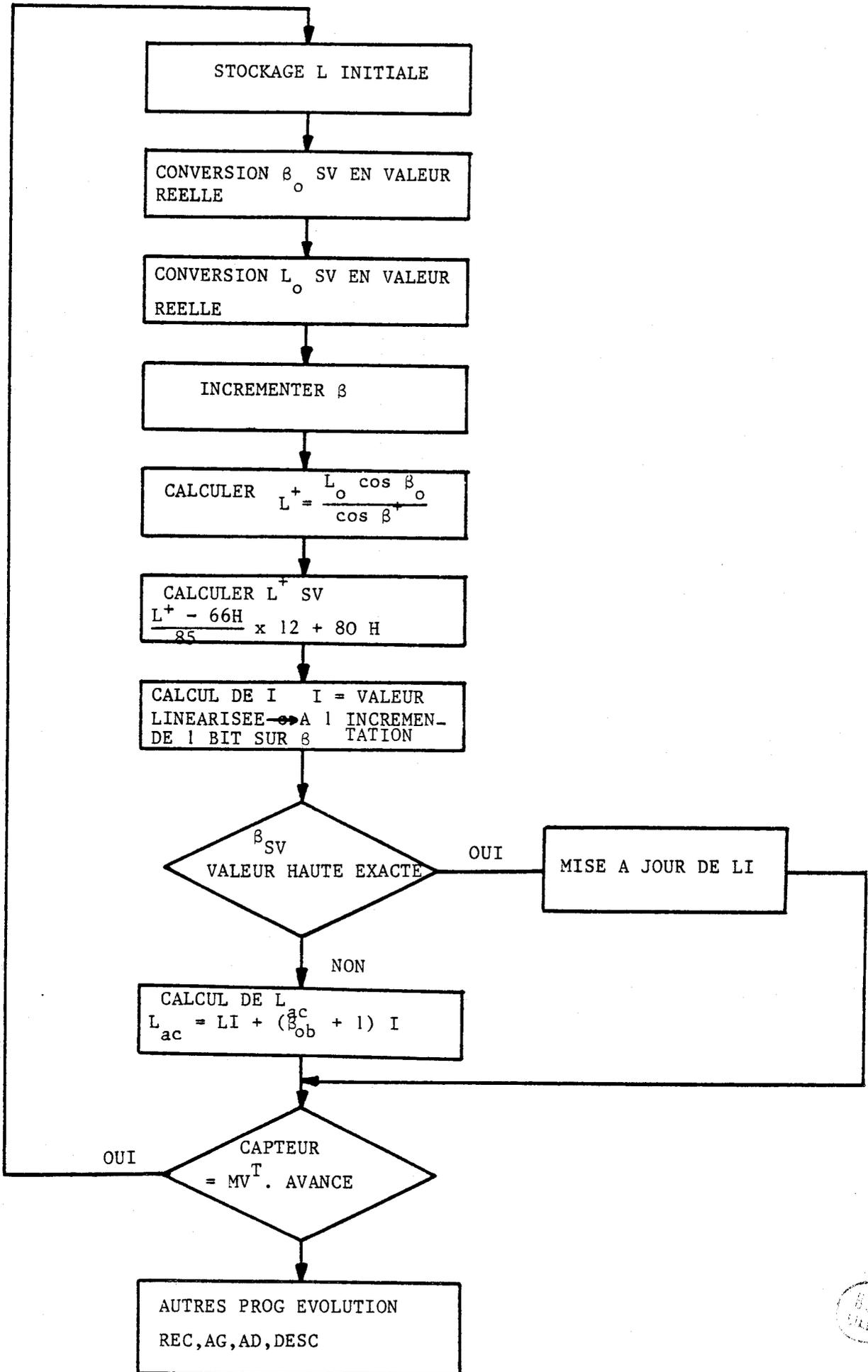


Figure (5.7) ORGANIGRAMME DE CALCUL DU MOUVEMENT D'AVANCE A HAUTEUR CONSTANTE



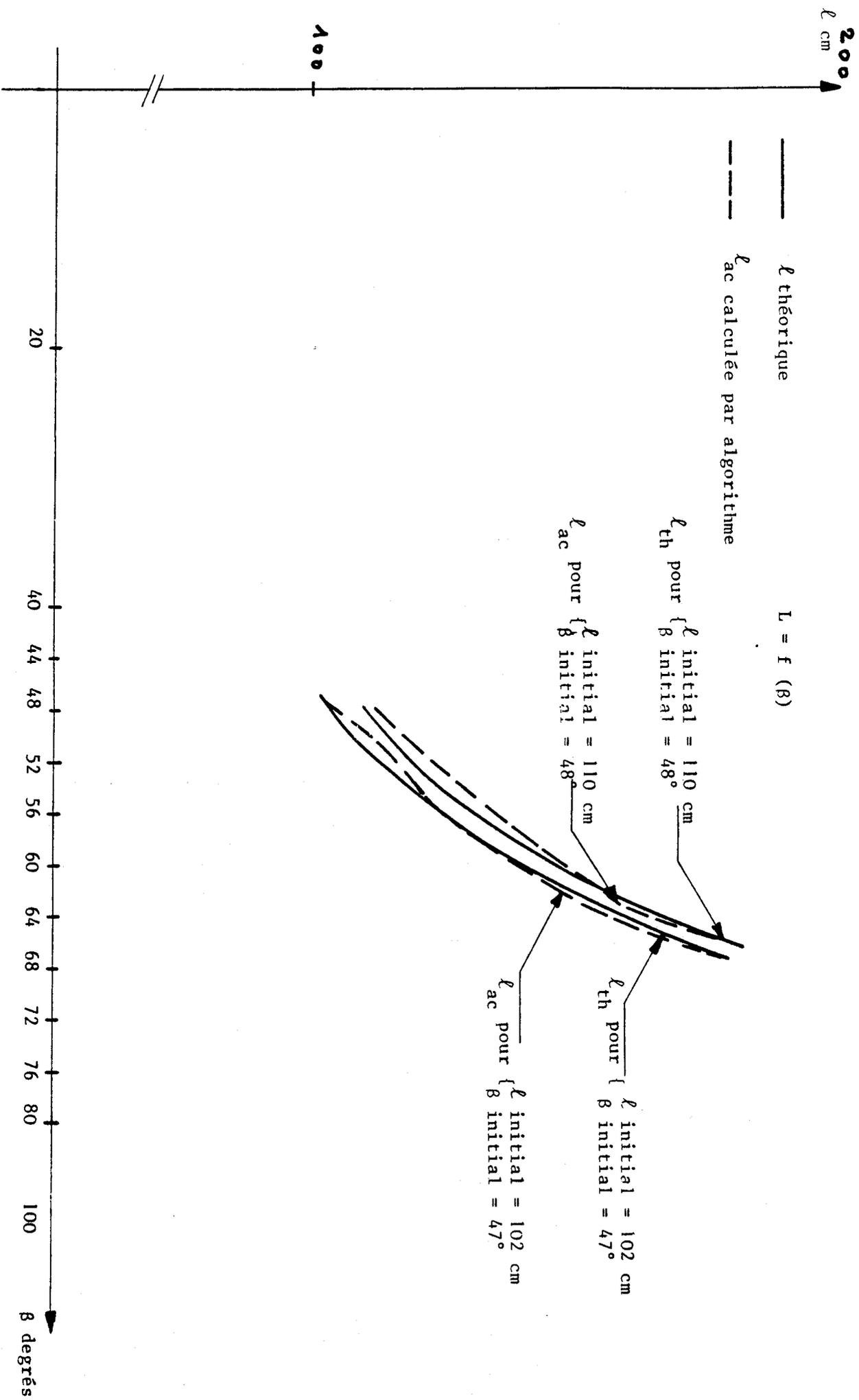


Figure (5.7) Variation de L robot dans un mouvement d'avance



Cette erreur est d'ailleurs relativement grande. Elle est de l'ordre du $\frac{1}{100}$ sur ℓ en effectuant les calculs avec une précision de $\frac{1}{256}$ ème. Cette détérioration de la précision est due aux différentes approximations tout au long des calculs permettant d'aboutir à la consigne servo-valve de l'élongation. Une amélioration de la précision pourrait être obtenue en faisant l'ensemble des calculs sur 16 bits. Ainsi par interpolation du résultat précédent, on pourrait escompter obtenir une précision sur le calcul de ℓ d'au moins du $\frac{1}{1000}$ résultat compatible avec la précision des potentiomètres installés sur le robot.

Notons également que dans notre cas l'erreur obtenue n'est nullement gênante puisqu'il ne s'agissait pas d'atteindre un point particulier avec une certaine précision mais d'illustrer le principe de découplage du mode semi-automatique.

b) Acquisition des informations

L'acquisition des signaux extérieurs par le calculateur tels que :

- manches à balai
- jauges de contraintes du capteur céphalique
- potentiomètres donnant la position de chacun des degrés de liberté du robot
- capteurs infrarouges

se font par l'intermédiaire de carte de conversion A/N.

Les capteurs infrarouges sont alimentés par une source de courant continu indépendante, disposée sur le socle du robot. Les amplificateurs sont situés sur la tête du poignet pour assurer une meilleure transmission.

Les consignes servo-valves sont données par l'intermédiaire de cartes N/A.

Les figures (5.9), (5.10), (5.11) montrent respectivement le schéma du cablage console potentiométrique - capteur céphalique-calculateur - robot, l'implantation des capteurs et amplificateurs infrarouges sur le robot et une vue d'ensemble de la manipulation

c) Sécurité

Il s'agit d'assurer la sécurité du matériel et celle du personnel évoluant à proximité du robot. Elle intervient à différents niveaux de la hiérarchie.

- puissance
- asservissement
- algorithmique d'évolution

Niveau 1 : c'est une sécurité primaire, elle agit directement sur le générateur hydraulique et est obtenue par l'intermédiaire des composants suivants :

- rayon laser : une barrière optique protège la zone d'évolution du robot, lorsque cette barrière est franchie, le groupe hydraulique est arrêté.
- arrêt d'urgence (type coup de poing) implanté sur la console potentiométrique.
- câble de sécurité implanté autour du robot.

CAPTEUR CEPHALIQUE

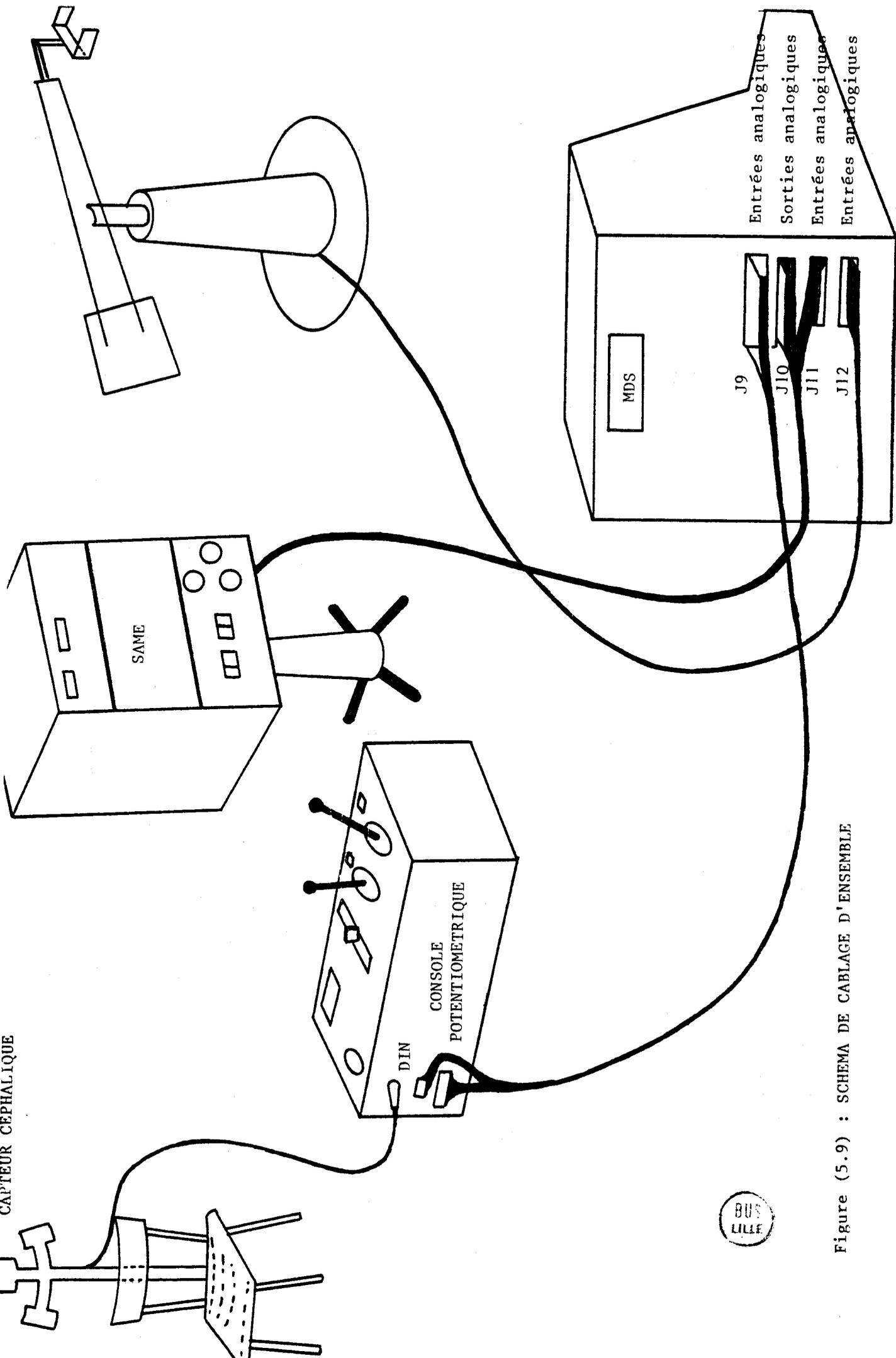


Figure (5.9) : SCHEMA DE CABLAGE D'ENSEMBLE

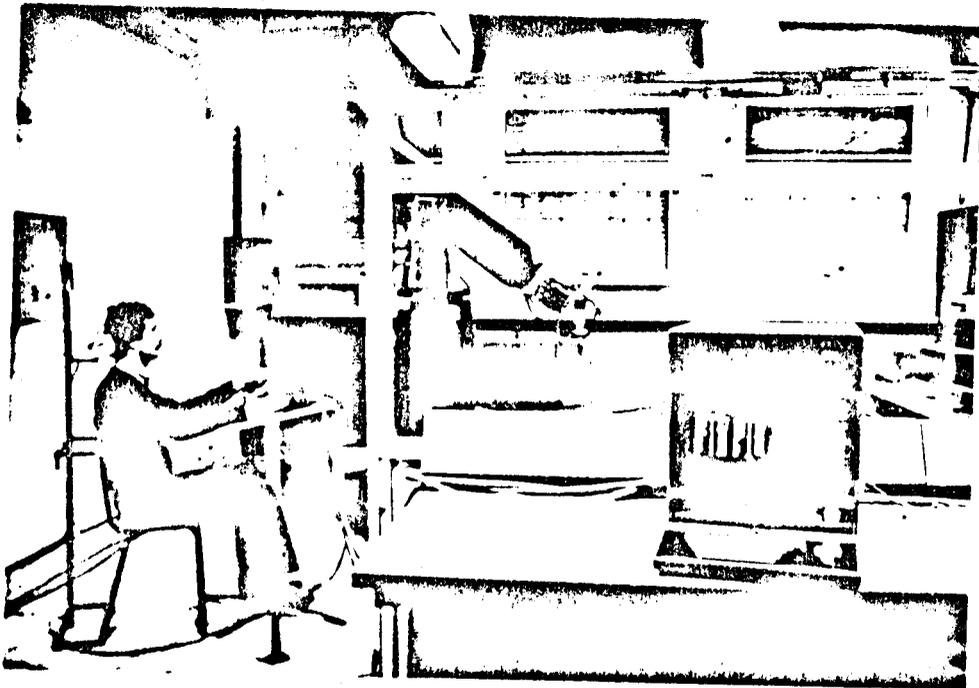
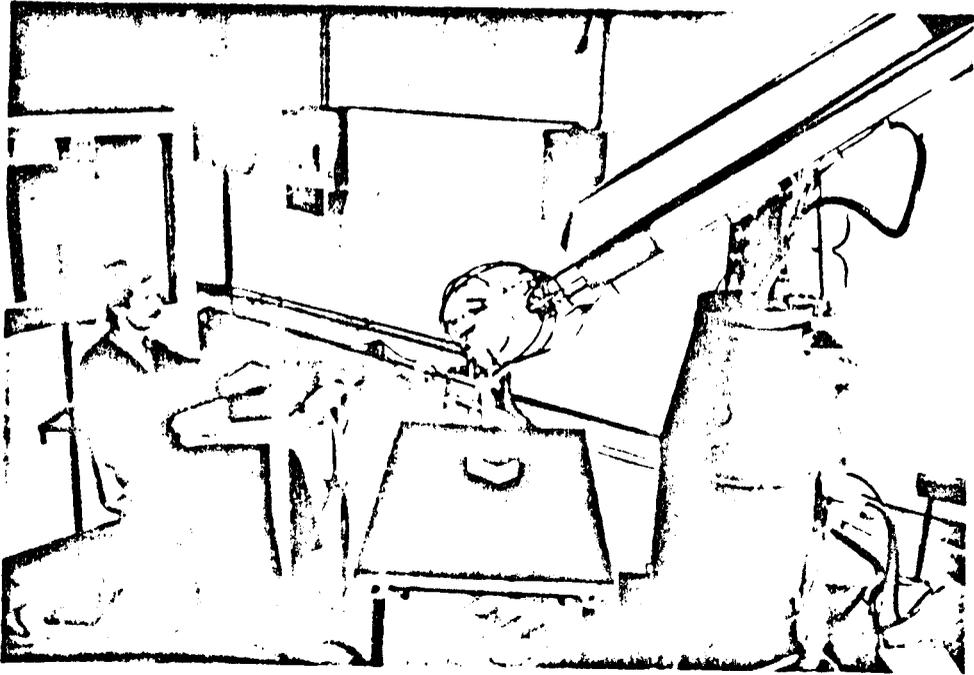


Figure - (5.11) VUE D'ENSEMBLE DE LA MANIPULATION

815
11111

Niveau 2 : cette sécurité agit au niveau des asservissements.
Elle immobilise le robot par mode interruptif tout en laissant le groupe hydraulique en fonction.
Elle est obtenue par :

- arrêt local
- arrêt par contact mécanique de micro-switch implantés autour du robot.

Niveau 3 : ce niveau de sécurité n'a pas fait l'objet d'étude dans cette manipulation.

V.4.4. - Quantification des paramètres de l'algorithme

a) Précision

La précision de l'algorithme dépend de :

- α - l'impact des faisceaux des capteurs infrarouges
- β - précision des calculs exécutés
- γ - précision de l'établissement de la correspondance SV et dimension robot
- δ - précision des convertisseurs, des potentiomètres robot, et des servo-valves.

b) Réalisabilité

Les relations de faisabilité peuvent être données par :

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + d\alpha_1; \alpha_2 = \frac{\pi}{2} + d\alpha_2; \alpha_3 = \frac{\pi}{3} + d\alpha_3 \quad | 5.27 |$$

U

$INF_{1_t} = 1, INF_{2_t} = 1; INF_{3_t} = 1$ signifiant que le capteur correspondant est opérationnel à l'instant du découplage.

Cette dernière condition exprime donc que les capteurs sont réglés à la même distance de détection

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sont les angles d'incidence des capteurs, par rapport aux faces supérieures de l'objet.

d_1, d_2, d_3 angle hystérésis de chacun des capteurs.

$INF_{1t}, INF_{2t}, INF_{3t}$ signaux des capteurs à l'instant t du découplage.

La relation donnant le taux de réussite (valeur exprimant l'efficacité de l'algorithme) peut être formulée par :

$$t^T = \frac{c_3 (k_1 c_1 + k_2 c_2)}{2} \quad | \quad 5.29 \quad |$$

c_3 = coefficient exprimant l'homogénéité du matériaux
0 ou 1

c_1 = variant de 0 à 1 exprimant l'efficacité du capteur en fonction de la couleur de l'objet

c_2 = variant de 0 à 1 exprimant l'efficacité du capteur en fonction de l'état de la surface

k_1, k_2 : coefficient de prépondérance.

L'ensemble de ces paramètres seront connus par identification expérimentale actuellement en cours.

V.5 - RECOUPLAGE PAR DIALOGUE

Le recouplage par dialogue évoqué au chapitre 3 de ce mémoire a été vérifié sur le robot Hall à 5 degrés de liberté et piloté par 2 manches à balai et 1 potentiomètre linéaire.

La mise en oeuvre pratique a nécessité le développement d'un certain nombre de programmes :

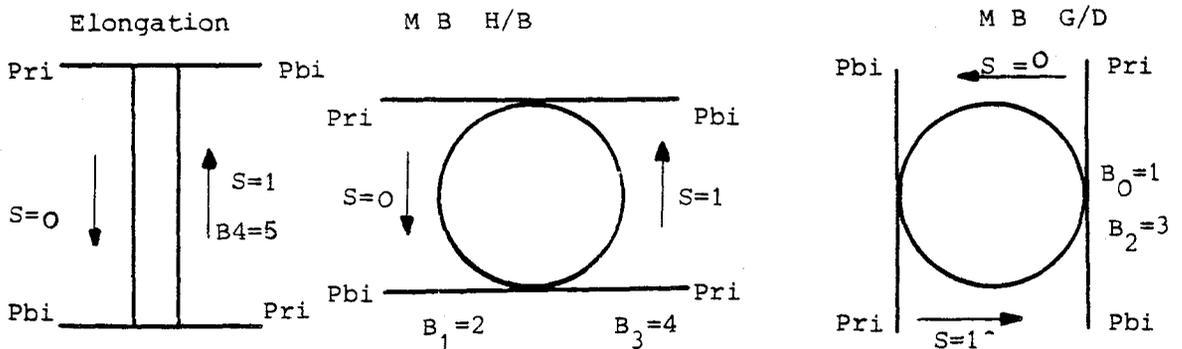
- stockage des positions robot et lecture des manches à balai
- codage du sens de déplacement des manches à balai
- identification du manche à balai en cause et choix du programme de visualisation correspondant
- détermination de la validité de la condition de recouplage
- visualisation des consignes opérateurs.

Un certain nombre de ces programmes font appel aux remarques suivantes :

- codage du sens de déplacement

* Codage : le codage du sens de déplacement a été établi en fonction du signe de $Pr_i - Pb_i$

Le codage mémorisé sur le calculateur est montré sur les figures ci-dessous pour chacun des manches à balai groupés en fonction de déplacement.



* Mémorisation du codage :

Afin de connaître le sens correspondant à chacun des manches à balai, la mémorisation du codage se fait toujours par rapport à une base "SENS" choisie par le programmeur.

La loi de mémorisation choisie est donnée ci-dessous :

$$| \text{CODAGE} | = | \text{SENS} + B_i | \quad | 5.30 |$$

B_i étant le numéro d'identification de chacun des degrés de liberté, dans un cycle de lecture séquentielle précablée sur la carte A/N. la valeur de B_i est donnée sur la figure ci-dessus.

. Choix du programme de visualisation

Le numéro d'identification B_i déjà évoqué, permet de choisir la consigne visuelle opérateur adéquate.

Certaines consignes demandent également à l'opérateur de ralentir son action sur les manches à balai lorsqu'il se rapproche du seuil ϵ_i .

. Détermination de la validité de la condition de recouplage

La simultanéité sur la validité des cinq relations fixant la condition de recouplage est vérifiée par l'état d'une case mémoire.

La relation |3.25| est ici toujours vérifiée étant donné la vitesse du microprocesseur utilisée et le nombre de degrés de liberté du robot ($m = 5$).

. Visualisation des consignes opérateur

L'ensemble des programmes de visualisation ont été développés selon une structure Software "Flip - Flop" permettant de n'impressionner un message que lors d'un changement d'état du manche à balai concerné.

Les messages visualisés sont par exemple du type suivant:

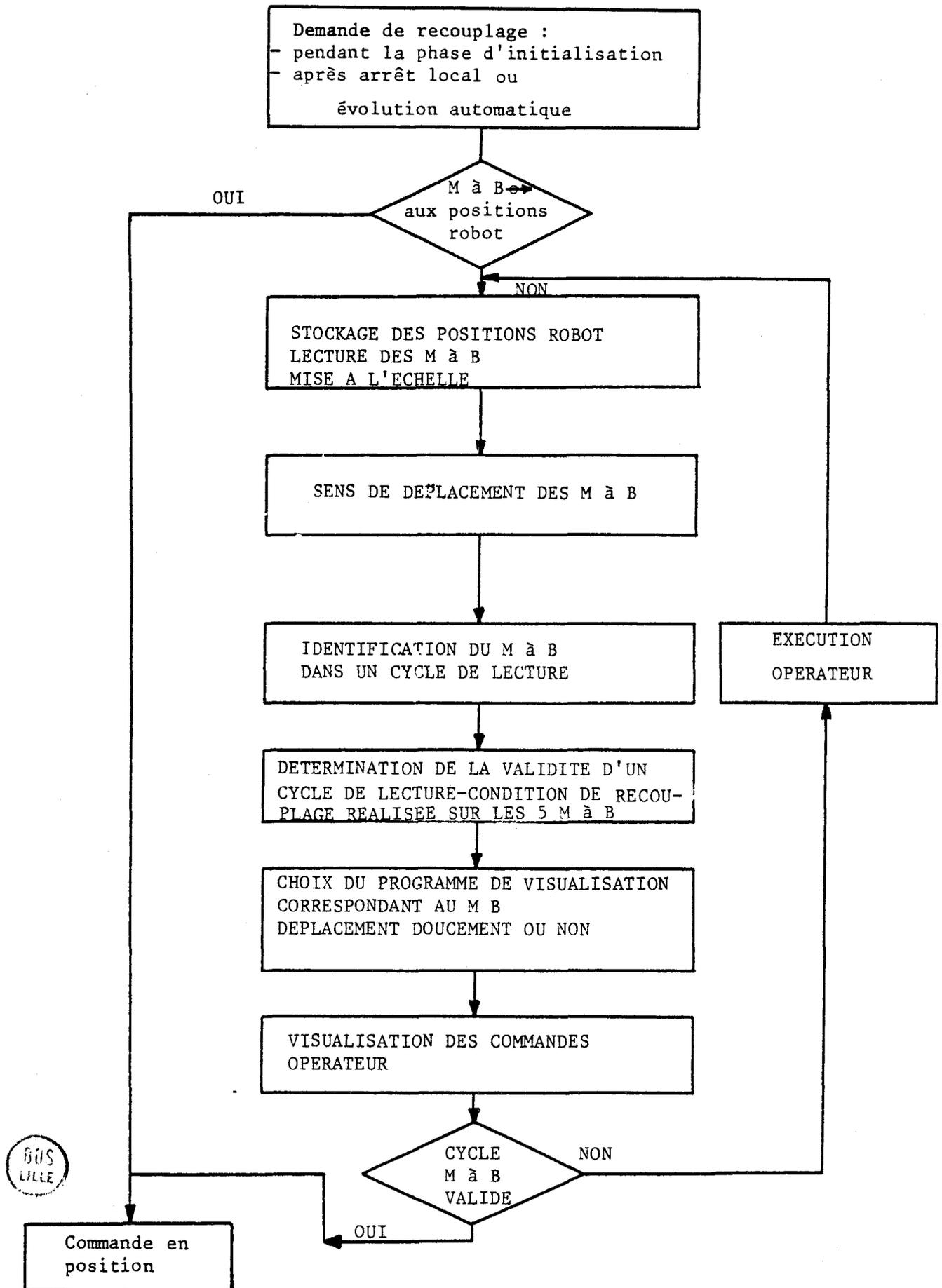
- * " $MB_1 \downarrow$ " (*manche à balai 1 en bas*)
- * " *RECOUPLAGE NON AUTORISE ANNULER ECART
POSITION REELLE ET MB* "
- * " $MB_2 \rightarrow$ *DOUCEMENT*" (*manche à balai 2 à droite doucement*)

Cette visualisation se fait directement sur la console du calculateur.

L'enchaînement des divers programmes développés sont montrés sur la figure (5.12).

Figure (5.12) RECOUPLAGE PAR DIALOGUE

ENCHAINEMENT DES PROGRAMMES



CONCLUSION

Les essais de découplage effectués ont montré

- * la primauté jouée par la commande en vitesse vis à vis de la commande en position. Bien que moins précise, elle est bien adaptée à la conduite du robot dans la phase à distance étant donné qu'aucune précision importante n'est dans ce cas demandée à l'opérateur. De plus elle ne pose pas les problèmes de correspondance spatiale rencontrés lors d'une commande en position. Cette commande en vitesse se fera dans le langage naturel de l'homme c'est-à-dire selon des mouvements définis en coordonnées cartésiennes (haut-bas, gauche-droite, avant-arrière).
- * L'inadaptation pour ce type de manipulation des capteurs optiques utilisés dans la phase de découplage et ce, en milieu industriel. En effet des essais ont été effectués avec des pièces de différentes couleurs et matériaux. Si dans bien des cas le découplage s'est correctement effectué, une pièce en aluminium a provoqué des mouvements incontrôlés après la phase de découplage. Ces mouvements étaient dûs en fait aux stries cependant peu visibles que cette pièce présentait.
- * La nécessité d'une parfaite stabilité à l'instant du découplage, de la commande à distance. En effet si la rigidité du robot est mauvaise ou si la commande utilisée durant la phase de conduite à distance est mal connue, le découplage peut conduire à des mouvements incontrôlés.
- * Une bonne efficacité du recouplage par dialogue en considérant le temps relativement court, exigé dans l'opération et la bonne sécurité assurée au robot et au matériel.

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

- 1 - SHIMANO B. (1979)
" VAL : An industrial robot programming and control system "
Unimation INC
Séminaire IRIA Langages et méthodes de programmation
des robots industriels.

- 2 - VIDAL P.
ROBOTIQUE
Support de cours de D.E.A. 79/80 USTL 1

- 3 - VIDAL P., D. JOLLY, P. AUTECHAUD, P. DESODT, A. HABCHI
" Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain "
Rapport scientifique final ATP CNRS Avril 1980

CONCLUSION GENERALE

Notre étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche ayant pour thème général une liaison Homme-robot. Ces travaux ont permis de dégager un certain nombre de conclusions sur l'intégration d'un opérateur humain dans le contrôle d'un robot.

Nous avons à ce titre développé deux modes de conduite dans la commande des manipulateurs avec supervision de l'homme.

- . le mode semi-automatique
- . le mode mixte

Dans le premier mode le partage des tâches entre les deux ressources disponibles (Homme,robot) est effectué de façon statique. Sa concrétisation est déjà effective sur le plan pratique par les nombreux contacts qu'a eus le laboratoire d'Automatique de Lille avec l'Industrie.

Le second mode de conduite n'a pas encore eu d'écho , puisque exposé sur le plan fondamental, nous pensons avoir tout de même répondu par cette étude à la question soulevée dans ce mémoire et qui a conduit à aborder le dilemme Homme-robot sous son aspect dynamique.

Malgré les multiples problèmes énumérés pour arriver à une réalisation concrète de ce système, nous estimons que sa faisabilité peut être considéré comme acquise.

Une question reste tout de même posé , il s'agit de son adoption. Les éléments de réponse ne peuvent être apportés sans avoir fait une prospection de l'ensemble du marché concerné.

A défaut d'adoption, nous avons l'intuition qu'une autre voie de commande des manipulateurs automatique par rapport à celle utilisée jusqu'à maintenant, pourrait être dégagée. Cette voie qui découle de la variante semi-automatique, pourrait être dénommée " commande floue ". Elle consisterait à remplacer l'homme par plusieurs capteurs à résolution de plus en plus précise et à rayons d'action de plus en plus petits. C'est d'ailleurs de cette idée que découle la notion d'Homme-capteur et d'Homme superviseur que l'on a introduite au début de ce mémoire. Cette nouvelle voie tendra sûrement vers la simplification des algorithmes de commande d'où découleraient de meilleurs performances temporelles tout en posant un concept naturel de hiérarchisation de la commande, et en soulevant les problèmes afférents à toute vision nouvelle.

Cette idée de remplacer l'homme par des capteurs nous vient également parce que nous pensons que même si le mode semi-automatique est adapté pour certaines applications, il ne s'agira que de cas particuliers ou transitoires (faute de mieux).

Après cette étude et en faisant abstraction d'hypothèses "ponctuelles", nous sommes d'avis que la voie réelle de la robotique industrielle est celle du robot autonome. En revanche, le mode mixte est parfaitement adapté aux situations où la symbiose Homme-robot est d'une nécessité absolue.

C'est la raison pour laquelle nous jugeons utile que cette recherche sur l'interaction Homme-robot dans de tels cas, soit poursuivie.

