

50376
1988
H9

N° d'ordre: 1424

THESE

présentée à

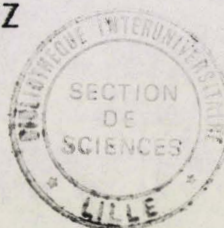
L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE
FLANDRES-ARTOIS

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR 3ème CYCLE EN AUTOMATIQUE

par

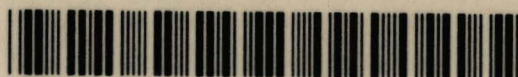
Philippe GRAVEZ



ETUDE D'UN SYSTEME DE SUPERVISION POUR LA
TELEOPERATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR

Soutenue le 28 mars 1988 devant la Commission d'Examen

MM. P.	VIDAL	Président
J.M.	TOULOTTE	Rapporteur
B.	ESPIAU	Examineur
R.	FOURNIER	Examineur
S.	MAOUCHE	Examineur



0300139526

A Pierre et Paul

AVANT-PROPOS

L'étude présentée dans ce mémoire a été réalisée au Centre d'Automatique de Lille (CAL) dans le cadre des activités Téléopération Avancée du programme ARA. Elle m'a de ce fait conduit à participer au montage et à l'évaluation du site expérimental installé sur le Centre d'Etude Nucléaire de Saclay au sein de l'Unité de Génie Robotique Avancé (UGRA-déplacé au CEN de Fontenay-aux-Roses depuis le début de 1987).

Parmi les membres du CAL, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Jean-Marc Toulotte qui a encadré cette thèse et dont les conseils pertinents ont toujours été les bienvenus. Je remercie également Pierre Vidal, directeur du laboratoire, qui a accepté de présider mon jury, ainsi que Salah Maouche qui a bien voulu y prendre part. Pour clore ce paragraphe lillois, je ne peux manquer de citer les noms de Bernard Lepers, Constantino Diaz, Aicha Guerrouad et Christian Agricole qui, au travers de discussions passionnantes, m'ont apporté suggestions, idées et critiques.

Du côté ARA, je désire tout d'abord souligner le rôle de Bernard Espiau, responsable à partir de 1985 du pôle Téléopération, dont j'ai pu apprécier la profonde honnêteté, tout autant que les qualités scientifiques. Je mentionnerai ensuite la contribution essentielle de Guy André (IRISA, maintenant chez MATRA) et de Raymond Fournier (UGRA) avec qui j'ai vécu l'aventure de la "manip canonique ARA". Il n'est pas exagéré d'affirmer que, sans leurs travaux et leur aide amicale, le superviseur SARAH n'aurait jamais vu le jour. Je tiens également à citer Christine Mangeot (UGRA) qui a permis de définir la place d'un système de planification au sein de notre l'architecture de commande.

Je remercie enfin tous ceux (responsables, chercheurs, techniciens et secrétaires) qui m'ont apporté leur soutien et ont fait que ce travail, s'il fut enrichissant d'un point de vue scientifique, le fut aussi sur le plan humain.

Je terminerai en évoquant la mémoire de Jean Vertut, véritable père de la téléopération en France, qui nous a quitté le 26 mai 1986. Son attachante personnalité a marqué ceux qui l'ont connu et son absence fut durement ressentie lors des manifestations qui mirent un point final aux activités du pôle Téléopération ARA, activités qu'il avait lui-même initiées et dirigées pendant près de cinq années.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
I. MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE.....	5
I.1 LE MODE MANUEL.....	6
I.1.1 Les différentes formes de la conduite manuelle.....	6
I.1.1.a Commande directe par apprentissage.....	6
I.1.1.b Commande télémanipulée.....	7
I.1.1.c Commande télémanipulée avec apprentissage.....	9
I.1.2 Commande bilatérale et téléprésence.....	11
I.1.2.a Principe de la commande bilatérale.....	11
I.1.2.b Télémanipulateurs mécaniques.....	12
I.1.2.c Télémanipulateurs à asservissement électrique.....	13
I.1.2.d Téléprésence.....	16
I.1.3 Commande maître/esclave généralisée et téléassistance.....	17
I.1.3.a La téléopération assistée par ordinateur.....	17
I.1.3.b Modes de commande.....	18
I.1.3.c Téléassistance.....	19
I.1.3.d Interface symbolique et supervision.....	20
I.2 LE MODE AUTOMATIQUE.....	23
I.2.1 Présentation générale.....	23
I.2.2 Niveaux de description d'une tâche.....	25
I.2.2.a Le niveau effecteur.....	25
I.2.2.b Le niveau objet.....	27
I.2.2.c Le niveau objectif.....	28
I.2.3 Commande hiérarchisée.....	30
I.2.3.a Bases de connaissance et programmation automatique.....	30
I.2.3.b Systèmes de perception évolués.....	32
I.2.3.c Architecture hiérarchisée.....	33
I.3 LE MODE SEMI-AUTOMATIQUE.....	37
I.3.1 Intégration de l'opérateur humain: généralités.....	37
I.3.1.a Contribution de l'étude des systèmes homme-machine.....	38
I.3.1.b Les performances opérateur.....	40
I.3.1.c Niveaux de communication.....	42
I.3.2 Mise en oeuvre du mode semi-automatique.....	46
I.3.2.a Partage du travail.....	46

I.3.2.b Le mode semi-automatique proprement dit.....	47
I.3.2.c Le mode mixte.....	49
I.3.3 Critique du mode mixte.....	52
II. SYSTEMES DE TAO.....	55
II.1 LA TELETHESE SPARTACUS.....	56
II.1.1 Description de la téléthèse.....	57
II.1.2 Modes de commande.....	61
II.1.3 Interface de supervision.....	62
II.2 SUPERMAN.....	66
II.2.1 Description.....	66
II.2.2 Etat STANDBY.....	68
II.2.3 Etat DEFINE.....	70
II.2.4 Etat EDIT.....	72
II.2.5 Etat EXECUTE.....	72
II.2.6 Etat TAKEOVER.....	72
II.3 LE SYSTEME TAO1.....	74
II.3.1 Description.....	74
II.3.2 Fonctions TAO1.....	77
II.3.3 Interface homme-calculateur.....	78
II.4 LE SYSTEME LARTS.....	81
II.4.1 Description.....	81
II.4.2 LARTS/T.....	84
II.4.3 LARTS/WM.....	87
III. ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO.....	91
III.1 CARACTERISTIQUES D'UNE MACHINE DE TAO.....	92
III.1.1 Description des organes constitutifs.....	92
III.1.1.a Manipulateurs dextres et organes associés.....	95
III.1.1.b Les systèmes de perception.....	96
III.1.1.c Les systèmes espions.....	98
III.1.1.d Le système de commande.....	99
III.1.2 La commande maître/esclave généralisée.....	100
III.1.3 Eléments d'évaluation d'une machine de TAO.....	106
III.1.3.a Aspects ergonomiques.....	106
III.1.3.b Effets sur l'exécution d'une tâche.....	107
III.1.3.c Apports de l'assistance opérateur.....	110
III.2 COMMANDE SYMBOLIQUE.....	112

III.2.1 Fondements conceptuels.....	112
III.2.1.a Commande supervisée.....	113
III.2.1.b Approche TAO.....	115
III.2.1.c Architecture hiérarchisée.....	117
III.2.1.d Entités manipulées.....	119
III.2.2 Niveaux de commande.....	124
III.2.2.a Niveau exécution.....	124
III.2.2.b Niveau supervision.....	128
III.2.2.c Niveau planification.....	130
III.2.3 Coopération homme-machine et modes de fonctionnement.....	134
III.2.3.a Problématique de l'assistance.....	134
III.2.3.b Structure coopérative et structure ouverte.....	137
III.3 SUPERVISION.....	140
III.3.1 Glomodes.....	140
III.3.2 Structure fonctionnelle du système de supervision.....	147
III.3.2.a Interpréteur de Glomodes.....	148
III.3.2.b Interpréteur de Molocs.....	152
III.3.2.c Moniteur d'Exécution et Interface de Réglage.....	152
III.3.3 Exemple d'application.....	154
III.3.3.a Le système CoPILOTe.....	154
III.3.3.b Phase de préparation (hors-ligne).....	156
III.3.3.c Phase d'exécution (en-ligne).....	158
IV. LE SYSTEME SARAH.....	163
IV.1 PRESENTATION GENERALE.....	164
IV.1.1 Forth.....	165
IV.1.2 Cahier des charges.....	168
IV.1.3 Fonctionnement du système.....	170
IV.1.3.a Interpréteur externe.....	170
IV.1.3.b Interpréteur interne.....	171
IV.1.3.c Gestion de paramètres.....	171
IV.2 COMPILATION DES GLOMODES.....	175
IV.2.1 Structure de glomode.....	175
IV.2.2 Mécanismes de compilation.....	177
IV.2.3 Exemples.....	180
IV.3 INTERPRETATION DES GLOMODES.....	186
IV.3.1 Interpréteur interne.....	186
IV.3.2 Interface opérateur.....	189

IV.3.3 Exemples.....	194
V. IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH.....	201
V.1 LE SITE CANONIQUE.....	202
V.1.1 Description.....	202
V.1.2 Les deux opérateurs.....	208
V.1.3 Système de communication.....	211
V.1.3.a Définition du protocole.....	211
V.1.3.b Description approfondie.....	213
V.1.3.c Adaptation aux liaisons série et étude de la fiabilité.....	216
V.2 L'EXPERIMENTATION CANONIQUE.....	219
V.2.1 Mise en oeuvre du système SARAH.....	219
V.2.2 Expérimentation supervision.....	221
V.2.3 Autres expérimentations.....	228
V.3 DISCUSSION.....	234
V.3.1 Téléprésence et téléassistance.....	234
V.3.2 Partage du travail entre l'homme et le calculateur.....	236
V.3.3 Développements futurs.....	240
CONCLUSION.....	243
BIBLIOGRAPHIE.....	247
ANNEXE A.....	257
ANNEXE B.....	271

INTRODUCTION

L'origine de la téléopération remonte à la naissance de l'industrie nucléaire lorsque se posa le problème du traitement des matières radioactives. Le premier télémanipulateur moderne a été conçu vers 1948 par l'équipe de Raymond Goertz à Argonne National Laboratory (USA). Il s'agissait d'un système maître/esclave à transmission mécanique permettant le travail en cellule chaude à de faibles distances. Dès cette époque commença en outre l'étude de machines motorisées unilatérales (sans retour d'effort), capables de soulever des charges beaucoup plus lourdes. L'année 1954 vit l'apparition à Argonne d'un modèle maître/esclave actionné par des moteurs électriques. Un tel progrès était marquant, en ce qu'il rendait possible l'association d'un manipulateur dextre avec un quelconque engin mobile (porteur articulé, véhicule, etc.) et autorisait les interventions en profondeur qui caractérisent la téléopération.

En France, le développement de l'énergie atomique s'accompagna à partir de 1956 d'un effort de recherche qui permit des réalisations de premier plan. Les travaux menés au CEA à Saclay, sous l'impulsion de Jean Vertut, se sont notamment concrétisés avec les manipulateurs bilatéraux de la famille MA23 et le véhicule radio-guidé Virgule. Par la suite, la téléopération assistée par ordinateur (TAO) prit un essor certain dans notre pays grâce aux projets SPARTACUS (1975-80) et ARA (Automatisation et Robotique Avancées, 1980-1986).

Durant une longue période, robotique et téléopération ont suivi une évolution parallèle mais indépendante, l'une mettant l'accent sur l'autonomie en phase d'exécution (robots de substitution), l'autre sur la conception de machines à vocation étendue, capables d'intervenir en milieu hostile. A la confluence de ces 2 disciplines se place aujourd'hui la

INTRODUCTION

téléopération assistée par ordinateur qui s'attache à améliorer l'efficacité des systèmes pilotés à distance en recourant à des techniques d'assistance par ordinateur.

Initialement limités au nucléaire, les domaines d'emploi des machines de téléopération se sont considérablement diversifiés, englobant maintenant le sous-marin et l'espace. Pour l'exploitation des océans, 2 classes d'appareils sont mises en oeuvre. La première se compose des manipulateurs (le plus souvent hydrauliques et unilatéraux) dont sont munis les sous-marins habités qui servent à la construction et à la maintenance des infrastructures pétrolières off-shore. La deuxième recouvre les engins d'exploration ou de travail commandés depuis la surface. Une distinction similaire se retrouve dans l'espace avec, d'une part, des sondes "automatiques" parfois équipées de bras préleveur d'échantillons pour l'analyse des roches lunaires (Surveyor, Lunakod), d'autre part, le manipulateur SPAR de la navette US. Plus récemment, l'application de la TAO en micro-chirurgie ou dans les travaux publics montre un élargissement de la notion de milieu hostile qui décrit désormais tout environnement impliquant des dangers pour l'homme ou des performances supérieures à ses capacités naturelles.

En toute généralité, une tâche de téléopération présente les caractéristiques suivantes:

- elle se déroule dans un milieu hostile où l'homme ne peut intervenir sans risque;
- elle est non répétitive;
- elle est fréquemment complexe, et ce d'autant que l'univers de travail est difficile à modéliser;
- les systèmes de perception actuels ne permettent pas d'appréhender son environnement d'une manière exhaustive;
- elle est susceptible de donner lieu à des situations imprévues auxquelles doivent répondre des stratégies adaptées élaborées en temps réel.

Dans ce contexte, la diversité des tâches à réaliser, l'insuffisance des moyens sensoriels, ainsi que la possible confrontation à l'imprévisible rendent indispensable la présence d'un opérateur humain dans les boucles de

INTRODUCTION

commande. Conceptuellement, la structure d'un système de téléopération repose sur les 3 univers décrits ci-dessous:

- l'univers esclave qui contient les organes opératifs et sensoriels de la machine, de même que les outils et les objets de l'environnement tâche;
- l'univers maître qui, à distance du premier, regroupe l'ensemble des organes de commande et de restitution destinés à l'opérateur humain;
- un univers virtuel, baptisé univers "X", qui englobe l'électronique et l'informatique de commande.

En pratique, ce dernier est distribué entre les 2 précédents, fonction des caractéristiques du système esclave (autonomie, puissance disponible, charge et volume utiles), des conditions ambiantes (radiations, température, etc.) et des débits de transmission maître/esclave.

Sur un télémanipulateur classique, le système de commande établit une relation unique entre les organes du poste opérateur et ceux de la partie esclave. En TAO au contraire, le calculateur casse cette rigidité de couplage et donne à la machine la potentialité de comportements multiples susceptibles d'assister l'homme dans la réalisation du travail. La commande du bras esclave peut ainsi résulter d'une combinaison de consignes opérateur, de contraintes programmées et de données sensorielles. De même, les retours d'information pourront être générés par le traitement des signaux capteurs, proprioceptifs ou extéroceptifs, ainsi que par une simulation sur un modèle géométrique de l'environnement. Une telle approche conduit à définir un ensemble de modes de commande et de restitution dont la pertinence dépend étroitement de la nature de la tâche en cours. De la sorte, s'il est possible d'apporter à l'homme une aide efficace dans le pilotage de la machine, encore est-il nécessaire de gérer les configurations successives du système de TAO et, autant que possible, d'assister l'opérateur dans son rôle de supervision. C'est là précisément le problème que nous nous proposons de traiter avec ce mémoire qui conclut un travail de recherche mené dans le cadre du projet ARA et de son pôle Téléopération Avancée.

Dans une première partie, nous rappelons les divers modes de conduite manuel, automatique et semi-automatique, utilisés en robotique.

INTRODUCTION

Nous y insisterons tout particulièrement sur les aspects les plus riches du point de vue de la téléopération.

Le deuxième chapitre décrit plusieurs systèmes de TAO que nous avons jugé représentatifs des grandes orientations de cette discipline.

Nous abordons ensuite l'étude de la conduite d'une machine de TAO. Après un exposé des caractéristiques propres à ce type de système, nous proposerons une approche globale de la gestion des comportements maître/esclave. Elle débouche sur une structure de commande hiérarchisée qui repose sur les niveaux exécution, supervision et planification. Ayant défini les entités manipulées par le calculateur, nous détaillerons la couche supervision qui décide interactivement de l'enchaînement des configurations machine. Les principes en seront illustrés sur un exemple théorique qui explicite les phases hors-ligne et en-ligne.

Notre quatrième partie traite du superviseur SARAH inspiré de l'approche précédente et qui a donné lieu à une implantation sur la machine de TAO développée dans le cadre de ARA.

Nous en terminerons enfin avec la mise en oeuvre de SARAH sur le site canonique du projet et la description des principales expérimentations réalisées.

CHAPITRE I

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

Comme pour tout système automatisé, on peut distinguer sur un robot:

- une partie opérative composée du manipulateur, de l'organe terminal et des outils qui y sont attachés;
- une partie commande comprenant un ou plusieurs calculateurs de pilotage et les interfaces opérateur.

A ces éléments s'ajoute un ensemble de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs qui délivrent des informations relatives à l'environnement de la tâche. Essentiellement, le rôle du système de commande est de remplir les fonctions suivantes, plus ou moins développées selon le type de machine:

- perception: reconnaissance de l'espace de travail, contrôle de l'évolution dans la tâche;
- décision: planification, résolution des conflits, recouvrement d'erreur;
- action: élaboration des signaux de consigne;
- dialogue: programmation, suivi et intervention en-ligne de l'opérateur.

D'une manière générale, l'analyse de la participation de l'homme à la commande permet de définir différents modes de conduite. Selon la finesse de la description de tâche fournie au robot, la qualité des informations disponibles sur l'univers de travail, les possibilités de traitement de ces

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

informations respectivement par l'homme ou la machine et les capacités d'"intelligence" du système de pilotage, le mode de conduite mis en oeuvre pourra être:

- manuel: l'homme est systématiquement présent dans la boucle de commande;
- automatique: la contribution de l'opérateur se limite à la phase d'initialisation;
- semi-automatique: l'homme intervient par intermittence pour guider, corriger ou débloquer le système.

Nous allons aborder dans la suite chacun de ces modes de conduite en insistant plus particulièrement sur les aspects qui intéressent la téléopération et que nous retrouverons ultérieurement.

I.1 LE MODE MANUEL

En mode de conduite manuel, l'homme est intégré dans la boucle de commande au niveau le plus bas de la machine. Ceci revient à dire qu'il participe physiquement à la génération des trajectoires, en temps réel ou différé. On distinguera plusieurs variantes au sein du mode manuel selon que la commande est:

- directe ou télémanipulée;
- avec ou sans apprentissage.

I.1.1 LES DIFFERENTES FORMES DE LA CONDUITE MANUELLE

I.1.1.a Commande directe par apprentissage

Ce type de commande, souvent qualifié de commande programmée par l'exemple, fait intervenir l'homme en temps différé. Au cours d'une phase hors-ligne (phase d'apprentissage), l'opérateur agit directement sur le bras manipulateur dont l'organe terminal est remplacé par une poignée. Les trajectoires sont enregistrées selon un échantillonnage spatial ou temporel

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

plus ou moins fin, fonction du degré de précision demandé. En-ligne (phase de recopie), le système de pilotage restitue les mouvements initiaux par interpolation entre les positions successivement mémorisées. A la recopie, le calculateur permet certains traitements comme l'introduction d'un rapport de vitesse ou d'un décalage entre les déplacements montrés par l'opérateur et ceux reproduits par la machine.

La commande par apprentissage, très utilisée sur les robots de production confrontés à des tâches simples, répétitives et parfaitement déterminées, offre des avantages appréciables:

- mise en oeuvre par du personnel non spécialisé;
- faible coût de la commande;
- autonomie en phase d'exécution;
- capacité à suivre des trajectoires complexes (robots de soudage et de peinture).

Parmi ses inconvénients, il faut citer une adaptativité quasi-nulle (on se contente au mieux de vérifier la présence sur le poste de travail des pièces ou des assemblages à traiter), ainsi que la difficulté de réaliser l'apprentissage quand le manipulateur est un organe lourd devant déplacer des masses considérables, ou lorsque la machine opère dans un milieu dangereux pour l'homme. Dans ce dernier cas, il est parfois possible d'effectuer l'apprentissage avant l'installation du robot dans l'univers de la tâche [Vertut 76], à la condition toutefois que cet univers soit au préalable complètement et précisément connu de l'opérateur.

Ajoutons qu'en regard de la diversité des trajectoires restituées, la commande par apprentissage est d'un grand intérêt dans le cadre des modes de conduite automatique et semi-automatique, dès lors que l'on dispose d'un système de programmation autorisant l'insertion de séquences enregistrées.

1.1.1.b Commande télémanipulée

La commande télémanipulée se définit comme la conduite en-ligne et

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

à distance d'un manipulateur qualifié d'esclave, par un opérateur humain générant des consignes de bas niveau sur un organe de pilotage encore appelé organe maître. Dans ce contexte, le rôle du système de commande est d'établir une relation entre les variables du maître qui traduisent les interactions homme-machine et celles de l'esclave liées à la tâche. D'après la nature de la relation employée, on classe les télémanipulateurs en 2 grandes catégories:

- les systèmes unilatéraux pilotés en vitesse;
- les systèmes bilatéraux pilotés en position.

La commande unilatérale permet à l'homme de contrôler la vitesse vectorielle du manipulateur au travers d'un organe maître (boîte à boutons ou jeu de leviers) ne restituant aucun retour d'effort ni de position. Cette vitesse peut être exprimée:

- dans le repère articulaire du robot (commande axe par axe);
- dans un repère cartésien attaché à l'espace de travail.

Les machines fonctionnant sur ce principe sont en majorité des télémanipulateurs lourds destinés à des tâches demandant peu de précision telles que la manutention de charges en milieu sain (travaux publics) ou hostile (nucléaire).

La commande bilatérale repose sur l'asservissement réciproque d'un bras maître équipé d'une poignée que l'opérateur déplace manuellement, avec un esclave qui en reproduit les mouvements et renvoie sur le maître les efforts qui lui sont appliqués. Selon le cas, les 2 bras sont:

- homothétiques et le système est fréquemment réversible;
- dissymétriques et le couplage maître-esclave oblige à des transformations de coordonnées.

A l'heure actuelle, les machines bilatérales sont essentiellement utilisées dans le nucléaire pour des tâches mettant en jeu des masses faibles (au maximum 50 kg), mais nécessitant une bonne dextérité (manipulation de produits dangereux, maintenance et démantèlement en milieu contaminé). La présente étude porte plus particulièrement sur cette classe de matériel.

En toute généralité, un système télémanipulateur est conçu pour

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

répondre à des tâches:

- complexes, non répétitives et parfois imprévisibles;
- exécutées dans des environnements hostiles et difficilement modélisables qui, interdisant l'intervention directe de l'homme, rendent cependant indispensable sa participation à la commande.

Concernant ce deuxième point, le terme "environnement hostile" prend ici un sens très large, l'hostilité pouvant provenir:

- du milieu lui-même (nucléaire, sous-marin, spatial);
- des caractéristiques de la tâche, lorsqu'elle suppose des capacités (puissance, précision) supérieures aux normes humaines; l'application récente des techniques de télémanipulation à la microchirurgie en est une illustration tout à fait remarquable [Ben Gayed-Guerrouad 86].

I.1.1.c Commande télémanipulée avec apprentissage

A la suite des types de commande précédemment abordés, on envisagera un mode de conduite où les mouvements du manipulateur résultent de l'action à distance et en temps différé de l'homme. Un tel principe est très employé sur des robots industriels pour lesquels il ne constitue qu'une variante améliorée de la commande avec apprentissage exposée en I.1.1.a. Dans ce domaine, on se reportera par exemple à [Hohn 78] qui traite de la programmation du robot Milacron T3, effectuée directement en coordonnées cartésiennes au moyen d'une boîte à boutons.

En robotique d'intervention, une commande télémanipulée avec apprentissage serait susceptible d'aider à la réalisation de tâches répétitives dans un environnement hostile. A priori, l'intérêt de cette forme de conduite semble limité: les tâches de téléopération sont en effet rarement répétitives au sens d'une tâche s'exécutant un grand nombre de fois d'une manière exactement identique. Certaines actions peuvent cependant être rencontrées à plusieurs reprises au cours de travaux à distance. Ainsi, l'inspection d'une installation nucléaire inclut généralement le traitement de pièces et d'assemblages normalisés. Il est de la sorte possible de vérifier un premier élément en mode télémanipulé, le système de

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

commande enregistrant en parallèle les trajectoires générées manuellement [Lyman 71] [Sato 85]. La séquence est ensuite exécutable à partir du moment où l'on amène le bras esclave dans une position de référence liée à un élément semblable à celui utilisé pour l'apprentissage. Les déplacements mémorisés sont alors restitués par rapport à cette position et avec une vitesse contrôlée par l'opérateur. Cette approche n'est évidemment valide qu'en l'absence de toute interaction avec le reste de l'environnement et ne saurait se suffire à elle-même; néanmoins, associée à d'autres modes de conduite, elle nous introduit de plein pied dans la commande semi-automatique.

I.1.2 COMMANDE BILATERALE ET TELEPRESENCE

Nous développons ici la conduite télémanipulée classique [Coiffet-Vertut 84]: après un bref exposé du principe de la commande bilatérale, nous décrirons l'évolution des techniques maître/esclave conduisant à la notion de téléopération et au concept de téléprésence.

I.1.2.a Principe de la commande bilatérale

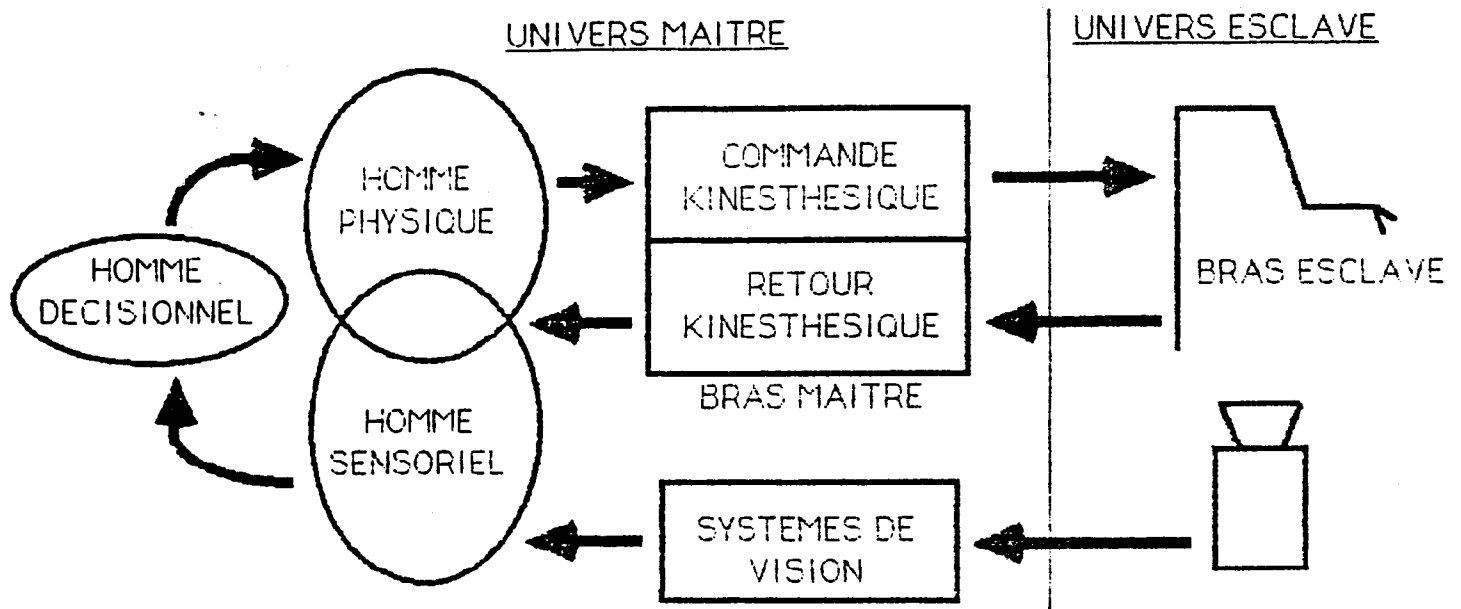
Ainsi que nous l'avons vu, un télémanipulateur dextre est composé de 2 bras, homothétiques ou non. Le maître dispose d'une poignée de commande avec laquelle l'opérateur génère les mouvements qu'il désire voir reproduits par le manipulateur esclave placé à l'intérieur du milieu hostile (commande kinesthésique). Pour assurer la coordination du système bilatéral, le maître est réciproquement asservi à l'esclave par une loi de commande en position ou en force que l'homme interprète indifféremment comme un retour d'effort (retour kinesthésique).

Dans l'accomplissement d'un travail à distance, l'opérateur reçoit par ailleurs des informations visuelles provenant de l'univers esclave et qui lui permettent de se définir un plan d'action, puis d'en surveiller le déroulement. Son rôle peut ainsi être décomposé en (figure I.1):

- homme sensoriel qui traite les données disponibles sur l'environnement de la tâche (vision directe et/ou retours capteurs);
- homme décisionnel qui élabore, contrôle et amende des stratégies visant à atteindre les objectifs fixés;
- homme physique qui exécute ces stratégies dans la conduite de la machine.

Une telle analyse est à rapprocher des fonctions principales d'un système de commande pour robot. Elle met l'accent sur les composantes de la boucle perception-décision-action en mode télémanipulé et se justifie d'autant mieux que l'opérateur supplée un calculateur de pilotage parfois totalement inexistant.

Figure 1.1: Fonctions de l'opérateur humain en téléopération



I.1.2.b Télémanipulateurs mécaniques



Les systèmes bilatéraux ont été initialement développés afin de manipuler à distance et sans danger des matières radio-actives. Les machines de la première génération, encore utilisées pour nombre d'applications, fonctionnent selon un principe mécanique dans lequel les efforts exercés par l'homme sur le bras maître sont transmis vers l'esclave au moyen de câbles, rubans et poulies. Du fait de la réversibilité du couplage, l'opérateur ressent sur le maître les efforts imprimés à l'esclave et le qualificatif bilatéral attribué à la commande décrit une complète équivalence entre les 2 bras. La liaison maître-esclave traversant une paroi de protection, les machines de ce type permettent de travailler sur des produits confinés à l'intérieur d'une cellule étanche ou d'intervenir en milieu hostile dans le cadre d'un engin embarquant l'opérateur et le poste de contrôle-commande.

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

Outre le retour kinesthésique, l'homme est assuré d'une vision directe de la scène esclave par l'intermédiaire d'un hublot en verre blindé. Le télémanipulateur mécanique ne demande donc aucun système électronique ni informatique, mais son intérêt est restreint par la faible distance de travail résultant du mode de transmission employé.

I.1.2.c Télémanipulateurs à asservissement électrique

Partant des manipulateurs bilatéraux précédents, les chercheurs américains du laboratoire ANL d'Argonne ont imaginé au début des années 60 de remplacer le couplage mécanique par des asservissements électriques [Goertz 64]. Les machines de la deuxième génération possèdent 2 bras homothétiques et motorisés dont les actionneurs sont asservis par paire maître/esclave. On trouvera sur les figures I.2.a et I.2.b une description du modèle MA23 conçu par le CEA en collaboration avec la société La Calhène et sous la direction de Jean Vertut [Vertut 76]. Comme avec le télémanipulateur mécanique, la commande est réversible et les informations d'effort sont restituées sur le maître, éventuellement avec un gain (1/2, 1/4 ou 1/8) approprié au travail à accomplir [Bicker 86]. Recourant à une liaison par câble ou par radio, les machines électriques autorisent des distances de manipulation considérables. Il est ainsi possible de monter l'esclave sur une quelconque base mobile (pont roulant, véhicule, porteur articulé) et d'envisager des opérations en profondeur au sein du milieu hostile. Cette catégorie de tâches, associée à des interventions lointaines, caractérise la téléopération en regard des tâches de télémanipulation géographiquement plus limitées.

L'augmentation des distances de travail rend cependant problématique le pilotage du système par un opérateur qui ne dispose qu'exceptionnellement d'une vision directe sur l'environnement esclave.

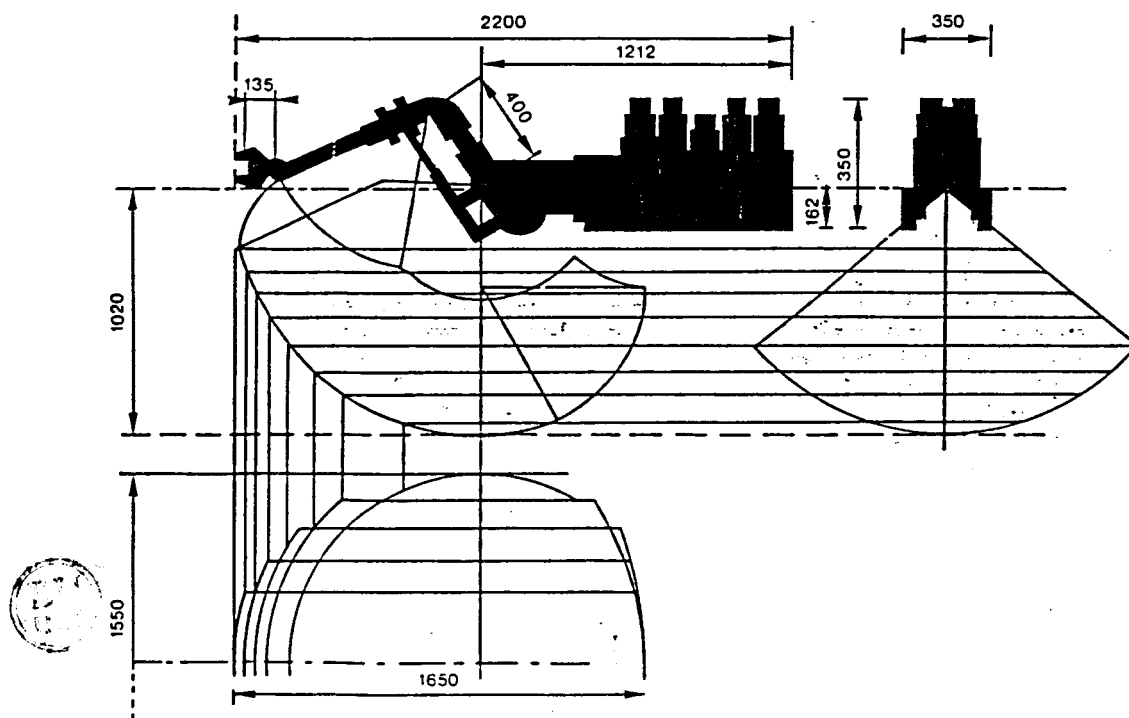
- La machine de téléopération doit tout d'abord intégrer des capteurs d'images et les organes de commande à distance nécessaires (zoom, mise au point, déplacement et orientation des caméras). A la tâche principale de conduite du manipulateur, s'ajoute de la sorte pour

- l'homme une tâche annexe de réglage des dispositifs de vision; on estime couramment que 30% du temps total d'exécution y est consacré.
- Par ailleurs, les informations fournies par ces capteurs sont généralement insuffisantes à une perception globale et précise de l'univers esclave (absence de relief, point de vue ou orientation inadapté). Elles imposent à l'opérateur un effort d'interprétation parfois malaisé et l'obligent à se construire un modèle mental de l'environnement.

Figure I.2.a: Manipulateur MA23-6000

Caractéristiques principales

Degrés de liberté:	7
Capacité de manipulation:	25 daN
Rapport d'effort maître/esclave:	1/4
Vitesse moyenne:	1 m/s
Poids: maître:	110 daN
esclave:	180 daN
Puissance: maître:	350 W
esclave:	500 W



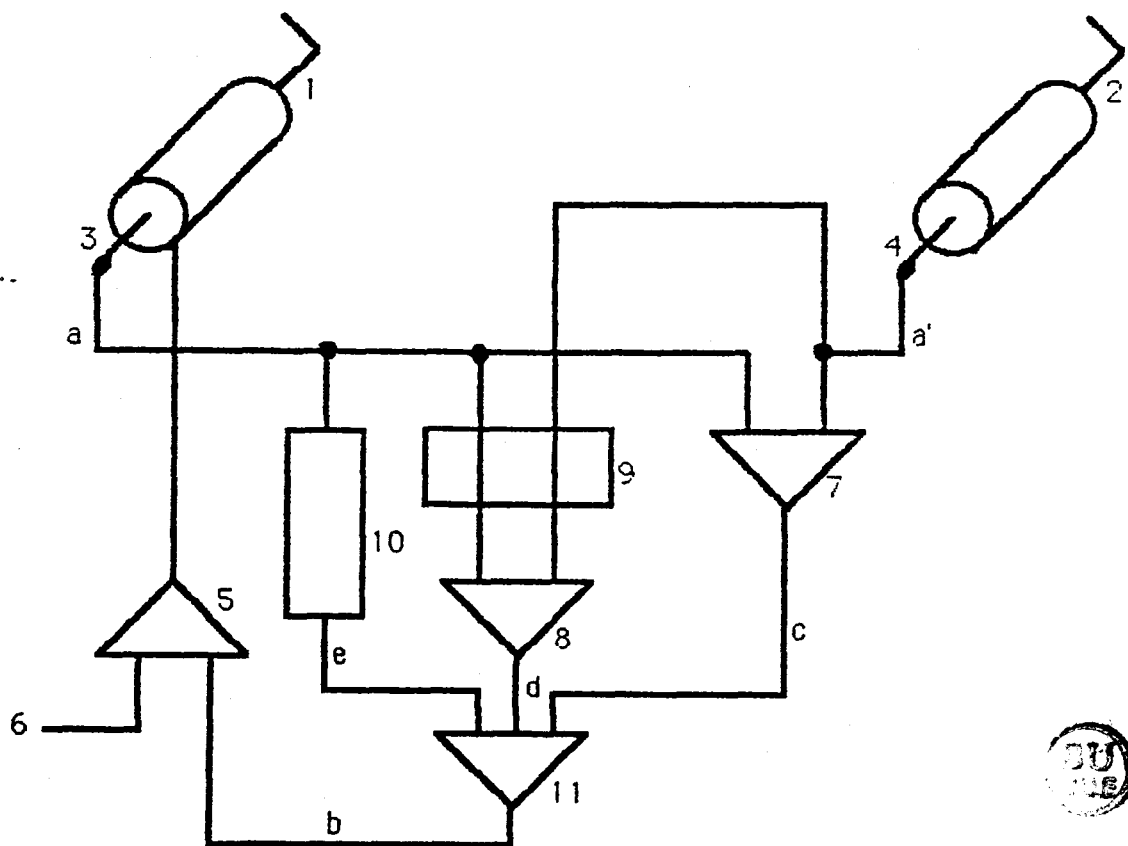


Figure I.2.b: Asservissement des actionneurs du MA23 [Vertut 76]

- 1 actionneur du bras esclave
- 2 actionneur correspondant sur le maître
- 3-4 potentiomètres à piste plastique
- 5 amplificateur de commande en courant
- 6 alimentation de puissance
- 7-8 amplificateurs des erreurs en position et en vitesse
- 9 dérivateur tachymétrique
- 10 dérivateur de compensation des frottements
- 11 amplificateur sommateur

Sur chacun des bras, les actionneurs sont des moteurs à courant continu munis de réducteurs à moufles (caractéristiques de la famille MA23) qui permettent de diminuer les jeux rencontrés sur les télémanipulateurs classiques. La figure représente l'asservissement du type position-position d'un moteur du bras esclave à partir de son vis-à-vis sur le maître. Les actionneurs (1-2) sont commandés en courant et possèdent chacun un potentiomètre à piste plastique (3-4) donnant un signal de position (a-a'). L'amplificateur (5) est attaqué par un signal (b) qui résulte de la combinaison des erreurs de position (c) et de vitesse (d) obtenue par dérivation. Les frottements sont compensés au niveau de l'amplificateur sommateur (11) à partir du signal tachymétrique (e) obtenu après dérivation de (a). L'asservissement est absolument identique en ce qui concerne la commande de l'actionneur maître par l'esclave (commande bilatérale).

I.1.2.d Téléprésence

Pour remédier aux difficultés évoquées, une certaine coordination entre organes de commande et systèmes de perception s'avère indispensable. Elle a pour but d'établir des correspondances simples entre les informations restituées à l'opérateur et les mouvements qu'il imprime au maître. L'approche dessinée ici se généralise au travers du concept de téléprésence qui tend à permettre à l'homme de travailler de manière naturelle, en symbiose avec l'univers de la tâche, comme s'il intervenait directement dans le milieu hostile. Cette qualité d'un système piloté à distance repose sur la simulation d'une symétrie aussi grande que possible entre les fonctions motrices ou sensorielles de l'opérateur et le comportement de la machine. A la base de la téléprésence, on trouve la restitution kinesthésique des informations de position et d'effort. Concernant les retours visuels, citons entre autres techniques [Tachi 84 et 85]:

- la disposition des caméras de façon à ce que les mouvements de l'esclave soient perçus par l'opérateur avec des orientations identiques aux mouvements correspondants du maître;
- le recours à la vision stéréoscopique;
- l'utilisation d'une caméra disposant d'un champ de vision en relation dans l'univers esclave avec celui de l'homme dans l'univers maître (en particulier, des études ont été menées sur une commande céphalique liant l'orientation de cette caméra aux déplacements de la tête de l'opérateur).

I.1.3 COMMANDE MAÎTRE/ESCLAVE GÉNÉRALISÉE ET TÉLEASSISTANCE

Avec les systèmes abordés jusqu'alors, l'homme est seul détenteur des connaissances touchant à la tâche. Il se détermine une stratégie d'après les informations qui lui sont fournies, puis la réalise à distance en mode exclusivement manuel par l'intermédiaire des organes de commande. De ce point de vue, la machine est avant tout un outil qui prolonge la main de l'opérateur ou en décuple les possibilités. Une telle interprétation de la conduite télémanipulée est remise en cause par la participation du calculateur aux fonctions de pilotage, faisant basculer le système maître/esclave dans le domaine du mode semi-automatique. Nous avons néanmoins choisi d'introduire ici la commande bilatérale généralisée en raison de la continuité que présente la progression des machines de téléopération depuis un couplage rigide des 2 bras vers une autonomie toujours plus grande du manipulateur esclave.

I.1.3.a Téléopération assistée par ordinateur

La téléopération assistée par ordinateur (TAO) repose sur l'intégration dans la liaison maître/esclave d'un calculateur qui transforme la machine en un système capable d'évoluer dynamiquement selon le travail à exécuter. En conduite bilatérale, la relation de couplage est décrite sous la forme des lois de commande indiquées ci-dessous:

- commande en position de l'esclave à partir du maître;
- asservissement réciproque du maître en effort ou en position.

Sur les machines précédentes, ces lois de commande sont immuables de par la technologie employée. Le calculateur multiplie au contraire les algorithmes de couplage et permet d'agir sur le comportement du télémanipulateur dans le cadre d'un principe de commande maître/esclave généralisée (CMEG) particulièrement riche [André-Fournier 85]. Chaque variable fonctionnelle d'un système esclave peut dorénavant être associée à un des générateurs de consignes suivants:

- opérateur humain, au travers d'un organe maître;
- capteurs proximétriques (boucles adaptatives);

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

- base de données environnement jouant le rôle d'un capteur virtuel;
- module programmé qui définit des contraintes géométriques.

De même, le retour kinesthésique peut inclure une composante artificielle issue d'informations sensorielles ou modélisées. Le système de TAO offre ainsi à l'opérateur un ensemble de modes de commande qui témoignent chacun d'un comportement spécifique de la machine vis-à-vis de l'homme et de l'univers de travail.

Parallèlement, le calculateur autorise le couplage de bras dissymétriques, à partir du moment où l'on dispose de leurs modèles cinématiques et dynamiques. On envisagera dès lors de connecter un bras maître universel avec un quelconque manipulateur esclave et selon de multiples modes de commande [Bejczy 81].

A ce stade, il apparaît que le rôle du calculateur est fondamentalement de casser la symétrie aussi bien physique que fonctionnelle du système maître/esclave, donnant à la machine de TAO une souplesse d'utilisation inégalée. Cette forme de commande réalise une synthèse entre robotique classique et téléopération qui ouvre la voie vers un mode de conduite coopératif.

I.1.3.b Modes de commande

On trouvera par la suite (chapitre III) une approche analytique de la commande maître/esclave généralisée. Pour les besoins de notre exposé, nous nous contenterons dans un premier temps de présenter quelques exemples de mode de commande dont l'expérimentation a démontré l'intérêt:

- décalage de position qui permet de travailler en limite de l'espace atteignable du manipulateur esclave en conservant la main de l'homme dans une zone restreinte de confort;
- effets d'échelle en position ou en force destinées à réduire la fatigue de l'opérateur ou à augmenter la précision des mouvements;

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

- suppression de poids qui compense ou soustrait du retour kinesthésique les forces verticales dues à une masse transportée;
- blocage de degrés de liberté qui impose à la commande manuelle des contraintes géométriques maintenant un outil solidaire de l'organe terminal sur un plan (tronçonneuse, meule) ou sur un axe (perceuse, clé à choc);
- commande référencée capteurs autorisant le contrôle automatique de certains ddl ou la restitution d'un retour d'effort synthétique (attractif en suivi de surfaces ou de cibles mobiles, répulsif en anti-collision);
- commande référencée modèle susceptible des mêmes comportements que précédemment.

Considérée au travers de ces exemples caractéristiques, la notion de commande maître/esclave généralisée appelle 2 remarques importantes qui font l'objet des paragraphes suivants.

I.1.3.c Téléassistance

Dans les divers modes de TAO, les dispositifs de restitution fournissent à l'opérateur:

- des informations relatives à la perception de l'univers esclave;
- des informations fonctionnelles n'ayant de sens qu'en rapport avec un objectif local et qui visent à assister l'homme dans la conduite du manipulateur.

Cette constatation introduit le retour d'information généralisé (RIG) [André 86] par lequel le calculateur sélectionne les données pertinentes d'après leurs qualités intrinsèques ou leur signification vis-à-vis de la tâche, et les restitue de la façon la plus apte à en faciliter l'exploitation. De telles informations proviennent des systèmes sensoriels ou d'une modélisation a priori de l'environnement (base de données CAO). Elles se traduisent par des

retours réels d'effort et de vision délivrés par les capteurs correspondants, et des retours artificiels (efforts synthétiques et simulation graphique) générés par l'ordinateur. On ne cherche donc plus systématiquement à faire intervenir l'homme de la même manière (CMEG) et avec la même perception (RIG) que s'il était physiquement présent dans l'univers de travail. Pour ces raisons, le concept de téléassistance se superpose à celui de téléprésence (figure I.3). La machine ne se contente pas d'être aussi transparente que possible vue de l'opérateur, elle assiste l'homme au travers de ses fonctions:

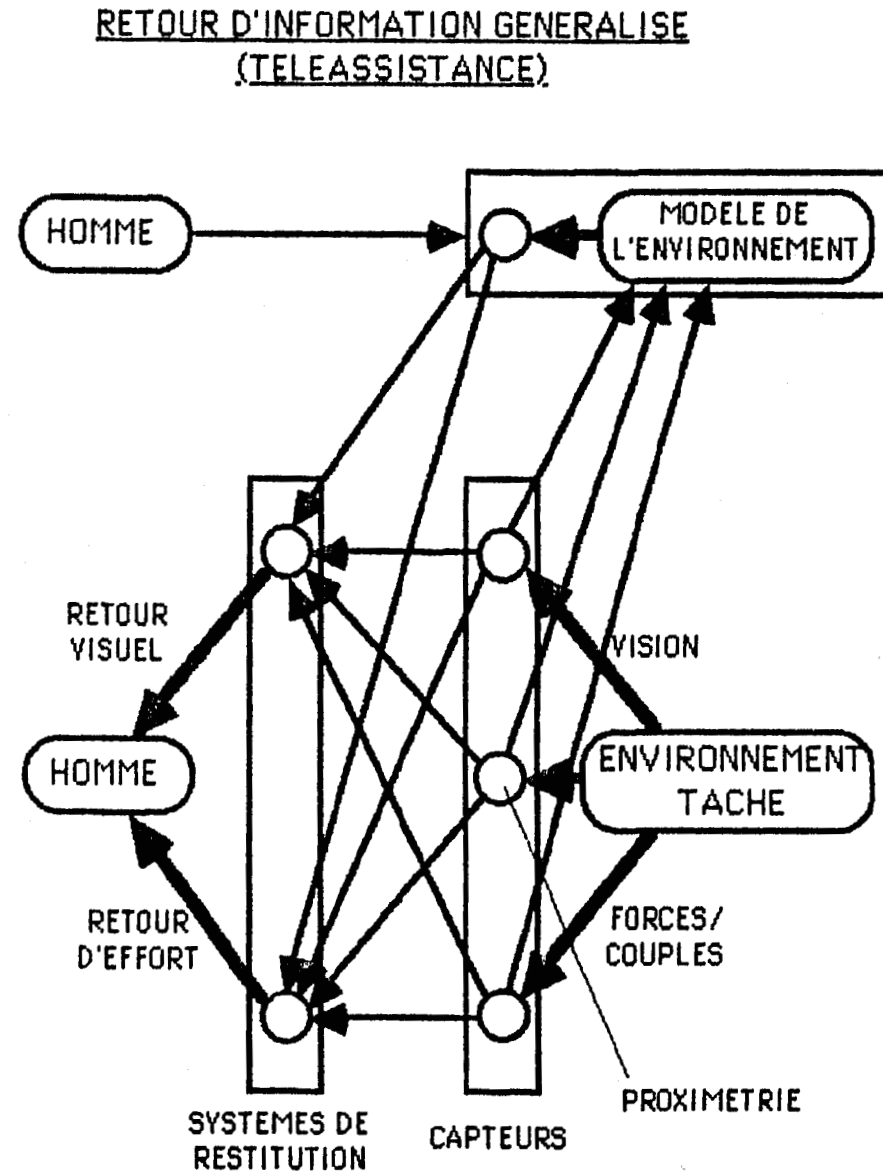
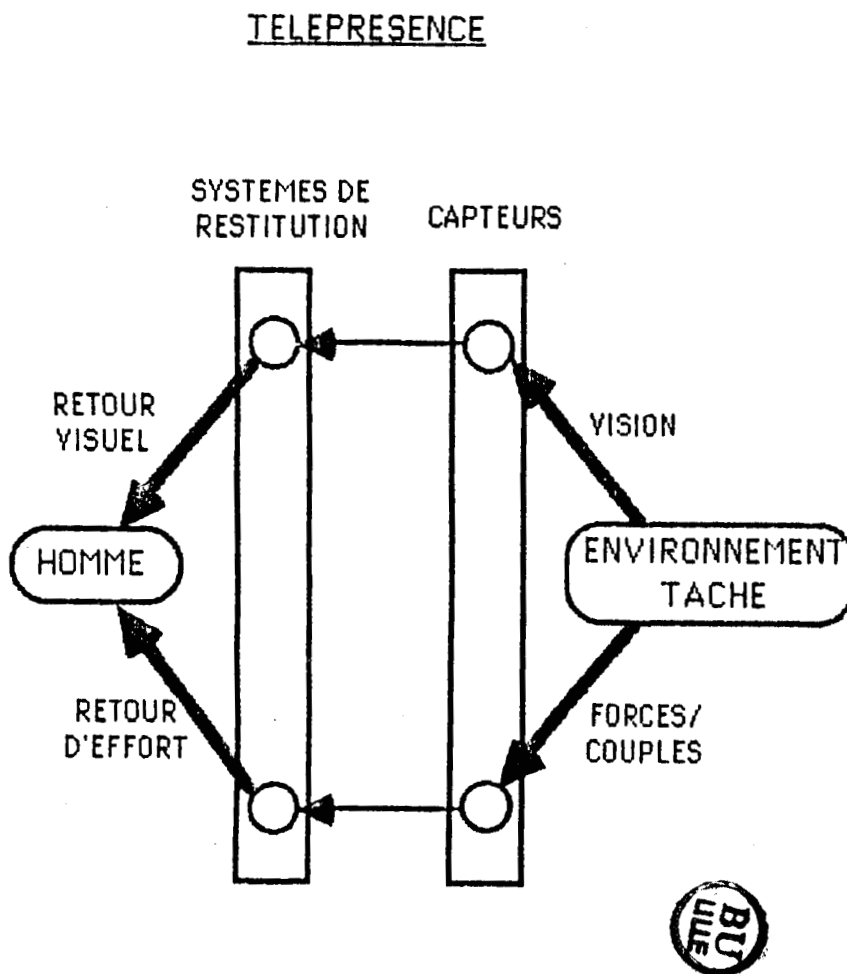
- sensorielle, par exemple en éliminant des informations constantes et dépourvues de signification telles que le poids d'un objet déplacé à vitesse lente;
- physique, par exemple en prenant en charge la commande de certains degrés de liberté;
- à la fois sensorielle et physique, en restituant des informations d'interprétation délicate sous une forme assurant une réponse quasi-réflexe (modes référencées capteurs et modèle).

I.1.3.d Interface symbolique et supervision

La machine de TAO permettant de nombreux modes de commande, encore faut-il que l'opérateur ait la possibilité de déterminer puis de faire exécuter ceux qui lui apporteront une assistance appropriée dans le pilotage du bras esclave. Cet aspect conditionne la souplesse d'utilisation du télémanipulateur qui peut être réduite à néant par une coopération homme-machine laborieuse.

- Le système doit ainsi intégrer une interface symbolique nécessaire à l'opérateur pour modifier en ligne le comportement maître/esclave.
- Par ailleurs et afin d'améliorer la communication homme-machine, on envisagera un dialogue de haut niveau autorisant la description de situations complexes dont l'interprétation par le calculateur guidera l'homme dans le choix des modes les mieux adaptés au travail en cours. Une telle approche suppose une structure de commande hiérarchisée dans laquelle, outre le couplage maître/esclave réalisé par la

Figure 1.3: Téléprésence et retour d'information généralisé
 [André 86]



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

machine d'exécution, les modes de commande sont mis en oeuvre par un module superviseur [Sheridan 76] fonctionnant en interaction avec l'homme.

Nous résumerons ceci en disant que si l'informatique contribue à diminuer la charge de travail physique de l'opérateur, elle lui impose en contrepartie la maîtrise d'une machine reconfigurable impliquant une activité mentale supplémentaire. Une spécification essentielle du système de commande est donc d'apporter à l'homme une aide efficace dans ses fonctions décisionnelles et de dialogue avec le calculateur. Cette assistance de haut niveau passe par une analyse de la tâche qui pourra s'inspirer de l'étude du mode de conduite automatique que nous allons maintenant aborder.

Remarque: Dans la suite, le terme "analogique" sera couramment employé pour désigner la participation continue de l'homme dans les boucles de bas niveau; on mettra ce qualificatif en rapport avec la commande symbolique relative au système superviseur.

I.2 LE MODE AUTOMATIQUE

L'objectif de cette présentation du mode automatique n'est en aucun cas de dresser un état de l'art de la commande des robots de substitution. Il s'agit plutôt de dégager certains concepts qui nous seront utiles par la suite. On ne cherchera donc pas à trouver ici une description fidèle des langages de robotique existants, ni même un exposé de leurs aspects les plus importants, autres que ceux qui intéressent directement la TAO.

I.2.1 PRESENTATION GENERALE

En mode de conduite automatique, l'homme intervient à un niveau symbolique pour initialiser le système. L'étude de ce mode, orientée le plus souvent vers des tâches d'assemblage, constitue le principal thème des recherches menées actuellement en robotique. Les caractéristiques des robots de substitution sont essentiellement:

- une complète autonomie en phase d'exécution;
- une bonne adaptativité à l'environnement de la tâche; elle n'est a priori limitée que par:
 - la variété et la qualité des informations que les capteurs sont capables de fournir;
 - les possibilités d'interprétation de ces informations par un ordinateur et en temps réel;
- une programmation hors-ligne faisant appel à des langages de description de tâche;
- l'utilisation d'importants moyens de calcul et de traitement intégrés au sein de structures informatiques hiérarchisées.

A ce jour, les machines de ce type répondent à des tâches s'exécutant:

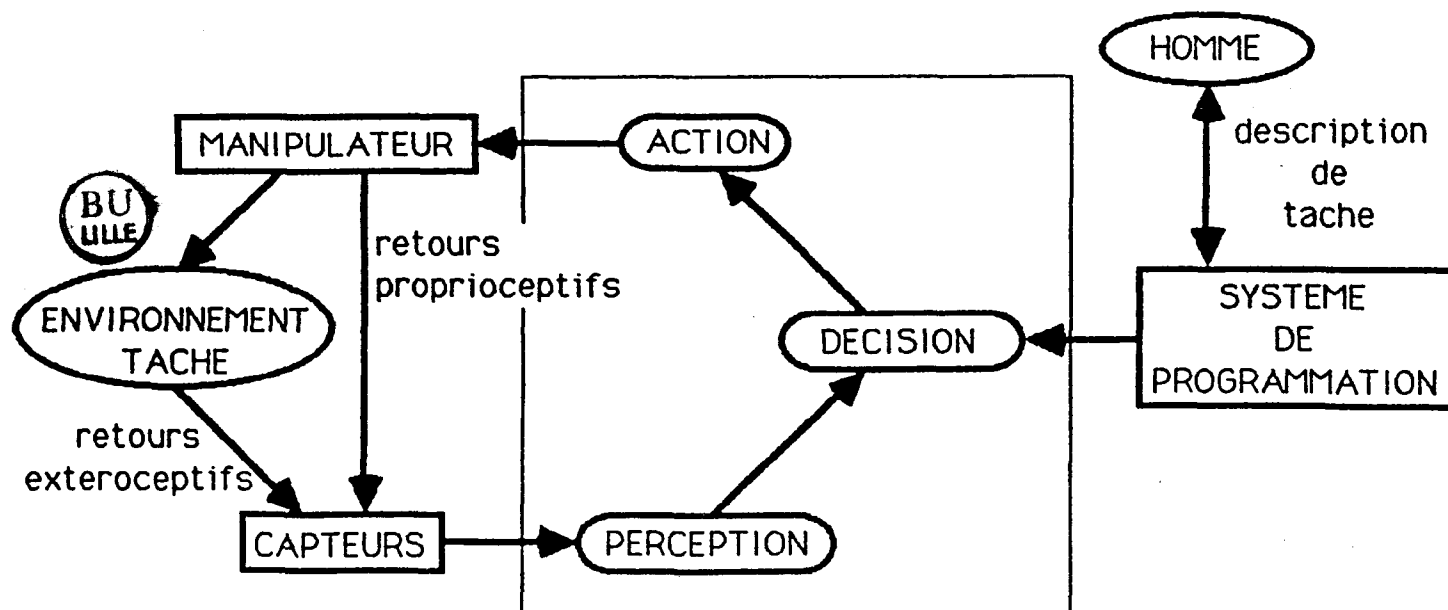
- dans un environnement aisément modélisable;
- d'une manière suffisamment répétitive pour assurer la rentabilité de systèmes de pilotage coûteux et qui nécessitent des phases de programmation longues.

Dans le cadre du mode automatique, le travail de l'opérateur consiste à fournir hors-ligne une description de la tâche au robot, le calculateur prenant en compte les fonctions perception-décision-action en phase d'exécution (figure I.4). Alors qu'en mode manuel, le dialogue homme-machine repose sur un "langage physique" de bas niveau, en mode automatique, il passe par des formes évoluées de programmation. Dans ce domaine, 2 approches parfois concourantes ont été développées:

- l'utilisation de langages généraux (C, PASCAL, ADA, ...) profitant de concepts éprouvés largement maîtrisés par les informaticiens et offrant des structures de contrôle puissantes telles que le traitement parallèle [Paul 84];
- l'implantation de langages dédiés à la robotique qui disposent d'instructions spécialisées.

L'étude de ces outils de programmation [Bonner-Shin 82] fait apparaître une grande diversité dans les niveaux de description de tâche proposés aux utilisateurs.

Figure I.4: Fonctions d'un système de commande



I.2.2 NIVEAUX DE DESCRIPTION D'UNE TACHE

La phase de mise en oeuvre hors-ligne d'un robot d'assemblage, critique sur le plan des impératifs économiques, peut de toute évidence être rendue plus simple par le recours à un langage de description de haut niveau. En contrepartie, cette approche suppose un environnement de programmation doté de certaines aptitudes à la résolution de problème et capable de décomposer la description fournie en une séquence d'actions exécutables par le système de commande temps réel. D'une manière classique, on distinguera les niveaux de description de tâche suivants [Latombe 79]:

- (1) niveau actionneur faisant intervenir les variables articulaires;
- (2) niveau effecteur où la tâche est définie en termes des mouvements de l'organe terminal, spécifiés dans un repère indépendant de la géométrie du manipulateur;
- (3) niveau objet qui se réfère aux entités physiques à manipuler;
- (4) niveau objectif décrivant le but à atteindre.

Conceptuellement, cette classification fait apparaître une structure hiérarchisée du système de programmation dont la fonction à un niveau (i) revient à générer une description de niveau (i-1) par l'interprétation d'une description de niveau (i).

La programmation symbolique au niveau actionneur, que l'on rapprochera de la phase d'apprentissage d'un robot programmé par l'exemple, s'avère tout à fait laborieuse et n'est envisagée que pour des applications particulièrement triviales.

I.2.2.a Le niveau effecteur

Une tâche est décrite au niveau effecteur en termes des déplacements de l'organe terminal et de la commande des outillages pouvant y être attachés. Ces déplacements sont définis dans un repère opérationnel indépendant des particularités géométriques du robot. Parallèlement, la prise en compte des retours d'information, qui à ce niveau concernent le plus

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

souvent les efforts appliqués au manipulateur, ne demande pas de préciser les capteurs physiques utilisés.

Interprétant un programme de ce type, le système de commande décompose chaque instruction de manière à l'exprimer sous forme de consignes destinées aux actionneurs. Un tel traitement suppose la connaissance d'un modèle cinématique (et si possible dynamique) du bras, associé aux modules générateurs de trajectoires et transformateurs de coordonnées. L'intérêt essentiel des langages de niveau effecteur est de permettre la description d'une tâche dans un référentiel (généralement cartésien) facilement perçu par l'homme et plus en rapport avec l'environnement de travail que le repère articulaire propre du robot. Les inconvénients de ces outils de programmation restent cependant considérables:

- ils contraignent l'utilisateur à apprécier quantitativement tous les détails de l'univers de la tâche;
- ils lui imposent de prévoir la détection et le traitement des incidents susceptibles de se produire [Gini 85];
- ils nécessitent l'écriture de séquences de code longues et fastidieuses.

La plupart des langages de robotique implantés à ce jour limite la description des tâches au niveau effecteur; citons entre autres: WAVE [Paul 77], AL [Binford 79] et LM développé depuis 1980 à Grenoble par une équipe de l'IMAG [Miribel-Mazer 84]. Les instructions proposées relèvent habituellement de l'une des 4 classes suivantes (les exemples donnés respectent la syntaxe LM):

- spécification des mouvements de l'organe terminal avec des clauses diverses; ex: DEPLACER PINCE DE TRANSF JUSQU'A FZ > 10.0;
- attachement de référentiels;
ex: LIER R1 R2 rend solidaires 2 objets de l'environnement de travail représentés par les repères R1 et R2; par la suite, si une transformation (déplacement) est appliquée à R1, elle le sera aussi et automatiquement à R2 (mise à jour de la valeur du référentiel);
- commande d'outil; ex: ACTIONNER TOURNEVIS JUSQU'A MZ > 15.0;

- synchronisation du robot avec un système extérieur (convoyeur, autre robot).

I.2.2.b Le niveau objet

A ce niveau, la description d'une tâche fait exclusivement référence aux objets de l'univers du robot, sans préciser les mouvements de l'effecteur. La programmation en termes des objets intervenant dans le travail affranchit l'utilisateur des détails de manipulation. Elle n'est cependant possible que si les actions primitives sont en nombre suffisamment restreint et peuvent être structurées afin d'assurer au langage un minimum de simplicité.

Les connaissances indispensables à l'interprétation d'une description de niveau objet concernent la position et la géométrie de l'organe terminal, des outillages employés et des pièces à saisir ou à assembler (modèle du robot et de l'environnement). Une des techniques mises en oeuvre revient à définir a priori, pour chaque opération élémentaire, un plan (ou squelette de programme) de niveau effecteur complété par la suite compte tenu du contexte de la tâche. Ces plans d'action locaux sont utilisés par le système de commande qui génère un programme explicitant les déplacements de l'organe terminal du robot. Alors que le traitement au niveau effecteur vise avant tout à traduire des instructions évoluées sous une forme adaptée à la commande de chaque actionneur, on assiste ici à un enrichissement de la description originelle par des éléments extraits d'une base de connaissance liée à l'espace de travail.

Parmi les rares systèmes de programmation développés au niveau objet, nous nous arrêterons brièvement sur AUTOPASS [Lieberman 77] étudié par IBM au centre de recherche J. T. Watson en Floride. Ce langage déjà ancien n'a jamais été implanté de manière opérationnelle; néanmoins, AUTOPASS reste une excellente illustration de ce que serait un outil de description de haut niveau. Ses caractéristiques les plus originales sont:

- une syntaxe proche du langage naturel;

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

- un jeu d'instructions évoluées qui permet de spécifier des relations géométriques entre les objets et de décrire les assemblages à réaliser;
ex: PLACER PIECE1 SUR PIECE2 EN ALIGNANT TROU1 ET TROU2;
- un interpréteur interactif recourant à l'utilisateur pour vérifier les séquences obtenues au niveau effecteur ou pour lui demander de fournir des informations complémentaires destinées à lever certaines ambiguïtés.

Un benchmark proposé dans [Bonner-Shin 82] a montré qu'une opération de palettisation codée en 50 instructions AL, était programmée en 8 instructions AUTOPASS et avec un temps d'analyse 3 fois moindre.

Il semble que l'approche du niveau objet s'oriente de plus en plus vers des méthodes d'intelligence artificielle comme celles présentées dans le paragraphe suivant. L'utilisation de plans prédéfinis s'accompagne en effet d'un manque de souplesse qui se manifeste notamment dans:

- la difficulté d'intégrer le retour d'information au sein d'un squelette de programme figé;
- la nécessité de prévenir les incidents qui peuvent survenir en-ligne, tels que les collisions ou les erreurs résultant des imprécisions du modèle.

Elle offre cependant l'avantage de ne pas imposer des temps de traitement prohibitifs en regard des systèmes d'intelligence artificielle. Dans le cadre de la robotique de substitution où le programme exécutable est élaboré hors-ligne, cet aspect n'est évidemment pas primordial; il en va tout autrement si l'on cherche à doter une machine de TAO de capacités d'interprétation au niveau objet.

1.2.2.c Le niveau objectif

Une description de niveau objectif se limite à la donnée du but à atteindre. Les méthodes employées dans la décomposition de tâche ont recours à des techniques développées pour l'intelligence artificielle, et en particulier aux systèmes de règles de production appelés générateurs

automatiques de plan. Une telle démarche passe par la détermination d'un modèle explicite de l'univers de travail auquel le générateur de plan tente d'appliquer diverses combinaisons de règles, que l'on pourrait qualifier d'opérateurs d'évolution de l'environnement, jusqu'à obtenir un état qui vérifie l'objectif fixé. A partir du chemin (liste des règles appliquées) défini au terme de la phase de recherche, il est possible de déduire une description de la tâche à un niveau inférieur (objet par exemple).

Actuellement, les études menées dans le domaine de la planification automatique n'ont pas encore donné lieu à des systèmes fonctionnant de façon satisfaisante dans des environnements robotiques représentatifs. Cet état de chose résulte de la complexité des problèmes d'analyse de tâche auxquels est confrontée la machine, mais aussi des difficultés rencontrées dans la modélisation des univers réels. La validité de l'approche par générateur de plan a été néanmoins amplement démontrée sur des applications théoriques simples avec des systèmes tels que STRIPS [Fikes 71], PLANNER, NOAH [Nilsson 82] et en France ARGOS (LSI, Toulouse) [Evrard-Farreny-Prade 83].

I.2.3 COMMANDE HIERARCHISEE

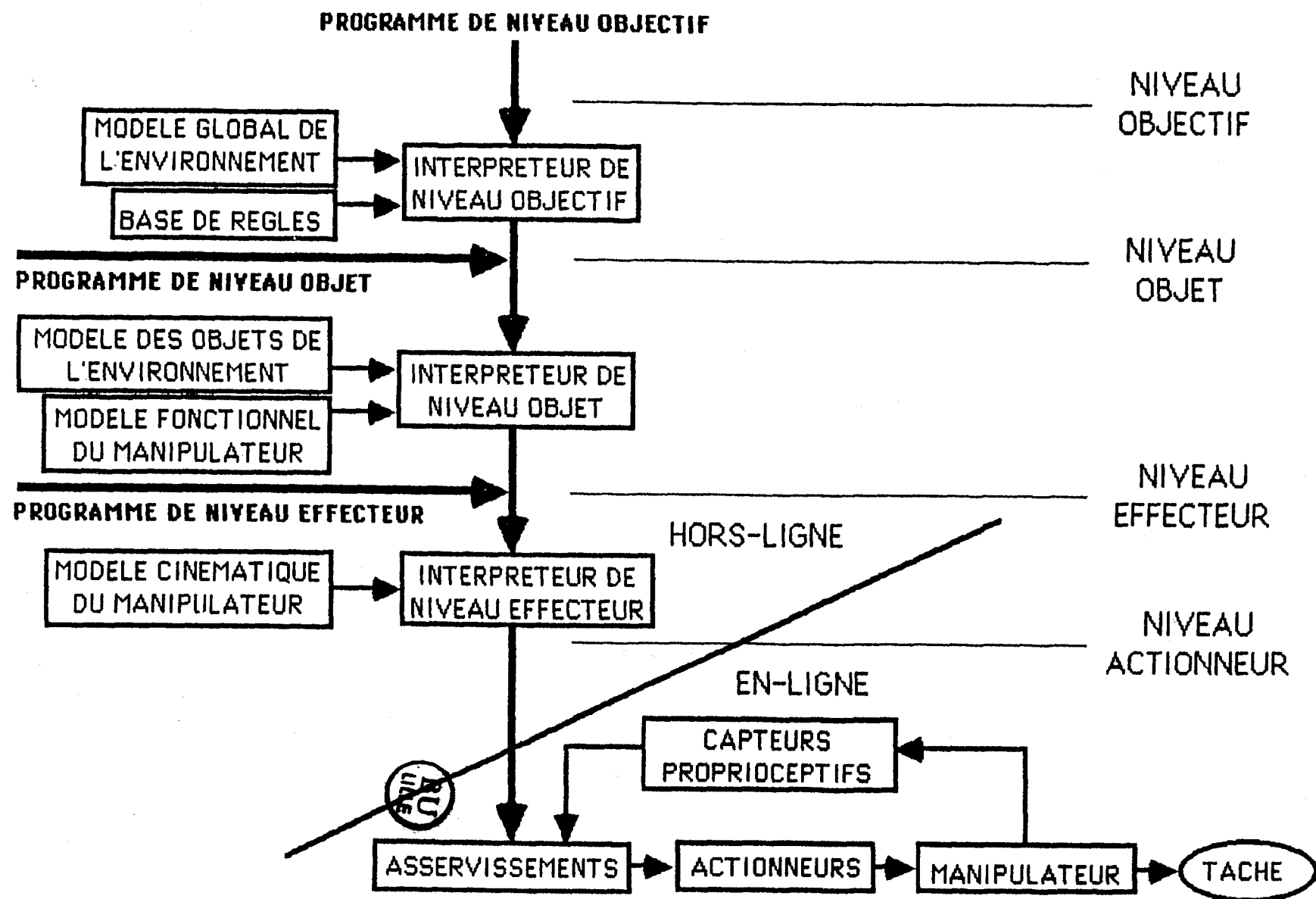
En robotique de substitution, l'objectif premier des techniques d'analyse de tâche est d'apporter une aide efficace dans la programmation hors-ligne de la machine. Transposées à la téléopération, ces techniques peuvent prétendre faciliter la communication homme-machine en dotant l'engin d'intervention d'une certaine autonomie décisionnelle. Dans ce domaine, une démarche particulièrement intéressante, bien que destinée à la conduite d'un robot autonome, a été proposée par James Albus du National Bureau of Standards [Albus-Barbera 79]. Son originalité repose sur l'extension du concept de hiérarchisation à l'ensemble de la structure de commande au lieu de le restreindre au seul système de programmation.

I.2.3.a Bases de connaissance et programmation automatique

La figure I.5 illustre les conceptions classiques touchant au fonctionnement du système de commande. Exprimée dans un langage évolué, la description de tâche est successivement traitée hors-ligne par plusieurs interpréteurs jusqu'à obtenir un programme de niveau actionneur qui sera exploité en phase de travail. Ce processus de décomposition hiérarchique suppose un ensemble de connaissances définies a priori et relatives à la tâche ou au robot.

- Au niveau effecteur est associé un modèle cinématique (et parfois dynamique) du manipulateur. Il permet divers changements de repère ainsi que la *génération de trajectoires coordonnées*.
- Au niveau objet correspond un modèle géométrique des objets de l'univers spécifiant leurs position, orientation, forme et les prises possibles. Ces connaissances sont utilisées pour compléter des plans d'action locaux qui témoignent des opérations dont est capable le manipulateur (modèle fonctionnel du robot).
- Le niveau objectif dispose quant à lui d'un modèle global de l'environnement de la tâche axé sur les relations entre éléments, et d'une base de règles décrivant les possibilités d'évolution de cet environnement.

Figure 1.5: Système de commande pour robot: approche classique



Il apparaît de la sorte que le principe d'une description de niveau objectif se fonde sur une distribution des connaissances nécessaires à la réalisation de la tâche par le robot. On distingue en effet:

- la connaissance du manipulateur;
- la connaissance de l'environnement de travail;
- la connaissance de la tâche proprement dite.

D'une manière idéale, les 2 premières classes n'ont aucun besoin d'être redéfinies pour chaque tâche, d'où l'utilité d'en faire des bases informationnelles propres. Aux différents niveaux, le rôle hors-ligne du système de commande se conçoit ainsi dans la recombinaison des connaissances selon une description de tâche donnée et en vue de la génération automatique d'un programme exécutable [Latombe 83].

I.2.3.b Systèmes de perception évolués

Le principal défaut du schéma précédent réside dans l'absence d'adaptativité aux échelons supérieurs. Ceux-ci ne disposent que de connaissances acquises hors-ligne et de ce fait, susceptibles d'être remises en question à la suite d'une modélisation imparfaite ou d'incidents non prévus. Les retours capteurs interviennent exclusivement dans le cadre du programme obtenu au niveau actionneur et leur utilisation se limite en général à la vérification de conditions d'arrêt sur les déplacements du manipulateur [Paul 83].

Une architecture de commande privilégiant la planification a priori s'avère ainsi peu propice à tirer le meilleur parti des capacités sensorielles du robot. Cet aspect devient tout à fait évident lorsque l'on considère le développement récent de capteurs évolués donnant à la machine les moyens d'explorer son environnement et bientôt de travailler en milieu non structuré.

- A l'heure actuelle, une perception locale limitée au voisinage immédiat de l'organe terminal est rendue possible par l'emploi de proximateurs infra-rouges ou ultra-sonores montés à l'extrémité du manipulateur. Les informations qu'ils délivrent renseignent le système de conduite

sur la position des objets détectés relativement à l'effecteur. Elles permettent donc des mouvements adaptatifs tels que le suivi de surface, la poursuite de cible mobile ou le centrage fin.

- Complémentaire des retours proximétriques, le traitement d'image en quasi-temps réel offre une perception plus large de l'univers du robot. Dans des situations favorables et pour des scènes simples, il fournit des indications suffisantes à la reconnaissance de formes préalablement modélisées. Le calculateur en déduit alors les coordonnées approximatives, la géométrie et les prises possibles des éléments observés. Rapportées à l'analyse de la tâche, de telles connaissances sont précieuses pour guider la décomposition d'une description de niveau objet.

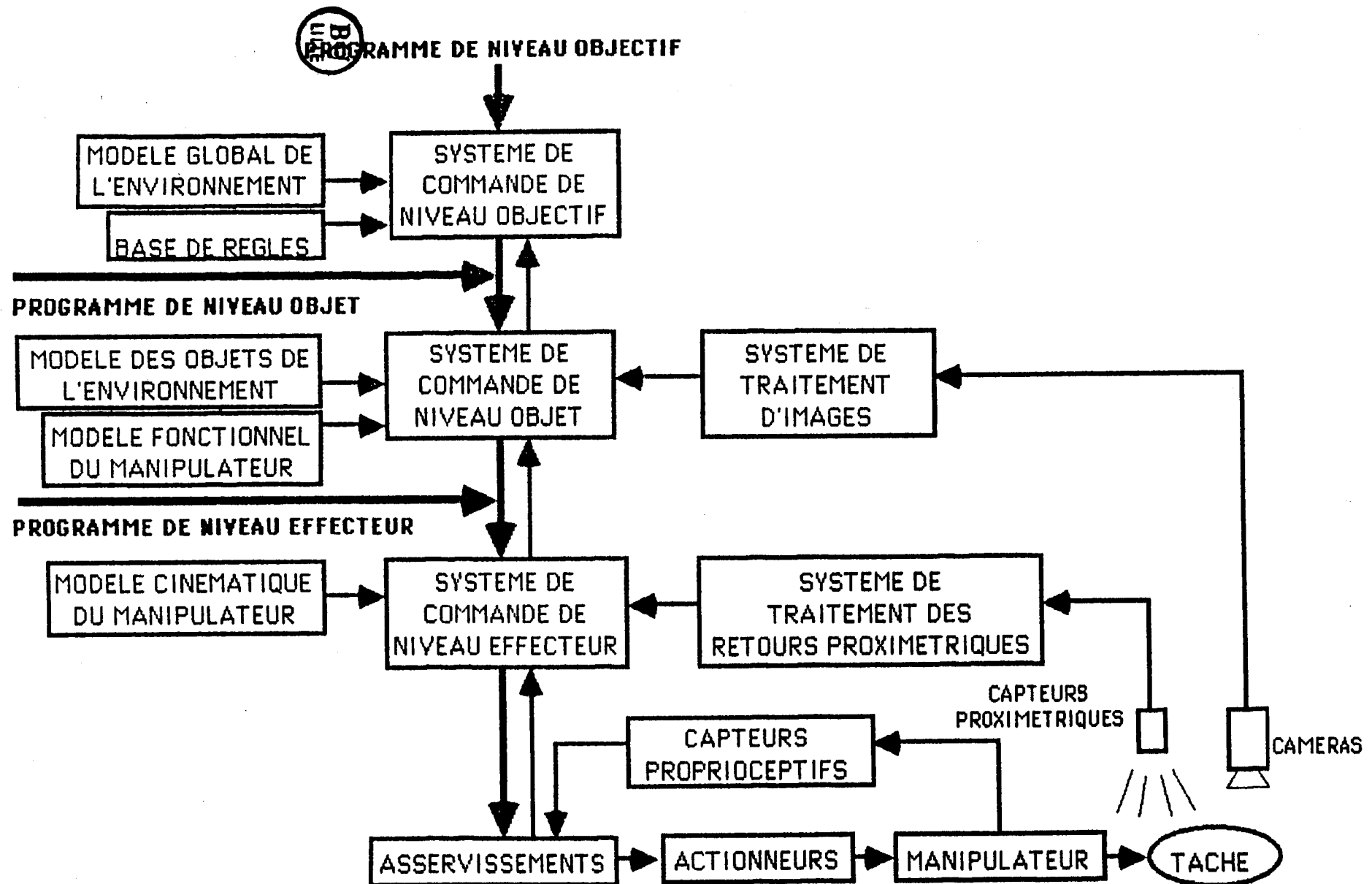
I.2.3.c Architecture hiérarchisée

Avec la percée de l'informatique, l'intégration de systèmes de perception évolués dans les structures de commande d'un robot autorise 2 approches nouvelles. L'exploitation des retours capteurs peut en effet prendre les formes suivantes:

- mise en oeuvre de boucles d'asservissement adaptatives;
- apprentissage de paramètres (les informations obtenues en-ligne complètent les connaissances modélisées);
- évaluation de la progression dans la tâche orientant la détermination d'une stratégie appropriée à la poursuite du travail.

On envisagera ainsi dans un premier temps la génération hors-ligne d'un programme comportant des références à certaines informations qui seront délivrées par les capteurs. Une extension du langage LM vers le niveau objet (LM-GEO [Mazer 83]) associe au système de conduite une base CAO décrivant les éléments de l'univers du robot; l'éditeur géométrique donne en particulier la possibilité de laisser à un dispositif de vision le soin de calculer en-ligne la position d'un objet de l'environnement. De ce point de vue, les fonctions sensorielles attachées à la machine ont pour rôle essentiel de faciliter une modélisation efficace de l'espace de travail. Néanmoins, sur un hypothétique système fonctionnant au niveau objet ou

Figure 1.6: Système de commande pour robot: approche hiérarchisée



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

objectif, cette approche est mise en échec dès lors que le programme construit hors-ligne n'inclut pas explicitement une procédure répondant aux incidents rencontrés.

Face aux structures classiques, une architecture de commande hiérarchisée et modulaire semble apporter une solution à ce manque d'adaptativité (figure I.6) [Albus-Barbera 79] [McCain 85]. Elle définit une double chaîne de traitement de l'information au travers:

- d'un flux descendant relatif à la décomposition d'une description de tâche fournie par l'utilisateur;
- d'un flux montant lié à l'interprétation des retours sensoriels.

Un schéma de ce type établit des boucles perception-décision-action de haut niveau qui assurent le recouvrement d'erreur aux différents échelons. Dans ce contexte, chaque élément de la hiérarchie constitue un système de commande à part entière. En phase d'exécution, un niveau (i) pilote une machine formée du manipulateur et des niveaux (j) pour $j < i$. Il reçoit des consignes du niveau (i+1), fait intervenir ses bases de connaissance propres et prend en compte les informations délivrées par les capteurs qui lui sont attachés (retours extéroceptifs) ou par le niveau (i-1) (retours proprioceptifs). Des problèmes complexes sont en conséquence susceptibles d'être résolus en-ligne aux échelons supérieurs où les contraintes temporelles ont une importance moindre. L'approche proposée se révèle ainsi parfaitement adéquate dans l'utilisation d'informations symboliques provenant de systèmes sensoriels évolués, parmi lesquels on pourra placer l'homme considéré en tant que "capteur intelligent". De la sorte, outre une assistance à la programmation, l'intérêt d'une structure hiérarchisée s'affirme par des qualités intrinsèques d'adaptativité et de fonctionnement temps réel.

Dans le cadre difficile des robots de substitution, les conceptions exposées dépassent parfois les aptitudes actuelles des machines. Néanmoins, appliquées à la téléopération où la présence en-ligne d'un opérateur humain autorise des traitements puissants et rapides, elles devraient contribuer à augmenter la souplesse d'emploi d'un système de

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

TAO. Pour être valable, une telle transposition suppose toutefois la définition de formes de coopération homme-machine appropriées au partage de la commande et aux spécificités des 2 partenaires.

I.3 LE MODE SEMI-AUTOMATIQUE

Alors qu'en conduite purement manuelle, la machine est un outil qui prolonge la main de l'homme, le mode semi-automatique introduit un partage du travail entre l'opérateur et le système de pilotage. Cette coopération se manifeste en phase d'exécution et donc avec des contraintes temporelles sévères, sensibles principalement au niveau du dialogue homme-calculateur. D'une manière formelle, la commande maître/esclave généralisée abordée au début du chapitre relève du mode semi-automatique qui peut de la sorte être interprété comme une extension du mode manuel. Néanmoins, la distribution des tâches entre l'homme et la machine justifie une approche différente que nous développerons ici au travers du comportement opérateur, des problèmes de communication et des règles de partage du travail. Cette présentation des divers aspects de l'intégration de l'homme à la commande d'un robot sera illustrée d'une brève analyse du mode mixte initialement proposé dans [Habchi 81] et qui fut d'une certaine façon le point de départ de nos travaux. Nous terminerons par un commentaire critique de ce concept à la lumière des récents progrès de la téléopération.

Dans le passé, le mode semi-automatique a été assez peu étudié en robotique. Il s'inscrit cependant dans le cadre général des systèmes homme-machine qui ont fait l'objet d'importantes recherches portant sur des domaines essentiels de l'activité humaine tels que:

- le pilotage de véhicules divers (avions, navires, engins spatiaux, ...);
- la régulation de processus industriels (nucléaire, chimique, ...).

Ces dernières années, l'intérêt de la conduite semi-automatique s'est vu renforcé par l'apparition de robots de coopération destinés à intervenir en milieux hostiles ou non structurés et qui réalisent un partage de la commande entre l'homme et la machine.

I.3.1 INTEGRATION DE L'OPERATEUR HUMAIN: GENERALITES

Nous évoquerons ici le côté spécifiquement humain du mode semi-automatique en commençant par replacer la téléopération au sein des

systèmes homme-machine. L'ensemble des remarques exprimées à cette occasion jette sur la TAO un éclairage ergonomique que la vision de l'automaticien ne devra pas faire négliger.

I.3.1.a Contribution de l'étude des systèmes homme-machine

A l'origine (1940-55), les recherches axées sur la participation de l'homme au pilotage d'une machine se sont attachées à l'étude des facteurs humains dont l'anthropométrie, les facultés sensorielles et les relations perception-action. Par la suite (1955-70), la théorie des systèmes donna le jour à des modèles comportementalistes de l'opérateur, définis par des entrées, des sorties et des fonctions de transfert. Les travaux de l'époque mirent en évidence un principe d'invariance des systèmes homme-machine décrivant une relative régularité de leurs performances, indépendamment des caractéristiques propres de la machine. Ce principe, qui témoigne de l'adaptation de l'opérateur à son environnement de travail, conclut à la nécessité d'une modélisation globale appréciant la part de l'homme dans la commande. Plus proche de nous (1970-86), l'utilisation du calculateur a permis:

- d'analyser le comportement humain dans des situations extrêmes (en simulation);
- de dégager l'homme de certaines tâches de bas niveau;
- de concevoir des systèmes d'aide à la décision qui ont orienté l'attention des ergonomes vers une approche cognitive de l'opérateur.

Au sein des tendances que l'on observe aujourd'hui dans l'évolution des systèmes homme-machine, 3 grandes directions font écho aux préoccupations de la robotique en milieu hostile [Sheridan 85]:

- Eloignement de l'opérateur en regard de la tâche

Ce premier point présente 2 aspects complémentaires: il s'agit d'une part de la conduite à distance d'engins complexes, d'autre part de l'intervention de l'opérateur dans des boucles de commande de haut niveau, l'interprétation et l'exécution des ordres étant effectuées par la machine. Le rôle de l'homme tend ainsi à se ramener à celui d'un

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

homme superviseur qui fixe les conditions initiales et contrôle le bon déroulement de la tâche réalisée d'une manière au moins partiellement automatique. Dans ce travail, il reçoit en général l'assistance d'un calculateur [Sheridan 76] qualifié de système de supervision, par opposition à la machine d'exécution fonctionnant au niveau le plus bas.

- Analyse des modèles humains

Le problème considéré concerne la façon dont l'opérateur se définit un modèle mental de la tâche telle qu'il est à même de la percevoir au travers de la machine. Ce type d'étude [Smith 81] trouve une application évidente à la conception des postes de commande, relativement au choix des organes de pilotage et de restitution, ainsi qu'à leur disposition spatiale (cf. téléprésence). Par ailleurs, dans le cadre d'un système d'aide à la décision, les connaissances obtenues permettent d'assurer une plus grande convivialité au cours des échanges homme-calculateur [Hayes 81].

- Assistance décisionnelle intégrée à la commande

Dans l'aide qu'un système informatique est susceptible d'apporter aux fonctions décisionnelles de l'opérateur, 2 approches convergentes sont envisagées:

- pour des tâches assez bien modélisées, la machine est parfois capable de prendre la responsabilité de la commande et recourt à l'homme comme à une ressource particulière ("capteur intelligent") délivrant des informations symboliques;
- face à des situations difficilement planifiables, une autre possibilité consiste à faire exécuter par le calculateur un filtrage (traitement et sélection) des retours d'information, orientant l'opérateur vers une solution plus ou moins précise qu'il peut d'autant mieux évaluer qu'il est directement impliqué dans le processus décisionnel.

La problématique actuelle des systèmes homme-machine se résume ainsi à une diminution de la charge de travail physique de l'opérateur, allant de pair avec un accroissement de sa charge de travail mentale. Ce dilemme explique en grande partie le développement de techniques d'assistance

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

fondées sur l'intelligence artificielle et l'étude de la structuration des connaissances chez l'homme (génie cognitif [Norman 82]). Remarquons cependant qu'une telle démarche se doit de considérer l'opérateur dans sa globalité humaine, sans négliger l'influence nuisible d'une présence étouffante du calculateur sur sa motivation et son habileté.

I.3.1.b Les performances opérateur

L'intervention d'un opérateur dans les boucles de commande du robot influe largement sur la conception de la machine. Elle suppose en particulier:

- la prise en compte de facteurs physiologiques et psychologiques;
- l'étude du comportement de l'homme relativement au contexte envisagé;
- la définition des interfaces opérateur;
- la détermination puis l'évaluation des règles de coopération.

Dans ce domaine, la variation des performances humaines au cours du temps est une donnée essentielle de l'analyse des systèmes coopératifs. Ainsi, la fatigue qui résulte d'un effort soutenu fait apparaître au niveau de l'homme:

- une perte de vigilance (fonctions sensorielles);
- une baisse de sa dextérité (fonctions motrices);
- une augmentation du taux d'erreur (fonctions décisionnelles).

A plus long terme, une surcharge de travail cause parfois un état de stress dans lequel l'opérateur se concentre exclusivement sur un aspect de la commande perçu comme critique, créant ainsi une menace de défaillance associée à des paramètres habituellement bien contrôlés. En outre, si cet opérateur est à même de fournir un travail exceptionnel pendant une courte période, une tâche simple et monotone peut l'amener à relâcher son attention. Ultérieurement, il risque de se trouver incapable de répondre rapidement à une situation plus complexe mais néanmoins tout à fait maîtrisable en temps ordinaire.

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

Concernant la coopération homme-machine, les considérations précédentes mettent en évidence:

- la difficulté de définir des "paramètres sensibles" liés à un taux de défaillance humaine supérieur à la norme (indépendamment de la qualité des retours d'information et de la dextérité demandée);
- la nécessité de maintenir autant que possible la charge de travail de l'opérateur à un niveau nominal [Rouse 75]:
 - par l'exécution automatique de certaines fonctions lorsqu'il y a dépassement des capacités humaines;
 - en sollicitant artificiellement l'homme dans les phases de pilotage par ordinateur afin de soutenir son attention et sa motivation vis-à-vis de la tâche.

De ce point de vue, la recherche d'une plus grande convivialité dans les systèmes homme-machine passe par l'évaluation dynamique des capacités opérateur. Les études s'y rapportant [Diaz 85] n'ont pas encore mené au développement d'un module espion apte à délivrer en-ligne des informations exploitables. Elles permettent cependant de cerner plusieurs méthodes:

- détection d'un état de stress par le traitement de signaux physiologiques tels que la réponse électrodermale (différence de potentiel entre 2 points de la peau, variable avec la sudation) ou les caractéristiques acoustiques de la voix dans la reconnaissance de la parole;
- estimation de la charge de travail en recourant à une tâche secondaire pour laquelle la performance humaine est connue (l'opérateur néglige cette tâche lorsqu'il est par trop accaparé au pilotage de la machine), ou par une technique d'occlusion (mesure du temps de réponse à une dégradation progressive du retour visuel);
- détermination de la fiabilité de l'homme par l'observation directe de son comportement sur la tâche principale (la méthode proposée fait appel à un codage des actions élémentaires appliquées sur un organe de commande, puis à la mise en évidence des incohérences au travers d'une analyse syntaxique des phrases obtenues).

I.3.1.c Niveaux de communication

Dans le pilotage d'un processus quelconque, l'opérateur humain génère des ordres à destination de la machine et reçoit en retour des informations sensorielles ou des compte-rendus d'exécution. Touchant aux interactions homme-machine en TAO, il nous faut distinguer 2 formes de communication selon que l'homme participe physiquement à l'élaboration des trajectoires ou qu'il dialogue avec un ordinateur dans le cadre d'un travail de supervision (figure I.7). Au niveau le plus bas, l'opérateur est qualifié d'homme capteur par référence à ses fonctions sensorielles (et motrices) impliquées dans la production de consignes analogiques. Des échanges de ce type établissent un dialogue homme-tâche qui repose sur un "langage gestuel" émulé par le bras maître et grâce auquel l'opérateur agit directement sur l'environnement de travail. (Au contraire, le pilotage en vitesse depuis une boîte à boutons est une commande codée qui oblige à traduire les mouvements désirés en des termes appropriés à la morphologie de l'organe de pilotage).

Figure I.7.a: Commande télémanipulée et dialogue homme-tâche

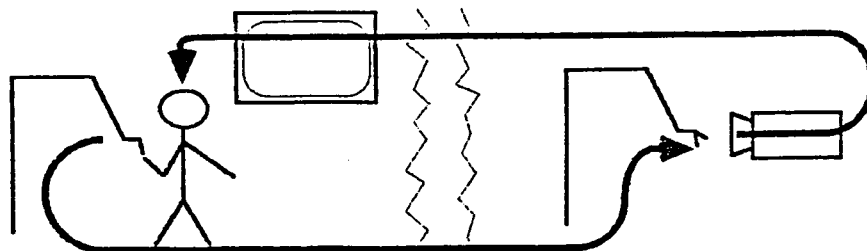
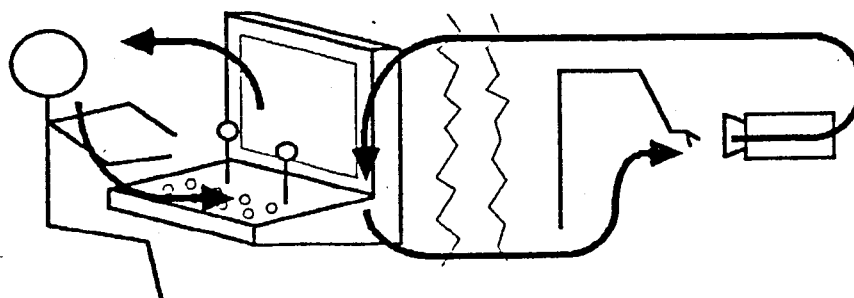


Figure I.7.b: Commande supervisée et dialogue homme-calculateur



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

A un niveau supérieur, un langage symbolique (généralement textuel et/ou graphique) qui autorise une plus grande liberté d'expression est indispensable à l'instauration d'un dialogue homme-calculateur. L'opérateur ayant en-ligne à décrire à la machine les actions ou les modes de commande qu'il attend d'elle, les qualités demandées à ce langage sont:

- une formulation aisée et rapide de la part de l'homme;
- une interprétation sans ambiguïté de la part de la machine;
- des possibilités d'expression donnant à l'homme les moyens de spécifier le comportement de la machine.

Vus les inconvénients déjà signalés des outils de programmation pour robots, un langage classique offrant des instructions fonctionnelles est totalement inadapté aux nécessités de la communication homme-calculateur en phase de travail. L'approche habituellement suivie avec les systèmes coopératifs tend à construire un dialogue fortement structuré, sous forme par exemple de menus hiérarchisés affichant une sélection de fonctions automatiques ou de modes manuels. Dans ce contexte, l'opérateur s'affirme en tant qu'homme superviseur qui choisit une commande parmi celles proposées par la machine, en lance l'exécution et contrôle sa mise en oeuvre. De son côté, le calculateur filtre les retours sensoriels et assure la structuration des échanges dont il reste maître en permanence. Cette structuration résulte le plus souvent d'une analyse de l'ensemble des options possibles en regard de l'état interne de la machine, réduisant ainsi le rôle du module de supervision à celui d'une simple interface (assistance orientée système). Elle peut également faire l'objet d'un traitement informatique selon les connaissances disponibles sur la tâche. Le calculateur permet alors d'ordonner les actions d'après la situation observée et parfois de mener des enchaînements automatiques (assistance orientée tâche).

Dans l'élaboration de la stratégie globale, la tâche est décomposée en opérations primitives par l'homme planificateur qui reçoit éventuellement l'aide d'un système générateur de plan. A ce niveau, les motivations du dialogue ainsi que les contraintes de temps moins sévères devraient privilégier une forme de communication assez proche du langage naturel [Evrard-Farreny-Prade 83] mettant l'accent sur l'expressivité et la souplesse d'utilisation, aux dépens de la rapidité des échanges.

Tableau I.1: comparaison des fonctions homme/robot [Lopez-Foulc 84]

Homme	Robot
<u>Détection de signaux</u>	
- limitée aux sens humains - acquisition simultanée d'un grand nombre de signaux - vigilance discontinue et courte	- échelle de perception étendue - excellente sensibilité - pas de problème de vigilance
<u>Interprétation</u>	
- difficulté dans l'appréciation des détails quantitatifs - vision globale des problèmes - reconnaissance de formes immédiate même avec des déformations importantes - changement aisé de classification - capacité à interpréter diversement un même signal - agrégation d'informations d'origines variées - amélioration des performances par l'expérience - risque d'erreur	- extraction d'informations précises à partir de signaux bien définis - temps de réponse parfois non négligeables - nombre de traitements parallèles illimité - difficulté à associer des signaux de natures différentes - réponse unique à un signal donné - performances stables



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

Tableau I.1: comparaison des fonctions homme/robot (suite)

Homme	Robot
<u>Calcul et raisonnement</u>	
- intuition raccourcissant les raisonnements longs	- calcul rapide et précis
- référence à des expériences antérieures	- dimension des calculs illimitée
- adaptation à des situations non prévues	- déduction excellente
- fiabilité variable	- induction impossible
	- pas de raisonnement abrégé
	- régularité des résultats
<u>Fonctions motrices</u>	
- difficile en boucle ouverte	- capacité à générer une commande à partir d'un modèle
- excellente adaptativité	
<u>Autonomie et rythme de travail</u>	
- réponse répétitive difficile à maintenir	- constance et fidélité des réponses automatiques
- possibilité d'un effort exceptionnel	- grande vitesse d'exécution
- dégradation des performances avec la fatigue	- rythme régulier
- rythme discontinu	
<u>Communication</u>	
- échanges sommaires et rapides	- syntaxe contraignante
- bonne expressivité	- expression limitée
- utilisation du contexte	- sens univoque
- correction des erreurs	
- risque d'ambiguïté	



I.3.2 MISE EN OEUVRE DU MODE SEMI-AUTOMATIQUE

La participation d'un opérateur humain à la conduite du robot oblige à s'interroger sur le partage de la commande entre l'homme et la machine. Dans un premier temps, l'analyse de la tâche de pilotage pour le domaine d'application envisagé doit orienter la distribution du travail compte-tenu des aptitudes de chacun. Les règles de coopération étant posées, on en déduira l'architecture et le fonctionnement du système informatique.

I.3.2.a Partage du travail

D'une manière générale, la complémentarité des capacités respectives de l'homme et de la machine (tableau I.1) fait apparaître l'intérêt du mode semi-automatique dès lors que l'on se trouve confronté à des tâches non répétitives s'exécutant au sein d'environnements complexes et difficilement modélisables. Dans ce type de situation, la mise en oeuvre de robots autonomes s'avère souvent impossible du fait:

- de l'absence de capteur permettant à la machine d'appréhender l'univers de travail dans sa globalité et avec une précision suffisante;
- du manque de fiabilité des systèmes solveurs de problèmes nécessaires à la génération automatique de plan.

Il en résulte qu'une solution appropriée à de tels milieux réside dans une commande mettant à profit les fonctions sensorielles et décisionnelles de l'homme.

Au cours du mode semi-automatique, l'opérateur intervient par intermittence pour guider, corriger ou débloquer le système. Ceci se traduit par un partage du travail dans le temps avec une succession de phases de conduite manuelles et automatiques, ou par la décomposition de la commande en fonctions élémentaires qui, à un instant donné, seront assurées par l'homme ou la machine (partage dans l'espace). Qu'il s'agisse de la totalité de la commande, ou seulement d'une de ses composantes, le passage d'une

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

phase manuelle à une phase automatique (découplage maître/esclave) et réciproquement (recouplage) ne peut se produire qu'à certaines conditions qu'il importe de définir soigneusement. Dans la majorité des cas, le partage du travail est régi par un principe d'allocation statique des tâches reposant sur des critères de découplage qui témoignent d'une distribution a priori des responsabilités. L'opérateur désigne les objectifs et planifie les actions pour les atteindre, alors que le calculateur traite l'information de manière à améliorer la planification et évaluer la progression vers le but [Licklider 60]. Aujourd'hui, cette dichotomie est remise en cause par les fonctions décisionnelles de l'ordinateur. L'allocation dynamique de tâche [Rouse 81] basée sur l'estimation en-ligne des capacités ponctuelles de l'homme et de la machine à réaliser le travail, présente en effet nombre d'avantages:

- une meilleure utilisation des ressources du système;
- une charge de travail opérateur relativement constante;
- de moindres risques de diversion pour l'homme ou la machine, d'où un système plus tolérant aux fautes.

Selon la nature des critères de découplage employés et la façon dont ils sont évalués, nous distinguerons ainsi:

- le mode semi-automatique proprement dit;
- le mode mixte.

1.3.2.b Le mode semi-automatique proprement dit

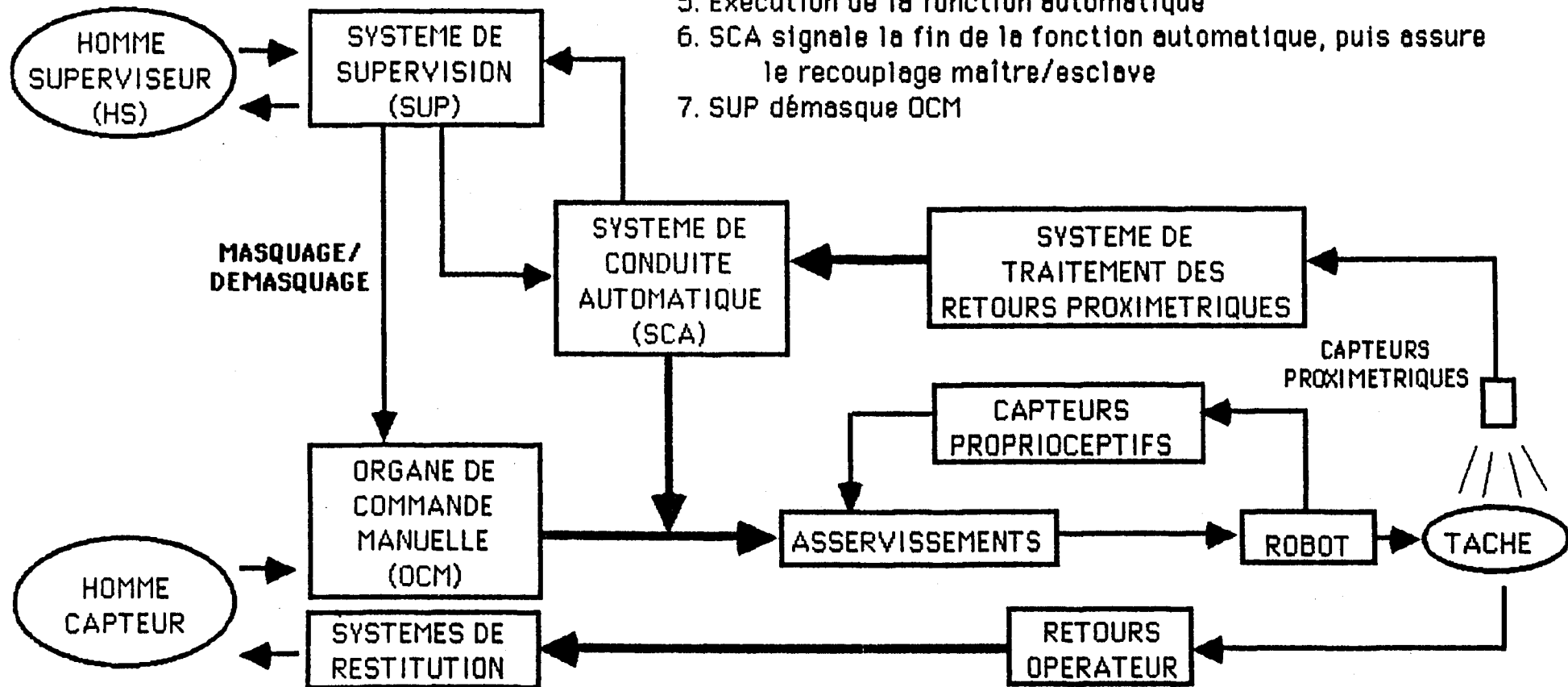
Un système télémanipulateur susceptible d'être utilisé en conduite semi-automatique sera constitué, par exemple, d'un bras muni de capteurs proximétriques au niveau de son organe terminal et d'une structure de commande illustrée sur la figure 1.8. En phase de pilotage par calculateur, la tâche est exécutée par un ensemble de fonctions locales (préhension, déplacement fin, insertion, ...) que contrôlent des algorithmes d'évolution automatique au sein d'un espace limité à la zone de perception machine, ainsi que par une condition de découplage pré-déterminée et portant entre autres choses sur l'accrochage capteur. Dans ce contexte, l'homme sera qualifié de superviseur physique: il pilote manuellement le bras esclave dans les mouvements de grande amplitude et pointe les objets de l'environnement

Figure 1.8: Structure de commande supportant le mode semi-automatique

MISE EN DEUVRE D'UNE FONCTION AUTOMATIQUE

1. Phase de conduite manuelle
2. HS demande une fonction automatique
3. SCA valide l'ordre de découplage si l'accrochage capteur permet la fonction demandée
4. SUP masque OCM
5. Exécution de la fonction automatique
6. SCA signale la fin de la fonction automatique, puis assure le recouplage maître/esclave
7. SUP démasque OCM

48



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

sur lesquels vont s'exercer les fonctions automatiques qu'il a préalablement sélectionnées. Ces fonctions seront lancées à la vérification des conditions de découplage puis menées à terme avant que le système ne revienne en conduite manuelle. L'homme agit de la sorte comme générateur de plan d'action à distance qui décrit la stratégie qu'il s'est fixé par l'intermédiaire d'un organe de pilotage analogique et d'une interface symbolique.

I.3.2.c Le mode mixte

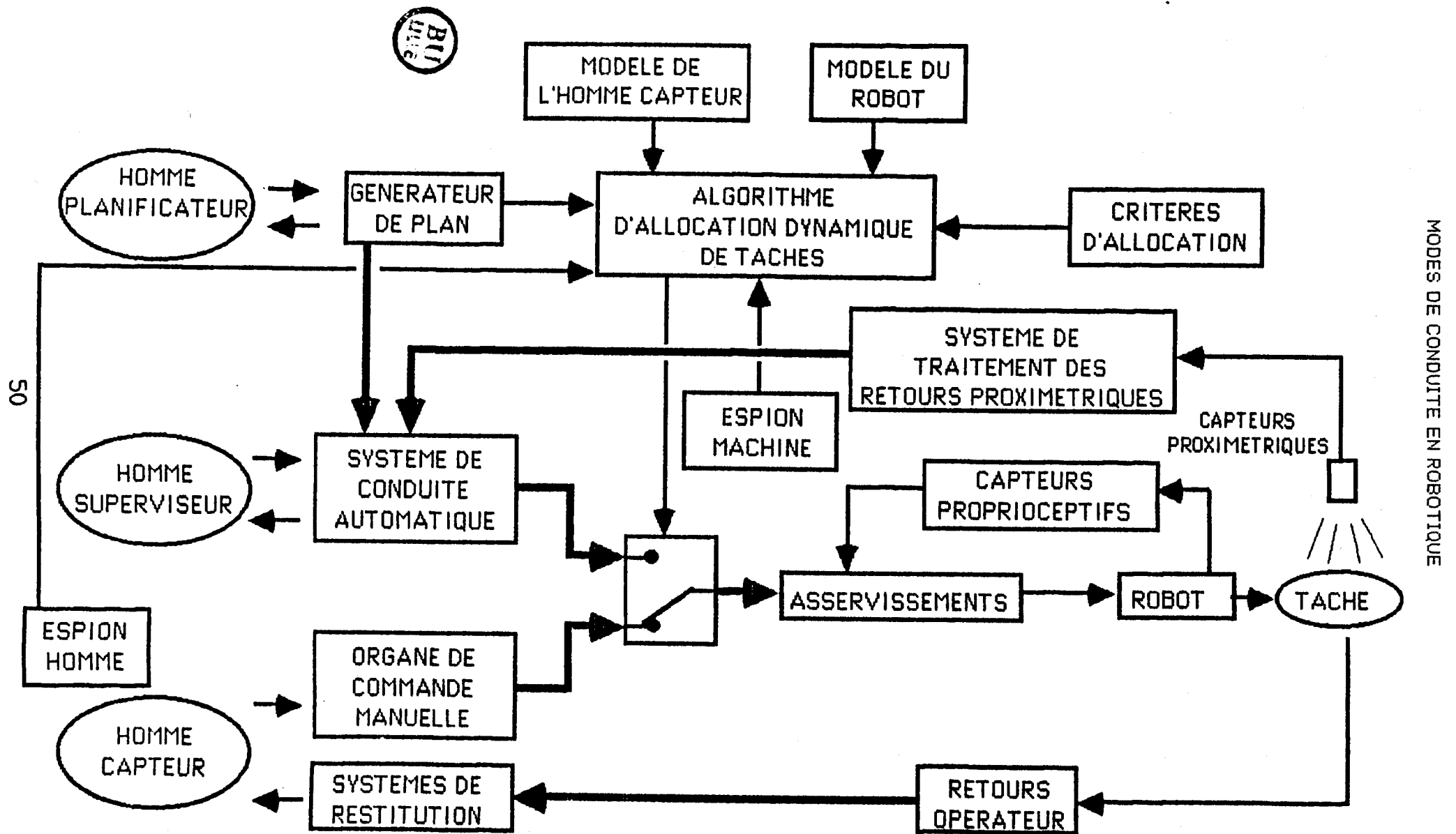
A la différence du mode semi-automatique, l'approche mixte [Habchi 81] [Autechaud 83] se caractérise par une décision de découplage/recouplage qui résulte de l'évaluation dynamique des capacités respectives de l'homme et de la machine à accomplir une tâche donnée. Les fonctions de supervision ne sont plus assurées par l'homme seul, mais par le couple opérateur/système de conduite. On passe ainsi d'une structure maître-esclave à phases automatiques à une structure maître-maître où les dilemmes sont résolus par calculateur.

La mise en oeuvre du mode mixte suppose des moyens informatiques importants et requiert une hiérarchisation de l'architecture de commande (figure I.9). Au niveau le plus haut, un générateur de plan interactif détermine l'enchaînement des actions; le partage du travail est ensuite organisé par un module d'allocation de tâche prenant en compte:

- des modèles du robot et de l'homme capteur;
- l'état de la machine et de l'opérateur (ce qui implique l'existence de systèmes espions);
- les caractéristiques de la tâche à réaliser dont certains paramètres (précision, réalisabilité) dépendent du manipulateur;
- des critères à optimiser (charge de travail, motivation de l'opérateur, vitesse d'exécution, ...).

Selon les choix faits à cet échelon, les consignes d'asservissement sont alors générées sur un organe maître ou par le calculateur.

Figure 1.9: Structure de commande supportant le mode mixte



MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

On analysera de la sorte le mode mixte comme la réunion de 3 systèmes en interaction:

- un système non découplable où la perception machine insuffisante a pour conséquence un pilotage exclusivement manuel;
- un système à vision opérateur nulle qui n'autorise qu'une conduite automatique;
- un système à dilemme entraînant une interrogation quant à l'allocation de la commande (découplage global) ou d'un élément de celle-ci (découplage local associé à un partage dans l'espace).

Dans un tel cadre, l'opérateur dialogue avec la machine en tant qu'homme capteur qui participe aux phases télémanipulées, mais également en tant qu'homme planificateur ou superviseur qui intervient dans les processus décisionnels.

I.3.3 CRITIQUE DU MODE MIXTE

A la lumière des applications possibles de la conduite semi-automatique, les principes de commande exposés ci-dessus présentent un intérêt essentiellement théorique qu'une approche pragmatique oblige à moduler. En particulier, si le mode mixte se révèle tout à fait remarquable par l'assistance de haut niveau qu'il est susceptible d'apporter à l'opérateur, il se heurte à des difficultés d'implantation relatives aux outils informatiques qui lui sont indispensables (générateur de plan et systèmes espions). Une deuxième remarque se fonde sur une hypothèse implicite de l'allocation dynamique de tâche: à savoir que, considérant les coûts de réalisation, la rentabilité du mode mixte suppose une influence sensible des variations de la performance humaine vis-à-vis des aptitudes naturelles de l'opérateur et de la machine à effectuer un certain travail. Des recherches menées au Centre d'Automatique de Lille concernant un micromanipulateur médical chargé d'assister le chirurgien dans des opérations d'une extrême précision, ont montré l'étroite concurrence régnant entre l'homme et le calculateur. Dans ce domaine spécifique, une faible dégradation de la dextérité du chirurgien permet parfois d'envisager avantageusement un mode de conduite automatique. Cet aspect est cependant mineur et, le plus souvent, la donnée d'une sous-tâche de téléopération décide du partage de la commande.

Il semble par ailleurs impossible de tracer une frontière stricte entre les fonctions de planification et d'allocation. Ainsi, l'exécution automatique d'une sous-tâche peut nécessiter une phase manuelle de reconnaissance et de modélisation de l'environnement local, phase qui n'a pas d'utilité si l'on décide initialement d'un mode télémanipulé. De même, le recours à l'opérateur impose le réglage des systèmes de vision qui prendra un temps non négligeable s'il faut déplacer les caméras pour obtenir un champ d'observation correct. Ceci revient à dire que l'attribution de la commande à l'homme ou au calculateur passe par des phases de configuration destinées à mettre le système homme-machine dans un état adapté au mode de conduite choisi, et dont il importe d'apprécier le coût au niveau de l'allocation du travail.

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

D'une manière plus générale, l'homme et le calculateur ne sont pas les seules ressources en concurrence au sein d'un système d'intervention. Une machine de TAO offrira ainsi différents retours opérateur (vision caméra 2D ou 3D, animation graphique, ...), disposera de multiples organes de commande (bras maître, syntaxeurs, joysticks) et éventuellement de divers manipulateurs esclaves non équivalents. Dans ce contexte, la conduite du robot inclut la construction de boucles perception-décision-action attachées à des ressources qu'il faudra sélectionner objectivement. Cette extension du cadre semi-automatique donne à la notion de mode mixte un sens élargi qui substitue au partage du travail un problème de génération dynamique de boucles de commande intégrant ou non l'opérateur considéré comme une ressource parmi d'autres. Au niveau du système informatique, la "conduite mixte généralisée" se traduit par une architecture comprenant:

- un module de planification qui détermine interactivement un plan d'action et spécifie certaines contraintes quant aux ressources à utiliser;
- un module d'allocation précisant la distribution des tâches chaque fois que plusieurs sous-systèmes pourront prétendre jouer un rôle identique dans la commande.

Le principe que nous venons d'exposer et que nous qualifierons de mode coopératif permet une plus grande souplesse dans le partage du travail, en ce qu'il rompt la dualité manuel/automatique du mode mixte. Dans cette optique, on envisagera par exemple:

- une conduite automatique sans perception machine et sous le seul contrôle de l'opérateur;
- l'utilisation en pilotage manuel d'informations proximétriques ou CAO restituées sous forme d'un retour d'effort synthétique;
- une conduite télémanipulée où l'homme réalise une sous-tâche définie au niveau supérieur par le calculateur.

CONCLUSION

Historiquement, la Téléopération Assistée par Ordinateur se place

MODES DE CONDUITE EN ROBOTIQUE

à la confluence de la robotique de substitution et de la téléopération classique. On y retrouve différentes formes de conduite manuelle (commande unilatérale en vitesse ou en position, commande maître/esclave à retour d'effort), ainsi que diverses techniques empruntées au mode automatique, dès lors que celles-ci peuvent s'accomoder d'un environnement mal connu a priori. L'intégration de ces 2 approches n'est cependant pas triviale. Elle se doit en effet de prendre en compte certains facteurs humains (charge de travail, motivation, etc.) au sein d'une stratégie de partage des tâches entre l'homme et la machine. Le problème étant posé, le chapitre II va nous permettre d'étudier les réponses apportées par quelques uns des systèmes de TAO réalisés jusqu'à maintenant.

CHAPITRE II

SYSTEMES DE TAO

Plutôt que d'exposer rapidement l'ensemble des systèmes de TAO existants à ce jour, il nous a paru judicieux de présenter ici 4 exemples particulièrement significatifs des potentialités de la téléopération avancée. Partant de la conduite maître/esclave classique, l'introduction du calculateur qui brise la symétrie d'une machine bilatérale, a en effet permis d'explorer des stratégies de commande adaptées à des domaines d'application très variés. Les systèmes décrits dans ce chapitre répondent ainsi à des demandes diverses, allant de l'aide aux handicapés à la coopération de l'homme avec une structure de conduite "intelligente", en passant par l'étude de la commande supervisée et l'assistance dans le pilotage manuel d'un bras nucléaire.

Notre première partie traite de la téléthèse SPARTACUS développée dans le cadre d'un projet national français (1975-80). Ce système de télémanipulation pour handicapé physique est destiné à la réalisation des tâches de la vie courante telles que verser de l'eau dans un verre ou composer un numéro de téléphone. Le problème essentiel rencontré sur cette application concerne la génération des commandes du bras en utilisant les signaux biologiques que peut offrir un patient tétraplégique et qui sont le plus souvent en nombre limité et de qualité variable.

Nous aborderons ensuite le système SUPERMAN (MIT, 1979) visant à l'implantation expérimentale des principes de commande supervisée définis par Sheridan [Sheridan 67 et 69]. Sa conception repose sur une autonomie restreinte de l'organe d'intervention, orientée plus précisément vers des applications sous-marines où les faibles débits d'information entre le manipulateur et la surface dégradent considérablement les performances d'une commande maître/esclave classique.

Le troisième exemple est relatif au système TAO1 (CEA/UGRA, 1986) fondé sur le concept de commande maître/esclave généralisée. TAO1 propose à l'opérateur humain un ensemble de modes de commande qui l'assistent dans l'accomplissement de travaux complexes demandant une dextérité que ne permettent généralement pas les télémanipulateurs des premières et deuxièmes générations. Il concourt ainsi à l'exécution plus rapide et plus sûre des tâches à distance habituellement menées dans le nucléaire (retraitement, intervention, etc.).

Nous exposerons enfin la réalisation japonaise LARTS (Electro-technical Laboratory, 1985) dont l'originalité réside dans l'intégration de la commande téléopérée au sein d'un système de conduite très sophistiqué possédant les caractéristiques suivantes:

- un environnement de programmation de niveau objet;
- des capacités de fonctionnement autonome sous le contrôle de l'opérateur;
- une modélisation de l'univers esclave associée à un formalisme objet.

II.1 LA TELETHESE SPARTACUS

L'étude qui fait l'objet de cette partie concerne un télémanipulateur destiné à aider un handicapé tétraplégique dans sa vie de tous les jours. Prévue sur une durée de 5 ans, elle a été lancée par l'IRIA en 1975 sous la forme d'un projet national de recherche (SPARTACUS) rassemblant les efforts d'une vingtaine de laboratoires français. Le terme téléthèse utilisé dans notre contexte décrit un outil qui, sans remplacer ni soutenir

SYSTEMES DE TAO

les fonctions d'un membre paralysé, met à profit les possibilités de communication du handicapé pour restaurer au travers d'un bras mécanique certaines de ses capacités à intervenir sur son environnement immédiat.

Dès l'origine, les spécifications du système SPARTACUS ont été fixées comme suit [Guittet 76]:

- un espace atteignable correspondant à celui d'un homme assis pouvant occasionnellement se lever pour accéder à des objets proches;
- n'imposer qu'un minimum de modifications dans l'environnement du handicapé et se substituer à la plupart des dispositifs spéciaux couramment employés (par exemple, pour tourner les pages d'un livre ou alimenter le sujet);
- un système de commande flexible susceptible d'être adapté à différents patients, compte-tenu de leurs fonctions résiduelles;
- des stratégies de pilotage optimales en regard de la génération des mouvements d'un manipulateur et de son organe terminal par un opérateur humain à la motricité réduite;
- des procédures automatiques copiant les actions réflexes observées chez les personnes non handicapées.

II.1.1 DESCRIPTION DE LA TELETHESE

D'une manière générale, la téléthèse SPARTACUS se compose:

- d'un manipulateur à 7 degrés de liberté (3 translations, 3 rotations, préhension);
- d'un calculateur de conduite;
- de capteurs de signaux biologiques qui permettent au patient de délivrer des commandes continues (analogiques) ou discrètes (symboliques);

Dans un premier temps, un système expérimental a vu le jour à l'IRIA autour d'un bras nucléaire MA23 (CEA/La Calhène) dont l'effecteur (pince bidigitale) était équipé de 3 capteurs optiques de proximité. La commande en était assurée par un mini-ordinateur Solar 16-65 disposant de 48 K de mémoire, ainsi que d'entrées/sorties analogiques et tout ou rien. Par la

suite, le LRE (Laboratoire de Robotique d'Evry) a réalisé une deuxième implantation à partir d'un bras MAT1 [Vertut 81] spécifiquement conçu pour l'aide aux handicapés et d'une structure informatique à microprocesseurs (Intel 8080A, carte arithmétique, cartes de conversion numérique-analogique et analogique-numérique).

Parmi les capteurs de signaux biologiques développés ou étudiés dans le cadre du projet, nous citons ci-dessous les dispositifs qui se sont révélés les plus utiles [Galerie-Quetin 86]:

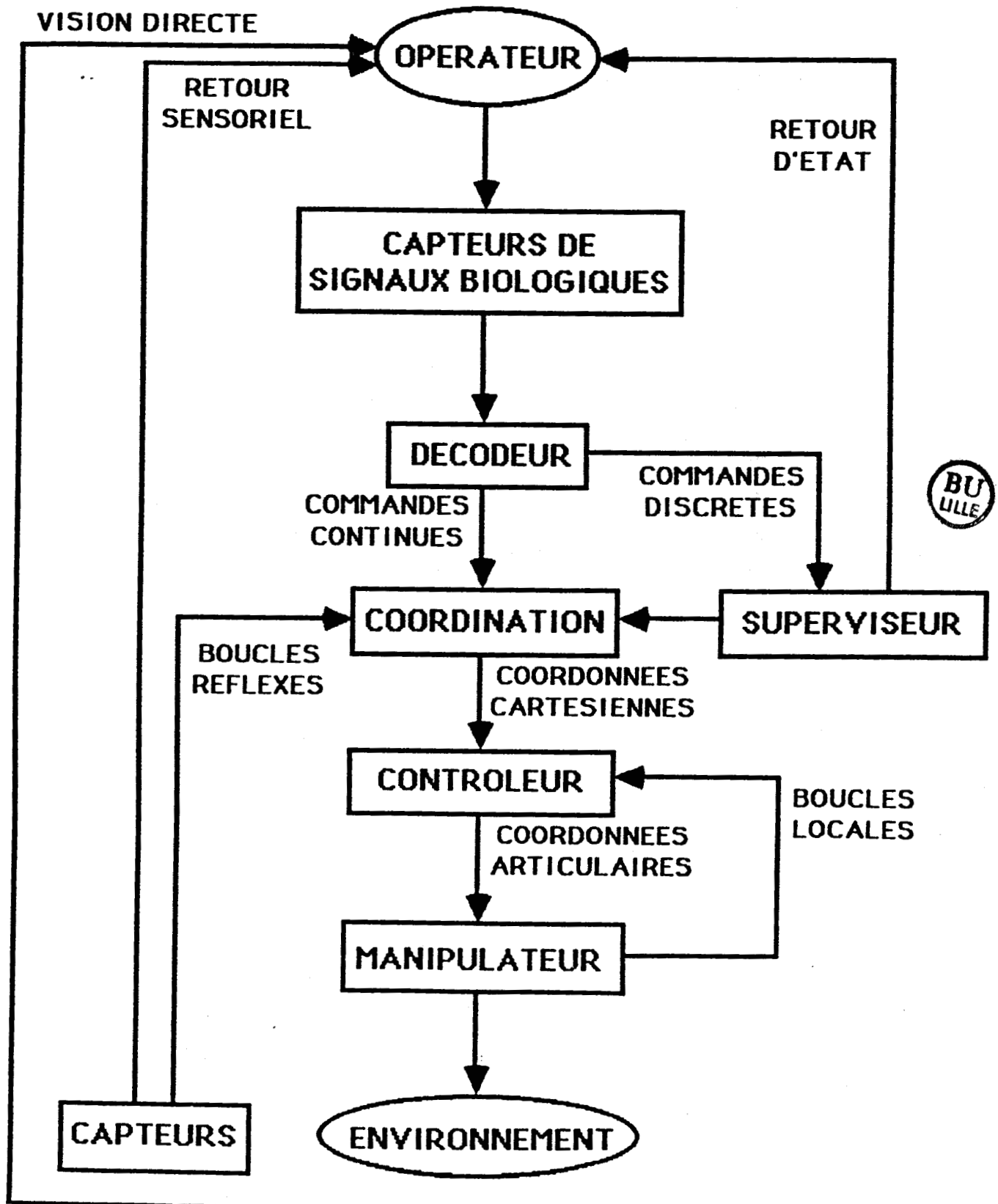
- capteurs céphaliques à 2 ou 3 ddl placés en contact avec la tête de l'opérateur et qui en mesurent les mouvements dans les plans frontal et sagittal; le troisième ddl étant la rotation selon un axe vertical qui présente l'inconvénient d'être également sollicitée pour élargir le champ de vision du handicapé;
- boule de commande: de nombreux tétraplégiques conservant une certaine mobilité de la main, un organe à un ddl de ce type est bien adapté à une commande en position (ne restituant pas de force de rappel que le patient aurait de toute façon des difficultés à percevoir du fait de l'insensibilité de ses membres supérieurs, il est d'un emploi délicat pour une commande en vitesse);
- boîte à boutons proposant des switches de grande taille associés à un retour non tactile (visuel ou sonore);
- capteurs myoélectriques qui détectent au travers d'électrodes cutanées les différences de potentiel provoquées par la contraction des muscles (faciaux dans le cas considéré).

Sur un plan fonctionnel, l'organisation de la commande est illustrée par la figure II.1. La structure décrite est avant tout une synthèse des diverses implantations, faisant intervenir une terminologie qui nous est personnelle afin de garder un minimum de compatibilité avec les systèmes exposés par ailleurs. Cette structure se compose de plusieurs modules qui contribuent à l'élaboration des consignes actionneurs de la manière suivante [Guittet 78, Yclon 79]:

- Contrôleur

Etroitement dépendant du bras utilisé, il assure la transformation des

Figure II.1: Schéma fonctionnel de la commande SPARTACUS



SYSTEMES DE TAO

coordonnées cartésiennes qui lui sont fournies en consignes actionneurs et construit les boucles d'asservissement locales. Il donne d'autre part la possibilité de piloter le manipulateur en coordonnées polaires ou cylindriques, si cela s'avère intéressant en regard des caractéristiques de la tâche ou de l'opérateur.

- Coordination

Ce module fait l'acquisition des signaux biologiques délivrés par le patient et, selon diverses lois de commande, génère les consignes absolues passées au contrôleur. La flexibilité de la commande résulte essentiellement du système de coordination qui permet un pilotage en vitesse ou en position, ainsi que la mise en oeuvre de boucles réflexes prenant en compte les retours capteurs. La richesse offerte à ce niveau se traduit par un catalogue étendu de modes de commande définis comme des relations entre variables de pilotage, informations sensorielles et variables pilotées.

- Superviseur

Partant des commandes discrètes émises par le handicapé, le superviseur est chargé de:

- l'activation des modes de commande selon une stratégie prédéfinie;
- l'embrayage/débrayage du manipulateur;
- la sélection des gains entre les amplitudes des signaux d'entrée et des variables pilotées.

- Décodeur

Interfacé aux capteurs de signaux biologiques, le décodeur effectue un premier traitement (fonctions de transfert) des consignes opérateur qui souvent ne sont pas exploitables dans leur état brut, et détecte les commandes discrètes qui résultent d'une séquence de signaux continus (telle que tourner la tête à droite, puis à gauche) ou demandent à être interprétées (différenciation entre impulsions longues et brèves, par exemple).

Chaque patient ne disposant pas des mêmes capacités de communication, le système de commande est personnalisable au travers d'un fichier de configuration qui spécifie les signaux utilisés, ainsi que le codage adopté pour les commandes discrètes.

II.1.2 MODES DE COMMANDE

Les problèmes rencontrés dans la commande de la téléthèse par un handicapé proviennent principalement du nombre limité de signaux simultanément disponibles pour le pilotage du bras. Dans ce contexte, 2 stratégies de conduite sont possibles:

- une commande séquentielle où le patient ne pilote à un même instant que certaines variables du manipulateur, les autres étant maintenues constantes;
- une commande parallèle qui repose sur le couplage de plusieurs variables entre elles (cf. mode "pilotage").

Le système SPARTACUS offre ainsi à l'opérateur un ensemble de modes de commande caractérisés par:

- le nombre et la nature des variables pilotées;
- les signaux biologiques (et les fonctions de transfert associées) qui sont employés pour ce pilotage;
- une loi de commande qui décrit la façon dont le handicapé va contrôler les mouvements de l'effecteur.

Parmi ces différents modes de commande et pour un patient maîtrisant 3 signaux continus (typiquement 2 avec les déplacements de la tête et un avec le bras), on trouvera [Galerie-Quetin 86]:

- mode X, Y, Z: commande en position des 3 translations (dans un repère cartésien absolu);
- mode ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : commande en position des 3 rotations (dans un repère sphérique absolu), selon un point fixe qui peut être le poignet du manipulateur ou le centre de la pince;
- mode X, Y, ϕ_3 : commande en position de 2 translations (plan horizontal) et de la rotation autour de l'axe principal de la pince (particulièrement utile pour verser un liquide);
- mode $Z = a \phi_3 + b$: permet de boire par ajustement de l'altitude du verre (Z) à son angle d'inclinaison (ϕ_3);
- mode "pilotage": commande en position de l'orientation de la pince en site et azimut, et en vitesse de la translation correspondant à l'axe principal de la pince (similaire au pilotage d'un avion avec direction,

SYSTEMES DE TAO

profondeur et manette des gaz, d'où son nom);

- mode ouverture/fermeture pince: commande en position de l'écartement des mors et en vitesse de la translation attachée à l'axe principal de la pince.

Par ailleurs, certaines fonctions ne font pas intervenir de consignes opérateur et sont qualifiées d'automatiques; elles peuvent soit se superposer à un mode manuel, soit s'y substituer. Citons entre autres automatismes:

- toucher doux [Kwee 78] qui, à la manière d'un ressort, limite les forces verticales exercées par l'effecteur et assure un contrôle en effort plutôt qu'en position, dès lors qu'il y a contact avec une surface horizontale;
- saisie automatique [Espiau 78] qui utilise les informations proximétriques pour centrer la pince sur un objet, puis en assure la préhension.

II.1.3 INTERFACE DE SUPERVISION

Considérant la mobilité réduite de l'opérateur, l'accomplissement d'une tâche impose une stratégie de conduite où différents groupes de ddl sont successivement pilotés au moyen des mêmes signaux biologiques délivrés par le handicapé. Une telle stratégie se décompose ainsi en plusieurs phases auxquelles correspondent fonctionnellement des modes de commande ou des fonctions automatiques (saisie). Il en résulte que des signaux discrets sont nécessaires à l'allocation des signaux continus aux variables pilotées ainsi qu'à la spécification des lois de commande. En particulier, l'opérateur doit être capable de communiquer les ordres suivants [Guittet 78]:

- embrayage/débrayage du manipulateur (l'état débrayé permet au patient soit de se reposer, soit de générer des mouvements de grande amplitude par "pompage" en ramenant le signal de commande à zéro avant d'embrayer et de reprendre le déplacement interrompu);
- changement de mode de commande;

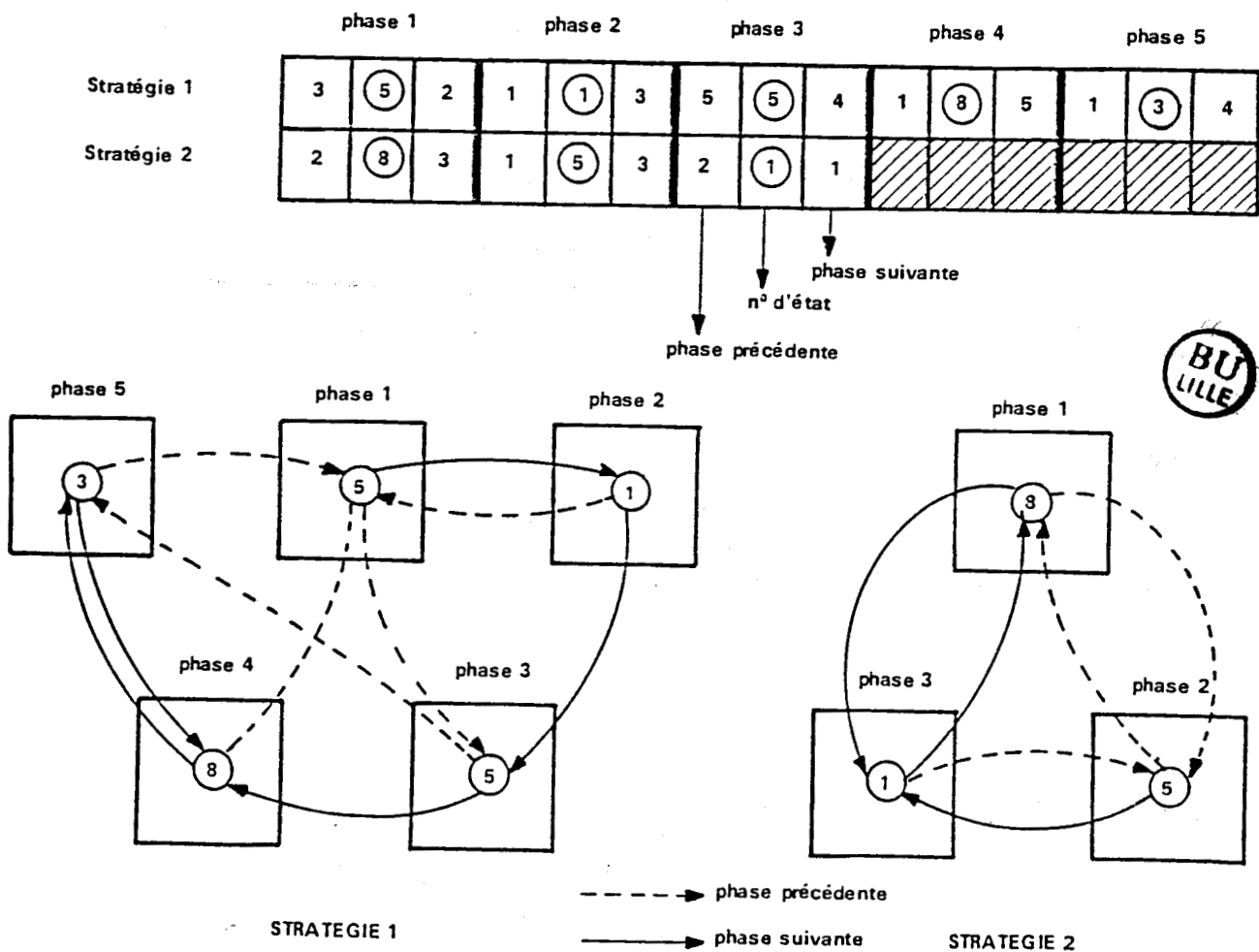
SYSTEMES DE TAO

- lancement d'une fonction automatique;
- sélection des gains du système (2 valeurs distinctes d'un facteur 3 sont accessibles).

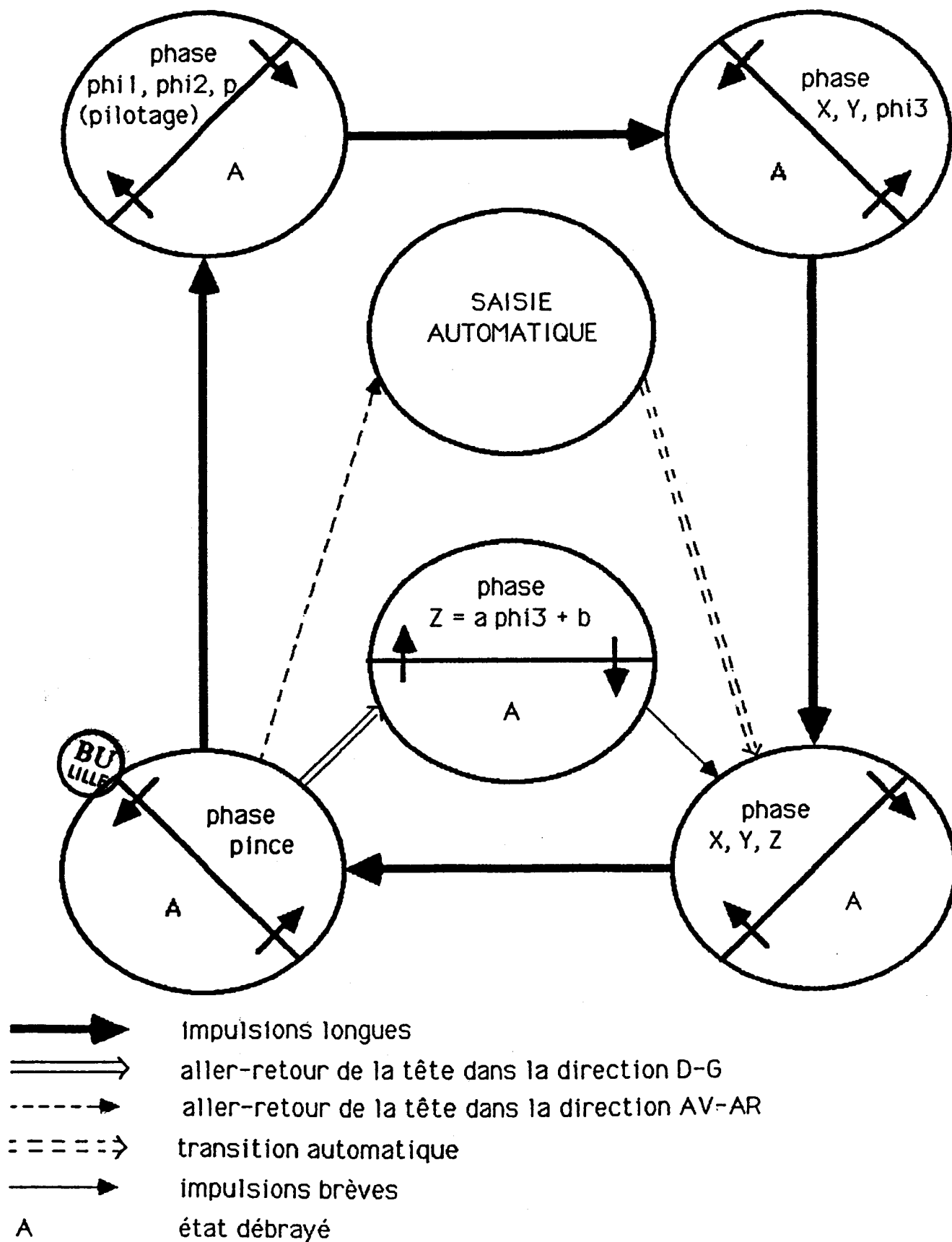
Sur la première implantation de la téléthèse (IRIA [Yclon 79]), le système met à la disposition de l'opérateur diverses stratégies qui regroupent chacune un maximum de 15 phases. Une phase est constituée d'un mode de commande (ou d'un automatisme exclusif) et de 2 pointeurs vers 2 autres phases de la stratégie, les phases suivantes et précédentes (figure II.2). Les choix offerts au handicapé sont ainsi:

- changer de stratégie;

Figure II.2: Exemples de stratégies SPARTACUS
(implantation IRIA, Yclon 79)



**Figure 11.3: Exemple d'automate de commande SPARTACUS
(implantation LRE) [Galerie-Quetin 86]:
cas d'un opérateur disposant de 3 signaux continus et 1 discret**



SYSTEMES DE TAO

- passer dans la phase pointée comme suivante ou dans celle pointée comme précédente (le manipulateur étant embrayé ou non);
- repasser dans la dernière phase activée;
- embrayer ou débrayer le bras (la deuxième option assure aussi l'interruption d'une fonction automatique en cas d'incident imprévu).

Par la suite, cette approche a été revue dans le sens d'une plus grande souplesse relativement au choix des phases. Le système développé au LRE [Galerie-Quetin 86] présente en effet une structure de type automate dont nous donnons un exemple sur la figure II.3. Le graphe illustré contient 6 états distincts (dont un automatique) et s'adresse à un patient susceptible de délivrer 3 signaux continus et un signal discret, le tout permettant ici 4 ordres de transition différents. En cours d'exécution, le décodeur scrute les entrées opérateur et détecte toute occurrence d'une transition. Partant d'une phase courante i , une transition j entraîne l'extraction de l'élément (i,j) de la matrice associée à l'automate, qui indique la nouvelle phase à mettre en oeuvre. L'état du système est alors actualisé et signalé au handicapé par l'intermédiaire d'un afficheur à diode monté sur le bras MAT1 à proximité immédiate de la pince (afin d'éviter tout mouvement de la tête du sujet, qui aurait des conséquences désastreuses au niveau de la commande).

D'un point de vue philosophique, l'étude du système SPARTACUS montre le lien existant entre les divers modes de commande et la facilité de réalisation de certaines sous-tâches (le mode $Z = a \phi^3 + b$ a ainsi été qualifié de "mode buvette" par les handicapés ayant participé aux expérimentations). La possibilité de donner au système de téléopération des comportements variés, fonction du travail à effectuer, permet de la sorte une assistance dans le pilotage de la machine. Cette constatation se vérifie naturellement dans le cas d'un opérateur handicapé, mais peut aussi être généralisée à la conduite à distance la plus large, comme nous le verrons avec le système TAO1. Auparavant, il nous faut cependant aborder la notion de commande supervisée qui découle d'une autre motivation fondamentale de la téléopération avancée: la recherche de l'autonomie des organes esclaves.

II.2 SUPERMAN

Superman est une machine de TAO conçue et développée par l'équipe de Thomas Sheridan du MIT. On trouvera dans [Brooks 79] une description détaillée de ce système expérimental essentiellement destiné à l'étude de la commande supervisée (cf. I.3.1.c) dans le cadre d'applications sous-marines. L'originalité de l'approche Superman réside dans l'intégration des conduites manuelles et automatiques au sein d'une machine qui propose différents modes de commande téléopérés, ainsi que les outils logiciels permettant de programmer puis d'exécuter des tâches simples sous la surveillance de l'opérateur.

II.2.1 DESCRIPTION

Sur un plan matériel, le système Superman se compose d'un télémanipulateur maître/esclave ANL E2 à 7 degrés de liberté, équipé de capteurs proprioceptifs délivrant des informations de position, de vitesse et d'effort. Les 2 bras sont reliés à un ordinateur Interdata Model 70 de 64 K de mémoire, qui supporte des algorithmes de commande en position ou en vitesse, ainsi que la gestion des interactions avec l'homme et l'interprétation des fichiers de programme. Le système est interfacé avec l'opérateur par l'intermédiaire des dispositifs suivants:

- un bras maître à retour d'effort (identique au bras esclave);
- un joystick à 3 ddl équilibré par ressort;
- une interface DASI (Dedicated Analog-Symbolic Interface) munie de boutons (touches de fonction) et de potentiomètres (réglage de paramètre);
- un clavier ASCII associé à un écran alphanumérique et graphique.

Le dialogue homme-calculateur est construit sur un langage de commande classique qui autorise la création puis l'exécution de fichiers tâche, ainsi que la mise en oeuvre de modes de téléopération (figures II.4 et II.5). En cours de fonctionnement, la machine passe par plusieurs états que nous allons maintenant détailler et qui sont:

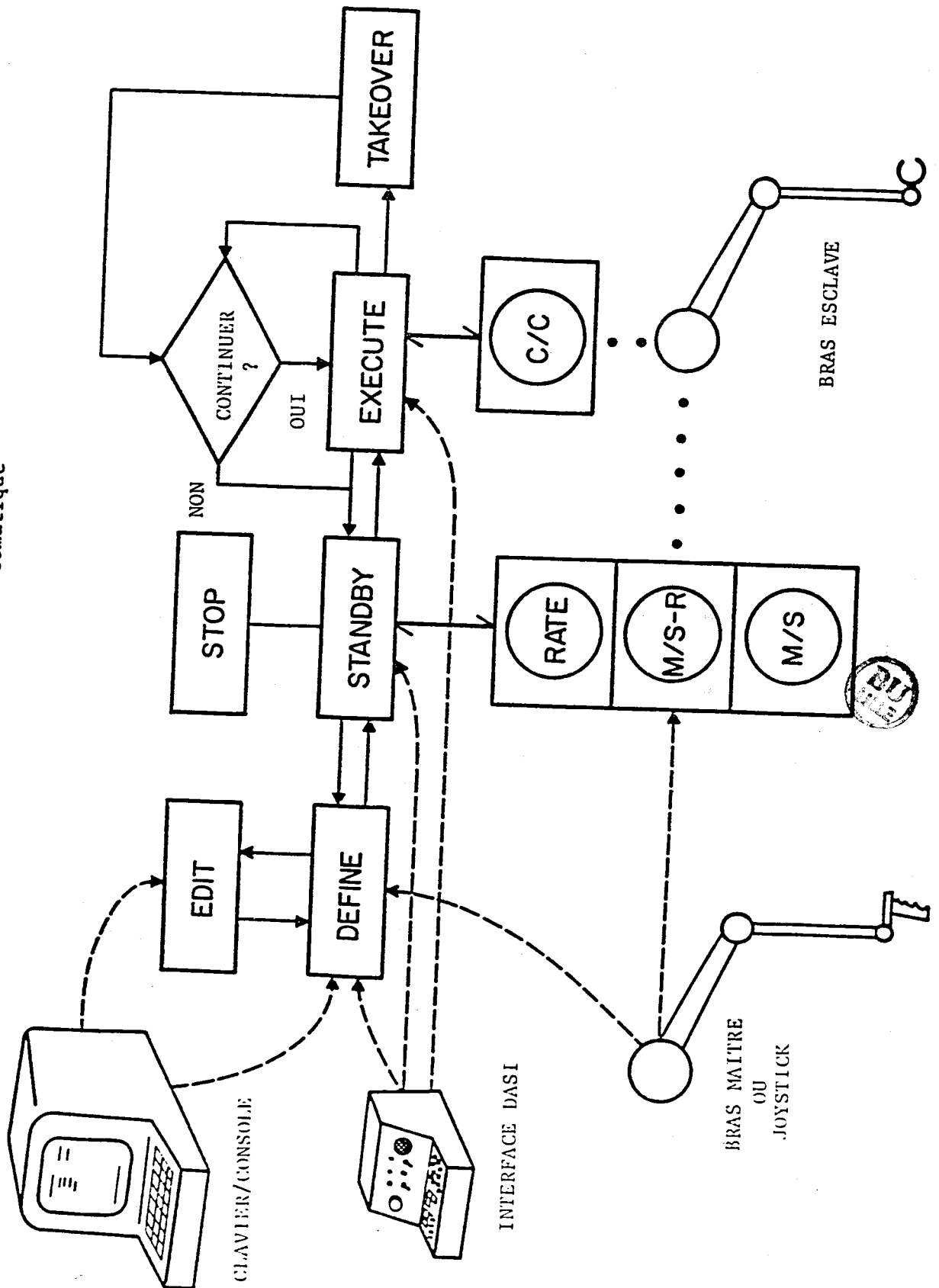
Figure II.4: Etats du système SUPERMAN (Brooks 79)

RATE: commande en vitesse

M/S-R: mode hybride position/vitesse

M/S: mode maître/esclave

C/C: conduite automatique



SYSTEMES DE TAO

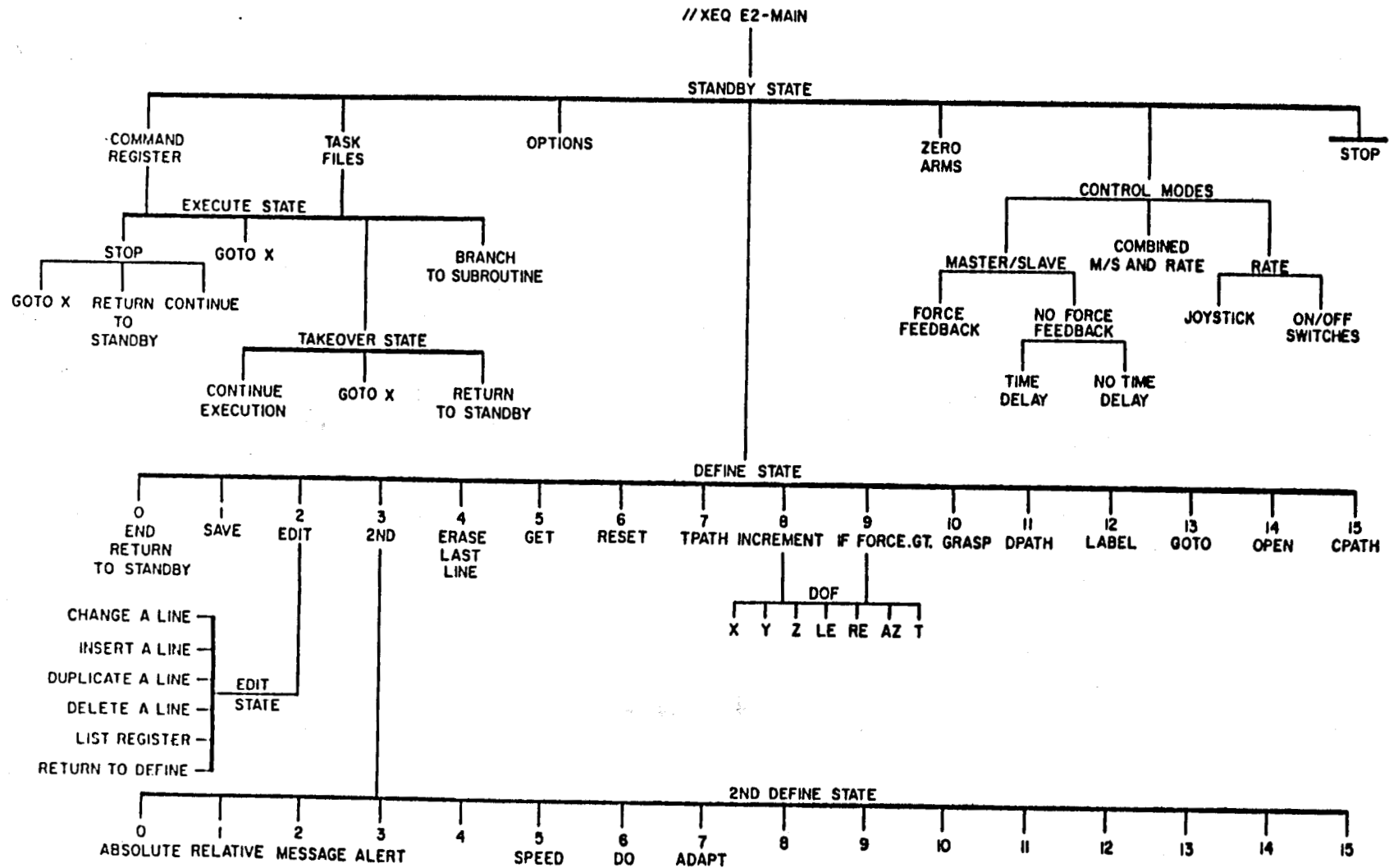
- STANDBY: conduite manuelle;
- DEFINE: programmation et apprentissage;
- EDIT: édition;
- EXECUTE: exécution automatique;
- TAKEOVER: reprise en mode manuel;
- STOP.

II.2.2 ETAT STANDBY

L'état STANDBY correspond au mode de conduite téléopéré de la machine. L'opérateur y a le contrôle de l'ensemble du système via les touches de fonction du DASI et les dispositifs d'entrée analogique. Il peut ainsi:

- lancer un mode de commande manuel parmi:
 - commande en vitesse d'un ddl (switch rate) à partir d'un bouton du DASI;
 - mode hybride position/vitesse (mixed master/slave and rate): les translations esclaves sont pilotées en vitesse alors que les rotations le sont en position; toutes les consignes proviennent du bras maître qui restitue en translation un retour d'effort proportionnel à ses déplacements par rapport à une position neutre et se comporte donc comme un joystick;
 - commande en vitesse des 6 ddl (variable rate joystick): les translations esclaves sont pilotées depuis le joystick, tandis que les rotations sont couplées aux translations du maître qui joue le rôle d'un deuxième joystick;
 - mode maître/esclave sans retour d'effort (master/slave without force feedback);
 - mode maître/esclave avec retour d'effort (master/slave with force feedback);
 - mode indexé position/vitesse (indexed master/slave and rate): commande en position en-deçà d'une frontière imaginaire, en vitesse au-delà; les consignes sont dans tous les cas générées sur le bras maître;

Figure II.5: Structure du langage de commande
SUPERMAN (Brooks 79)



SYSTEMES DE TAO



SYSTEMES DE TAO

remarque: la transition entre 2 modes (par exemple, le passage d'une commande en vitesse à une commande en position) oblige fréquemment à une phase de recalage ou de mise en référence dont l'opérateur est averti par un signal sonore;

- entrer dans l'état DEFINE ou EXECUTE.

II.2.3 ETAT DEFINE

Cet état du calculateur de pilotage permet à l'opérateur de générer des fichiers de commande assurant l'exécution automatique de certaines sous-tâches. La forme de programmation proposée par Superman est tout à fait remarquable en ce qu'elle se fonde sur l'utilisation combinée:

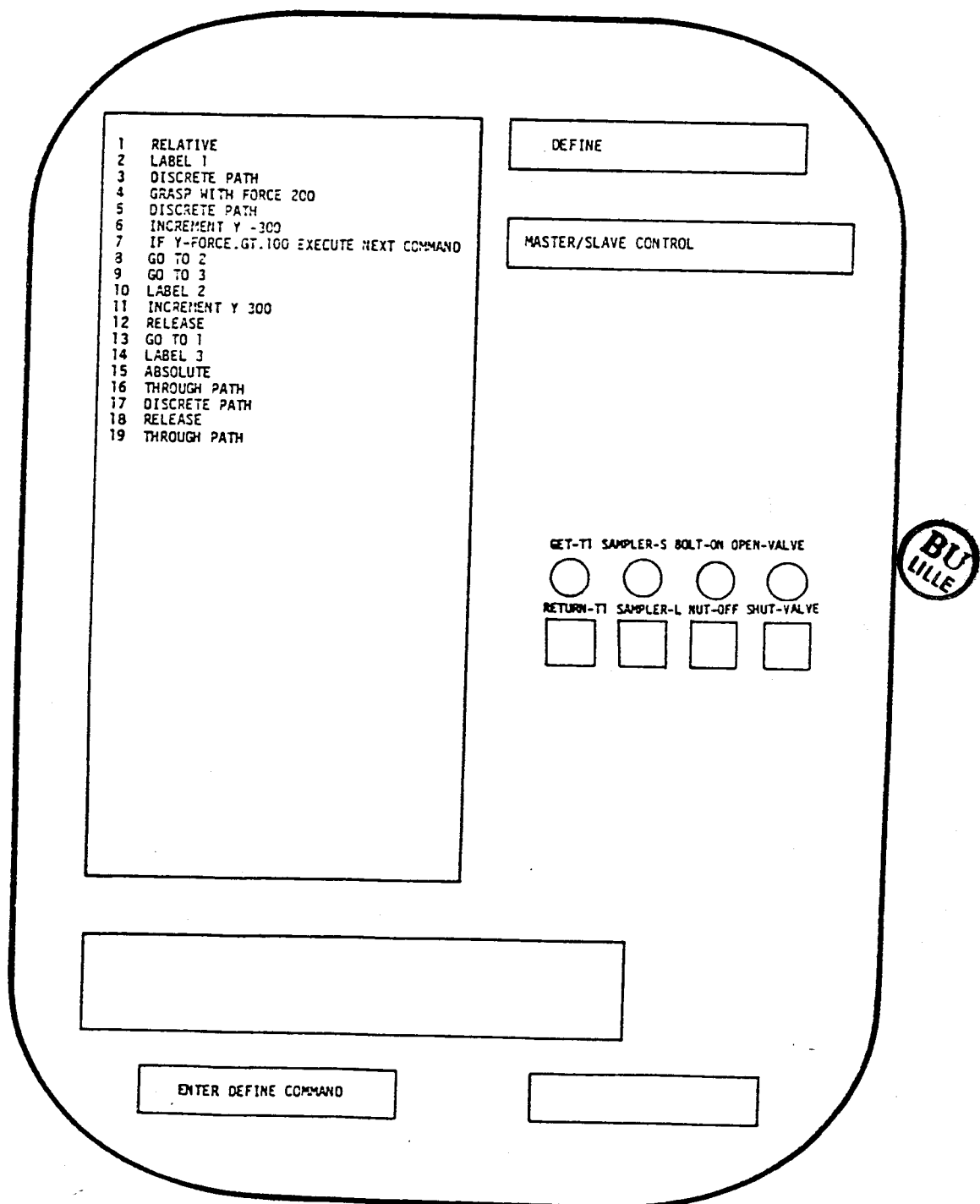
- des touches de fonction du DASI dont 16 sont dédiées aux instructions du langage de commande et autorisent une entrée rapide par l'opérateur;
- des potentiomètres du DASI sur lesquels sont introduits les paramètres de type incrément en position, vitesse et force;
- du manipulateur que l'homme déplace pour montrer des positions dont il demande l'acquisition au moyen d'un switch du DASI (à l'entrée dans l'état DEFINE, le système reste dans le mode de commande manuel sélectionné au cours du STANDBY précédent);
- du clavier pour la donnée des noms de fichier;
- de la console qui affiche le fichier en cours de création (figure II.6).

Parmi les instructions offertes à l'opérateur, nous présentons ci-dessous quelques exemples significatifs:

- ABSOLUTE: informe le système de programmation que les ordres suivants doivent être exécutés avec des positions identiques à celles enregistrées dans l'état DEFINE;
- RELATIVE: informe le système de programmation que les positions enregistrées doivent être reproduites en phase d'exécution relativement à la position atteinte par le bras esclave au début de la séquence et qui correspond à la première position spécifiée après l'instruction RELATIVE;

SYSTEMES DE TAO

Figure II.6: Affichage en cours d'édition d'un fichier de commande (tâche de déboulonnage, Brooks 79)



SYSTEMES DE TAO

- DISCRETE PATH (DPATH): enregistre la position présente du bras (apprentissage) et, durant l'exécution, déplace l'esclave vers cette position avec une vitesse finale nulle;
- THROUGH PATH (TPATH): enregistre la position présente du bras et l'utilise dans EXECUTE comme point de passage à vitesse non nulle;
- IF DOF FORCE.GT. EXECUTE NEXT COMMAND: interprète l'instruction suivante si la force mesurée sur un ddl spécifié par l'opérateur est supérieure à la valeur indiquée sur le potentiomètre force.

Depuis l'état DEFINE, l'opérateur a par ailleurs accès aux états EDIT et STANDBY.

II.2.4 ETAT EDIT

Permet l'édition et la modification d'un fichier de commande.

II.2.5 ETAT EXECUTE

L'entrée dans l'état EXECUTE résulte de la sélection par l'homme d'un fichier de commande. Le système interrompt le mode manuel en cours et effectue le calcul des positions relatives, puis teste leur accessibilité. Le fichier commande est ensuite exécuté nominalement, pas à pas ou à vitesse réduite. A l'achèvement de la sous-tâche automatique, le calculateur revient en STANDBY et réactive le mode manuel interrompu. Lors de l'exécution, un bouton du DASI autorise l'opérateur à stopper le déroulement automatique et à passer dans l'état TAKEOVER.

II.2.6 ETAT TAKEOVER

Le calculateur redonne la commande du manipulateur à l'homme en relançant, après un recalage progressif des 2 bras, le mode manuel précédemment sélectionné. Par la suite, le fonctionnement automatique peut

SYSTEMES DE TAO

être repris ou définitivement abandonné, le système se mettant alors en STANDBY.

Relativement à la commande supervisée, les expérimentations menées avec Superman n'ont pas mis en évidence d'avantages sensibles vis-à-vis d'une tâche entièrement réalisée en commande maître/esclave à retour d'effort. Néanmoins, en regard des autres modes manuels, l'approche supervisée améliore nettement les performances du système, en particulier lorsque la vision est dégradée ou la tâche très complexe.

II.3 LE SYSTEME TAO1

Développé au CEA/UGRA (Unité de Génie Robotique Avancée dépendant à l'époque du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay), le système TAO1 [Chermette 86] résulte d'une action objectif-produit du projet ARA (pôle Téléopération) qui de 1980 à 1986 a pris la relève de SPARTACUS. TAO1 est une machine opérationnelle destinée à des applications nucléaires; elle propose divers modes de commande manuels et semi-automatiques susceptibles d'aider à la réalisation à distance de tâches en milieu contaminé (retraitement de combustible, etc.). Dans ce cadre, TAO1 a été conçu comme un système robuste et simple d'emploi, caractérisé par:

- une structure informatique performante en regard des temps d'échange et de traitement des signaux de commande;
- une interface homme/calculateur fonctionnelle qui permet à un opérateur de formation classique d'utiliser la machine après un rapide entraînement;
- un dialogue de maintenance facilitant le réglage des bras qui constitue généralement une opération délicate.

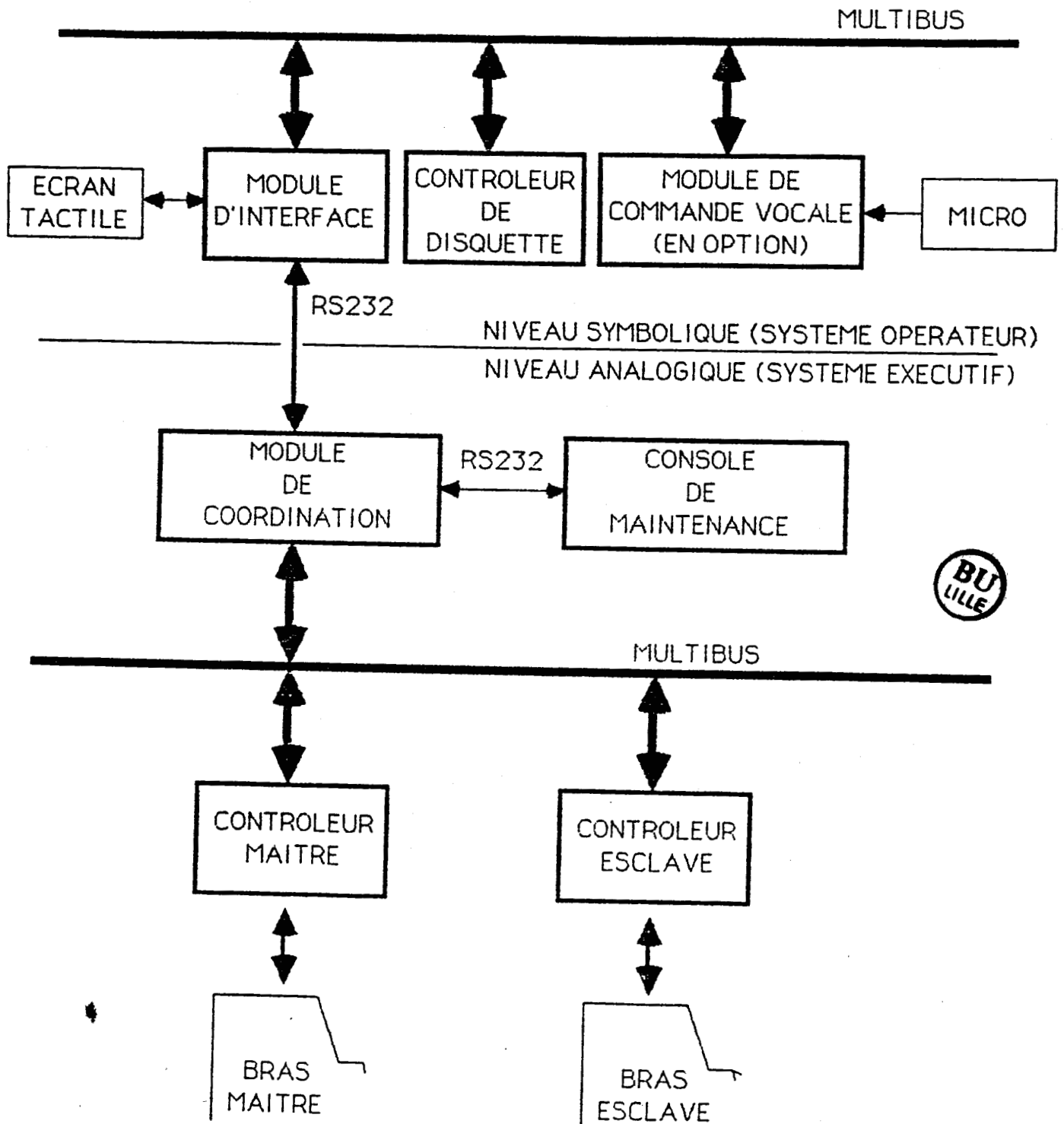
Dans son état actuel, le système supporte exclusivement des modes téléopérés (manuels et semi-automatiques), l'implantation de fonctions automatiques (saisie d'outil) est cependant prévue dans un proche avenir.

II.3.1 DESCRIPTION

TAO1 présente une structure hiérarchique illustrée sur la figure II.7 où l'on distingue les éléments suivants:

- un écran tactile (interface symbolique) sur lequel l'opérateur spécifie les comportements machine désirés;
- un système opérateur (premier bac informatique) chargé de la construction du dialogue homme-calculateur (gestion de l'écran, acquisition et filtrage des ordres, restitution des informations d'état de la machine);
- un système exécutif (deuxième bac informatique) mettant en oeuvre les modes de commande et autres fonctions TAO demandés par l'opérateur;

Figure II.7: Structure informatique du système TAO1
[Chermette 86]



SYSTEMES DE TAO

- un bras esclave MA23 M de type nucléaire à 7 ddl (3 translations, 3 rotations, préhension);
- un bras maître homothétique MA23 à retour d'effort.

Les données échangées entre les différents modules de commande sont transmises par 2 liaisons Multibus Intel (propres à chaque bac informatique) ou par une liaison série (communication inter-bac).

Le système exécutif est implanté sur 3 cartes 8086 associées à des processeurs de calcul 8087. Il est constitué par:

- 2 contrôleurs de bras (maître et esclave) assurant:
 - l'asservissement local de chaque actionneur;
 - les transformations de coordonnées directes et inverses entre les repères opérationnels (indépendants des bras) et articulaires;
 - la détection d'événements tels que les butées mécaniques ou le dépassement des efforts maximum;

ces 2 dernières tâches sont décrites par des assemblages de primitives contrôleurs spécifiques à chaque comportement machine;

- un module de coordination qui traite:
 - de l'initialisation des fonctions TAO (sélection des primitives contrôleurs et de la relation de couplage relatives au mode de commande à lancer);
 - du calcul des consignes maîtres et esclaves à partir des signaux de copie;
 - des événements signalés par les contrôleurs;

hors-ligne, ce module peut être connecté à une console de maintenance donnant accès à certains des paramètres de commande (gain, offset, matrice de couplage, ...).

Au niveau le plus haut, le système opérateur est dédié à la gestion des interactions symboliques homme-machine. Il fonctionne à la manière d'un automate séquentiel où la logique de l'interface TAO1 est traduite sous forme de Grafcets. L'écran tactile se comporte en effet comme une boîte à boutons virtuelle affichant sur plusieurs pages un ensemble de pavés et de potentiomètres linéaires sensibles au toucher de l'homme. Selon l'état de la

machine et les entrées opérateur, le système décide de la page à visualiser, des attributs de pavé (couleur, clignotement, etc.), ainsi que de l'activation/désactivation des fonctions proposées. Il génère à destination de l'exécutif un mot de commande et reçoit en retour un mot d'état témoignant du couplage mis en oeuvre et des alarmes détectées à l'échelon contrôleur.

II.3.2 FONCTIONS TAO1

Vis-à-vis de la commande télémanipulée, le comportement de la machine TAO1 est défini par le biais de plusieurs fonctions activables depuis l'écran tactile. A l'initialisation, ou en l'absence de toute autre demande opérateur, le système se trouve dans un mode bilatéral symétrique correspondant au couplage maître/esclave classique; par la suite, les fonctions disponibles sont essentiellement:

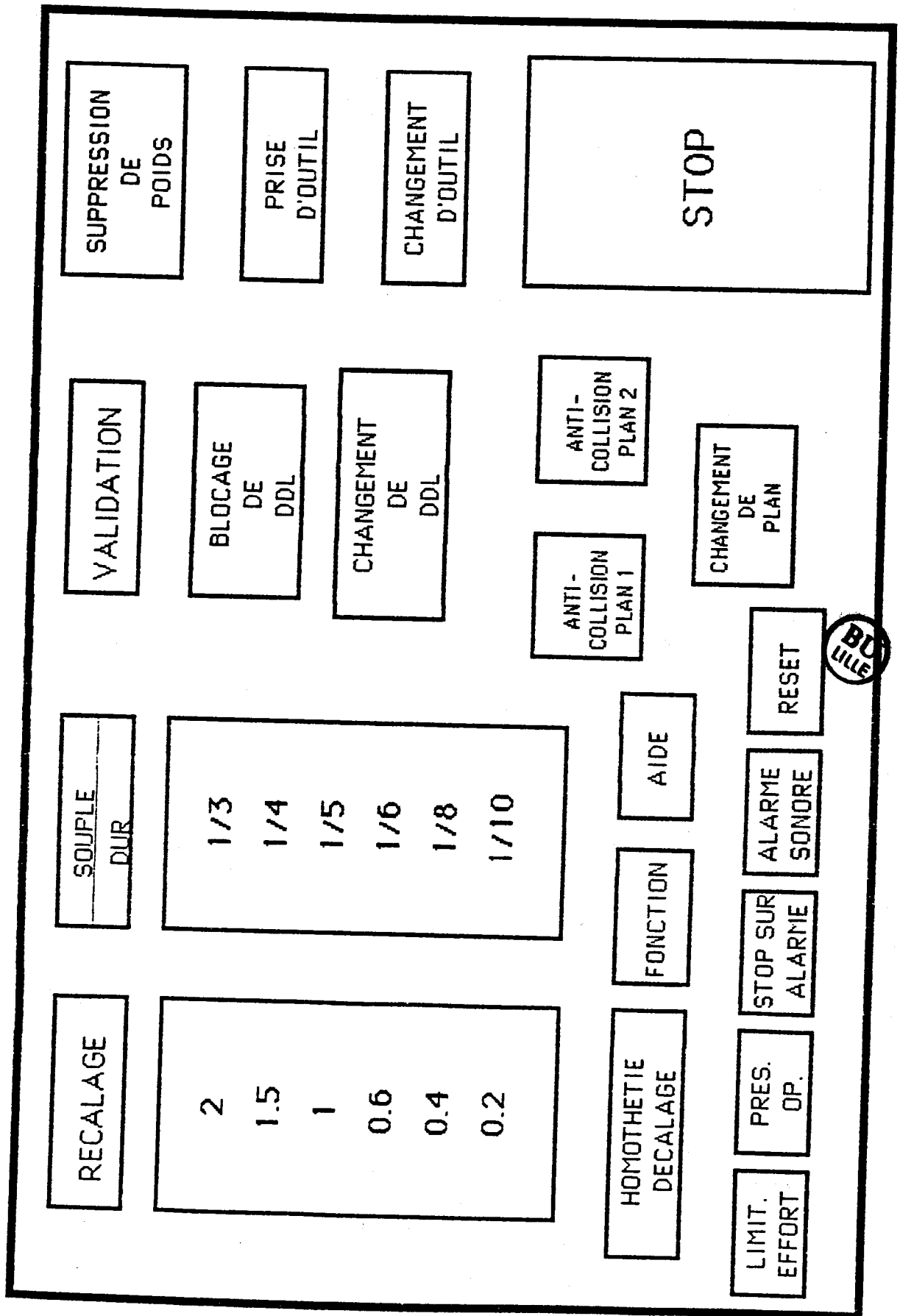
- réglage du retour d'effort: l'opérateur sélectionne le gain:
effort restitué par le maître/effort ressenti sur l'esclave
parmi les valeurs suivantes: $1/3$, $1/4$, $1/5$, $1/6$, $1/8$ et $1/10$ (ce réglage s'adresse à toutes les relations bilatérales);
- suppression de poids: la composante verticale des forces appliquées à l'effecteur esclave est mesurée, puis progressivement soustraite du retour d'effort;
- homothétie/décalage: dans le sous-mode homothétie, les translations pilotées par le maître sont reproduites sur l'esclave de façon amplifiée (grands mouvements) ou réduite (précision); cette relation introduisant une dissymétrie entre les 2 bras, le sous-mode décalage (activé par un switch de la poignée de commande) permet de découpler le maître et de le déplacer afin, dans le cas d'un rapport d'homothétie inférieur à 1 (réduction):
 - de garder la main de l'homme dans une zone de confort;
 - d'atteindre les limites de l'espace atteignable esclave en évitant toute butée mécanique sur le maître;après exécution de ce mode, le retour en couplage normal passe par un recalage du maître sur l'esclave;

- blocage de ddl: la commande du bras esclave est distribuée entre le calculateur qui bloque certains ddl (dans un repère pince ou outil) et l'homme qui conserve le contrôle des autres; ce mode vise à faciliter l'emploi d'outils (perceuse, tronçonneuse, ...) dont la mise en oeuvre exige le respect de contraintes géométriques; dans ce contexte, le partage des ddl peut résulter:
 - d'un choix explicite de l'opérateur qui les spécifie dans le repère pince;
 - de la donnée de l'outil utilisé et de la prise qui le lie à l'organe terminal (repère outil);associé à la fonction, un sous-mode libre (switch de la poignée) donne à l'homme le moyen de positionner la pince ou l'outil, et donc de définir dans le référentiel absolu les contraintes à imposer au bras (axe de perçage ou plan de tronçonnage, par exemple);
- anticollision: l'opérateur décrit une zone de travail par apprentissage de 2 plans d'anticollision (pointage successif de 2 fois 3 points) que le bras esclave ne peut approcher sans générer une alarme ou un retour d'effort répulsif.

II.3.3 INTERFACE HOMME-CALCULATEUR

Les échanges homme/calculateur s'effectuent au travers d'un écran tactile disposant de plusieurs pages où sont représentés divers pavés et échelles potentiométriques (figure II.8). L'activation d'un pavé par le contact du doigt de l'opérateur entraîne l'exécution d'une fonction, l'affectation d'un indicateur (sélection des ddl à bloquer) ou l'accès à une page de l'écran. De leur côté, les potentiomètres permettent à l'opérateur de visualiser et de modifier la valeur des variables de couplage (retour d'effort, rapport d'homothétie). A tout instant, l'état de la machine est restitué par la couleur des pavés attachés à chaque fonction (couleurs froides dans l'état inactif, rouge dans l'état actif). Il s'établit de la sorte un véritable dialogue dont la gestion est supportée par une logique d'interface implantée sous forme de Grafcets sur le système opérateur.

Figure 11.8: Page principale de l'écran tactile TAO1



SYSTEMES DE TAO

Le mode homothétie/décalage est ainsi lancé par l'activation du pavé correspondant qui passe au rouge et appelle la fonction avec un rapport de 1; l'opérateur peut ensuite changer ce rapport en appuyant sur les zones sensibles du potentiomètre associé. La relation est désactivée par une seconde pression sur le pavé qui reprend alors sa couleur originale, tandis que le pavé recalage devient clignotant afin d'indiquer que cette fonction est nécessaire au retour en couplage normal. Le mode blocage de ddl est obtenu d'une manière similaire après spécification, soit des ddl à bloquer (le pavé changement de ddl donne accès à la page dédiée à cette sélection), soit de l'outil utilisé (le pavé changement d'outil affiche un menu des outils et de leurs prises possibles), le premier pavé devenant clignotant si aucun partage n'a été défini à la demande du mode.

Par ailleurs, l'interface opérateur assure également certaines fonctions de sécurité telles que:

- stop: blocage des bras;
- reset: stop suivi d'une réinitialisation du système (désactivation de toutes les fonctions);
- limitation d'effort: génération d'une alarme si l'effort mesuré sur l'organe terminal est supérieur à une valeur fixée a priori;
- présence opérateur: génération d'une alarme si l'opérateur lâche la poignée de commande;
- alarme sonore et stop sur alarme.

De façon générale, l'interface TAO1 est parfaitement adaptée à la conduite symbolique d'une machine simple n'offrant qu'un ensemble limité de modes de commande. Il est cependant clair que le système décrit n'exploite qu'une faible partie des potentialités de la TAO et que les remarquables qualités ergonomiques de la machine supporteraient mal l'implantation de multiples fonctions supplémentaires et particulièrement de modes automatiques qui exigent de nombreux paramètres d'appréciation délicate. Toute évolution dans ce sens suppose ainsi des aides de haut niveau capables d'assister l'opérateur dans le choix des fonctions à mettre en oeuvre et la gestion de leurs paramètres.

II.4 LE SYSTEME LARTS

A la différence de TAO1, le système LARTS (Language-Aided Robotic Teleoperation System) réalisé par une équipe japonaise de l'Electro-technical Laboratory, met l'accent sur l'autonomie du bras esclave et conçoit la commande télémanipulée en tant que méthode d'apprentissage. LARTS intègre ainsi certains principes de la conduite maître/esclave généralisée au sein d'une architecture informatique disposant d'un double niveau d'interface homme-calculateur, via:

- un langage de commande maître/esclave;
- un langage de description de tâche en termes des objets manipulés.

Dans ce contexte et afin d'améliorer les capacités de l'organe opératif, 2 approches complémentaires ont été développées:

- un partage spatial de la commande entre l'homme et le calculateur (TAO);
- une distribution temporelle qui se traduit par l'exécution automatique de sous-tâches "programmées" en mode téléopéré.

Concernant ce deuxième point, l'acquisition des informations (tâche ou environnement) nécessaires à toute action autonome est proposée par le système sous les formes suivantes:

- enregistrement puis reproduction des trajectoires définies en conduite manuelle (LARTS/T [Sato-Hirai 85]);
- apprentissage à l'aide du bras esclave des objets de l'environnement dont les éléments caractéristiques sont mémorisés dans une base de données et permettent par la suite la transcription automatique de commandes de haut niveau en instructions exécutables par le manipulateur (LARTS/WM [Hirai-Sato 85]).

II.4.1 DESCRIPTION

Tel qu'il est présenté par ses auteurs, le système LARTS se décompose en:

SYSTEMES DE TAO

- une structure hardware;
- un module "degré de liberté" (modes téléopérés);
- un module "intelligence" (aide décisionnelle dans l'apprentissage ou fonctionnement automatique).

La structure hardware comprend plus particulièrement:

- un bras maître (6 ddl) à retour d'effort dont la conception direct-drive minimise les jeux et frottements mécaniques;
- un bras esclave à 5 ddl;
- une architecture informatique qui supporte les contrôleurs de bras, ainsi que les logiciels de conduite maître/esclave et de description de tâche (cette architecture à base de plusieurs mini ou micro-ordinateurs a évolué avec les versions successives du système).

Le deuxième échelon est constitué d'un module de commande maître/esclave généralisée dont le principe repose sur un partage des ddl (au sens large) entre l'homme et le calculateur. Avec le système LARTS, cette approche donne lieu à des "butées logicielles" (software jigs) qui s'ajoutent à la conduite manuelle et imposent des contraintes aux mouvements générés par l'opérateur. Ces contraintes concernent essentiellement:

- la position et l'orientation de l'effecteur (ex: déplacement d'un objet dont le calculateur maintient l'orientation constante);
- la trajectoire ou la direction du bras (ex: déplacement d'un objet sur une droite ou toute autre trajectoire spécifiée);
- le plan de travail (ex: déplacement d'un objet à altitude constante);
- la vitesse ou l'accélération des mouvements;
- la force appliquée sur l'organe terminal;
- la compliance;
- à la fois la compliance et la position de l'effecteur;
- la réalisation de conditions externes.

Outre la conduite maître/esclave, le système propose une commande incrémentale et des fonctions de décalage introduisant une dissymétrie des 2 bras en position ou en force (compensation de poids). Le contrôle symbolique de la machine par l'homme est assuré au travers d'un langage de télémanipulation dont nous présentons les principales instructions sur le

Tableau II.1: Instructions fondamentales du langage de télémanipulation LARTS [Sato-Hirai 85]

Couplage maître/esclave	Facteur d'homothétie en translation Facteur d'homothétie en rotation	(MPOS liste d'éléments, liste de valeurs) (MORI liste d'éléments, liste de valeurs)
Butées logicielles	Contraintes en translation Contraintes en rotation Contraintes sur les translations max Contraintes sur les rotations max Définition d'une butée logicielle Activation d'une butée logicielle Désactivation d'une butée logicielle	(SPOS liste d'éléments, liste de valeurs) (SORI liste d'éléments, liste de valeurs) (RPOSX/RPOSY/RPOSZ min, max) (RORIA/RORIB/RORIC min, max) (DEJ nom de butée, domaine, cste 1, cste 2, ...) (PUTJ nom de butée) (REMJ nom de butée)
Evènements	Indicateur de saisie Indicateur de position	(GRIPFLAG valeur) (GEX/GEY/GEZ valeur)
Modes de commande	Mode maître/esclave début/fin Mode incrémental début/fin Enregistrement Reproduction Recouplage maître/esclave	(MSGO)/(MSSTOP) (INCON)/(INCOFF) (MSFGO programme 'S-on/'S-off) (PBGO programme) (GRADUALLY 'S-TO-M/'M-TO-S)
Divers	Commande pince	(GRIP 'on/'off)



Tableau II.2: Instructions fondamentales du langage de description de tâche TOL.0 [Sato-Hirai 85]

Instructions de mouvements absolus	(MOVE obj {AT position} {FORCE [= <] force-vector} {VELOCITY [= <] velocity-vector} {ACCELERATION [= <] acceleration-vector} {COMPLIANCE = compliance-vector}) (APPROACH obj -- id options MOVE--) (MOVE-TO-GRIP obj -- id options MOVE--) (PUT-IT-ON obj -- id options MOVE--)	
Instructions de mouvements relatifs	(TRANS {obj} {BY relative-position-vector} -- id options MOVE exceptée AT--) (LIFT-UP {obj} -- id options TRANS--) (DEPROACH {obj} -- id options TRANS--) (SHIFT {obj} {BY relative-point-vector} -- id options TRANS exceptée BY--) (TURN {obj} {ABOUT position} {BY degree} -- id options TRANS exceptée BY--)	
Macro-instructions simples	(PICK obj) (PLACE obj1 ON obj2) (LOAD-TOOL tool)	(UNLOAD-TOOL tool) (SET-TOOL tool ON obj) (UNSET-TOOL tool)
Macro-instructions complexes	(REMOVE obj {TO holder} {WITH tool {TYPE = [HOLD NON-HOLD]}}) (PICK-PLACE obj1 ON obj2 {WITH tool {TYPE = [HOLD NON-HOLD]}})	

SYSTEMES DE TAO

tableau II.1. Ces instructions sont affichées sous formes de différents menus qui autorisent des interactions homme-calculateur rapides et fiables.

A l'échelon le plus haut (écrit en LISP), le langage de robotique -- TOL.O (Teleoperation Oriented Language of Object level) permet à l'opérateur de décrire simplement une tâche (d'assemblage) complexe. TOL.O (tableau II.2) offre en effet des instructions classiques de niveau effecteur (telles que MOVE object AT position), ainsi que des macro-instructions de niveau objet (telles que PICK object ou PICK-PLACE object1 ON object2). Une tâche ayant été spécifiée de la sorte, un interpréteur de macros traite la description fournie afin de générer un programme qui explicite chacun des mouvements de l'effecteur. Cette décomposition se fonde sur l'association des actions de manipulation avec les 3 positions suivantes, solidaires des objets de l'environnement:

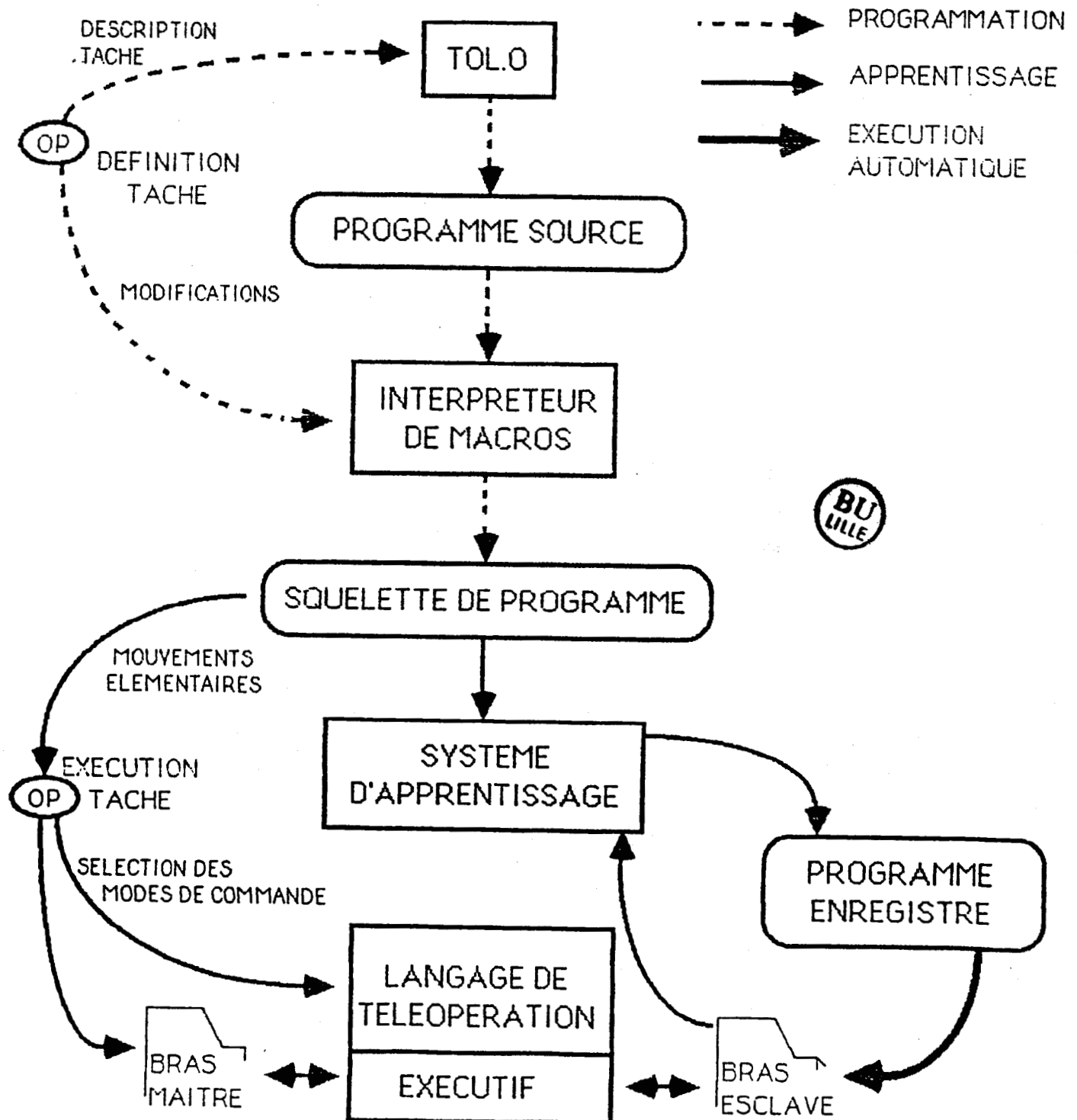
- position d'approche à partir de laquelle l'organe terminal peut réaliser une saisie correcte;
- position de saisie;
- position de départ à partir de laquelle le bras peut entamer en toute sécurité un mouvement de grande amplitude.

II.4.2 LARTS/T

Dans une première application (version LARTS/T: LARTS of Teaching oriented version [Sato-Hirai 85]), le système précédent est employé pour l'apprentissage d'une tâche. Avec la méthode proposée, l'opérateur communique à la machine la structure générale de la tâche considérée par l'intermédiaire d'un fichier source TOL.O. Après interprétation, ce fichier conduit à un squelette de programme dont les paramètres géométriques sont ensuite définis à l'aide du manipulateur esclave (mode manuel). Dans le cadre de travaux répétitifs, une exécution initiale est ainsi effectuée en conduite téléopérée, le calculateur disposant dès lors des informations nécessaires à un fonctionnement autonome.

De façon plus précise, la mise en oeuvre de LARTS/T passe par les

Figure II.9: Fonctionnement du système LARTS/T



SYSTEMES DE TAO

phases développées ci-dessous (figure II.9) (l'exemple présenté en parallèle est extrait de [Sato-Hirai 85] et consiste à saisir le bouchon -cap- d'une bouteille pour le déposer sur un support -cap holder-):

- l'opérateur commence par éditer un programme de niveau objet décrivant la tâche en termes des macro-instructions de TOL.O;
ex: REMOVE CAP;

- le programme source est ensuite traité par l'interpréteur de macros de manière à spécifier chaque mouvement de l'organe terminal;
ex: "::" indique une ligne de commentaires,
(:: REMOVE CAP TO CAP HOLDER)

```
(:: PICK CAP)
  (APPROACH CAP)
  (MOVE-TO-GRIP CAP)
  (GRIP CAP)
  (LIFT-UP CAP)
  (:: PLACE CAP ON CAP-HOLDER)
    (APPROACH CAP-HOLDER)
    (PUT-IT-ON CAP-HOLDER)
    (UN-GRIP CAP)
    (DEPROACH CAP);
```

- partant des instructions de niveau effecteur, un module d'apprentissage indique à l'opérateur les paramètres pertinents à mémoriser (positions d'approche, de saisie, de départ, ouverture de la pince, etc.), ainsi que les mouvements et les actions à effectuer pour en faire l'acquisition;

ex: (APPROACH CAP AT CAP.APP)

press (Bi) at CAP.APP

(remarque: les noms de variables (CAP.APP) sont produits automatiquement par le système, Bi est un bouton placé sur le bras maître);

- suivant les directives du module d'apprentissage, l'opérateur réalise les mouvements demandés et signale les positions utiles; il sélectionne par ailleurs le mode (maître/esclave ou incrémental) et les assistances (butées logicielles) qui lui paraissent les plus aptes à faciliter l'exécution manuelle du travail;

SYSTEMES DE TAO

- à chaque acquisition, le module d'apprentissage affecte les paramètres appris aux variables du programme effecteur et génère une séquence d'instructions exécutables;

ex: ((SEQ -99 0 100 0 0 0 0) /position initiale du bras
(APPROACH 43 124 -30 0 0 -3 -33 0)
(MOVE-TO-GRIP 97 136 -106 0 0 -3 -33 0)
(GRIP 95 136 -106 0 0 -3 17 0)
(LIFT-UP 95 136 -26 0 0 -3 17 0)
(APPROACH 94 -78 5 0 0 0 13 0)
(PUT-IT-ON 96 -72 -67 0 0 0 13 0)
(UN-GRIP 96 -72 -67 0 0 0 -27 0)
(DEPROACH 95 -72 31 0 0 0 -27 0));

- ultérieurement, cette séquence sera exploitée par un module d'exécution susceptible de la mettre en oeuvre dans l'ordre d'apprentissage ou dans l'ordre inverse.

D'un point de vue général, LARTS/T s'apparente plus à un système de robotique recourant à la programmation "par l'exemple", qu'à un système de TAO proprement dit (l'orientation du langage TOL.O vers des applications d'assemblage peu fréquentes en milieu hostile suffirait à le montrer). Il illustre néanmoins la potentialité du couplage d'un télémanipulateur avancé avec une structure de commande évoluée, potentialité pleinement développée sur la deuxième version de LARTS que nous abordons maintenant.

II.4.3 LARTS/WM

A la suite de LARTS/T, et afin d'obtenir une plus grande souplesse dans la mise en oeuvre des phases automatiques, le système LARTS/WM (LARTS augmented with World Model [Hirai-Sato 85]) associe un modèle de l'environnement à la structure originelle exposée en II.4.1. Chaque objet de l'univers peut y être décrit par ses caractéristiques géométriques et par certains paramètres ou procédures "opérationnels" relatifs aux actions que le manipulateur est susceptible de lui faire subir (ex: l'ouverture pince en saisie nominale ou une procédure particulière de préhension). Pour le

SYSTEMES DE TAO

remplissage de ce modèle, LARTS/WM fait appel à des phases d'apprentissage téléopérées où l'homme pointe avec le bras esclave des positions significatives liées aux objets à manipuler. Au cours du travail, les données mémorisées serviront à l'affectation des paramètres géométriques nécessaires aux actions menées de façon autonome par le système.

Le modèle de l'environnement attaché à LARTS/WM se fonde sur un formalisme objet où tout élément de l'univers est défini en tant qu'instance d'une classe dont il hérite les propriétés. Une instance de la classe la plus générale "objet de l'environnement" (classe cobject dans la syntaxe LARTS) est de la sorte représentée par le descripteur suivant:

name: nom de l'objet considéré;

frm: repère de référence solidaire de l'objet;

grip.trn: coordonnées de la position de saisie dans le repère de référence;

app.trn: coordonnées de la position d'approche dans le repère de référence;

tlink: relation d'attachement avec un autre objet.

Dès lors, une boîte (sous-classe box de cobject) pourra être caractérisée par un descripteur de même type augmenté des champs:

long: longueur;

wide: largeur;

thick: épaisseur.

Outre les connaissances statiques précédentes, l'approche LARTS associe à chaque classe des comportements décrits en termes de méthodes. Dans ce contexte, l'objet object étant une instance de cobject, l'instruction TOL.O "APPROACH object" se traduit comme l'appel de la méthode APPROACH de cobject qui prend ses paramètres dans le descripteur de object, commande le manipulateur par l'intermédiaire des méthodes de l'objet robot et actualise le champ frm de object (et des objets qui en sont solidaires) après exécution du déplacement vers la position OBJECT.APP.

Concernant l'apprentissage de l'environnement, LARTS/WM propose 2 options, selon que la classe d'appartenance de l'objet considéré est

définie de manière précise (classe box par exemple) ou non (classe cobject).

- Dans le premier cas (apprentissage orienté modèle), la mention par l'opérateur d'une entité inconnue (ex: APPROACH BOX1) et de sa classe a pour effet la création de l'objet correspondant et la mise en oeuvre de la méthode TEACH (apprentissage) spécifique de la classe indiquée. Cette méthode demande à l'opérateur de pointer avec l'esclave et d'enregistrer les positions caractéristiques permettant de remplir tous les champs du descripteur de l'objet. La phase de conduite manuelle est ici exclusivement une phase d'apprentissage qui ne s'accompagne d'aucune exécution, celle-ci étant effectuée en automatique par la suite.
- Avec l'apprentissage orienté mouvement, l'opérateur exécute en mode manuel l'action envisagée et enregistre (au moyen d'un switch) tous les points caractéristiques (positions d'approche, de saisie, etc.). Il décrit ensuite les mouvements accomplis à l'aide du langage TOL.O, afin de guider le système dans le chargement du descripteur de classe cobject nouvellement créé.

Vis-à-vis de LARTS/T qui se limite à la mémorisation de trajectoires, l'objectif de LARTS/WM est d'aider à la modélisation à distance de l'environnement, puis d'assurer la transcription automatique d'instructions de haut niveau. En ce sens, LARTS/WM est d'un remarquable intérêt pour la téléopération où des commandes évoluées sont seules acceptables dans la description en-ligne des tâches à la machine. Il faut néanmoins observer que l'expérimentation (essentiellement simulée) du système s'est tournée vers une tâche d'allumage d'une lampe à alcool qui semble bien peu significative pour la validation d'un tel concept.

A la lumière de la présentation ci-dessus, il apparaît que la finalité du système LARTS est avant tout la programmation de tâches répétitives, plus proches de la robotique d'assemblage que des travaux en milieu hostile. En regard de la TAO, LARTS ouvre cependant la voie vers des systèmes capables d'apporter à l'opérateur une aide décisionnelle en-ligne.

CONCLUSION

Les systèmes de TAO décrits dans ce chapitre sont significatifs des 2 grandes orientations de la téléopération moderne. La première, purement française, vise à assister l'homme dans le pilotage essentiellement manuel de la machine. Qu'il s'agisse d'un opérateur handicapé (SPARTACUS) ou confronté à des tâches complexes (TAO1), l'apport du calculateur facilite son travail sans en modifier fondamentalement la nature (téléassistance). A l'opposé, les approches américaines (SUPERMAN) et japonaises (LARTS), qui relèvent de la télérobotique, tendent à substituer un homme superviseur à l'homme exécutant. De notre point de vue, il n'y a pas là de véritable divergence conceptuelle, mais plutôt 2 aspects d'un même problème perçu relativement aux domaines d'application les plus motivants pour chaque nation: dans le premier cas, le nucléaire qui implique la réalisation de tâches dextres au sein d'un univers difficile à modéliser; dans le deuxième, le sous-marin et surtout le spatial où les environnements peuvent être qualifiés de structurés, ne permettant toutefois que des communications station/engin très imparfaites. Cette approche synthétique sera défendue dans le chapitre suivant au travers d'une étude globale de la commande symbolique en TAO.

CHAPITRE III

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Après avoir évoqué les différents modes de conduite propres à la robotique, nous allons dans ce chapitre aborder l'étude d'un système de commande dédié à la téléopération avancée. Une machine de TAO est mise en oeuvre dans le cadre global du mode coopératif qui fait appel à des phases de pilotage manuelles, assistées et automatiques. La complexité des environnements de travail et des procédés utilisés, alliée à l'occurrence de situations imprévues, interdit en effet l'emploi de robots autonomes dont les capacités sont encore insuffisantes en regard des tâches couramment rencontrées. Par ailleurs, la diversité des organes périphériques attachés à la machine, la dextérité imparfaite des systèmes bilatéraux et la mauvaise qualité des retours opérateur, rendraient laborieuse une conduite purement manuelle.

Relativement à la commande maître/esclave classique, l'analyse des difficultés de pilotage montre que l'amélioration des temps d'exécution et de la sûreté de fonctionnement passe par des formes d'assistance analogique ciblées, visant à surmonter des classes de problèmes bien définies. L'aide proposée au niveau tactique ne sera ainsi pleinement profitable qu'associée à une structure informatique capable d'apporter une assistance symbolique de niveau stratégique. A l'inverse, la participation de

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

l'homme aux aspects sensoriels et décisionnels de la commande permet de suppléer aux insuffisances du calculateur et autorise des principes de conduite plus difficilement implantés sur les robots de substitution.

Dans l'exposé de notre approche, nous commencerons par présenter certaines caractéristiques spécifiques à une machine de TAO, qui influent sensiblement sur la conception du système de pilotage. Celui-ci fera l'objet de notre deuxième partie et le chapitre s'achèvera par une description plus détaillée du niveau supervision chargé de la gestion des modes maître/esclave généralisés.

III.1 CARACTERISTIQUES D'UNE MACHINE DE TAO

Le rôle d'une machine de TAO est de donner à l'homme les moyens d'intervenir à distance en milieu hostile dans le cadre de tâches variées et le plus souvent non répétitives. Elle doit ainsi intégrer des organes multiples susceptibles d'agir au sein de l'environnement esclave, d'acquérir des informations sur celui-ci ou d'élargir l'espace opérationnel des bras dextres et des capteurs. En outre, afin d'accroître la qualité d'exécution des tâches, elle offrira à l'opérateur des assistances diverses, adaptées à des situations fréquemment observées, et dont il importe d'évaluer la contribution à la commande.

III.1.1 DESCRIPTION DES ORGANES CONSTITUTIFS

Un système de téléopération se distingue de la plupart des autres systèmes robotisés par le nombre et la variété des organes mécaniques ou électroniques qui le constituent. En toute généralité, il présente un caractère multimachines fondé sur les éléments suivants (figure III.1):

- un site de travail à distance comprenant:
 - un ou plusieurs bras dextres à commande bilatérale (télém manipulateur maître/esclave) ou automatique (robot);
 - des outils;

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- des dispositifs sensoriels (capteurs d'effort et de proximité, caméras) délivrant des informations destinées à l'homme ou au calculateur de conduite;
- des engins (porteurs, véhicules) assurant la mobilité des organes opératifs et sensoriels;
- un poste de contrôle/commande qui regroupe les dispositifs de commande et de restitution d'information;
- un système informatique de contrôle et de gestion.

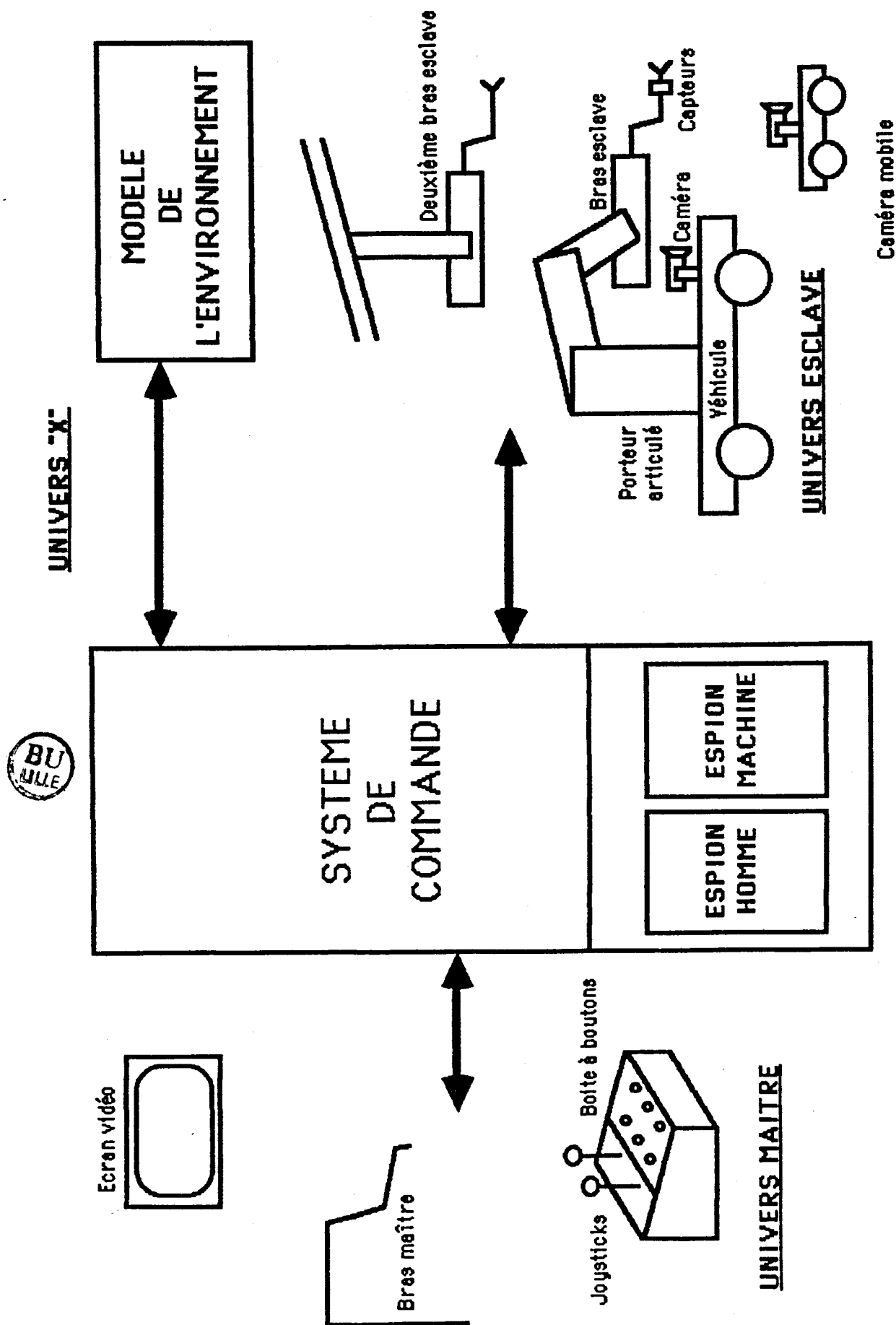
Selon que les différents organes de la machine sont disposés dans le poste maître ou dans l'univers esclave, nous les qualifierons respectivement d'organes opérateur ou d'organes d'intervention. Remarquons dès à présent que cette terminologie ne préjuge pas du sens des lois de commande qui seront mises en oeuvre entre les différents sous-systèmes. En particulier, dans certaines phases de travail, les relations indiquées ci-dessous pourront être réalisées:

- commande d'un organe opérateur par un organe d'intervention; par exemple, un bras maître recopiant les déplacements de son esclave piloté par calculateur;
- commande d'un organe d'intervention par un autre organe d'intervention; par exemple, l'asservissement des orientations d'une caméra aux mouvements d'un bras esclave, de façon à fournir en permanence à l'opérateur une image de la zone entourant l'organe terminal.

Nous décrivons dans la suite les divers constituants d'une machine de TAO, au travers de 4 groupes fonctionnels:

- manipulateurs dextres et organes associés qui participent directement à l'exécution du travail;
- dispositifs sensoriels chargés d'informer l'homme ou le calculateur de la progression dans la tâche;
- modules espions témoignant de l'état courant du système homme-machine;
- structure de commande qui établit les boucles perception-décision-action nécessaires à la conduite des organes d'intervention;

Figure III.1: Aspect multimachines d'un système de TAO



III.1.1.a Manipulateurs dextres et organes associés

Fondamentalement, une machine de TAO est construite autour d'un ou de plusieurs manipulateurs dextres autorisant une commande bilatérale à partir d'un organe maître, aussi bien qu'une commande automatique via le calculateur. Les bras employés en mode maître/esclave sont le plus souvent caractérisés par une compliance passive intrinsèque visant à compenser les insuffisances du retour d'information destiné à l'opérateur. Une telle compliance fait cependant obstacle à la précision demandée en mode robot, et l'on s'oriente à l'heure actuelle vers des asservissements actionneurs à gains modulables susceptibles de donner satisfaction dans chacun des modes de conduite envisagés.

Touchant aux aspects matériels de la commande bilatérale, les 2 bras d'un couple maître/esclave peuvent être:

- homothétiques, donnant ainsi à l'opérateur une maîtrise totale des déplacements de tous les segments du manipulateur esclave;
- ou dissymétriques afin de réduire l'encombrement du bras maître et de limiter les mouvements de la main de l'homme à une zone restreinte de confort (d'à peu près 30 cm dans chaque direction).

En vue de l'intervention en milieu hostile, on attache par ailleurs aux éléments dextres de la machine:

- des systèmes porteurs (véhicules, manipulateurs lourds, ponts roulants) se contentant d'un pilotage relativement grossier (depuis une boîte à boutons ou un jeu de joysticks, par exemple) et qui répondent à 2 impératifs complémentaires:
 - augmenter le volume atteignable par les organes opératifs de la machine;
 - minimiser l'importance du dilemme légèreté-rigidité des structures mécaniques dans l'exécution de mouvements de grande amplitude ou de précision (les déplacements larges réclament en effet des bras légers possédant un bon rapport couples actionneurs/inertie, alors que les mouvements fins supposent avant tout des structures rigides donc lourdes [Book

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

84]);

- des outillages (préhenseurs, perceuses, tronçonneuses, etc) demandant une alimentation en énergie et qu'il faut pouvoir adapter sur un organe terminal universel (pince bidigitale ou dispositif de changement d'outil);
- des capteurs dont il va maintenant être question.

III.1.1.b Les systèmes de perception

Les systèmes sensoriels qui équipent une machine de TAO délivrent à l'opérateur ou au calculateur de pilotage des informations en rapport avec:

- le retour d'effort;
- la perception locale de l'espace environnant l'effecteur;
- la vision de la scène esclave.

Concernant la détermination des forces et couples appliqués à l'organe terminal d'un bras esclave, 2 méthodes sont couramment employées:

- la mesure des courants moteurs (remarquablement simple avec des moteurs à courant continu);
- le recours à des capteurs spécifiques (jauges de contrainte).

Dans ce domaine, les capteurs d'effort se caractérisent par l'indépendance des valeurs obtenues relativement aux paramètres dynamiques (inertie, frottement) du manipulateur. Ils sont ainsi parfaitement appropriés au contrôle de l'évolution dans la tâche, en particulier lorsque l'exploitation des informations revient à la machine (génération de mouvements compliants, détection des collisions). Pour ce qui est de la restitution kinesthésique, on préférera au contraire la mesure des courants moteurs qui assure une meilleure coordination maître/esclave en conduite manuelle.

La perception locale repose sur des capteurs proximétriques infra-rouges ou ultra-sonores [Espiau-André 81] placés sur l'effecteur d'un bras esclave (pince ou outillage). La prise en compte des informations fournies nécessite un traitement par le système de pilotage qui permet des

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

modes référencés-capteurs de type:

- automatique: commande en boucle fermée;
- hybride: partage des ddl entre l'homme et la machine;
- réflexe: restitution d'un retour d'effort synthétique sur le bras maître.

Les dispositifs sensoriels proximétriques ou au contact peuvent également donner lieu à une visualisation sur écran. On envisagera ainsi de proposer en parallèle la reproduction kinesthésique des efforts mesurés au niveau des actionneurs esclaves et une représentation graphique des forces et couples réellement appliqués à l'organe terminal et déterminés au moyen de capteurs à jauges de contrainte.

Outre la perception locale, la machine dispose de systèmes de vision principalement destinés à l'homme. Ils font intervenir dans l'univers esclave des caméras:

- munies d'objectif motorisé (réglage du zoom, de la mise au point et du diaphragme);
- associées à des mécanismes d'orientation commandés à distance en site et azimut (toureille, prisme mobile);
- embarquées soit sur un manipulateur ou son porteur, soit sur un véhicule qui leur est propre.

A ces capteurs d'images correspondent dans le poste maître des organes de restitution tels que:

- moniteur vidéo classique;
- écran géant qui offre un espace de confort visuel plus important;
- dispositif de vision 3D.

Complémentairement, le recours à une base de données CAO s'affirme comme une des évolutions les plus originales de la téléopération avancée, en raison du double rôle qu'elle est à même de jouer:

- un rôle passif en générant des images synthétiques sur des zones cachées ou en condition de vision dégradée;
- un rôle actif en contribuant à la conduite du bras d'une manière analogue aux capteurs proximétriques (commande référencée modèle:

automatique, hybride ou réflexe).

III.1.1.c Les systèmes espions

Ainsi que nous l'avons vu, une machine de TAO autorise des boucles de commande diverses et redondantes, caractérisées par:

- la participation ou non de l'opérateur humain;
- les organes physiques mis en oeuvre;
- les retours sensoriels utilisés;
- les phases de configuration nécessaires.

Le choix d'une de ces boucles passe par l'estimation de la pertinence de chacune des options possibles en regard d'une sous-tâche donnée et donc par la détermination de l'état fonctionnel des ressources concurrentes. Des modules espions sont ainsi chargés de l'extraction et du traitement des informations relatives aux performances des éléments mécaniques, électroniques ou humains du système. A côté de l'espion opérateur précédemment évoqué, des études ont porté sur la détection de panne franche ou déviante dans les asservissements d'un manipulateur, conduisant à des expériences malheureusement encore peu concluantes. Par ailleurs, des techniques simples de traitement d'images peuvent apporter des renseignements utiles sur la qualité des informations délivrées par les systèmes de vision. Au cours d'un travail de téléopération, ces systèmes sont en effet affectés par:

- une focalisation défectueuse;
- les conditions d'éclairage;
- des facteurs propres au milieu comme la présence de particules de vase en suspension dans l'eau lors d'interventions sous-marines.

Dans un tel contexte, la définition d'un indice de netteté, s'appuyant sur la mesure du taux de convexité des images, permet au système informatique d'apprécier la valeur respective des différents retours visuels, de les ordonner, et le cas échéant, de privilégier l'exploitation d'une base CAO. Elle contribue d'autre part à l'évaluation des performances opérateur qui sont sensibles à toute dégradation des informations restituées.

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

III.1.1.d Le système de commande

Sans entrer dans les détails de la structure de commande qui sera présentée par la suite, cette description matérielle d'un système de TAO appelle 2 remarques.

- En premier lieu, la machine devant répondre à une grande variété de tâches, il est indispensable que l'on puisse aisément modifier sa configuration physique pour l'adapter à une application particulière qui demandera, par exemple, des capteurs spécifiques imposés par certains des procédés employés.
- En outre, la mise en oeuvre des boucles de commande ne saurait se concevoir selon un schéma figé, sous peine d'aboutir à un poste opérateur peu convivial, encombré d'interfaces multiples rigidement attachées aux organes d'intervention. Au contraire, une relative souplesse s'avère souhaitable dans ce domaine, permettant, par exemple, à l'homme de piloter successivement un manipulateur et un véhicule avec le même bras maître.

Afin d'utiliser au mieux les ressources de la machine, on abordera chaque sous-système comme un élément modulaire qui accepte des consignes et/ou délivre des informations, et pourra être associé à d'autres éléments dans le cadre de diverses lois de commande. Sur un plan purement informatique, une telle démarche se traduit par une intégration poussée des différents organes dans la structure de conduite. Elle met ainsi en évidence la nécessité d'une étude approfondie de l'aspect système, en rapport avec le problème de la communication à l'intérieur de la machine.

III.1.2 PRINCIPE DE COMMANDE TAO:

LA COMMANDE MAITRE/ESCLAVE GENERALISEE (CMEG)

En mode de conduite coopératif, l'homme et le calculateur participent au pilotage de la machine au sein d'un partage spatial ou temporel du travail. La distribution de la commande dans l'espace nous oblige à considérer séparément les divers degrés de liberté (ddl) d'un manipulateur. Ces ddl peuvent être spécifiés relativement:

- au repère articulaire défini par la géométrie du bras;
- à un repère absolu (cartésien) solidaire de l'univers esclave (ou du poste maître);
- à un repère opérationnel lié à la base du manipulateur;
- à un repère fonctionnel attaché à l'organe terminal ou aux outils qui y sont adaptés.

Dans le cas d'un bras maître, les repères absolu et opérationnel sont totalement confondus. Il en va différemment pour un esclave dont le repère opérationnel se déplace avec le porteur qui lui est associé.

A un instant donné, un ddl exprimé dans l'un des systèmes de coordonnées précédents est piloté en position, en vitesse ou en force, selon une consigne qui résulte d'informations connues à priori ou délivrées en temps réel. On distingue ainsi:

- la commande programmée prise en compte par le calculateur au travers d'un module logiciel de génération de trajectoires ou de contraintes géométriques;
- la commande référencée capteurs qui fait intervenir les retours proximétriques;
- la commande référencée modèle qui fait intervenir une base de données environnement (CAO);
- la commande en recopie où la consigne est issue:
 - d'un organe du poste maître (conduite manuelle);
 - d'un organe de l'univers esclave (suivi automatique).

Concernant le pilotage des systèmes porteurs et des dispositifs d'orientation des caméras qui ne demandent qu'une précision modérée, nous

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

indiquons ci-dessous les chaînes d'action couramment rencontrées:

- commande en vitesse à partir d'une boîte à boutons dans un repère articulaire ou opérationnel;
- commande en position depuis un pantin non motorisé (capteur céphalique, syntaxeur manuel, ...) ou un bras maître avec ou sans retour d'effort;
- commande en position asservie sur un autre organe d'intervention (exemple: caméra suiveuse);
- commande programmée.

La commande maître/esclave généralisée qui caractérise la conduite des organes dextres de la machine permet des boucles perception-action beaucoup plus riches. Elles se traduisent pour l'opérateur par des modes de commande variés que l'on classe en (figure III.2):

- modes manuels qui donnent à l'opérateur l'entière responsabilité du pilotage de l'esclave, le calculateur pouvant cependant introduire un décalage ou un facteur d'échelle dans la transmission des positions et des efforts entre les 2 bras;
- modes réflexes où le retour kinesthésique réel est augmenté d'une composante artificielle (potentiel attractif/répulsif) intégrant des informations proximétriques ou des connaissances modélisées; l'opérateur se place ainsi en série derrière le calculateur et conserve une certaine liberté d'action dans la conduite du manipulateur;
- modes hybrides dans lesquels la commande de l'esclave est attribuée selon un partage spatial (par ddl) qui met en parallèle l'homme et le calculateur;
- modes robots où le système informatique génère seul les consignes esclaves, prenant en compte les retours capteurs, une base de données CAO ou un module programmé.

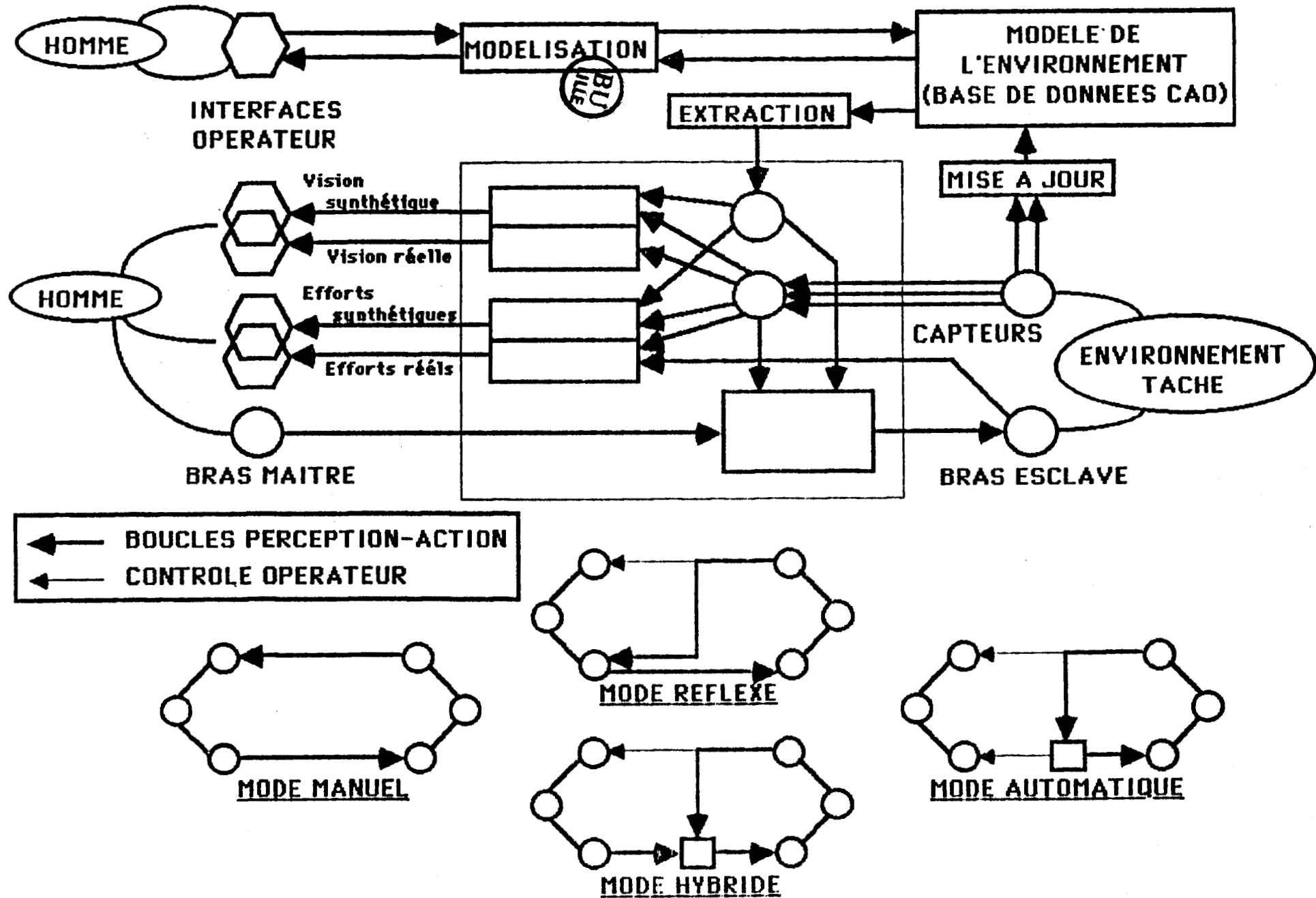
Au niveau analogique, la mise en oeuvre de ces modes repose sur les lois de la commande maître/esclave généralisée dont les formes fondamentales sont les suivantes:

on notera:

X coordonnées opérationnelles

M maître

Figure III.2: Boucles perception-action fondamentales en TAO
[André 86]



ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

$\underline{Z}$ coordonnées fonctionnelles

E esclave

$\underline{E}$ vecteur d'effort

c consigne

r recopie;

1. commande unilatérale

- pilotage de l'esclave par le maître, le maître est libre:

$$\underline{X}_c^E = \underline{X}_r^M + \underline{X}_o^E$$

$\underline{X}_o^E$ désigne un éventuel décalage entre les positions initiales des 2 bras;

- suivi par le maître de l'esclave commandé indépendamment:

$$\underline{X}_c^M = \underline{X}_r^E + \underline{X}_o^M$$

2. commande bilatérale

- commande maître-esclave à retour d'effort:

$$\underline{X}_c^E = \underline{X}_r^M + \underline{X}_o^E$$

et

$$\underline{X}_c^M = \underline{X}_r^E + \underline{X}_o^M \quad \text{retour en position}$$

ou

$$\underline{E}_c^M = \underline{E}_r^E \quad \text{retour en force}$$

Remarque: Avec un bras compliant tel que le MA23, il y a une relative équivalence entre les 2 dernières lois de commande. Les forces appliquées à l'esclave entraînent en effet une flexion de la chaîne cinématique, due à la souplesse des asservissements. Cette flexion se traduit par une erreur de position restituée au niveau du maître et ressentie par l'opérateur comme un retour d'effort classique.

- commande maître-esclave à retour d'effort intégrant des contraintes programmées et la restitution d'informations proximétriques ou modélisées (l'utilisation d'un repère fonctionnel s'impose dans ce cas):

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

$$\underline{Z}_c^E = \underline{Z}_r^M + \underline{Z}_o^E$$

et

$$\underline{E}_c^M = [\underline{C}]\underline{E}_r^E + \underline{DF}$$

avec:

$$\underline{DF} = [\underline{D1}]\underline{DF}^* + [\underline{D2}]\underline{DF}_{S1} + [\underline{D3}]\underline{DF}_{S2} + [\underline{D4}]\underline{DF}_g$$

et:

$\underline{DF}^*$ module programmé

$\underline{DF}_{S1}$ restitution du retour proximétrique

$\underline{DF}_{S2}$ restitution des informations modélisées

$\underline{DF}_g$ compensation d'un poids supporté par l'organe terminal;

les matrices $[\underline{C}]$ et $[\underline{D}]$ définissent le partage des ddl (matrices de sélection) et spécifient les gains respectifs de chaque composante du retour kinesthésique;

3. fonctionnement automatique

- par exemple, commande en position de l'esclave (maître suiveur ou non):

$$\underline{Z}_c^E = \underline{DZ}$$

avec:

$$\underline{DZ} = [\underline{B1}]\underline{DZ}^* + [\underline{B2}]\underline{DZ}_{S1} + [\underline{B3}]\underline{DZ}_{S2}$$

Ces différentes lois de commande pouvant être combinées, les équations générales de la CMEG sont:

$$\underline{Z}_c^E = [\underline{A}]\underline{Z}_r^M + \underline{DZ}$$

et

$$\underline{E}_c^M = [\underline{C}]\underline{E}_r^E + \underline{DF}$$

Dans un tel contexte, l'emploi de manipulateurs homothétiques assure à l'opérateur un contrôle complet des mouvements de toutes les articulations. De ce point de vue, il est avantageux de mettre en parfaite

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

concordance les repères de commande des 2 bras. Un décalage X_0 permet alors à l'homme de travailler aux limites de l'espace atteignable de l'esclave en conservant un certain confort dans les déplacements du maître.

L'approche est plus complexe si les manipulateurs sont dissymétriques:

- d'une part, une possibilité annexe de commande en coordonnées articulaires depuis une boîte à boutons s'avère indispensable si l'on veut éviter le passage par des points de singularité ou des collisions mettant en jeu un segment intermédiaire de l'esclave;
- d'autre part et selon les situations rencontrées, l'opérateur peut désirer lier le repère opérationnel du maître avec un repère fonctionnel de l'esclave et commander ainsi directement la position d'un outil (par exemple, l'extrémité du foret d'une perceuse) [Quetin 83] [Bejczy 85].

D'une manière générale, une relation dissymétrique (bras non homothétiques ou décalés) implique un déséquilibre dynamique du système bilatéral qui conduit à une dégradation du retour d'effort. En particulier, les forces et couples ressentis par l'opérateur ne témoignent plus qu'imparfaitement des inerties esclaves, faisant apparaître une instabilité de l'ensemble homme-télemanipulateur dans les mouvements rapides. Face à ce problème, un retour kinesthésique compensatoire, simulé au travers d'un modèle dynamique de l'esclave, semble constituer une solution satisfaisante, bien qu'elle donne lieu à des calculs remarquablement délicats dans un cadre temps réel [Bejczy 85].

III.1.3 ELEMENTS D'EVALUATION D'UNE MACHINE DE TAO

Comme pour tout système coopératif, l'estimation précise des performances d'une machine de TAO est une question difficile. Elle oblige en effet à prendre en compte de nombreux facteurs non mesurables, parmi lesquels nous citerons:

- le type de tâche considéré;
- la qualité variable des retours d'information;
- l'expérience et l'habileté de l'opérateur.

L'intérêt d'une telle étude est cependant fondamental en ce qu'elle est susceptible de fournir des outils d'évaluation orientés vers:

- la comparaison des systèmes maître/esclave;
- l'accroissement de leur efficacité;
- la détermination des formes d'assistance à développer;
- la validation de ces aides.

III.1.3.a Aspects ergonomiques

Au cours d'un travail de téléopération, l'homme agit à distance dans l'univers de la tâche par l'intermédiaire d'une machine qui lui apparaît peu transparente. Bien qu'offrant une excellente dextérité en regard des engins unilatéraux, un système maître/esclave à retour d'effort ne peut se comparer avec un bras humain. Les principales raisons en sont:

- la géométrie non anthropomorphe des manipulateurs (essentiellement dans la correspondance organe terminal/poignée de commande);
- les jeux et frottements affectant la transmission des efforts;
- l'inertie des structures mécaniques articulées.

Par ailleurs, la recherche et l'exploitation des informations relatives à l'univers esclave compliquent encore la tâche de l'opérateur. Aux dégradations du retour visuel indirect s'ajoute une charge de travail supplémentaire découlant de la participation de l'homme au pilotage et au réglage des caméras. De son côté, le retour kinesthésique se voit augmenté d'une composante indésirable qui témoigne des imperfections mécaniques du

système et affaiblit la perception des contacts avec les objets de l'environnement.

Pour l'opérateur, la non-transparence de la machine est à l'origine [Vertut 83]:

- d'une fatigue physique plus grande qu'en intervention directe, due en majeure partie au fait que l'association effecteur/poignée de commande ne reproduit ni la dextérité, ni la dynamique de la préhension humaine; le poids d'un objet soulevé se traduit ainsi par la restitution sur la poignée opérateur d'un couple peu ergonomique, dont la maîtrise demande parfois l'utilisation des 2 mains [Fiori-Acquaviva-Lescoat 83];
- d'une fatigue mentale, induite outre par les difficultés d'interprétation du retour d'information, par la nécessité pour l'homme de se construire un modèle de l'univers esclave visant à contrebalancer une perception défaillante.

A plus ou moins long terme, cette fatigue est responsable d'une nouvelle et progressive dégradation des performances du système homme-machine.

III.1.3.b Effets sur l'exécution d'une tâche

Touchant à la réalisation des tâches, la dextérité imparfaite des systèmes de téléopération se manifeste par:

1. une baisse de la précision résultant des jeux et de l'inertie des manipulateurs, ainsi que de la mauvaise qualité des retours visuels;
2. une augmentation des durées d'intervention;
3. des incidents fréquents et imprévus, comme la destruction d'un foret au cours d'un perçage où le contrôle des efforts latéraux s'avère malaisé.

En particulier, le point 2 a conduit à la définition d'un facteur d'efficacité temporelle [Vertut 73] donné comme le rapport entre le temps requis pour l'accomplissement à distance d'une certaine tâche et le temps minimum de réalisation de la même tâche à la main. Les valeurs mesurées dans diverses situations expérimentales ont mis en évidence les éléments suivants:

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- aspect humain: relative insensibilité à l'expérience opérateur qui s'applique de manière similaire en intervention directe et à distance;
- aspect machine (tableau III.1): variations importantes selon:
 - l'inertie et le jeu des manipulateurs;
 - le type de poignée de commande;
 - la forme du retour visuel (direct ou caméra);
 - la présence ou non d'un retour d'effort;
 - l'existence de systèmes de péréitéléopération (véhicules, porteurs, supports de caméra, etc.);
- aspect tâche: écart dans un rapport de 2 à 3 lorsque la stratégie employée est différente en intervention directe et à distance.

Les résultats précédents sont complétés par l'observation d'une tâche réelle de démontage de vanne (durée totale: 1 H 30) qui montre l'influence de chaque phase de travail sur le temps d'exécution (tableau III.2.a). Ajoutons que dans le cadre des opérations entreprises sur la centrale accidentée de Three Mile Island, 1 H d'intervention à distance a pu demander jusqu'à 80 H de préparation, durée ramenée par la suite à un maximum de 40 H.

Tableau III.1: facteur d'efficacité temporelle
pour différents systèmes d'intervention [Vertut 73]

Tâche de télémanipulation:

système maître/esclave, vision directe..... 2,5

Tâche de téléopération:

système maître/esclave, porteur,

vision caméra (1 seul opérateur)..... 5 à 9

Télémanipulateur unilatéral

(sans retour d'effort)..... 10 à 100

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Tableau III.2.a: temps d'exécution des différentes phases
de travail en téléopération classique [Vertut 84]
(système maître/esclave, porteurs, 3 caméras,
tâche de démontage d'une vanne)

Commande (unilatérale) des porteurs.....	30
Manipulation bilatérale.....	30
Réglage des caméras.....	40
Total:	100

Tableau III.2.b: temps d'exécution des différentes phases
de travail en téléopération assistée par ordinateur [Vertut 84]
(commande maître/esclave généralisée, porteurs robotisés,
3 caméras avec suivi automatique de l'effecteur,
tâche de démontage d'une vanne)

Commande des porteurs.....	10 (estimation)
Manipulation bilatérale.....	20
Réglage des caméras.....	3
Total:	33

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Tableau III.3: évaluation des effets de l'assistance sur
la sûreté de fonctionnement et la charge de travail de l'opérateur

[Fournier-Gaillard 86]

(tâche principale de perçage)

<u>Conditions</u> <u>expérimentales</u>	Temps de réaction à la tâche secondaire (sec)	Nombre de forets cassés
Pas d'assistance	0,88	10
Suppression de poids	0,84	3
Blocage de ddl	0,84	3
Suppression de poids et blocage de ddl	0,78	1



III.1.3.c Apport de l'assistance opérateur

Afin d'évaluer de façon chiffrée la contribution de diverses techniques d'assistance, une opération de démontage de vanne identique à celle évoquée dans le paragraphe ci-dessus, a été réalisée en recourant aux aides suivantes:

- commande robotisée des systèmes porteurs avec anti-collision programmée;
- caméras en poursuite automatique de l'effecteur;
- commande maître/esclave généralisée.

En respectant l'échelle temporelle déjà utilisée, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau III.2.b qui traduit un gain de temps d'environ 60%. Une autre série d'expériences relative à un travail de perçage mené en

parallèle avec une tâche secondaire a permis de construire le tableau III.3. La tâche annexe avait pour but d'estimer la charge mentale de l'opérateur au travers de son temps de réaction à une sollicitation parasite. Celle-ci consistait à demander une réponse affirmative ou négative à un mot prononcé oralement, selon qu'il contenait ou non une lettre donnée. La synthèse des valeurs moyennes illustre une remarquable amélioration de la sûreté de fonctionnement avec l'assistance, ainsi qu'une diminution moins sensible de la densité d'occupation opérateur.

D'une façon générale, l'évaluation des assistances met en lumière un triple effet en regard de la tâche:

- plus grande vitesse d'exécution;
- meilleure sûreté de fonctionnement;
- réduction de la charge de travail et de la fatigue opérateur.

Dans ce domaine, une certaine prudence est cependant de mise. Des études ergonomiques montrent en effet que l'aide apportée à un opérateur ne peut s'envisager indépendamment du travail auquel il est confronté. Par exemple, si l'intérêt de la compensation du poids d'un objet au niveau du retour kinesthésique est évident lors de déplacements lents et précis, il en va différemment pour des mouvements rapides et de grande amplitude où la sensation d'apesanteur conduit l'homme à mesestimer l'inertie de la masse transportée. Il apparaît ainsi qu'une assistance ne se conçoit qu'en regard de classes bien définies de problèmes, d'où le besoin d'une aide décisionnelle dans le choix des modes de commande appropriés à l'exécution efficace d'une tâche complète.

III.2 COMMANDE SYMBOLIQUE

L'introduction des concepts de Commande Maître/Esclave et Retour d'Information Généralisés au sein d'un système de téléopération avancée se traduit pour l'opérateur humain par diverses formes d'assistance relatives à ses fonctions sensorielles et motrices. Ces assistances apportent une plus grande efficacité dans la réalisation des tâches, s'accompagnant d'une diminution de la charge de travail physique de l'opérateur. En contrepartie, elles obligent à intégrer au système de TAO une interface symbolique permettant à l'homme de décrire en-ligne les comportements machine susceptibles de répondre avantageusement aux situations observées. Sur un système multimachines tel que nous l'avons présenté, ce rôle supplémentaire attribué à l'opérateur impose une activité mentale qui atteint très vite un seuil critique. L'assistance précédemment évoquée ne sera ainsi profitable que secondée d'une aide de caractère symbolique facilitant le choix pertinent:

- des organes d'exécution à utiliser;
- des modes de commande à mettre en oeuvre;
- des retours d'information à sélectionner.

Nous développons dans cette partie une approche globale de la commande symbolique en TAO, reposant sur la détermination hors-ligne d'un plan d'action sommaire qui est ensuite, en-ligne, interactivement interprété et exprimé en termes de fonctions exécutables par la machine. Nous nous attacherons par ailleurs à définir la place de l'homme vis-à-vis d'une structure de commande que nous voulons résolument coopérative.

III.2.1 FONDEMENTS CONCEPTUELS

En toute généralité, l'accomplissement d'un travail par un robot passe par une phase de préparation. L'homme y décrit la tâche à la machine, suivant un modèle qu'il s'est créé et d'une manière plus ou moins détaillée selon:

- les capacités d'interprétation du système de programmation;

- les connaissances dont dispose ce dernier.

Le plus souvent, cette description est traitée hors-ligne jusqu'à obtenir un programme exécutable. En téléopération où l'environnement est incomplètement modélisé et la tâche parfois mal connue, une telle approche n'est pas envisageable. La détermination d'un enchaînement de comportements machine approprié à la réalisation d'une tâche nécessite la prise en compte du retour sensoriel dont l'exploitation gagne à être partagée entre l'homme et la machine. Dans ce contexte, notre intérêt se porte sur un système de commande de haut niveau, possédant certaines informations relatives à la tâche ainsi qu'à son évolution, et capable en-ligne d'apporter une assistance symbolique à l'opérateur dans ses fonctions décisionnelles et de dialogue avec le calculateur.

III.2.1.a Commande supervisée

Parlant de la commande symbolique d'un système piloté à distance, on ne peut manquer de faire référence aux travaux de Thomas Sheridan et de son équipe du MIT. Leur approche, qualifiée de commande supervisée (supervisory control [Sheridan 67 et 69]) est motivée par l'existence de situations qui interdisent la mise en oeuvre dans de bonnes conditions d'une machine maître/esclave. Parmi celles-ci, citons les cas suivants:

- l'opérateur ne peut se consacrer totalement à la conduite du manipulateur, étant handicapé ou sollicité par ailleurs;
- la liaison maître/esclave est bruitée (fréquent dans le sous-marin où les signaux échangés passent généralement par un unique canal de communication);
- la distance de travail introduit des retards non négligeables.

Ce dernier point recouvre en particulier le pilotage d'un engin spatial depuis une station au sol. Avec des délais allant de 2,6 s dans une transmission terre-lune à 188 s pour mars, l'opérateur procède par phases successives de conduite en boucle ouverte, entrecoupées de périodes d'attente du retour sensoriel [Ferrel 65]. Face à ce type de problème, l'amélioration des performances du système conduit à doter l'engin d'intervention d'une autonomie limitée, réduisant ainsi la fréquence des échanges avec le poste

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

maître. De la sorte, l'action de l'homme revient à communiquer à la machine une suite de sous-buts qui seront automatiquement réalisés par les organes d'exécution situés à distance.

Structurellement, la solution adoptée consiste à répartir les fonctions de commande entre 2 calculateurs:

- un calculateur embarqué qui traite le retour d'information et assure la conduite du manipulateur dans le cadre d'un objectif restreint;
- un calculateur de supervision coopérant avec l'homme pour planifier le travail à court terme et contrôler l'évolution dans la tâche.

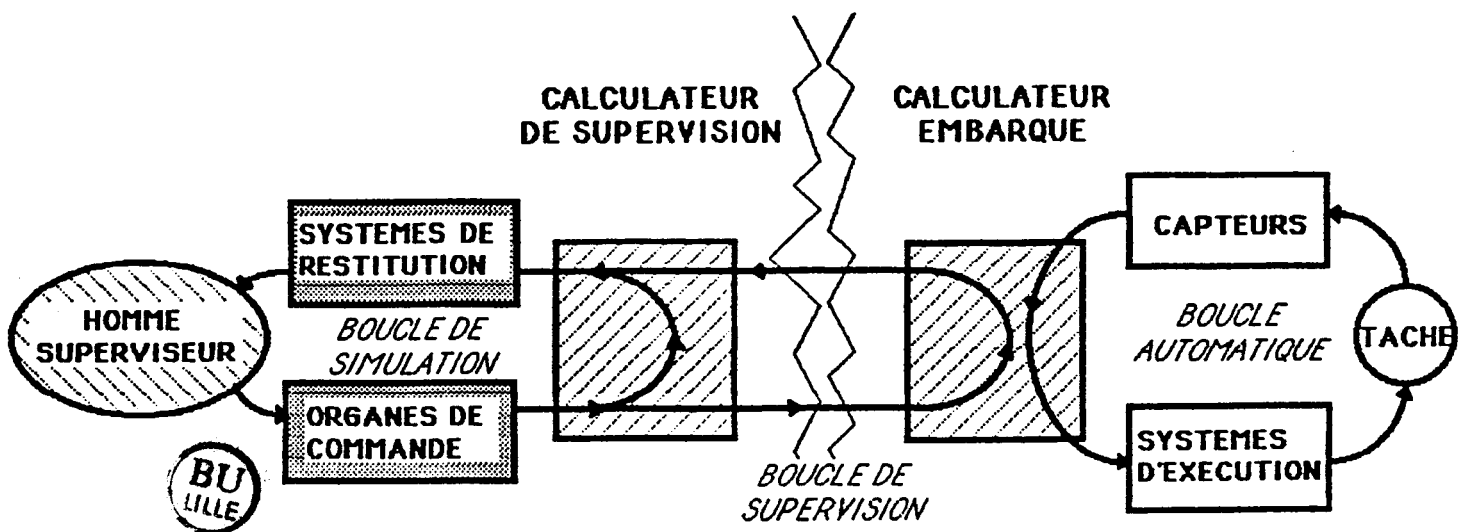


Figure III.3: Commande supervisée d'un système de téléopération

Comme le montre la figure III.3, le fonctionnement du système est fondé sur plusieurs boucles de commande associant l'opérateur et les 2 calculateurs:

- une boucle automatique responsable de la conduite locale et autonome du robot par le calculateur embarqué;
- une boucle de supervision affectée par les défauts de transmission et qui autorise la commande symbolique et la surveillance de l'engin depuis le poste maître;
- une boucle de simulation qui génère à destination de l'opérateur un pseudo-retour d'information, prédisant le comportement du système afin de compenser les effets de l'éloignement.

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Dégagé de toute participation physique à la commande, l'opérateur voit son rôle se transformer en celui d'un homme superviseur remplissant les fonctions suivantes:

- planification: analyse de la tâche et ordonnancement des sous-buts;
- apprentissage: initialisation du système embarqué et description des objectifs à atteindre;
- contrôle: traitement des comptes-rendus et du retour simulé;
- intervention: modification des consignes précédentes ou reprise manuelle (avec les problèmes que cela implique) pour débloquer le système.

III.2.1.b Approche TAO

A la différence de la commande supervisée exposée ci-dessus, notre approche n'a pas pour objectif d'éliminer l'homme des boucles analogiques d'un système maître/esclave. Elle cherche au contraire à assister un opérateur superviseur dans la conduite symbolique d'un système multifonctions intégrant:

- des organes téléopérés;
- un opérateur d'exécution qui génère des consignes analogiques en mode manuel ou semi-automatique et signale l'occurrence de toute situation "anormale".

Remarque: à ce stade, les termes d'opérateurs superviseur et d'exécution désignent des fonctionnalités humaines et non des opérateurs distincts.

Classiquement, un télémanipulateur se conçoit comme un outil qui prolonge la main de l'homme. Considérant l'objectif à atteindre, l'opérateur se définit librement une stratégie qu'il traduit dans l'univers de travail par l'intermédiaire d'une machine fonctionnant en mode exclusivement manuel.

Dans le contexte élargi de la téléopération, la nature multimachines du système opératif se manifeste au travers:

- d'une perception active exprimant la nécessité d'une recherche de l'information par le pilotage des dispositifs sensoriels et, plus

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

généralement, par des phases en-ligne de modélisation locale de l'environnement ou de recalage d'un modèle a priori avec l'univers réel;

- de la mobilité des organes d'exécution qu'il faut déplacer pour leur permettre d'accéder à l'ensemble de la zone de travail souvent géographiquement étendue.

Dans la réalisation d'une tâche, cet aspect multimachines implique un ordonnancement précis des actions relatives aux différents sous-systèmes. Par ailleurs, la conduite d'une machine de TAO multifonctions passe par la sélection:

- des modes de commande assistant l'opérateur d'exécution dans le pilotage des bras esclaves et des organes de péri-téléopération;
- des retours d'information (sensoriels ou modélisés) et de leurs modes de restitution (visuels ou kinesthésiques).

Au niveau symbolique, les caractères multimachines et multifonctions d'un système de TAO ont ainsi des conséquences importantes:

- L'existence de nombreux modes de commande oblige à déterminer une succession de comportements machine adaptée à la tâche, et à exprimer une stratégie en termes de fonctions exécutables par le système de conduite temps réel.
- L'intervention d'organes fonctionnellement différents conduit à intégrer dans cette stratégie des actions de configuration (orientation et réglage des caméras, déplacement porteur) destinées à mettre le système homme-machine en état de poursuivre le travail à distance.

Abordée de la sorte, la commande symbolique d'un téléopérateur présente un aspect décisionnel dans la planification du travail et le choix des assistances tactiques à utiliser, et un aspect communication dans la construction d'un dialogue entre l'homme et le calculateur.

L'aide apportée à l'opérateur au niveau analogique imposant une activité mentale supplémentaire, la conception d'un système coopératif se doit d'introduire des formes d'assistance stratégique facilitant la commande symbolique en-ligne. En toute généralité, les moyens d'une telle

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

assistance sont:

- la sélection et le traitement des informations pertinentes (modèles à priori, retours capteurs et comptes-rendus d'exécution);
- le filtrage des ordres opérateur.

Ils se traduisent par un dialogue structuré de haut niveau reposant sur les formes d'assistance symbolique suivantes:

- une assistance orientée système, fondée sur une connaissance du fonctionnement de la machine et rendant le téléopérateur plus convivial indépendamment du contexte tâche (le calculateur indique par exemple les modes de commande permis dans l'état courant de la machine);
- une assistance orientée tâche résultant d'une connaissance du travail à réaliser et destinée à:
 - développer l'autonomie décisionnelle du système qui, dans certains cas, détermine les assistances analogiques à apporter et contrôle l'évolution du travail;
 - aider à la prise de décision humaine en proposant par exemple un nombre limité de comportements machine appropriés à la situation rencontrée;
 - faciliter la communication en-ligne avec le calculateur en permettant un dialogue en des termes relatifs à la tâche plutôt qu'à des modes de commande peu significatifs.

III.2.1.c Architecture hiérarchisée

Cette deuxième forme d'assistance nous ramène à des problèmes de description et d'analyse de tâche évoqués dans le chapitre I. Parmi les différentes approches exposées, le concept de commande hiérarchisée avancé par James Albus [Albus 79] paraît le plus en rapport avec les préoccupations de la TAO. On s'orientera de la sorte vers une architecture interactive et multi-niveaux, tirant parti d'un "processeur humain" indispensable dans un environnement où l'occurrence de situations imprévisibles interdit une planification rigide exclusivement basée sur des modèles définis hors-ligne.

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

En commande hiérarchisée, une description de tâche de haut niveau est décomposée par étapes successives, jusqu'à obtenir une séquence d'instructions exécutables. Dans notre contexte coopératif où les informations sont partagées entre l'homme et la machine, une instruction exécutable se composera en général:

- de la spécification d'un comportement machine (tel que: "blocage de ddl sur un axe" avec "pilotage manuel des caméras" et "désactivation de l'anti-collision"),
- associé à un objectif local (qui pourrait être ici: "perçage d'un trou sur la pièce pointée par l'outil"), dont la connaissance permet à l'opérateur de jouer un rôle moteur en conduite manuelle et/ou de signaler tout incident susceptible de remettre en cause l'évolution prévue.

De façon générale, l'environnement de travail étant incomplètement modélisable, l'adaptativité de la machine de TAO nécessite la prise en compte dans l'analyse de tâche des informations sensorielles disponibles en-ligne et interprétées par l'homme ou le calculateur. L'architecture de conduite sera ainsi constituée de niveaux de commande faisant collaborer l'opérateur avec un système informatique capable de l'assister et parfois de le remplacer dans la décomposition d'une description de tâche élaborée aux échelons supérieurs. Ces niveaux sont caractérisés par:

- un type de description plus ou moins fine de la tâche (objectif, objet ou effecteur);
- des connaissances (modèle à priori, perception en-ligne et comptes-rendus d'exécution) attachées à la décomposition de la description fournie et partagées entre l'homme et la machine;
- des contraintes temporelles:
 - à quel moment dans l'évolution du travail les informations pertinentes sont-elles disponibles?
 - avec quelle urgence la réponse doit-elle être élaborée?

Chaque niveau de commande aura de la sorte à affiner la description qui lui est donnée, mais aussi à la compléter et éventuellement à en modifier certains éléments proposés par défaut. En cas de conflit avec le

niveau supérieur, une réponse valide pourra résulter:

- soit d'une procédure de recouvrement d'échec activée par ce dernier niveau;
- soit d'un fonctionnement dégradé où l'homme se substitue aux échelons les plus élevés.

Touchant à la mise en oeuvre de l'assistance symbolique, une première idée consiste à recourir à un générateur de plan interactif. Elle se heurte cependant à plusieurs inconvénients majeurs inhérents aux systèmes d'intelligence artificielle:

- des temps de traitement encore prohibitifs relativement à la phase de travail en-ligne;
- la nécessité d'un modèle de la tâche (environnement et procédés), difficilement satisfaite du fait de l'éloignement de l'espace de travail, de la présence d'un opérateur humain et de possibles évolutions accidentelles;
- un raisonnement de type système expert dont la compréhension est souvent malaisée pour un opérateur peu familier avec le fonctionnement d'un moteur d'inférence.

Pour y remédier, notre approche en TAO repose sur une architecture de commande à 3 niveaux (figure III.4):

- **planification** hors-ligne utilisant des techniques d'IA et donnant lieu à un plan d'action sommaire fondé sur des connaissances partielles disponibles à priori;
- **supervision** en-ligne qui permet à l'homme superviseur de compléter, d'amender et éventuellement de se substituer au plan, conduisant à la spécification des comportements machine;
- **exécution** chargé de la construction en temps réel des boucles analogiques traduisant les comportements demandés et incluant ou non l'opérateur d'exécution.

III.2.1.d Entités manipulées

Au niveau exécution, la description d'une tâche est ainsi attachée

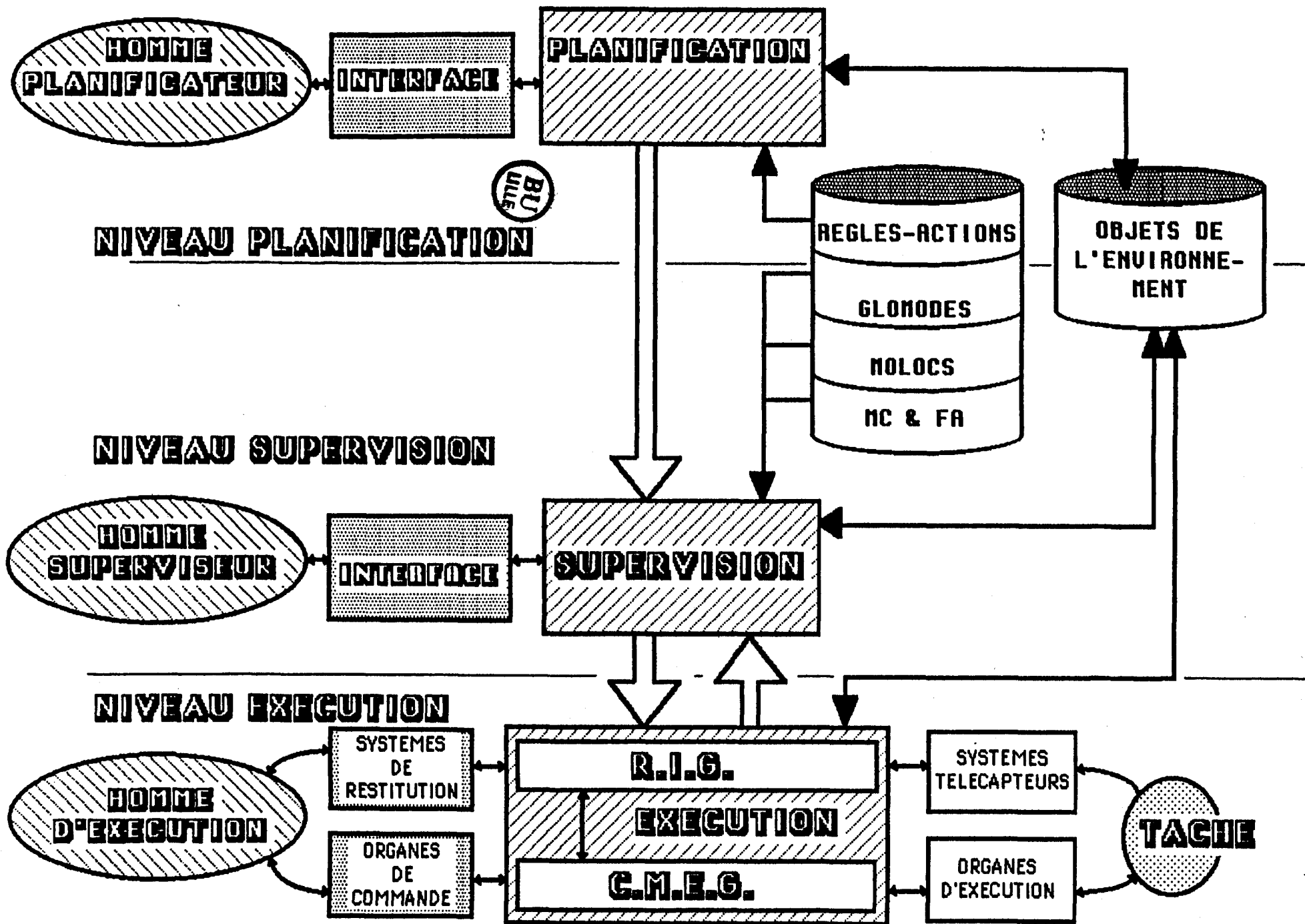


Figure III.4: Structure du système de commande

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

à une succession de comportements machine et d'objectifs locaux fixés à l'opérateur. Dans le but de préciser les entités manipulées par le niveau supervision, nous poserons les définitions suivantes:

- mode de commande: relation fondamentale entre plusieurs organes de la machine (ex: bras maître/esclave: mode manuel, modèle/bras esclave: mode automatique, bras maître et capteurs/bras esclave: mode assisté, bras maître/bras esclave/porteur: mode manuel avec synchronisation de l'esclave et de son porteur);
- fonction d'assistance: relation harmonique (ex: anti-collision, compensation de poids dans le retour d'effort, vision caméra 2D ou 3D, indicateurs de navigation) venant se greffer sur un mode ou une succession de modes de commande, sans modifier leur contribution à la réalisation de la tâche;

Remarque: la représentation interne d'un mode de commande ou d'une fonction d'assistance fait intervenir:

- un code opération spécifiant la fonctionnalité du mode ou de la fonction,
- suivi de paramètres qui précisent ou non cette fonctionnalité, et que nous qualifierons respectivement de paramètres de définition et de paramètres de réglage;

exemple 1:

code opération: blocage de ddl (mode de commande manuel);

paramètre de définition: ddl à bloquer;

paramètres de réglage: gain du retour d'effort, raideur des asservissements;

exemple 2:

code opération: anti-collision (fonction d'assistance);

paramètres de définition: volumes à éviter (par référence à une base CAO);

paramètres de réglage: distance de sécurité (éventuellement fonction de la vitesse instantanée du bras esclave), gain du retour d'effort synthétique (en pilotage manuel);

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- moloc (mode local): combinaison de modes de commande et d'ordres d'activation/désactivation de fonction d'assistance;
- glomode (mode global): enchaînement prédéfini de molocs et de consignes (contenu sémantique associé à chaque moloc) destinées à l'opérateur d'exécution, correspondant à la description générique d'une action exprimée de façon:
 - redondante en ce sens qu'elle permet un choix en-ligne entre plusieurs stratégies alternatives et explicite des procédures locales de reprise sur incident;
 - incomplète (tous les paramètres ne sont pas connus à priori, ni d'ailleurs la séquence qui sera effectivement suivie en phase d'exécution).

La démarche conduisant aux notions de description générique et de glomode repose sur le postulat selon lequel il est possible d'associer à des actions élémentaires de téléopération un assemblage de molocs indépendamment de tout contexte tâche particulier. Elle vise à simplifier la planification et à faciliter en-ligne un dialogue homme-calculateur de haut niveau. On considérera de la sorte la planification comme l'ordonnancement de glomodes instanciés par le contexte de réalisation d'une tâche donnée.

Dans ce contexte et afin de définir l'interface planification/supervision, nous limiterons la description des actions associées aux glomodes à la manipulation des objets et outils de l'environnement de travail (ex: saisir, déposer, déplacer, tronçonner, percer, ...). Vis-à-vis de la planification, cette frontière évite un niveau de détail qu'il serait fastidieux, voir impossible, de traiter à l'échelon le plus haut. Elle reste d'autre part dans le domaine de validité du postulat attaché à la notion de glomode.

	<u>PLANIFICATION</u>	<u>SUPERVISION</u>	<u>EXECUTION</u>
CONSIGNES D'ENTREE	DESCRIPTION DE TACHE AU NIVEAU OBJECTIF	SEQUENCES DE MOLOCS	- COMPOTEMENTS MACHINE - OBJECTIFS LOCAUX FIXES A L'OPERATEUR
ROLE	ORDONNANCEMENT EN ACTIONS DE NIVEAU OBJET	- ENCHAINEMENT DE COMPORTEMENTS MACHINE - CONTENU SEMANTIQUE	- GENERATION DE CONSIGNES DANS L'ESPACE OPERATIONNEL DES SYSTEMES ESCLAVES - TRAITEMENT DU RETOUR D'INFORMATION
CONNAISSANCES ASSOCIEES	- MODELE GLOBAL DE L'ENVIRONNEMENT - BASE DE REGLES-ACTIONS	- MODELE DES OBJETS DE L'ENVIRONNEMENT - CATALOGUES: GLOMODES, MOLOCS, MODES DE COMMANDE ET FONCTIONS D'ASSISTANCE	- MODELES CINEMATiques DES SYSTEMES ESCLAVES - RETOURS CAPTEURS - BASE DE DONNEES ENVIRONNEMENT
CONTRAINTES TEMPORELLES	COMPATIBLES AVEC TECHNIQUES D'IA (FONCTIONNEMENT HORS-LIGNE)	FONCTIONNEMENT EN-LIGNE, REPONSES IMMEDIATES A L'ECHELLE HUMAINE	PERIODE D'ECHANTILLONNAGE (10-15 ms)
DIALOGUE HOMME-MACHINE	PROCHE DU LANGAGE NATUREL (EXPRESSIVITE)	DIALOGUE STRUCTURE EN TERMES RELATIFS A LA TACHE: - MENUS - ECRAN GRAPHIQUE - DISPOSITIFS DE POINTAGE	- LANGAGE GESTUEL - RESTITUTION KINESTHESIQUE ET VISUELLE DES INFORMATIONS
FONCTIONS INTERNES	- DEFINITION INTERACTIVE DU BUT A ATTEINDRE - PLANIFICATION A PRIORI - ANALYSE DU PLAN	- TRADUCTION DU PLAN EN TERMES DE MOLOCS PLANIFIES - EDITION/INTERPRETATION DE MOLOCS NON PLANIFIES - REGLAGE DE PARAMETRES	- MISE EN OEUVRE DES BOUCLES PERCEPTION-ACTION - SURVEILLANCE DE LA PROGRESSION DANS LE TRAVAIL

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Tableau III.4: Caractéristiques des niveaux exécution/supervision/planification

III.2.2 NIVEAUX DE COMMANDE

L'architecture de commande proposée ci-dessus est fondée sur les 3 niveaux: exécution, supervision et planification (tableau III.4). Dans le cadre d'un hypothétique fonctionnement totalement automatique, ceux-ci s'identifient aux niveaux effecteur, objet et objectif des robots de substitution. En fonctionnement normal, ils s'en distinguent par l'intervention d'un opérateur humain qui participe en-ligne:

- à la génération des trajectoires;
- aux fonctions de supervision;

Chaque niveau se conçoit comme un système de commande à part entière, constitué d'un opérateur (en tant qu'entité fonctionnelle) et d'une structure informatique. Il traite une description de tâche à la lumière des informations partagées entre l'homme et le calculateur, et génère une description de plus bas niveau dont la connaissance peut, à l'échelon inférieur, faire elle aussi l'objet d'un partage.

Après avoir défini globalement l'architecture de notre système de commande, nous allons maintenant décrire le niveau exécution et développer les problèmes attachés aux niveaux supervision et planification.

III.2.2.a Niveau exécution

Le niveau exécution est chargé de la commande maître/esclave et du retour d'information généralisés. Le calculateur y gère la relation maître/esclave en affectant à chaque variable de configuration de l'espace fonctionnel d'un système esclave, un des générateurs de commande suivants [André-Fournier 85]:

- opérateur humain qui délivre des consignes analogiques via un organe de commande (bras maître, syntaxeur manuel, boîte à boutons, etc.);
- capteurs (essentiellement proximétriques);
- module programmé ou base de données CAO (trajectoires modélisées et contraintes géométriques en position ou en force);

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- autre système esclave (synchronisation manipulateur/caméra ou manipulateur/porteur).

Il autorise d'autre part la restitution des informations délivrées par les systèmes de perception (position, effort, proximétrie, vision) ou par une base de données environnement, sous une forme pertinente (kinesthésique ou visuelle) en regard de la tâche locale à réaliser.

Pour l'opérateur humain, ceci se traduit par la possibilité de comportements machine qui incluent une large famille de modes élémentaires, de la commande entièrement manuelle à la commande entièrement automatique. A ces modes élémentaires correspondent des boucles perception-action que l'on classe en (cf. III.1.2 et figure III.2):

- boucles manuelles;
- boucles semi-automatiques: hybrides ou réflexes;
- boucles automatiques.

En pratique, un mode de commande peut résulter d'une combinaison de boucles fondamentales; ainsi le mode BDDL assure à la fois:

- un blocage de certains ddl du manipulateur esclave (boucle hybride);
- un retour d'effort synthétique sur le maître, nécessaire à la coordination des 2 bras (boucle réflexe).

Par ailleurs, un comportement machine global fait généralement intervenir plusieurs modes de commande tels que: bras esclave en mode bilatéral (avec bras maître), caméra 1 suiveuse (de l'effecteur esclave), caméra 2 pilotée manuellement (par joysticks). Vis-à-vis du niveau exécution, cet aspect commande coopérative multi-systèmes a une double conséquence:

- le recours fréquent à 2 opérateurs, responsables, l'un du pilotage des bras dextres, l'autre de la conduite des systèmes de péri-téléopération (porteurs, caméras, ...);
- une architecture informatique modulaire et distribuée, capable d'associer souplement les divers organes de la machine, compte-tenu des conflits possibles dans leur allocation aux modes de commande demandés (figure III.5 [Fournier 86]).

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

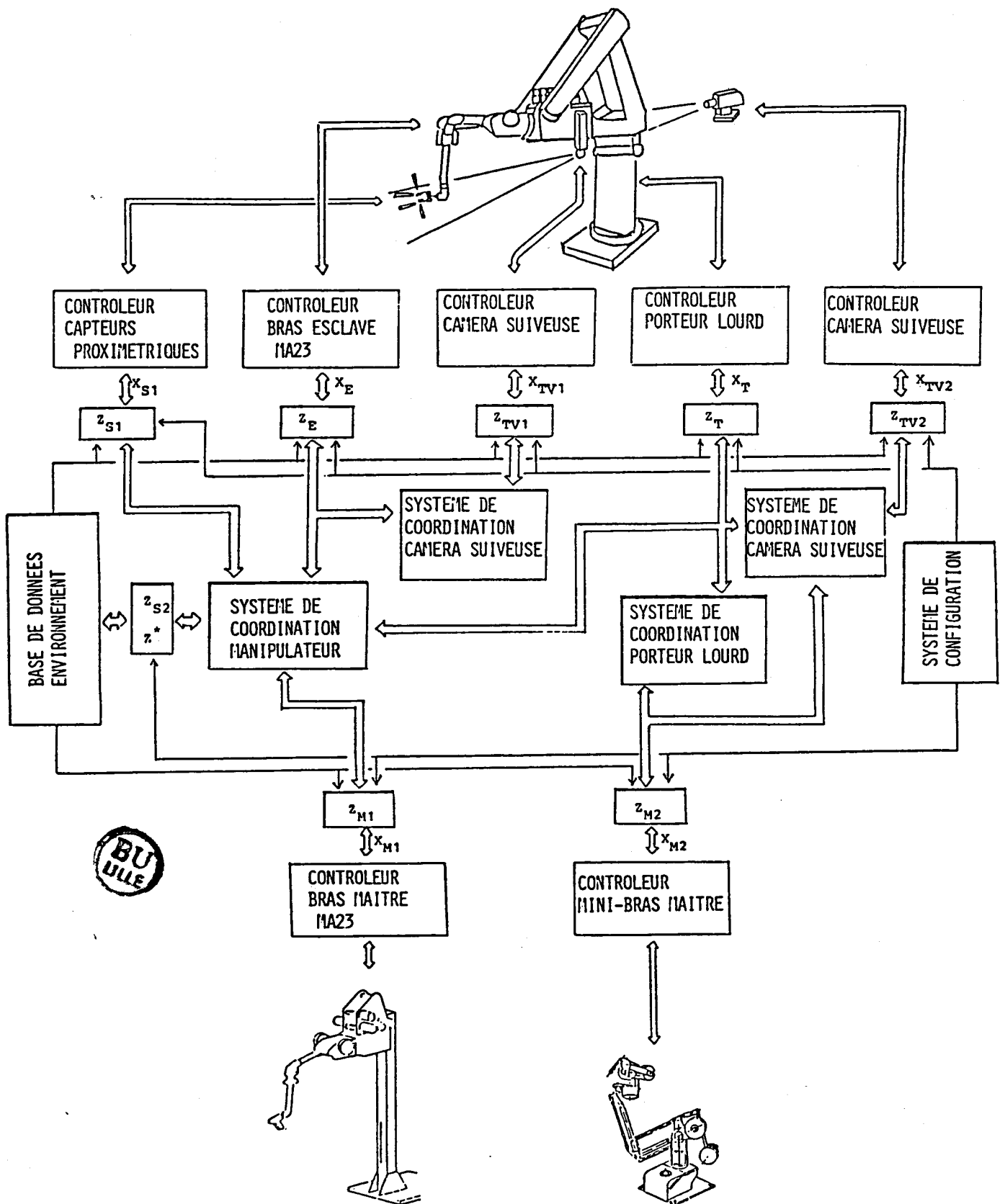


FIGURE III.5: EXEMPLE DE CONFIGURATION DU SYSTEME DE COMMANDE MAITRE/ESCLAVE GENERALISEE

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Dans ce contexte, le rôle de l'opérateur d'exécution consiste en:

- une contribution physique à la génération des trajectoires en mode manuel ou semi-automatique;
- la surveillance de la progression dans le travail.

Touchant au premier point, outre une éventuelle autonomie du système esclave, l'assistance apportée à l'homme réside dans:

- le partage de la commande avec le calculateur;
- le traitement des informations disponibles en rapport avec le but local à atteindre (retour d'effort synthétique, indicateurs graphiques).

Relativement à la surveillance de l'évolution dans le travail, 2 types d'évènement doivent impérativement être signalés par le niveau exécution et donner lieu à un compte-rendu destiné au niveau superviseur:

- l'arrêt normal d'un mode à la réalisation du but qui lui est attaché; cet évènement est généré:
 - automatiquement si l'objectif local est connu du calculateur (ex: DEPLACEMENT AUTO POSITIONI --> fin de mode sur fin de tâche);
 - par l'opérateur dans le cas contraire (ex: BDDL --> fin de mode sur arrêt opérateur);
- une interruption sur incident qui peut résulter:
 - d'une détection automatique à la vérification d'une condition prédéfinie (ex: collision au cours d'un DEPLACEMENT AUTO --> interruption sur butée en effort);
 - d'une intervention humaine (interruption opérateur).

Cette fonction de contrôle nous amène à distinguer:

- les organes dextres et leurs porteurs qui participent directement à la réalisation de la tâche et demande une surveillance étroite; on leur associe une interface de contrôle permettant à l'opérateur:
 - de signaler un arrêt dans le cadre d'une évolution normale ou une interruption sur incident;
 - d'être informé des évènements générés par le calculateur;
- les organes annexes qui ont essentiellement un rôle sensoriel et d'assistance, et dont la surveillance est assurée depuis le niveau

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

supervision.

III.2.2.b Niveau supervision

Au sein de l'architecture de commande, la supervision se définit comme la détermination en-ligne d'enchaînements cohérents de comportements machine, exprimés en termes de modes de commande et de fonctions d'assistance. Dans ce processus, le calculateur prend en compte:

- des contraintes tâche spécifiées au travers d'un plan a priori;
- des ordres opérateur;
- des comptes-rendus et des alarmes issus du niveau exécution.

Il dispose de connaissances relatives à l'état de la machine et aux objets de l'environnement, connaissances qu'il aura à actualiser en rapport avec la progression dans la tâche. On lui associe par ailleurs des catalogues de glomodes, molocs, modes de commande et fonctions d'assistance, grâce auxquels il pourra dialoguer avec l'homme et interpréter les ordres ainsi que les informations qui lui sont donnés.

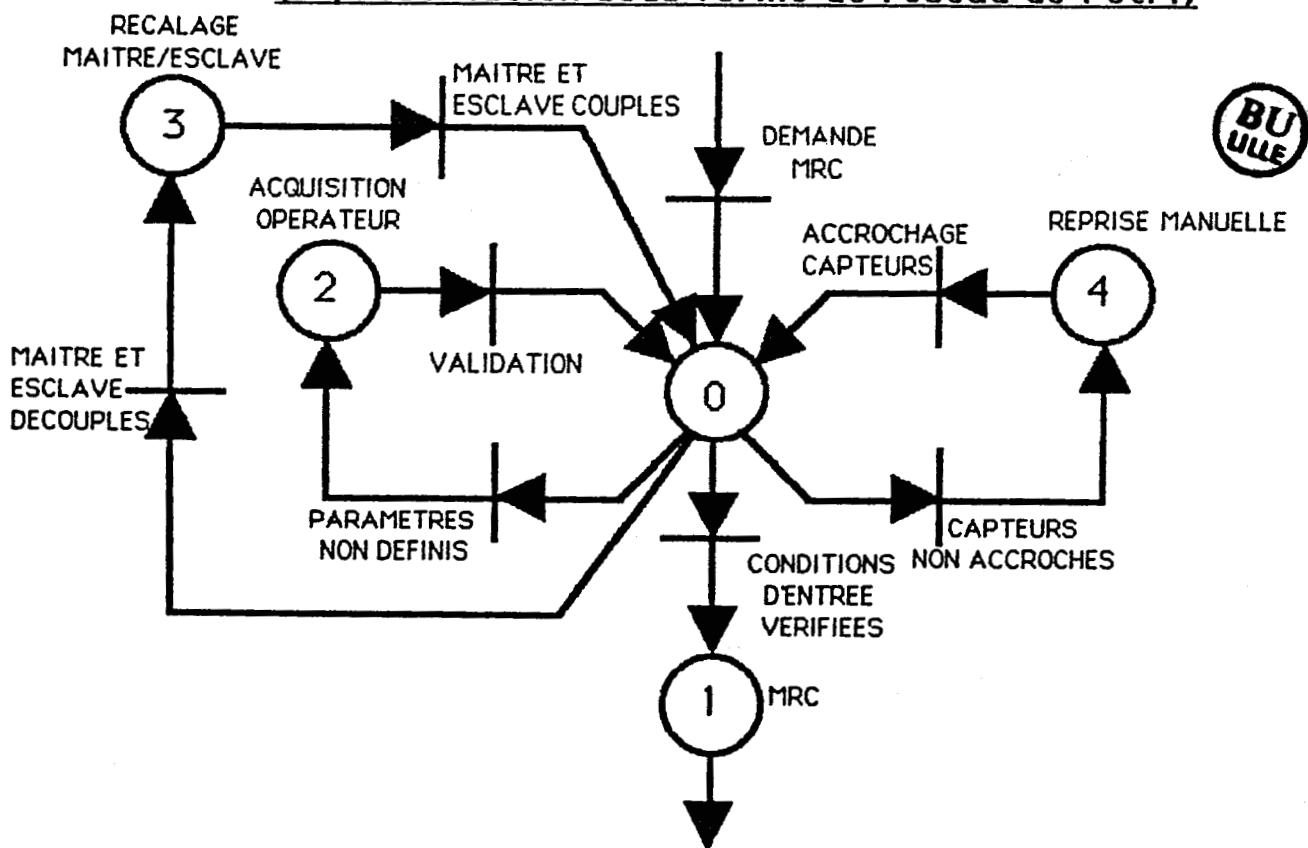
Vues de l'opérateur, les fonctions affectées au système superviseur sont:

- (1) assurer une analyse locale de la tâche et, partant de la donnée d'un glomode, élaborer interactivement une séquence de molocs exécutables contribuant à la réalisation de l'action désirée;
- (2) contrôler l'évolution dans les enchaînements et traiter les événements "anormaux" détectés par l'opérateur d'exécution ou les dispositifs de perception;
- (3) informer l'homme du contenu sémantique des enchaînements mis en oeuvre, afin de lui permettre de remplir au mieux ses rôles sensoriels, décisionnels ou moteurs;
- (4) assister l'opérateur de supervision par le traitement des informations restituées, le filtrage des ordres et, plus généralement, par la construction d'un dialogue symbolique efficace en regard des impératifs de la communication en-ligne (rapidité et sûreté des échanges);

(5) offrir une bonne interactivité donnant à l'homme les moyens de débloquer la machine de TAO dans les situations où le calculateur ne sait pas répondre.

Remarquons que les points (4) et (5) sont contradictoires et qu'un système de supervision gagnera à proposer différents degrés dans l'assistance symbolique, autorisant ainsi l'homme à choisir une aide décisionnelle plus ou moins poussée selon les caractéristiques de la tâche.

Figure III.6: Phases de configuration attachées à la mise en oeuvre d'un mode bilatéral référencé capteurs (MRC) (représentation sous forme de réseau de Petri)



ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Concernant le point (2), l'exécution correcte d'un enchaînement suppose la réalisation des conditions d'entrée dans chacun des molocs qui le constituent. Ces conditions sont relatives:

- à la disponibilité de certaines ressources de la machine susceptibles de se trouver provisoirement ou définitivement inutilisables (par exemple, un mode référencé capteurs ne peut être lancé si les proximètres sont masqués ou défaillants);
- à l'état logique des relations établies entre les différents organes, qui devra être compatible avec les boucles de commande demandées (par exemple, un mode bilatéral implique un recalage du maître sur l'esclave si les 2 bras sont initialement découplés);
- à des paramètres dont l'acquisition pourra donner lieu à un dialogue avec l'opérateur ou à des actions d'apprentissage.

L'accomplissement d'une sous-tâche de TAO réclame ainsi un enchaînement précis des molocs impliqués dans l'interprétation du plan et d'actions de configuration faisant elles-mêmes intervenir des séquences de molocs. A titre d'exemple, la figure III.6 illustre ce problème dans le cas d'un simple mode référencé capteurs. De manière générale, la nécessité d'une action de configuration peut ne pas être perçue par le générateur de plan:

- soit parce qu'elle n'apparaît qu'en-ligne (comme au cours d'une reprise locale sur incident);
- soit parce que cela suppose une planification trop détaillée.

Un rôle majeur du système superviseur est donc d'assurer autant que possible automatiquement la gestion des glomodes de configuration.

L'étude du niveau supervision sera reprise et développée dans la 3e partie de ce chapitre, aussi nous nous limiterons pour l'instant aux considérations de base qui viennent d'être exposées.

III.2.2.c Niveau planification

Le niveau planification est le niveau supérieur de notre architecture de commande. Il génère un plan a priori fondé sur un ensemble de connaissances modélisées et contribue à la conduite coopérative de la

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

machine de TAO:

- en apportant une assistance décisionnelle à l'opérateur de supervision, au travers d'une stratégie prédéfinie;
- en facilitant le dialogue homme/calculateur en phase de travail, que le système superviseur pourra construire sur le plan qui lui est fourni.

Dans le cadre que nous nous sommes fixés, cette contribution inclut:

- le choix des organes opératifs à utiliser, compte-tenu des contraintes tâche;
- l'ordonnancement des actions (glomodes) à faire exécuter par ces organes;
- la gestion des paramètres environnement et procédés;
- la spécification de la liberté d'action en-ligne de l'opérateur.

De la sorte, un plan répondant au but: percer à la position POS un trou TROU, de diamètre D, profondeur H, sera par exemple:

- SAISIR MA23 PERCEUSE1 (POS-RANGMT-PERCEUSE1)
/ validation automatique;
- PERCER MA23 TROU (POS, H, FORCE-APPUI)
/ validation opérateur;
FORCE-APPUI donnée en-ligne par l'opérateur.

Le noyau du niveau planification est un générateur de plan capable de résoudre des problèmes pour lesquels il ne possède pas de solution déjà prête. Il présente une structure de type système expert caractérisée par la séparation des bases de connaissances et du moteur d'inférence qui les manipule. La plupart des générateurs de plan sont dérivés de STRIPS conçu au début des années 70 par Fikes et Nilsson [Fikes-Nilsson 71, Nilsson 80]. Les connaissances qui leur sont attachées se partagent au sein:

- d'une mémoire de travail où sont modélisés les états successifs de l'univers de la machine (base de faits), sous formes de prédicats du 1er ordre, de réseaux sémantiques ou d'objets;
- d'un modèle des actions que peut entreprendre le système (mémoire de production), exprimées en termes de règles décrites par:
 - une liste de préconditions: ensemble des faits devant être vérifiés pour pouvoir appliquer la règle;
 - des listes d'ajout et de retrait: ensemble des faits

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

respectivement créés et détruits suite à l'application de la règle.

Dans la planification d'une tâche, ces connaissances sont utilisées par un interpréteur de règles (ou moteur d'inférence) qui recherche une séquence d'actions transformant un état initial donné de l'univers en un autre état vérifiant le but fixé.

Un plan ayant été produit, sa réalisation suppose le traitement des erreurs qui peuvent résulter d'imprécisions dans la modélisation de l'environnement, d'évolutions inattendues ou de défaillances affectant les organes de la machine. La progression dans le plan doit ainsi faire l'objet d'un contrôle en-ligne visant à:

- détecter pour chaque étape, toute différence significative entre l'état réel de l'univers et son état prévu, déduit du modèle initial et des actions précédemment exécutées;
- décider des actions correctrices à mener, parmi lesquelles on distinguera des procédures locales de recouvrement d'erreur et des phases de replanification; par exemple, dans l'étape SAISIR MA23 PERCEUSE, une inexactitude sur la position de l'outil donnera lieu à une reprise manuelle, alors qu'un fonctionnement défectueux du manipulateur oblige à revoir la stratégie globale.

Dans ce domaine, si la replanification reste du ressort d'un générateur de plan (méthode des tables triangulaires de STRIPS [Fikes-Nilsson 72]), les autres fonctions de contrôle nécessitent un moniteur d'exécution associé à des systèmes de perception [Ghallab 84, Picardat 86].

Relativement à l'intégration d'un générateur de plan dans la structure de commande d'un système TAO, les principaux obstacles à surmonter sont les suivants:

- des temps de réponse non négligeables;
- la complexité des environnements de travail et des procédés employés qui requiert des dispositifs sensoriels puissants et un effort intensif de modélisation;
- le dialogue homme/IA.

A l'heure actuelle et pour des cas simples, certaines techniques permettent

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

de remédier à ces inconvénients; citons essentiellement:

- la compilation des règles [Ghallab-Dufresne 84] qui améliore sensiblement la rapidité des processus de recherche dans la mémoire de production;
- le recours à des systèmes sophistiqués d'acquisition et de traitement de l'information (télémétrie laser, interprétation d'images 3D, ...) qui donnent à la machine les moyens de participer activement à la modélisation de son environnement (exemple du robot mobile HILARE [Chatila-Laumond 85]);
- la compréhension du langage naturel [Evrard 84].

Elles s'accompagnent cependant de coûts de développement et de mise en oeuvre parfois jugés excessifs en regard de leur contribution à la commande. Profitant de la présence en-ligne d'un opérateur humain, nous préférons de la sorte nous orienter vers une approche coopérative capable de répondre efficacement à une vaste gamme de problèmes. Touchant au niveau planification, notre démarche se définit par:

- un fonctionnement hors-ligne;
- un contrôle d'exécution assuré interactivement au niveau supervision;
- des possibilités de replanification par l'opérateur qui se substitue alors au générateur de plan.

III.2.3 COOPERATION HOMME-MACHINE ET MODES DE FONCTIONNEMENT

Avec le système de commande tel qu'il a été présenté jusqu'ici, le rôle en-ligne de l'homme pourrait apparaître comme celui d'une simple ressource de la machine de TAO. Partant d'une planification a priori et suivant l'évolution dans la tâche, le calculateur pose en effet les règles de la coopération homme-machine et sollicite l'opérateur en lui laissant une liberté d'action limitée. Sur le plan de l'assistance, cette stratégie d'allocation des responsabilités correspond à un fonctionnement nominal du système informatique qui:

- propose à l'homme superviseur un ensemble d'options jugées pertinentes vis-à-vis du travail à accomplir;
- offre à l'homme d'exécution des enchaînements de comportements machine appropriés à la réalisation d'objectifs locaux fixés par le niveau supérieur.

Pratiquement, ce mode de fonctionnement n'est pas toujours possible, ni même souhaitable, en raison:

- de la nature souvent non déterministe des tâches rencontrées;
- de la participation à la commande d'un opérateur d'exécution incomplètement modélisable.

Ne prévoir qu'un fonctionnement nominal risque ainsi de conduire à une structure de commande dirigiste, susceptible d'imposer à l'homme des choix inadéquats en regard de la tâche ou de divers facteurs humains. Au contraire, une certaine souplesse s'avère indispensable dans le partage du travail, le système informatique devant à la fois apporter une assistance puissante à l'opérateur et lui permettre la liberté d'action nécessaire pour débloquer la machine dans les situations auxquelles le calculateur ne sait pas répondre.

III.2.3.a Problématique de l'assistance

En toute généralité, l'assistance qu'un système de TAO est à même de proposer à l'opérateur peut se décomposer en 3 classes:

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- l'assistance analogique qui vise à surmonter des problèmes de dextérité ou de perception spécifiques des procédés utilisés, de manière à assurer une réalisation plus sûre et plus efficace du travail;
- l'assistance symbolique orientée système qui se conçoit comme un mode d'emploi dynamique de la machine, précisant la disponibilité des ressources et interdisant les enchaînements dangereux pour l'homme ou la mécanique (tels que le recouplage brutal des bras maître et esclave au passage d'une phase automatique à une phase manuelle); ainsi, l'opérateur ayant demandé un mode bilatéral, il lui sera indiqué par exemple que le bras maître est présentement attribué au pilotage d'un véhicule et qu'un recalage devra être effectué suite à la libération de la ressource;
- l'assistance symbolique orientée tâche qui seconde l'homme dans ses fonctions décisionnelles et de dialogue, relativement à la détermination des molocs à mettre en oeuvre dans l'exécution d'un travail donné.

On remarquera que l'assistance orientée système ne dépend que de l'état interne de la machine et de règles de fonctionnement définies une fois pour toutes. Elle offre donc une aide pertinente quel que soit le contexte où elle intervient.

Face à la non répétitivité des tâches de téléopération, une réflexion sommaire montre qu'aux autres formes d'assistance est attaché un coût non négligeable dont il importe de tenir compte pour évaluer la rentabilité de l'aide fournie. Un tel coût s'exprime en termes:

- de moyens informatiques et sensoriels (générateur de plan, capteurs évolués, modules espions, ...);
- de temps de préparation et d'exécution (modélisation de l'environnement, phases de perception active et d'apprentissage, ...);
- de performance humaine, au travers d'une charge de travail parfois plus importante (communication homme-calculateur, ...) et d'une liberté d'action réduite pouvant entraîner une démotivation;
- de risques vis-à-vis de la tâche, l'aide symbolique étant susceptible

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

de gêner l'opérateur dans le traitement d'événements imprévus, parmi lesquels on retiendra les incidents dûs à des erreurs de modélisation. L'efficacité d'une machine de TAO est ainsi liée à la pertinence des assistances qu'elle offre, fonction de leur contribution à la commande et de leur coût dans le contexte tâche et humain considéré. Il serait par exemple totalement aberrant de fournir un effort intensif de planification dans le seul but de réaliser une tâche triviale. On admettra par ailleurs qu'un opérateur de formation classique se sentira mieux à son aise en recourant à des modes manuels ou assistés plutôt qu'à des modes automatiques qu'il maîtriserait mal.

Que l'on se place au niveau analogique ou symbolique, un partage équilibré de la commande entre l'homme et le calculateur repose sur des critères de rentabilité difficiles à enfermer sous une forme algorithmique ou experte. Dans un premier temps, on s'efforcera autant que possible de proposer pour chaque action de TAO des stratégies alternatives de caractère:

- automatique, fondées sur une description fournie par l'opérateur ou élaborée par la machine à partir de ses bases de connaissance et des informations capteurs;
- manuel, sollicitant l'homme pour éviter des problèmes de modélisation, d'interprétation du retour sensoriel ou de dialogue avec le calculateur;
- manuel avec apprentissage, qui permettent par la suite de ré-exécuter la même action sans intervention humaine.

Plus généralement, ces observations mettent l'accent sur le besoin d'un système flexible et ouvert autorisant l'opérateur à se substituer à des niveaux de commande défaillants ou ponctuellement inefficaces et à dialoguer librement avec la machine à l'échelon qui lui convient le mieux. Outre un fonctionnement nominal donnant une assistance informatique poussée, la nécessaire souplesse dans le partage du travail impose des possibilités de fonctionnement dégradé, parfois plus adaptées en regard des aptitudes respectives de l'homme et du calculateur. Selon le degré d'assistance symbolique demandé, nous établirons la hiérarchie suivante:

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- mode de fonctionnement nominal: suite à une planification préalable du travail, l'intervention en-ligne de l'homme est exclusivement suscitée par le calculateur;
- mode de fonctionnement dégradé de niveau glomode: l'homme se substitue au générateur de plan et garde l'initiative du dialogue avec le calculateur pour lancer les actions (glomodes) qui traduisent la stratégie d'ensemble qu'il s'est fixé; les enchaînements de molocs correspondants sont ensuite déterminés interactivement par le module superviseur;
- mode de fonctionnement dégradé de niveau moloc: l'homme dispose d'une entière liberté d'action pour commander la machine de TAO, ne recevant en contrepartie qu'une assistance orientée système (dialogue en termes de comportements machine).

III.2.3.b Structure coopérative et structure ouverte

Considérant la nature multimachines d'un système de TAO, les problèmes liés à l'assistance nous amènent à distinguer:

- les organes d'exécution (bras dextre et ses porteurs, outils, ...) qui participent directement à la réalisation de la tâche et dont les comportements peuvent être déduits d'une description fine du travail;
- les organes annexes (caméras, dispositifs de restitution, ...) essentiellement destinés à informer ou à assister l'homme et qui sont commandés en tenant compte de critères impossibles à faire évaluer par le calculateur (éclairage, champ de vision, ombres, reflets, confort opérateur, etc.).

La conduite globale de la machine devant ainsi répondre à des impératifs peu compatibles, notre architecture de commande symbolique intègre:

- une structure coopérative où l'analyse de la tâche et des incidents les plus probables, alliée à des contraintes (objectifs locaux) imposées à l'opérateur d'exécution, donne au sous-système piloté un caractère quasi-déterministe qui autorise une planification (au sens large)

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

conduisant au choix de molocs raisonnablement pertinents vis-à-vis du travail à accomplir;

- une structure ouverte, associée à un sous-système sensible à des facteurs humains non mesurables ou à des aléas imprévisibles, qui privilégie la liberté d'action de l'homme dans la définition en-ligne des assistances analogiques appropriées.

La première se compose du niveau planification et du module de supervision relatif à l'interprétation des glomodes; la deuxième, d'un autre module de supervision que nous qualifierons d'éditeur/interpréteur de molocs.

En phase d'exécution, ces 2 structures contribuent à la commande de la machine de TAO d'une manière tout à fait complémentaire que l'on caractérisera comme suit:

- structure coopérative:
 - fonctionnement nominal ou dégradé de niveau glomode;
 - assistance symbolique orientée tâche qui aide à la prise de décision humaine et facilite le dialogue homme-calculateur, mais s'avère parfois néfaste dans les situations que la machine est incapable d'analyser au moins partiellement;
 - séquençement unique des molocs touchant aux organes du sous-système piloté, fonction d'événements externes qui traduisent la progression dans la tâche (la commande parallèle de plusieurs manipulateurs n'est pas traitée ici);
- structure ouverte:
 - fonctionnement dégradé de niveau moloc;
 - assistance orientée système impliquant une aide symbolique limitée;
 - maîtrise totale de l'opérateur sur les comportements de chacun des éléments commandés qui évoluent selon un séquençement propre.

Confronté à une tâche de téléopération, on affectera la conduite symbolique des organes de la machine en considérant leur participation au travail ainsi que les possibilités d'assistance offertes par le système

informatique. Pratiquement, cette répartition respectera le plus souvent la distinction que nous avons établie entre organes d'exécution et organes annexes. Dans ce contexte, si la planification a priori se révèle inadaptée à la situation observée, l'opérateur aura la liberté d'ignorer le plan et de faire basculer la structure coopérative en mode dégradé de niveau glomode, ou même de ré-allouer la commande des organes d'exécution à la structure ouverte, le superviseur se réduisant alors à une simple interface symbolique. A l'inverse, chaque fois que le comportement d'un organe annexe pourra être mis en relation avec une étape précise de la stratégie d'exécution (indicateurs graphiques de navigation, par exemple), on envisagera d'en assurer la conduite à l'échelon des glomodes et/ou de la planification.

Avec ce type d'approche, la co-existence de 2 structures de commande oblige à se préoccuper des points suivants:

- les conflits de ressource entre des molocs d'origine différente;
- l'aggrégation de molocs partiels concourant à la spécification du comportement global de la machine de TAO;
- les problèmes de passage d'un mode de fonctionnement à un autre, la transition vers un mode moins dégradé supposant en particulier:
 - soit la vérification de conditions de reprise du plan ou du glomode interrompu;
 - soit une ré-initialisation des niveaux ou des modules de commande activés.

III.3 SUPERVISION

Au sein de l'architecture de commande proposée, le rôle du système de supervision est d'aider l'opérateur dans la définition et la mise en oeuvre des comportements machine appropriés à la réalisation téléopérée d'une tâche. Ce rôle présente un double aspect:

- décisionnel, relativement à la détermination d'enchaînements valides au sens de la machine et de l'évolution du travail (assistance orientée système et assistance orientée tâche);
- interactif, au travers de la construction d'un dialogue symbolique donnant à l'homme les moyens d'intervenir en-ligne pour décrire un plan d'action, orienter une stratégie, lancer un mode de commande ou une fonction d'assistance, et modifier des paramètres de réglage.

Afin d'apporter l'aide attendue, le système de supervision dispose de connaissances tâche distribuées au niveau du plan et de la base de données environnement, ainsi que dans le catalogue de glomodes qui lui est attaché. Nous commencerons ainsi cette partie en développant la notion de glomode, étude que nous ferons suivre d'une description fonctionnelle du superviseur. L'exemple d'une opération de perçage illustrera enfin le processus de la commande symbolique d'une machine de TAO dans les phases de préparation et d'exécution.

III.3.1 GLOMODES

En fonctionnement nominal, alors que le niveau planification génère hors-ligne un plan d'action déterministe, le système de supervision est chargé en-ligne d'assister l'opérateur dans le traitement de problèmes locaux, fréquemment rencontrés mais imprévisibles, qu'il s'agira essentiellement d'identifier et parfois de préciser, leur solution étant connue au préalable. Cette approche repose sur l'idée qu'une action élémentaire (vis-à-vis du plan) peut être représentée sous forme d'un glomode, c'est à dire d'un enchaînement de molocs à caractère:

- générique: défini a priori en dehors de tout contexte tâche particulier;

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- redondant: offrant des stratégies variées qui permettent:
 - d'effectuer un même travail dans divers environnements plus ou moins bien modélisés;
 - de répondre aux incidents d'exécution les plus probables;
- incomplet, le glomode étant ensuite instancié dans le cadre d'une tâche spécifique, par la donnée de certains paramètres et la sélection interactive d'une unique séquence de modes maître/esclave généralisés.

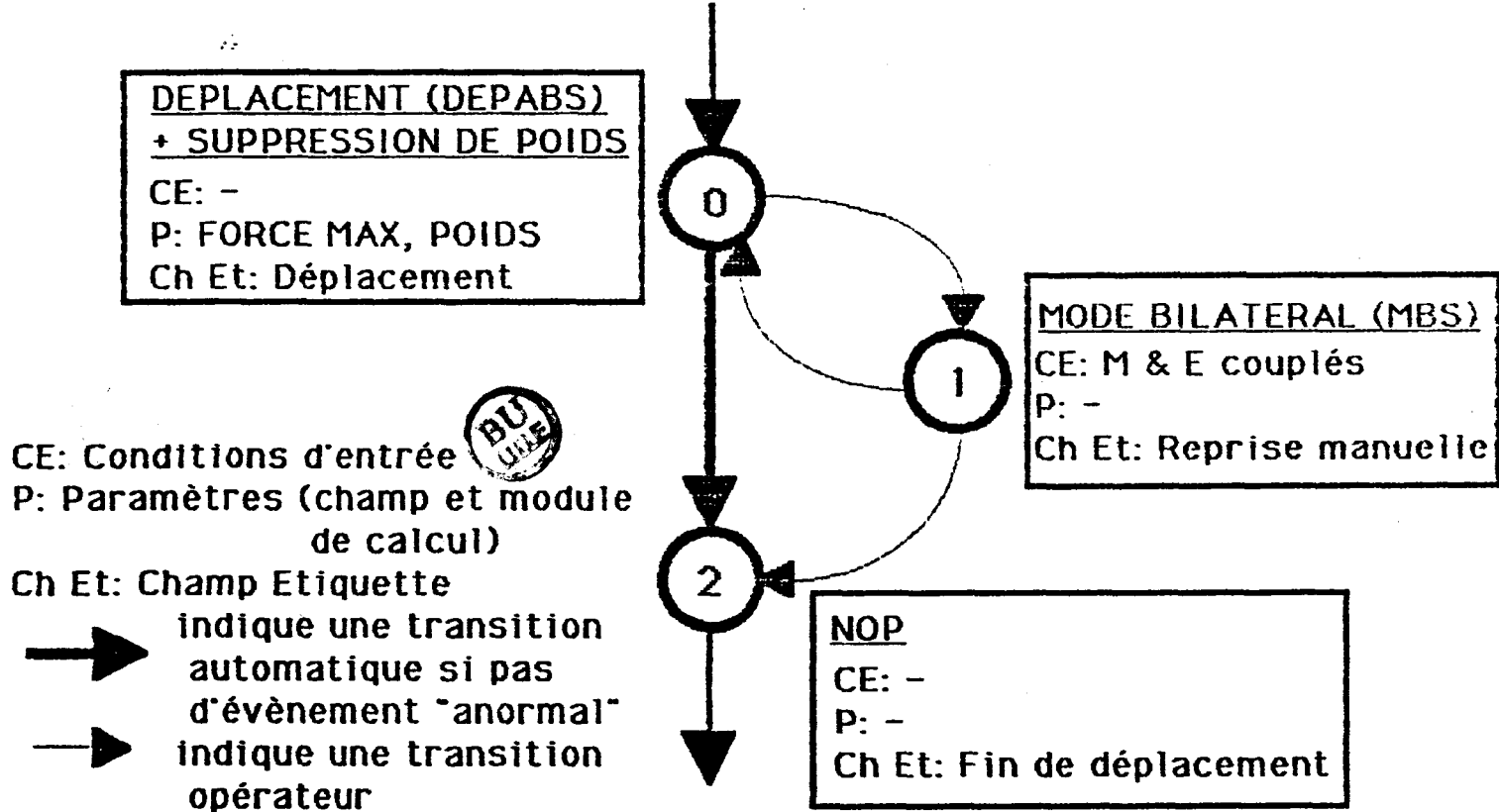
A l'échelon du système de commande et de l'assistance opérateur, les objectifs poursuivis sont:

- faciliter le travail du niveau supérieur en lui évitant une planification trop fine, susceptible par ailleurs d'une remise en cause du fait d'aléas de fonctionnement;
- assurer un dialogue homme-calculateur en des termes relatifs à la tâche plutôt qu'à des comportements machine peu significatifs (l'opérateur demandant par exemple un glomode "déplacement robot" sans avoir à se préoccuper des modes de commande impliqués, ni de la plupart de leurs paramètres);
- proposer ou décider des actions pertinentes compte-tenu de l'état de la machine et de la progression dans la tâche (ainsi, ayant signalé un risque de collision sur le déplacement précédent, l'opérateur aura à choisir entre une reprise manuelle et l'abandon du glomode, le système lançant automatiquement un recalage dans le premier cas).

D'un point de vue informatique, nous avons opté pour une démarche orientée données qui réduit la programmation des glomodes au strict nécessaire. On représentera de la sorte un enchaînement de comportements machine comme une structure de données compilée hors-ligne, puis traitée en phase de travail par un interpréteur qui contrôle le séquençement des molocs et gère les interactions avec l'homme. De façon plus parlante, nous décrirons un glomode sous forme d'un réseau constitué d'étapes et d'arcs orientés. A chaque étape sera associé un moloc ou un glomode plus élémentaire, les arcs de sortie définissant un ensemble de successeurs appropriés (et exclusifs) en regard de l'action considérée; les divergences

Figure III.7: Glomode deplauto
(déplacement automatique avec reprise manuelle sur collision)

Paramètres d'entrée: POSITION, VITESSE



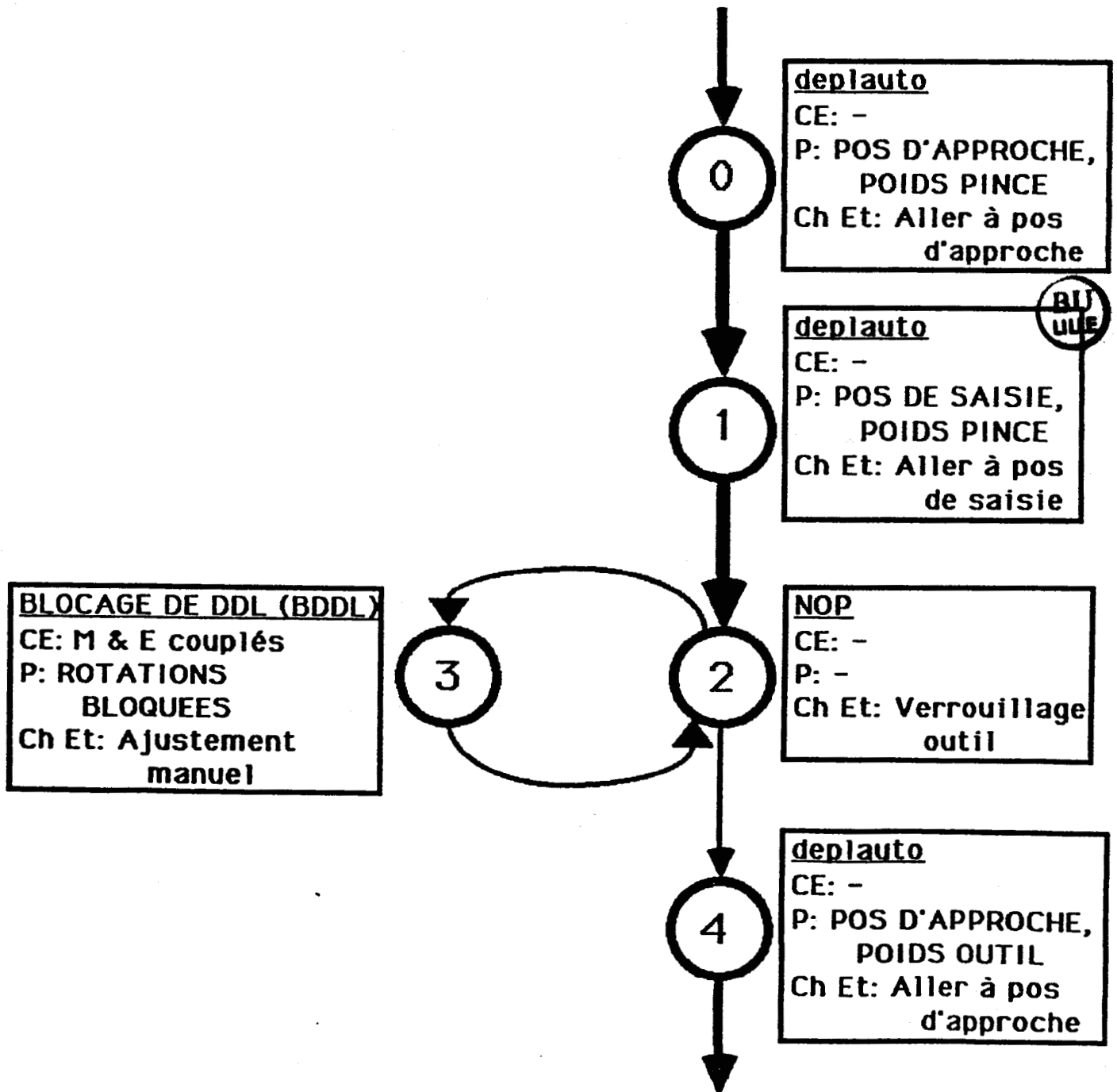
existant dans le réseau expriment ainsi des stratégies alternatives ou des procédures de reprise sur incident. La figure III.7 illustre un glomode particulièrement simple de déplacement automatique qui intègre une possibilité d'évitement d'obstacle en mode télémanipulé, le réseau autorisant ultérieurement:

- soit de terminer l'action en manuel;
- soit de revenir au mode robot.

Par le choix en-ligne du chemin à suivre dans le réseau, l'opérateur dispose d'un outil de commande capable de réagir à nombre d'évènements imprévus. Si toutefois cela s'avère insuffisant, il peut abandonner le

Figure III.8: Glomode outsaisie_auto

Paramètre d'entrée: outil



glomode initial et enchaîner l'interprétation de glomodes de plus bas niveau. Le système de supervision offrira donc un catalogue de glomodes modulaires (une seule étape d'entrée et de sortie, expliquant le NOP de la figure III.7), allant du simple mode de commande (glomode atomique) à des actions très sophistiquées. Hors-ligne, cette modularité permet de construire hiérarchiquement les enchaînements selon un principe de réseaux imbriqués inspiré de l'environnement Forth dans lequel le superviseur a été primitivement implanté. L'exemple de la figure III.8 décrit ce mécanisme au travers d'un glomode outsaisie_auto qui assure le verrouillage d'un outil équipé d'un ergot de fixation dans un dispositif pneumatique monté sur l'organe terminal (site ARA). Le réseau présenté est un assemblage de plusieurs deplauto, dont il gère les paramètres position et poids en accédant à la base de données des objets de l'univers (en raison de la compliance du bras MA23 employé, la compensation des poids supportés par le manipulateur est indispensable à la précision des mouvements automatiques).

A ce stade, la structure de graphe qui correspond à un glomode ne contient pas toutes les informations nécessaires à son interprétation en-ligne. Outre un moloc ou un glomode plus élémentaire, on attachera à chaque étape d'un réseau:

- des conditions d'entrée dans l'étape dont la vérification pourra donner lieu à l'exécution automatique d'actions intermédiaires non explicitées telles que le recalage du maître sur l'esclave;
- un champ paramètre et un module de calcul qui spécifient les types de paramètre utilisés (position, vitesse, poids, etc.) et éventuellement les calculs conduisant à l'obtention de leurs valeurs; ils définissent ainsi les échanges de données entre différentes étapes d'un même réseau ou entre les couches hiérarchisées qui le constituent;
- un champ étiquette indiquant à destination de l'homme la signification sémantique (but local) de l'étape dans le glomode (l'action) où elle s'intègre;
- un champ contrôle qui précise l'attribution du rôle maître dans le contrôle de l'évolution dans le réseau, via la manière dont s'effectuera la sélection d'un successeur:
 - par l'opérateur;

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- automatiquement à la réalisation de conditions données qui seront le plus souvent la fin normale d'un mode (fin de tâche ou arrêt opérateur) décidant d'un successeur privilégié associé à une exécution nominale du travail.

Ces champs sont illustrés sur les exemples des figures III.7 et 8.

Vis-à-vis du système de supervision, la mise en oeuvre de la machine de TAO passe par les phases suivantes:

- une phase d'initialisation relative à un domaine restreint d'application où l'on connectera à la machine les organes physiques (bras, caméras, véhicules, ...) dont elle aura besoin, et où l'on construira un catalogue de glomodes suffisant à la description des tâches envisagées;
- une phase de planification hors-ligne;
- une phase d'exécution en-ligne où le système superviseur interprète les glomodes spécifiés dans le plan (fonctionnement nominal) ou par l'opérateur (fonctionnement dégradé de niveau glomode).

Dans le contexte d'un fonctionnement nominal, les glomodes appelés par le plan s'expriment en termes des outils ou des objets de l'univers que manipule la machine de TAO. En vu d'un fonctionnement dégradé, il sera parfois avantageux de compiler des glomodes plus puissants et ce, tant que les spécificités de la tâche, dont l'importance croît avec le niveau de description atteint, n'entraînent pas une écriture trop lourde ou trop peu générale. On évitera d'autre part d'imbriquer plusieurs couches de reprises locales sur incident (figure III.9.a) qui obligerait l'opérateur de supervision à parcourir hiérarchiquement les empilements du glomode pour accéder à la procédure souhaitée. Le programmeur pourra néanmoins préserver le caractère redondant des réseaux évolués en représentant leurs divergences sous forme de stratégies alternatives (figure III.9.b).

Afin d'obtenir une certaine consistance dans la désignation des glomodes, nous avons adopté les conventions d'écriture suivantes:

- glomodes atomiques: nom abrégé et en majuscule du mode correspondant; ex: MBS (mode bilatéral symétrique);

- glomodes non atomiques mais se plaçant en dessous du niveau objet tel que défini par l'interface supervision/planification: même notation mais en lettres minuscules; ex: deplauto, outsaisie_auto;
- glomodes de niveau objet (les plus fréquemment utilisés): verbe (en majuscule) décrivant l'action d'une manière proche du langage naturel; ex: ALLER, SAISIR;
- glomodes de niveau supérieur au précédent: même notation mais en lettres minuscules; ex: percer_n-trous.

Figure III.9: Conventions de représentation des procédures de reprise sur incident et des stratégies alternatives

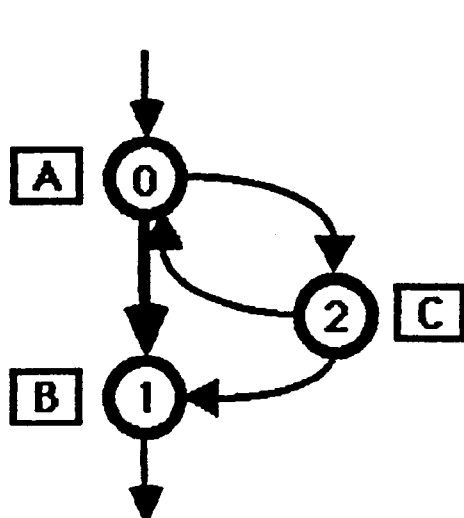


Figure III.9.a
Procédure de reprise
sur incident

L'action C est lancée par l'opérateur en cas d'interruption de A, suite à un incident dans l'exécution de l'action

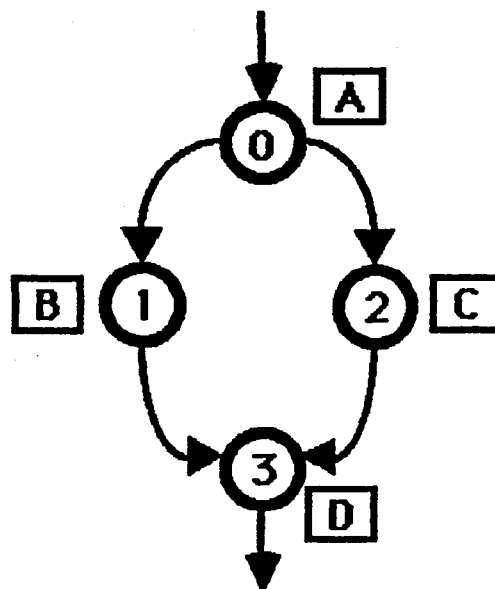


Figure III.9.b
Stratégie alternative

Après l'exécution correcte de A, l'opérateur (ou le système) choisit entre les actions B et C dont l'effet sur l'environnement est identique, au contraire de la probabilité de réalisation sans incident qui dépend du contexte

III.3.2 STRUCTURE FONCTIONNELLE DU SYSTEME DE SUPERVISION

D'une manière générale, les contraintes sévères de la communication homme-calculateur en phase de travail (vitesse et fiabilité des échanges) nous ont conduits à intégrer la contribution décisionnelle du système de supervision (assistance orientée tâche) au sein d'un dialogue structuré de type menu. Dans ce contexte, l'interpréteur de glomodes réduit le spectre des actions proposées à l'homme en ne retenant que celles qu'il juge appropriées vis-à-vis de l'état de la machine et de la progression dans la tâche. Une telle approche se caractérise par une grande facilité d'emploi, mais aussi par des restrictions sur la liberté de l'opérateur. Outre que l'assistance orientée tâche ne s'adresse le plus souvent qu'à la commande symbolique des organes dextres de la machine, elle est ainsi d'un intérêt parfois discutable qui oblige à considérer plusieurs modes de fonctionnement du système informatique.

Relativement à ces modes de fonctionnement, le système de supervision offrira à l'opérateur diverses formes de dialogue:

1. un dialogue optionnel en termes de glomodes qui donne à l'homme la possibilité de se substituer au générateur de plan (fonctionnement dégradé de niveau glomode) et de décrire librement la stratégie qu'il s'est fixé en recourant à un langage de commande classique;
2. un dialogue coopératif fondé sur des menus permettant la détermination interactive (assistance orientée tâche) du chemin à suivre dans le réseau associé au glomode interprété (fonctionnement nominal ou dégradé de niveau glomode);
3. un dialogue en termes de comportements machine (molocs) qui autorise l'opérateur à définir les modes de commande et les fonctions d'assistance analogique qu'il estime pertinents (fonctionnement dégradé de niveau moloc), les seules contraintes imposées étant dictées par l'assistance orientée système;
4. un dialogue de réglage destiné à la modification en cours d'exécution de certains paramètres tels que le gain du retour d'effort ou une vitesse de déplacement, ainsi qu'au masquage/démasquage des fonctions d'assistance préalablement spécifiées.

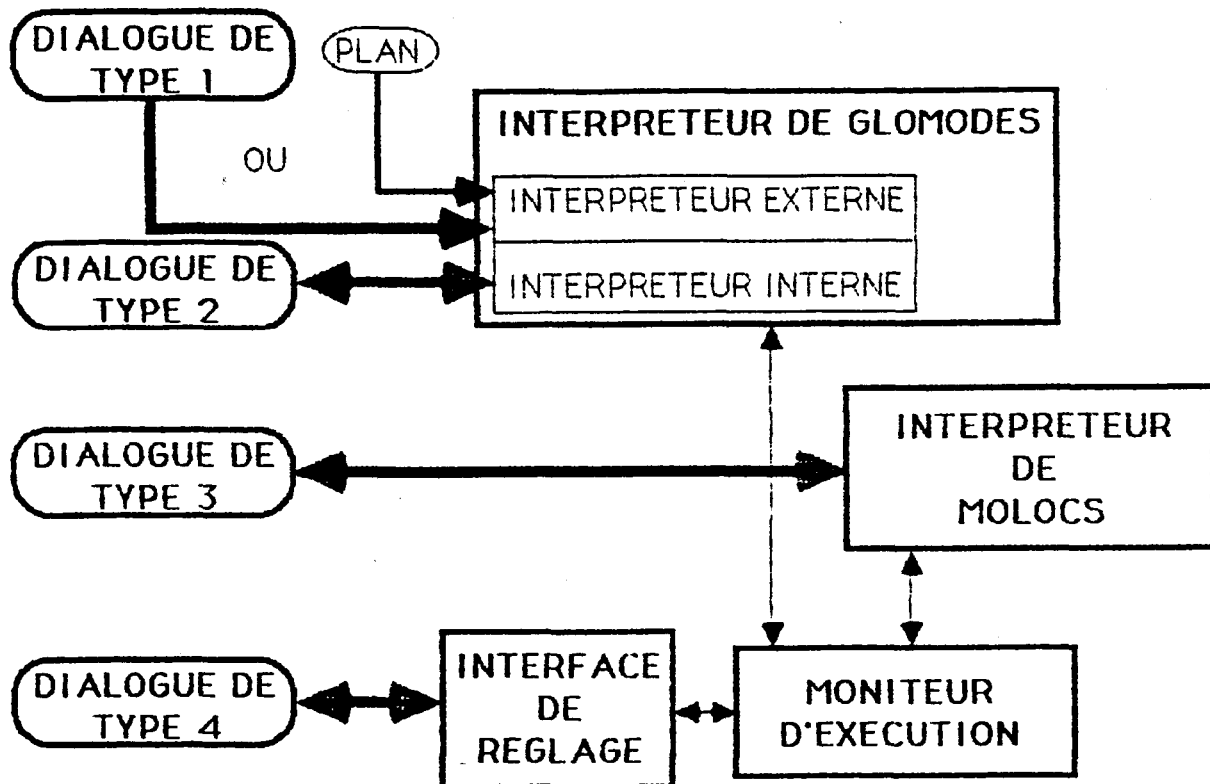


Figure III.10: Rôle des différents modules de supervision dans la communication symbolique homme-calculateur



Dans le but de construire les niveaux de communication précédents, la structure du système de supervision s'articule autour des modules indiqués ci-dessous (figures III.10 et III.11) :

- interpréteur de glomodes (dialogues 1 et 2);
- interpréteur de molocs (dialogue 3);
- moniteur d'exécution;
- interface de réglage (dialogue 4).

III.3.2.a Interpréteur de Glomodes (IG)

A la donnée d'un glomode par le plan ou par l'homme qui élabore lui-même sa propre stratégie, l'interpréteur de glomodes assure la mise en oeuvre de l'enchaînement correspondant. Pour lui faire tenir ce rôle, on y distinguera 2 sous-modules:

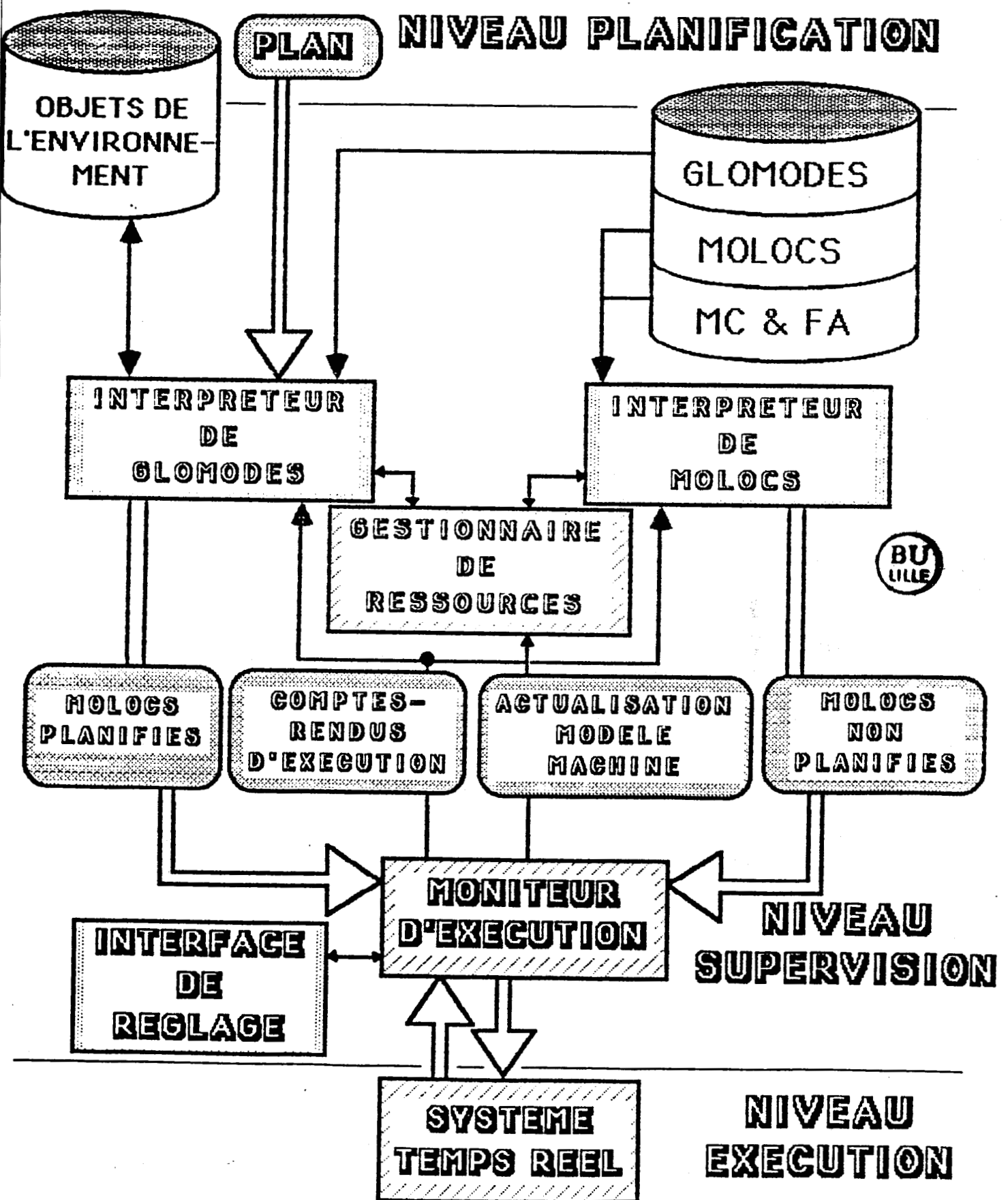


Figure III.11: Structure fonctionnelle du niveau supervision

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- un interpréteur externe chargé:
 - de la recherche au sein d'un dictionnaire de glomodes des structures de données traduisant sous une forme exploitable les actions appelées dans le plan ou dans les commandes opérateur (dialogue de type 1);
 - de la définition des paramètres manquants, introduits en-ligne par l'opérateur, acquis par apprentissage ou extraits d'un modèle des objets de l'environnement;
- un interpréteur interne qui assiste l'homme (dialogue de type 2) dans la gestion des glomodes, au travers:
 - du choix d'un chemin dans les réseaux associés, automatiquement ou en coopération avec l'opérateur;
 - du passage par les actions intermédiaires indispensables au déroulement correct des enchaînements demandés.

L'IG ordonne ainsi le lancement de molocs planifiés issus d'un catalogue fini, affiche les objectifs locaux à atteindre et traite les comptes-rendus d'exécution dont il informe l'opérateur.

Durant l'interprétation d'un glomode, le système fait suivre tout évènement "fin de mode" d'un processus de sélection du prochain moloc à activer. Il commence par scruter le champ contrôle de l'étape (atomique ou non) qui vient de s'achever et tente de lui trouver un successeur pertinent, fonction des règles de franchissement localement programmées et du compte-rendu envoyé par le niveau inférieur. En cas d'échec, un menu d'évolution est alors présenté à l'opérateur de supervision, lui proposant:

- l'ensemble des successeurs définis par le réseau et décrits en des termes relatifs à la tâche (contenu du champ étiquette des étapes correspondantes);
- certaines options systématiques:
 - "abandon du glomode en cours" qui force la sortie de l'enchaînement;
 - "interruption du glomode en cours" donnant accès au menu de configuration dont il va être question;
 - "retour au mode précédent" qui permet de relancer un moloc interrompu par erreur ou après un incident.

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

L'opérateur ayant fait son choix, l'IG détermine le moloc à mettre en oeuvre et demande son exécution.

L'enchaînement de plusieurs modes de commande nécessite par ailleurs des actions intermédiaires de configuration, elles-mêmes représentées sous formes de glomodes tels que "apprentissage d'une position", "recalage maître/esclave" ou "déplacement porteur". Le qualificatif utilisé traduit le fait que ces actions ne participent pas directement à la réalisation de la tâche, mais contribuent plutôt à mettre la machine de TAO en état de poursuivre le travail à distance. La distinction sous-entendue ici n'est évidemment pas de nature conceptuelle, elle résulte des difficultés rencontrées pour planifier les actions de configuration lorsque l'on ne dispose pas d'un modèle exhaustif de la tâche et de l'environnement. Dans ce contexte et afin de ne pas surcharger l'écriture des réseaux, l'interpréteur de glomodes autorise à intercaler en-ligne au sein d'un enchaînement principal certains glomodes soigneusement définis pour ne pas perturber le déroulement global de l'action.

Les glomodes de configuration peuvent de la sorte être appelés de plusieurs manières:

- au niveau planification, si les connaissances a priori suffisent à les intégrer dans le plan;
- dans un autre glomode dont le contenu les spécifie explicitement;
- automatiquement par l'IG, à la suite d'une tentative de vérification des conditions d'entrée dans une étape (ex: recalage maître/esclave);
- en-ligne par l'opérateur de supervision qui, après avoir interrompu le glomode en cours, se voit proposer un menu de configuration lui permettant d'exécuter une action intermédiaire puis de reprendre l'action initiale; ainsi, un déplacement automatique rendant compte d'une position inatteignable par le bras esclave, l'opérateur demandera un mouvement du porteur associé avant de relancer le mode précédent qui cette fois se terminera convenablement.

Les 2 dernières possibilités sont tout à fait intéressantes en ce qu'elles évitent au programmeur de se préoccuper hors-ligne des phases courantes de configuration et donc accroissent la flexibilité en-ligne.

III.3.2.b Interpréteur de molocs (IM)

D'une façon générale, la donnée d'une tâche ne suffit pas à déterminer tous les aspects de la commande symbolique d'une machine de TAO, en particulier ceux qui touchent à l'opérateur d'exécution et qui dépendent de facteurs difficilement évaluables tels que l'expérience ou la fatigue, les conditions d'éclairage, la qualité des retours sensoriels, etc. L'objectif de l'interpréteur de molocs est ainsi de donner en-ligne à l'opérateur de supervision les moyens:

- de spécifier le comportement de certains systèmes non déduit de l'analyse de la tâche (systèmes de vision, dispositifs de restitution d'information, ...);
- de superposer aux molocs planifiés des fonctions d'assistance dont le besoin n'apparaît qu'au cours du travail (anticollision, suppression de poids, ...).

L'IM est de la sorte une interface autorisant la construction et la mise en oeuvre de molocs non planifiés, librement définis par l'opérateur (dialogue de type 3) à partir d'un catalogue de modes de commande et de fonctions d'assistance. Il offrira néanmoins une aide orientée système destinée à interdire les séquences dangereuses ou les actions impossibles à exécuter dans l'état courant de la machine (suite par exemple à la défaillance d'un organe). Dans ce but, et afin d'arbitrer les conflits entre molocs planifiés et non planifiés, on attache à l'IG et à l'IM un gestionnaire de ressources qui en règle générale donnera la priorité au plan, en évitant cependant toute préemption brutale et non ergonomique.

III.3.2.c Moniteur d'Exécution (ME) et Interface de Réglage (IR)

En aval des modules précédemment décrits, un moniteur d'exécution remplit les rôles suivants:

- aggrégation de molocs planifiés et non planifiés, donnant lieu à un comportement complet de la machine exprimé en termes des fonctions exécutables par le système temps réel;

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- traitement des alarmes et des comptes-rendus d'exécution qui sont ensuite relayés vers l'IG ou l'IM;
- actualisation du modèle machine conservé par le gestionnaire de ressources.

Associée au ME, une interface de réglage (dialogue de type 4) permet à l'opérateur d'intervenir en cours de fonctionnement pour:

- modifier un paramètre de réglage tel qu'un facteur d'homothétie en mode bilatéral ou une vitesse de déplacement en mode automatique;
- activer/desactiver une fonction d'assistance définie au niveau des interpréteurs de glomodes et de molocs.

Cette liberté supplémentaire laissée à l'opérateur est gérée par l'IG de manière à prohiber toute action susceptible de remettre en cause l'évolution dans le plan (comme le masquage de la suppression de poids en mode robot qui compromettrait gravement la précision des mouvements).

III.3.3 EXEMPLE D'APPLICATION

Afin d'illustrer notre approche de la conduite symbolique d'une machine de TAO et de mettre concrètement en évidence le rôle des différents niveaux de commande, nous présentons ici un exemple complet de réalisation d'une tâche [Fournier-Gravez-Mangeot 87], depuis la spécification de l'objectif à atteindre jusqu'à l'exécution téléopérée du travail. A l'heure actuelle, un tel exercice revêt encore un caractère théorique; il s'appuie néanmoins sur un générateur de plan ayant donné lieu à d'intéressantes simulations ainsi que sur un module de supervision conçu et expérimenté dans le cadre du projet ARA (pôle téléopération avancée). Si à ce jour, les divers éléments décrits n'ont pas été intégrés au sein d'un système de commande opérationnel, l'exposé qui va suivre nous a semblé suffisamment réaliste pour justifier de sa place dans ce chapitre.

III.3.3.a Le système CoPILOTe

Le niveau planification de l'architecture de commande considérée ici repose sur le système CoPILOTe (COnfiguration et Planification Intégrées en Langage Objet pour la TELéopération) [Mangeot 86 et 87] développé à l'UGRA par Christine Mangeot. Ce logiciel est dédié à la préparation hors-ligne de tâches non répétitives, peu déterministes et exécutées dans un contexte multimachines. Fondamentalement, CoPILOTe est un générateur de plan inspiré de STRIPS [Fikes 71] et de ARGOS II [Farreny 80] qui assiste l'homme dans:

- l'ordonnancement des actions élémentaires concourant à la réalisation du but fixé;
- le choix des ressources physiques nécessaires à leur mise en oeuvre.

Il présente une structure de type système expert où l'on distingue:

- une base de connaissance regroupant l'ensemble des faits relatifs à l'univers de la tâche (environnement et machine de TAO) et des règles qui traduisent l'expertise de planification;
- un module de contrôle responsable de l'élaboration du plan, au travers d'une stratégie de recherche des règles à appliquer pour:

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

- déduire certaines informations utiles de la base de faits (résolution de théorème);
- faire évoluer le modèle de l'état initial du monde vers un état final vérifiant l'objectif donné (résolution de problème);

Dans la modélisation des connaissances, le système CoPILOTe fait appel à un formalisme objet fondé sur les concepts de classes, d'héritage et d'instanciation. L'environnement de la tâche est ainsi décrit sous formes d'objets auxquels sont attachés des descripteurs qui en spécifient les caractéristiques physiques (champs), ainsi que les comportements (méthodes). Ces différents objets sont hiérarchiquement structurés en classes, chacun d'eux héritant toutes les propriétés des classes où il s'inscrit (du moins tant qu'il ne les redéfinit pas localement).

La représentation de l'univers du robot s'exprime de la sorte au moyen des classes:

- "système d'exécution" comprenant les sous-classes:
 - "manipulateur";
 - "porteur";
 - "véhicule";
 - "caméra", etc.
- "objet de l'environnement" comprenant les sous-classes:
 - "outil";
 - "visserie";
 - "architecture";
 - "trou", etc.

Cet aspect est illustré par les exemples suivants:

Manipulateur MA23: instance de classe "manipulateur"

nom: MA23;

fonctionnement: ok;

état-pince: non-libre;

contenu-pince: meule;

poids-porté-max: 25.

Perceuse-1: instance de classe "perceuse" (sous-classe de "outil")

nom: perceuse-1;
 position-rangement: pos-rang-per1;
 fonctionnement: ok;
 poids: 5;
 force-perçage: (valeur-défaut: FX).

Trou-1: instance de classe "trou"

nom: trou-1;
 position: (valeur-défaut: inconnue);
 profondeur: (valeur-défaut: X);
 état: non-percé.

De leur côté, les actions que la machine de TAO est à même de mettre en oeuvre sont formulées en termes de règles-actions dont nous donnons un exemple ci-dessous:

Action de perçage: instance de classe "règle-action"

Contexte:	(être? (fonctionnement \$perceuse) 'ok)
	(être? (fonctionnement \$manipulateur) 'ok)
	(>? (poids-porté-max \$manipulateur) (poids \$perceuse))
Précondition:	(être (contenu-pince \$manipulateur) (nom \$perceuse))
Ajout:	(être (état \$trou) 'percé)
Conséquence:	
Retrait:	(être (état \$trou) 'non-percé)
Commande:	(percer \$manipulateur \$trou)

Le fonctionnement du système de contrôle sera décrit dans le cadre de notre application. Pour plus de détails, on se reportera aux références bibliographiques citées.

III.3.3.b Phase de préparation (hors-ligne)

Au niveau planification, une tâche est définie par la donnée d'un

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

objectif et d'un état initial de l'univers du robot. Pour les besoins de notre exemple, nous considérerons l'objectif "taraudage d'un trou", l'état initial du monde étant esquissé par les descripteurs objets de la partie III.3.3.a. Hors-ligne, la préparation de tâche est assurée interactivement par CoPILOTe au travers des 3 phases suivantes.

La première fait intervenir un module de compréhension du langage naturel (en cours d'étude). Il interprète les commandes opérateur et établit un dialogue destiné à lever toute ambiguïté dans la description de l'objectif visé. Essentiellement, son rôle consiste en:

- la création des objets nécessaires à la planification, spécifiés en tant que nouvelles instances de classes connues et donc avec héritage de leurs propriétés; dans notre application, cette étape voit l'augmentation du modèle de l'environnement par un objet "trou-2" de classe "trou";
- la traduction de l'objectif en terme d'un ordre exploitable par le générateur de plan, qui serait ici:

but = (être? (état trou-2) 'taraudé).

La deuxième phase recouvre l'élaboration du plan lui-même. Le système de contrôle y sélectionne une règle-action qui inclut l'objectif à atteindre dans sa liste d'ajout. Il vérifie ensuite la validité de cette action en testant sa partie contexte (filtrage mixte). Si une unification des variables permet de vérifier les faits contenus dans ce champ, les préconditions de l'action deviennent de nouveaux buts et le processus est récursivement reconduit jusqu'à ce que tous les sous-buts terminaux soient réalisés dans l'état initial de l'univers. Le plan est enfin construit à partir de la liste des règles-actions appliquées, chaque étape étant définie par le champ commande de l'une d'elle.

Au cours de la troisième phase, le système effectue une analyse du plan précédemment obtenu et sollicite l'opérateur afin:

- d'acquérir certains des paramètres encore inconnus ou proposés par défaut (tels que la profondeur du trou à percer; la position pouvant par ailleurs ne pas être explicitée à ce niveau);

- d'affecter à chaque étape un mode de validation, par l'opérateur ou automatique, selon les incidents susceptibles de se produire lors de l'exécution.

Les opérations de saisie et de dépose étant relativement fiables, nous aurons à l'issue de la planification:

DEPOSER MA23 meule	/ validation automatique
SAISIR MA23 perceuse-1	/ validation automatique
PERCER MA23 trou-2	/ validation opérateur
DEPOSER MA23 perceuse-1	/ validation automatique
SAISIR MA23 taraud	/ validation automatique
TARAUDER MA23 trou-2	/ validation opérateur

III.3.3.c Phase d'exécution (en-ligne)

Le plan ayant été créé hors-ligne, il est passé au système superviseur qui, en phase d'exécution, génère les enchaînements de molocs correspondant aux actions spécifiées. A ce stade, le rôle de l'opérateur revient à:

- choisir un chemin au sein des réseaux qui représentent les glomodes attachés à chaque instruction du plan;
- sélectionner les glomodes de configuration nécessaires à l'évolution correcte dans la tâche.

Parallèlement, les paramètres indispensables sont obtenus en accédant aux descripteurs des objets manipulés. En toute généralité, ces paramètres peuvent être:

- complètement définis dans le modèle;
- marqués comme inconnu à l'intérieur d'un descripteur;
- non modélisés.

Dans ces 2 derniers cas, le système interroge en-ligne l'opérateur et lui demande les valeurs manquantes. Néanmoins, pour des paramètres géométriques (position, distance,...) difficiles à apprécier, on n'exigera pas de l'opérateur qu'il les explicite systématiquement. Vis-à-vis des enchaînements mis en oeuvre, ceci oblige à prévoir dans un même glomode

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

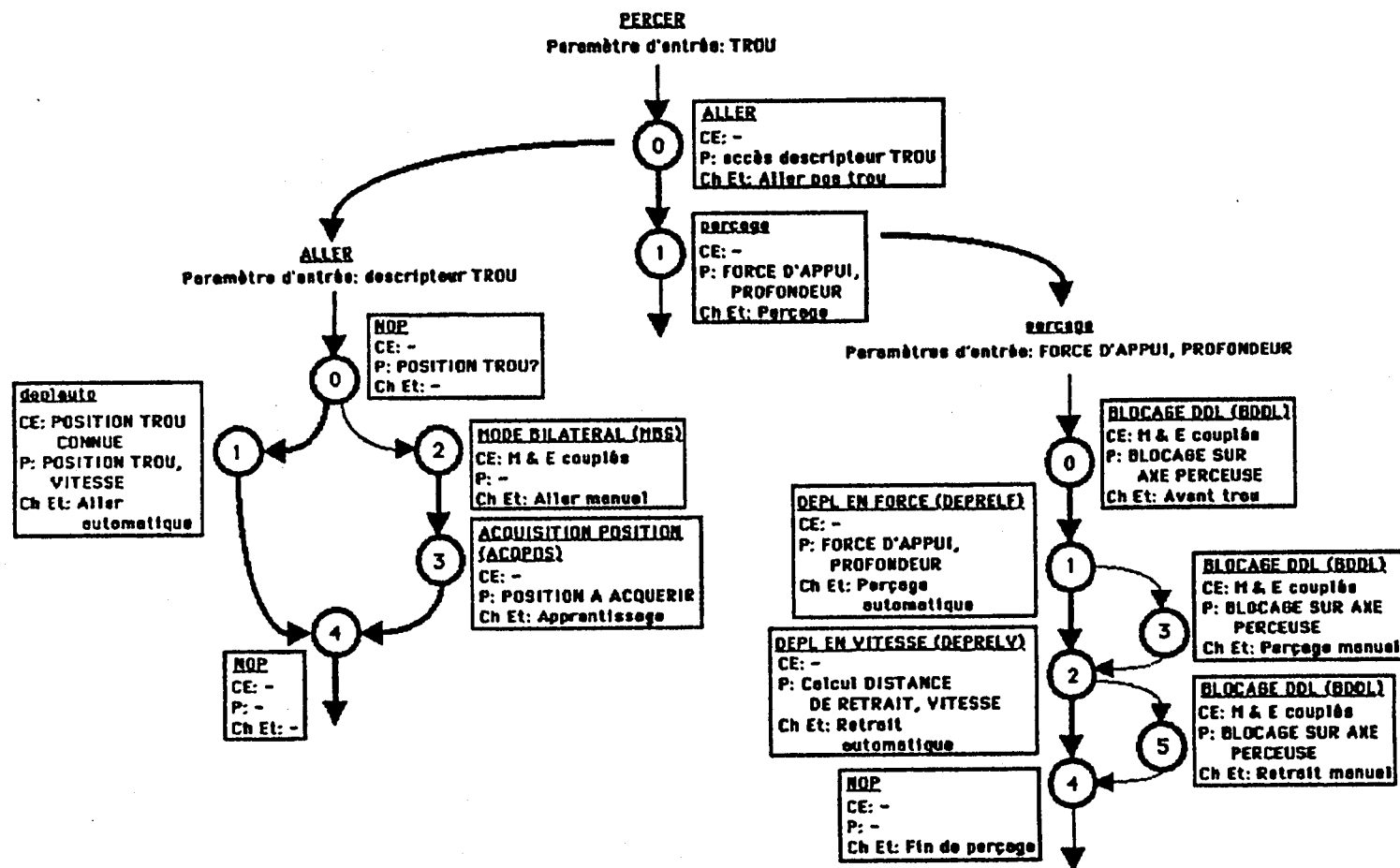
des stratégies à caractère:

- automatique (la valeur de tous les paramètres environnement est connue);
- manuel (certaines valeurs sont et restent inconnues, le recours à l'opérateur d'exécution n'impose pas de les expliciter);
- manuel avec apprentissage (les valeurs inconnues sont apprises au cours de l'exécution du travail et permettent de compléter les descripteurs des objets concernés en vue d'une utilisation ultérieure).

Afin d'illustrer le fonctionnement du superviseur, la figure III.12 décrit le glomode PERCER qui intègre un ALLER à la position de perçage automatique, ou manuel suivi d'une acquisition (l'apprentissage n'apportant ici aucune contrainte supplémentaire, une stratégie manuelle simple n'offre pas d'intérêt). Les paramètres procédé tels que la force d'appui sur la perceuse sont, soit calculés au niveau planification à partir d'une connaissance des matériaux, soit fixés par défaut et éventuellement modifiés en-ligne par l'opérateur. On remarquera dans perçage, l'exécution du pointage en mode manuel qui nous affranchit d'une modélisation coûteuse des interactions entre le foret et la surface à percer.

L'approche présentée dans ce chapitre donne lieu à une structure de commande flexible reposant sur 2 niveaux fonctionnels caractérisés par:

- planification:
 - génération hors-ligne d'un plan séquentiel;
 - prise en compte du contexte tâche au travers d'un ensemble de connaissances modélisées a priori;
- supervision:
 - compilation de glomodes indépendamment de l'environnement de travail;
 - écriture explicite de stratégies alternatives ou de procédures de reprise sur incident;
 - génération en-ligne d'enchaînements de molocs dont l'adaptation à la tâche résulte essentiellement d'un dialogue avec l'opérateur.



ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

L'importance relative de ces 2 niveaux dépend de facteurs liés au domaine d'application et leurs divers éléments auront un rôle plus ou moins accentué selon les spécificités propres à ce domaine. Ainsi, dans un environnement et pour des tâches bien modélisables (spatial), le niveau planification sera particulièrement développé, réduisant la participation en-ligne de l'opérateur de supervision. On gagnera de la sorte à attribuer les fonctions d'homme superviseur et d'homme d'exécution à un même opérateur disposant d'une interface multi-modes. Au contraire, pour des tâches non déterministes (intervention sur accident), la charge de travail confiée à l'homme superviseur justifie un système de commande mis en oeuvre par 2 opérateurs disposant d'interfaces spécialisées.

CONCLUSION

Le système de commande d'un télémanipulateur classique établit une relation unique entre les organes du poste opérateur (bras maître, écrans vidéo, ...) et ceux de l'univers de travail (bras esclave, caméras, ...). En TAO au contraire, le calculateur casse cette rigidité de couplage et offre à l'opérateur le choix entre plusieurs configurations machine susceptibles de contribuer avantageusement à l'exécution d'un travail donné. Cette approche conduit à la notion de mode associée à un domaine de pertinence limité (assistance orientée tâche). Elle implique ainsi l'intégration au système d'un niveau de commande symbolique chargé de la gestion interactive des configurations machine dans le contexte de la tâche considérée.

En toute généralité, le fait d'accroître les capacités du système, et donc sa complexité, se traduit pour l'opérateur par une charge de travail mentale supplémentaire. Le problème consiste alors à définir une stratégie d'allocation des tâches entre l'homme et la machine assurant une exploitation optimale de leurs aptitudes respectives. Pour y répondre, nous proposons une structure de commande hiérarchisée fondée sur les niveaux planification (hors-ligne), supervision (en-ligne) et exécution.

ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMANDE TAO

Les parties suivantes visent à apporter une validation au moins partielle des principes exposés ici. Elles traitent du superviseur SARAH qui a donné lieu à une implantation et à des expérimentations menées dans le cadre du pôle Téléopération du projet Automatisation et Robotique Avancées.

CHAPITRE IV

LE SYSTEME SARAH

Un des objectifs principaux du programme ARA (Automatisation et Robotique Avancées, 1980-1986) fut la poursuite de l'effort de recherche entrepris avec SPARTACUS. Le pôle Téléopération [Espiau 86] a en particulier permis le regroupement pluri-disciplinaire de nombreux laboratoires autour du CEN Saclay abritant un site expérimental commun. Les études menées dans ce cadre se sont matérialisées au sein d'une manipulation canonique destinée à intégrer les différents systèmes produits de ARA, à supporter un travail global de développement et de validation ergonomique, et à offrir une vitrine des résultats obtenus. La machine de TAO mise en oeuvre à cette occasion s'est appuyée sur les éléments ci-dessous:

- un système de commande maître/esclave généralisée (UGRA, CEN Saclay);
- un système de retour d'information généralisé (proximétrie et CAO) (IRISA, Rennes);
- un système de supervision (CAL, Lille).

Le montage du site a été achevé au milieu de 1986 et sa présentation eut lieu lors des journées téléopération ARA en décembre de la même année.

Baptisé SARAH, le système superviseur installé sur le site expérimental fait suite aux recherches du Centre d'Automatique de Lille en télé-

LE SYSTEME SARAH

opération [Habchi 81, Autechaud 83]. Relativement à la structure de commande TAO exposée dans le chapitre précédent, SARAH remplit essentiellement les fonctions d'interpréteur de glomodes, dans un contexte limité à la conduite symbolique d'une machine bilatérale à retour d'effort montée sur un porteur articulé. Plus précisément, il en contrôle le système d'exécution qui propose divers modes de commande (manuels, semi-automatiques et automatiques) susceptibles d'exploiter des informations proximétriques ou modélisées. Dans cette implantation, il ne prend cependant pas en compte certains systèmes annexes, tels que les tourelles de caméra ou la régie vidéo dont la commande reste entièrement du ressort de l'homme.

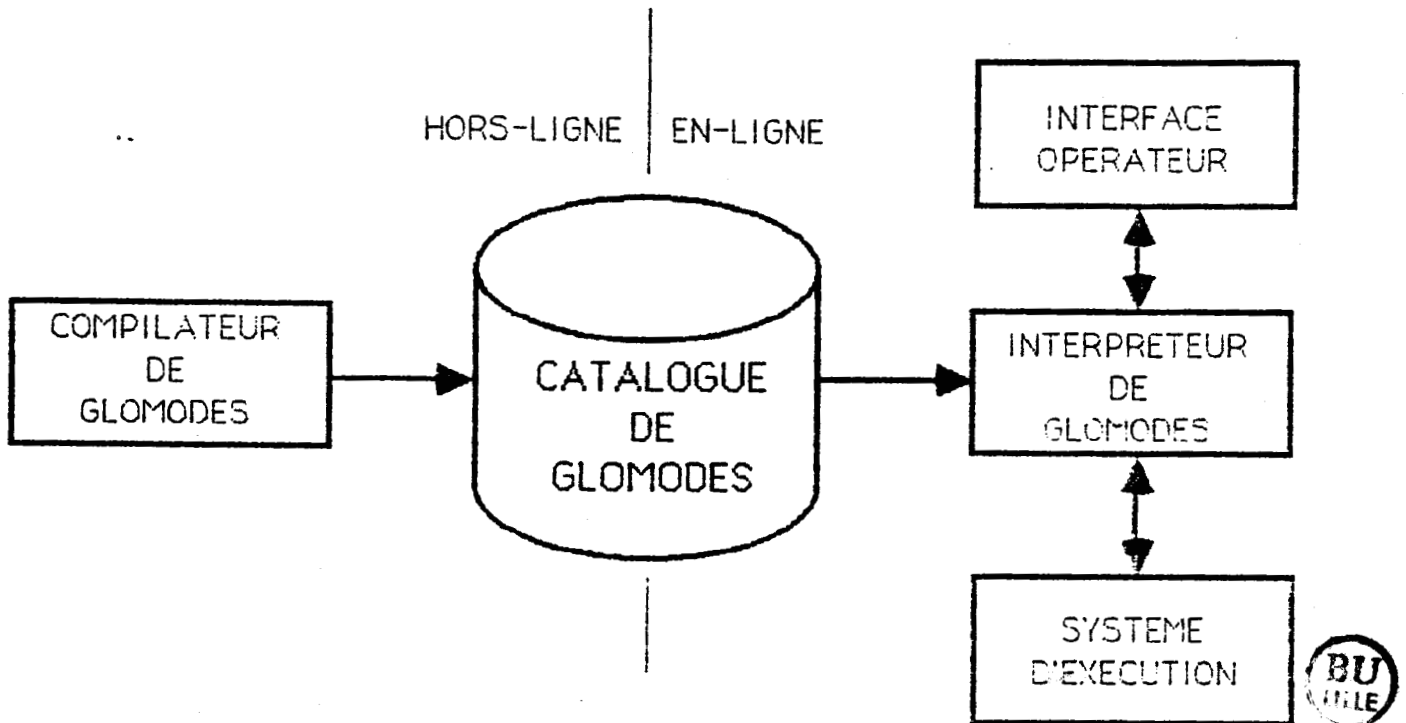
Outre le cahier des charges, nous aborderons dans un premier temps les aspects fonctionnels du système SARAH, ainsi que l'environnement de programmation Forth utilisé. Nous détaillerons ensuite les principes de compilation et d'interprétation des glomodes, que l'on associera au fonctionnement de l'interface opérateur. La description du site canonique et la discussion portant sur l'expérimentation de la machine fait l'objet du chapitre V.

IV.1 PRESENTATION GENERALE

S'inscrivant dans l'approche globale décrite au chapitre III, SARAH relève d'une démarche orientée données qui distingue les structures de glomode du programme qui en fait l'interprétation. Par ailleurs, les techniques de conception du dialogue homme-calculateur se fondant actuellement sur des méthodes empiriques et itératives [Ehrich-Williges 86], nous avons voulu un maximum d'indépendance entre le module opérateur et le logiciel de supervision proprement dit. SARAH se compose ainsi (figure IV.1):

- d'un compilateur chargé hors-ligne de la génération des structures de données attachées aux glomodes;
- d'un interpréteur qui assure en-ligne le traitement de ces structures;
- d'une interface opérateur dédiée à la construction du dialogue symbolique homme-machine.

Figure IV.1: Le système SARAH



IV.1.1 FORTH

Dès le début, le système SARAH a été étudié en vue d'une implantation dans un environnement de programmation Forth [Brodie 81, Salman-Tisserand-Toulout 83] auquel il emprunte plusieurs concepts originaux. La naissance de Forth remonte aux années 1968-70, lorsque le développement des mini- et micro-ordinateurs a créé certains besoins que ne comblaient pas les langages classiques. On peut citer en particulier [Koudela 73]:

- intégration des différentes fonctions d'un système de programmation (logiciel d'exploitation, éditeur, compilateur, assembleur, etc.) au sein d'un package unique;
- large interactivité entre l'utilisateur et le langage source;
- traduction rapide et transparente du source en code exécutable;
- facilité d'adaptation du logiciel vis-à-vis d'une application précise.

LE SYSTEME SARAH

Pour sa part, Forth inclut les caractéristiques mentionnées et combine une grande compacité mémoire avec une vitesse d'exécution élevée. Ces qualités ont été mises à profit dans des domaines tels que l'astronomie (voir ci-dessous), la robotique (Rockwell), les jeux vidéo (Atari) et, plus récemment, pour la réalisation d'un simulateur de vol de l'US Navy.

Recourant à des techniques de programmation entrelacée (cf. l'excellent article de Peter Kogge [Kogge 82]), le système Forth est construit autour d'un petit nombre de routines assembleur qui définissent la machine virtuelle du langage (l'interpréteur interne) et mettent à la disposition de l'utilisateur un ensemble restreint d'instructions de base. L'écriture d'un programme d'application revient alors à étendre le vocabulaire courant en générant de nouvelles instructions (les instructions Forth sont baptisées "mots") à partir de celles existantes. D'une manière générale, le processus de compilation associe à un mot nouveau une structure formée d'un nom suivi d'une liste d'adresses pointant les routines qui le composent; par la suite, ce mot pourra lui-même servir à bâtir des modules de programme plus complexes. A l'exécution, l'interpréteur interne effectue une succession de sauts avec empilement des adresses de retour, jusqu'à remonter aux codes machine constituant les primitives du langage. Forth offre ainsi un ensemble de mots de différents types, contenus dans un dictionnaire extensible dont l'organisation en vocabulaires distincts, structurés de façon arborescente, permet un accès facile à des logiciels particuliers, comme l'assembleur, l'éditeur ou un quelconque langage de commande spécialisé (dans la TAO, par exemple).

L'adjonction de nouveaux éléments au dictionnaire Forth fait intervenir des mécanismes de compilation, dont un exemple du plus commun est donné ci-dessous (routines ":" ou colon, début de compilation, et ";" ou semi-colon, retour en mode interprété):

```
: PERCER   SAISIR_PERCEUSE PERCER_TROU DEPOSER_PERCEUSE ; .
```

L'interprétation de cette ligne de commande crée une entrée dictionnaire (procédure colon) pour le mot PERCER, défini comme une suite d'instructions déjà connues du système. Forth autorise par ailleurs la génération de familles de mots possédant des propriétés semblables (construction <BUILD

LE SYSTEME SARAH

... DOES)), telles que des types de variable ou des structures objets.

Outre la pile de retour nécessaire à l'interpréteur interne, une pile de données LIFO (Last In, First Out) assure le passage des paramètres entre les routines appelées par l'utilisateur (qui en frappe le nom au clavier) ou enchaînées au sein d'un mot de plus haut niveau. Elle donne ainsi aux programmes un caractère modulaire qui facilite leur mise au point. Ajoutons que Forth emploie la notation polonaise inverse tout à fait adaptée au fonctionnement des machines à pile.

Pour exposer les avantages de Forth, nous rappellerons d'abord que son interpréteur tourne vite et n'impose qu'un faible encombrement mémoire. Il est donc parfaitement approprié à un environnement temps réel contraignant, comme dans le cas d'un système de conduite TAO. Du fait de l'originalité de sa machine virtuelle qui n'oblige pas à de longues phases de compilation, il permet une interaction aisée entre l'homme et le calculateur. Enfin, et c'est son principal intérêt, Forth est modulaire, extensible et offre à l'utilisateur un accès facile à toutes les couches du système ou des programmes d'application. Ces divers aspects simplifient considérablement le développement de logiciels complexes et, dans ce domaine, les résultats obtenus aux Etats-Unis sur la commande du radio-télescope de Kitt Peak sont remarquables [Moore-Rather 73 et 76]:

- travail à effectuer:
 - pointage du télescope;
 - acquisition et enregistrement des données;
 - analyse graphique en-ligne;
 - 3 modes d'observation;
- estimation classique:
 - volume de travail: 6 hommes/an;
 - coût: 120 000 \$;
 - occupation mémoire: 64 K;
 - temps de développement: 2 ans;
- réalisation avec Forth:
 - 24 semaines de travail pour un homme seul;
 - coût: 50 000 \$;

LE SYSTEME SARAH

- mémoire utilisée: 16 K;
- mise au point en 12 semaines.

Dans une large mesure, l'origine de SARAH résulte d'une réflexion sur une application des concepts de Forth à la TAO, orientée vers l'implantation d'un langage de télémanipulation entremêlant différents niveaux de description de tâche, aussi bien que des instructions fonctionnelles du type lancement d'un mode de commande. Cette démarche s'est vue fortement modifiée par l'introduction de la notion de glomode, mais fondamentalement l'interpréteur SARAH se conçoit comme une machine Forth adaptée au traitement de structures de glomode telles que décrites précédemment.

IV.1.2 CAHIER DES CHARGES

Le noyau du système SARAH est formé d'un interpréteur de glomodes comprenant:

- un module d'initialisation (interpréteur externe);
- un module de traitement (interpréteur interne).

La fonction de l'interpréteur externe réside dans l'appel et la validation des glomodes à mettre en oeuvre. Ses spécifications principales sont:

- supporter un langage de description de tâche permettant l'exploitation d'un plan généré hors-ligne ou l'entrée par l'opérateur de commandes de niveau objet, puis traduire les instructions de ce langage en termes de glomodes;
- vérifier les conditions d'entrée dans chacun des glomodes appelés, et en particulier la définition des paramètres nécessaires.

Partant de la donnée d'un glomode, l'interpréteur interne parcourt interactivement le réseau correspondant et lance les modes de commande qui y sont spécifiés. A l'achèvement d'un moloc, il sera demandé à ce module:

- de proposer au choix de l'opérateur un ensemble restreint de successeurs pertinents;
- dans nombre de cas (évolution nominale), de sélectionner un successeur privilégié sans intervention humaine (transition automatique),

LE SYSTEME SARAH

afin d'éviter des échanges homme-calculateur trop fréquents et fastidieux;

- d'acquérir auprès de l'opérateur les paramètres manquants en lui affichant les informations utiles à leur définition;
- d'assurer autant que possible la gestion des paramètres et leur passage entre différentes étapes d'un même réseau, ainsi qu'entre plusieurs réseaux hiérarchiquement imbriqués au sein d'un glomode;
- d'autoriser l'interruption d'un enchaînement pour intercaler une action de configuration et, chaque fois que cela sera envisageable, d'en décider automatiquement l'exécution.

Plus généralement, un rôle essentiel du système est d'informer l'opérateur:

- de l'évolution dans un glomode;
- de l'état courant de la machine;
- des événements détectés par le système d'exécution;
- des commandes accessibles à chaque instant.

Il doit d'autre part offrir des formes de dialogue adaptées à la conduite symbolique en-ligne d'une machine complexe, qui suppose des échanges rapides et fiables. On évitera ainsi l'emploi du clavier pour s'orienter vers des techniques de manipulation directe (menus, souris, ...) associées à un écran multifenêtres.

Outre la communication homme-calculateur, le superviseur converse avec un système d'exécution. Sur la machine ARA, un comportement du télémanipulateur s'exprime par un mode de commande (ou moloc, les 2 termes sont ici totalement équivalents) mis en oeuvre via un ordre symbolique (code + liste de paramètres). En retour, le système d'exécution envoie des compte-rendus relatifs à:

- une fin de mode et son origine, normale (ex: fin de tâche, arrêt opérateur) ou non (ex: butée mécanique en mode automatique, interruption opérateur, cf. III.2.2.a);
- un message à afficher (ex: butée mécanique en mode manuel);
- des paramètres appris à l'aide du bras esclave (ex: poids, position).

On trouvera à l'annexe A le catalogue des modes de commande proposés sur

LE SYSTEME SARAH

la machine ARA, accompagné des ordres de lancement et des compte-rendus correspondants.

IV.1.3 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Nous nous attacherons dans cette partie à exposer quelques aspects du fonctionnement général de SARAH dont la compréhension est nécessaire à la suite du chapitre.

IV.1.3.a Interpréteur externe

La mise en oeuvre d'une action TAO est demandée par l'opérateur qui entre au clavier une instruction de niveau objet (ou de niveau effecteur si aucune des précédentes ne convient à la situation rencontrée). La convivialité de la couche externe du logiciel repose ainsi sur un langage de description de tâche, spécifique dans une large mesure d'un domaine d'application précis. La définition d'un tel langage passe cependant par une structuration de l'espace des tâches inhérent à ce domaine, étude qu'il n'a pas encore été possible de mener à bien du fait:

- de la nature expérimentale de la machine ARA;
- du petit nombre de glomodes implantés;
- des applications considérées que l'on a choisies pour leur caractère générique, et non pour leur appartenance à un domaine parfaitement cerné.

Sur SARAH, la spécification d'une tâche est de la sorte effectuée en termes des noms de glomodes existants, le système interrogeant ensuite l'opérateur afin de leur associer des paramètres. Le rôle de l'interpréteur externe se réduit ainsi à la recherche dans un catalogue des glomodes appelés par l'opérateur, à la validation syntaxique des ordres donnés et à l'obtention des paramètres les plus indispensables.

LE SYSTEME SARAH

IV.1.3.b Interpréteur interne

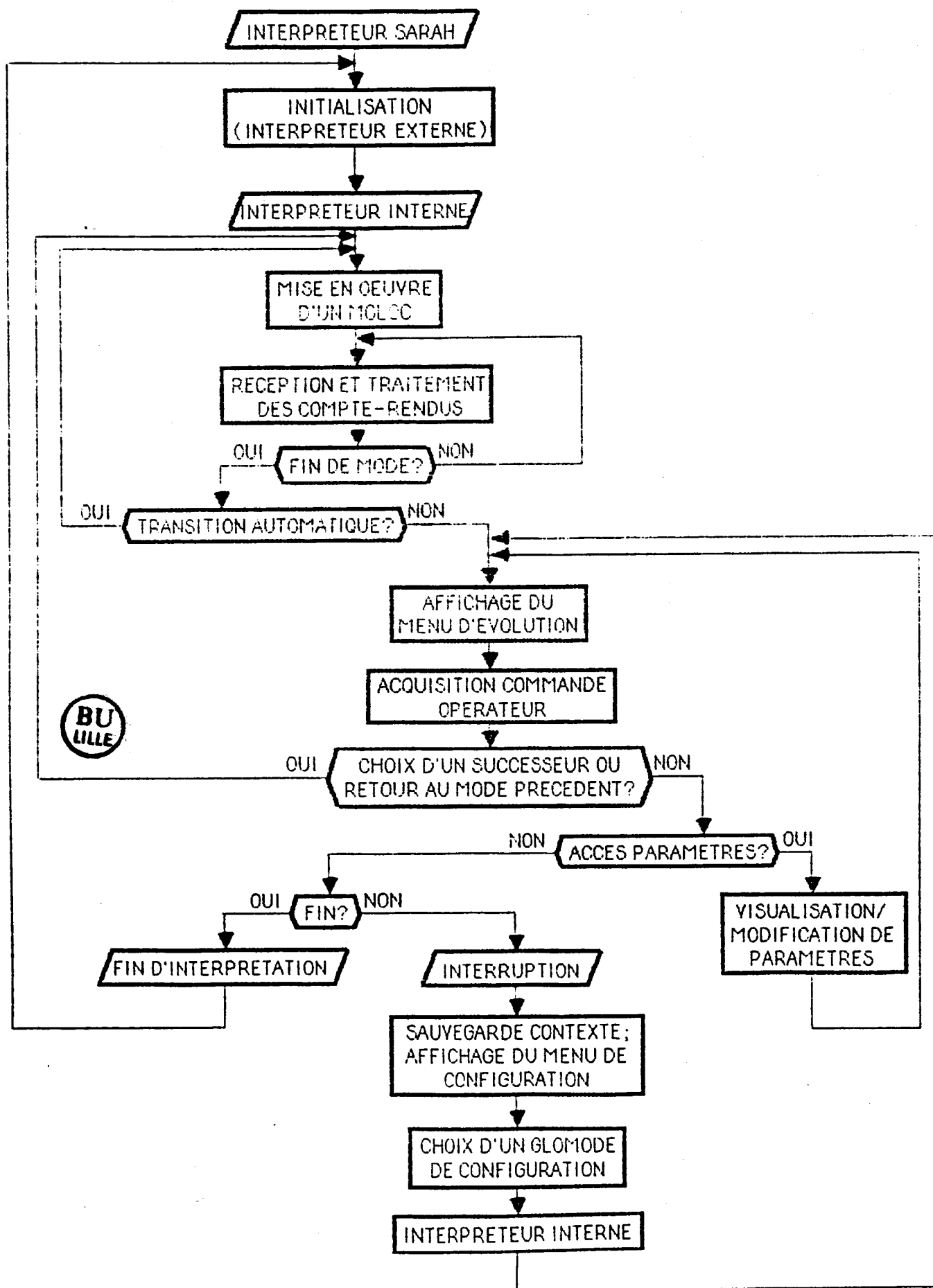
Après initialisation, l'interpréteur interne gère l'évolution dans les réseaux structurés qui composent le glomode demandé, fonction des événements détectés au niveau exécution et des choix de l'homme superviseur. La boucle d'interprétation représentée sur la figure IV.2 débute par la mise en oeuvre d'un mode de commande et se poursuit avec le traitement des compte-rendus du niveau inférieur. A la réception d'un événement "fin de mode", SARAH détermine un successeur privilégié ou un ensemble de successeurs pertinents (tel que défini par le réseau) qui sont alors proposés au travers d'un menu d'évolution.

- Le premier cas résulte de la conjonction d'un événement "fin de mode sur condition normale" et de l'existence dans le champ contrôle de l'étape achevée d'une instruction de transition automatique.
- Dans le deuxième cas, les options offertes à l'opérateur sont:
 - lancer un des successeurs affichés dans le menu d'évolution (si celui-ci n'est pas vide);
 - revenir au mode précédent;
 - abandonner définitivement le glomode en cours;
 - interrompre ce glomode et accéder au menu de configuration permettant d'y intercaler un autre enchaînement sélectionné au sein d'une liste d'actions intermédiaires;
 - visualiser et modifier la valeur d'un paramètre.

IV.1.3.c Gestion de paramètres

Spécifiée hors-ligne à la programmation des glomodes, la gestion des paramètres ne peut porter directement sur des valeurs qui sont le plus souvent inconnues à priori. Sur SARAH, cette gestion passe par une pile NPS de type LIFO manipulant des adresses relatives à une table de valeurs et constituées par un type et un numéro dans le type (POSITION 4, FORCE 1, etc.; on trouvera à l'annexe A une liste des types reconnus par le système). De telles adresses étant peu significatives pour l'opérateur, des noms plus expressifs leur sont fréquemment attachés qui seront seuls employés dans

Figure IV.2: Fonctionnement de l'interpréteur SARAH



LE SYSTEME SARAH

les échanges homme-calculateur. D'une manière générale, les paramètres utilisés se classent en:

- paramètres système, concernant le couplage maître/esclave (ex: facteur d'homothétie);
- paramètres procédé (ex: vitesse de déplacement en mode automatique);
- paramètres environnement (ex: position).

Ils reçoivent en outre un attribut de valeur sélectionné parmi:

- non défini;
- réservé système: invisible à l'opérateur;
- défini: valeur accessible sans restriction en lecture et écriture;
- protection locale: accessible en lecture mais pouvant être modifiée en-ligne par l'opérateur (réglage);
- protection globale: accessible en lecture exclusivement, sa modification étant susceptible de remettre en cause les glomodes implantés.

En cours d'exécution, chaque mode de commande a besoin de paramètres dont il s'attend à trouver l'adresse sur la pile NPS. Une procédure retire alors l'élément en sommet de pile ou sollicite l'opérateur lorsqu'il y a discordance de type. Cette procédure vérifie ensuite si l'attribut de la variable paramètre obtenue n'est pas "non défini", auquel cas l'acquisition ou l'apprentissage de sa valeur en est suggéré. La pile devant ainsi être chargée au préalable, son état est déterminé par les instructions contenues au sein du champ paramètre de chaque étape (entrée d'une nouvelle adresse, duplication, retrait de l'élément en sommet de pile, ...). Avec ce mécanisme, quelques unes des possibilités offertes à la compilation des glomodes sont:

- spécifier une adresse paramètre affectée d'une valeur protégée (ex: ddl à bloquer dans un glomode de perçage);
- spécifier une adresse paramètre et lui associer une valeur par défaut (protection locale), que l'opérateur pourra modifier en-ligne;
- spécifier une adresse paramètre sans lui attribuer de valeur;
- ne pas spécifier le paramètre à utiliser, mais en définir plusieurs du même type, donnant en-ligne à l'opérateur le choix entre différentes valeurs pré-sélectionnées.

LE SYSTEME SARAH

Par ailleurs, un modèle des objets de l'environnement permet l'écriture de glomodes qui ne réclament en-ligne que l'entrée des entités à manipuler (ex: SAISIR PERCEUSE_JAUNE), l'extraction et la mise à jour des paramètres pertinents étant assurées par les modules de calcul. Pour plus de détails, on se reportera aux exemples présentés en IV.2.3.

IV.2 COMPILATION DES GLOMODES

On retiendra de la partie précédente que les glomodes doivent intégrer nombre d'informations relatives aussi bien à l'architecture des réseaux qui les représentent, qu'à leur interprétation ultérieure. La construction de ces structures de données est effectuée dans une phase de compilation hors-ligne que nous allons maintenant exposer. Dans la lecture de ce qui suit, on gardera à l'esprit le caractère générique des glomodes qui ne sont pas écrits en vue d'une application particulière, mais d'un usage le plus général possible.

IV.2.1 STRUCTURE DE GLOMODE

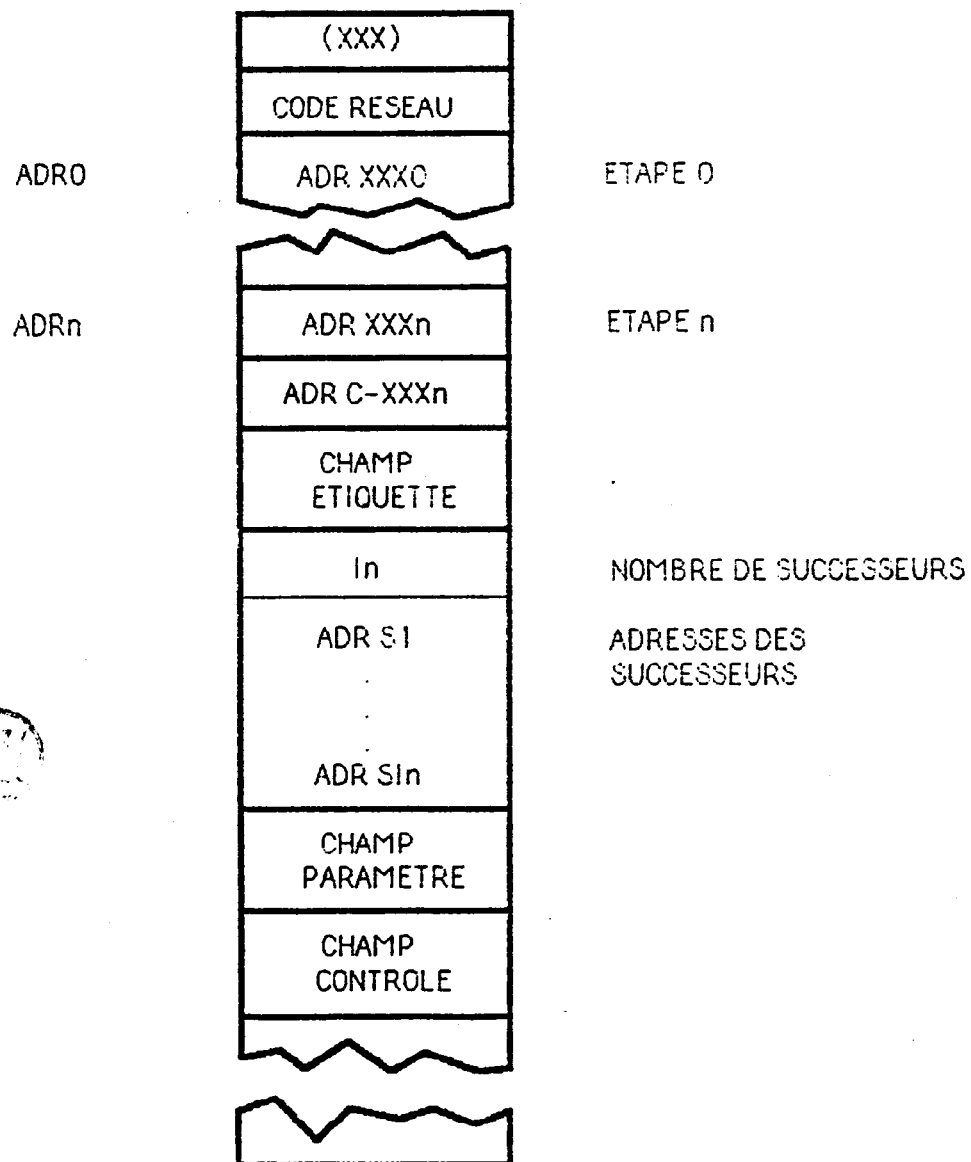
Avec l'implantation Forth du système SARAH, un glomode XXX est une structure de données constituée d'une liste de pointeurs adressant les éléments ci-dessous:

- un titre que nous désignerons .XXX (type chaîne de caractères);
- une procédure Forth -XXX vérifiant les conditions d'entrée dans le glomode;
- un corps de glomode (XXX);
- un indicateur de couplage BID(XXX) qui signifie à l'interpréteur interne, lorsque XXX est un moloc, que celui-ci est de nature:
 - bilatérale (et peut exiger un recalage avant sa mise en oeuvre);
 - découplée (et donc entraîne un décalage maître/esclave);
 - indifférente (ne modifie pas le couplage initial).

Selon le cas, (XXX) consiste en une procédure générant les ordres nécessaires au lancement du mode XXX (glomode atomique), ou une structure de réseau décrivant l'enchaînement de modes qui forme XXX.

Le réseau associé à un glomode évolué XXX comprenant N étapes, la structure (XXX) qui lui correspond est illustrée sur la figure IV.3. On y trouve tout d'abord un code réseau qui indique que les octets suivants ne sont pas une procédure exécutable (glomode non atomique). A chaque étape n sont ensuite attachés:

Figure IV.3: Structure de réseau



LE SYSTEME SARAH

- un mode de commande ou un glomode plus élémentaire XXXn;
- un module de calcul C-XXXn chargé des traitements permettant l'obtention des paramètres indispensables (calcul, dialogue avec l'opérateur, accès à la base de données environnement); de la même façon qu'un mode de commande, cette procédure consomme des adresses paramètres prises sur la pile NPS;
- un champ étiquette informant l'opérateur du rôle dévolu à l'étape dans l'évolution du glomode;
- le nombre et l'adresse des successeurs de l'étape;
- un champ paramètre contenant des adresses de paramètre à placer sur la pile NPS (et destinées, soit au glomode XXXn, soit au module de calcul C-XXXn), ainsi que des instructions de manipulation de la pile;
- un champ contrôle qui spécifie les possibilités de transition automatique en sortie de l'étape et autorise en particulier l'implantation de boucles.

IV.2.2 MECANISMES DE COMPILATION

Les structures de glomode étant ainsi posées, le système superviseur se doit de fournir à l'homme les outils assurant leur création hors-ligne. Ce rôle est dévolu à un module logiciel, le compilateur SARAH, dont l'utilisation est explicitée ci-dessous.

Nous définirons dans un premier temps les procédures de mise en oeuvre d'un mode de commande. Une telle procédure s'écrit selon le schéma:

- déclaration des types ou adresses des paramètres dont le mode délivre la valeur (constructions tp PACQ ou np tp PACQ1 avec np = numéro paramètre et tp = type paramètre); cette liste servira au traitement des compte-rendus de fin de mode;
- initialisation du buffer d'émission (routine TBUF4);
- déclaration des types ou des adresses des paramètres dont la valeur est exigée au lancement du mode (construction tp PREST ou np tp PREST1); ces valeurs seront chargées dans le buffer d'émission;
- envoi de l'ordre (routine SEND4).

LE SYSTEME SARAH

La procédure de mise en oeuvre attachée au mode bilatéral symétrique (MBS) est de la sorte:

```
: (MBS)    0 PINCE PACQ1 TBUF4! 0 POIDS PREST1 41 SEND4 ;
```

que l'on traduit par:

- à son achèvement, le mode MBS renvoie l'état de la pince au travers de la variable paramètre PINCE 0 (valeurs de consigne et de recopie de l'actionneur pince);
- il prend la valeur du poids à soustraire du retour d'effort dans la variable paramètre POIDS 0;
- son code d'appel est 41.

De même, la procédure:

```
: (ACQPOS)  POS PACQ 0 PINCE PACQ1 TBUF4! 38 SEND4 ;
```

signifie que le mode acquisition de position (ACQPOS, code 38) délivre, outre l'état de la pince, les valeurs de recopie du manipulateur qui seront rangées dans une variable position non précisée. Au lancement du mode, le numéro de cette dernière sera demandé à l'opérateur, s'il ne se trouve pas déjà sur la pile NPS.

Dans le cas d'un enchaînement XXX non atomique, le corps (XXX) du glomode est une structure de réseau décrite en respectant la forme générale suivante:

N (nombre d'étapes du réseau) DEFRES (XXX)

0 ETAPE

XXX0 (nom du glomode associé à l'étape 0)

C-XXX0 (nom du module de calcul associé à l'étape 0)

<compilation champ étiquette>

S1 S2 ... SIO IO ARC

(IO = nombre d'arcs de sortie de l'étape 0)

(S1 S2 ... SIO = numéros des étapes de sortie de l'étape 0)

<compilation champ paramètre>

<compilation champ contrôle>

...

N-1 ETAPE

...

FINRES

LE SYSTEME SARAH

où:

- <compilation champ contrôle> définit une liste d'instructions de contrôle dont les principales sont:
 - transition automatique: construction $n \text{ TRAUTO}$, n désignant le numéro d'une étape de sortie correspondant à un successeur privilégié de l'étape considérée;
 - début de boucle: $n1 \text{ ni DBCL}$, initialise à ni un compteur de boucle dont la valeur de chute est fixée à $n1$, ou $np \text{ ni VBCL}$ qui prend la valeur de chute dans la variable paramètre $\text{CTRBCL } np$;
 - fin de boucle: $n \text{ FBCL}$, exécute une transition automatique vers l'étape n si $ni < n1$, sinon $ni := ni + 1$.

Remarque 1: l'implantation de la structure de boucle autorise la programmation de boucles imbriquées, le compteur adressé par FBCL étant toujours celui initialisé par le DBCL (ou le VBCL) immédiatement précédent.

Remarque 2: en-ligne, les séquences d'instructions de contrôle sont interprétées dans l'ordre d'écriture jusqu'à la détection d'une instruction valide de transition automatique; ainsi:

$n1 \text{ FBCL } n2 \text{ TRAUTO}$

implique une transition automatique vers l'étape $n1$ tant que la boucle continue, vers l'étape $n2$ à la chute du compteur.

- <compilation champ paramètre> définit une liste d'instructions de manipulation de la pile NPS, parmi lesquelles on distingue:
 - des instructions de chargement:
 - $np \text{ tp PARAM}$ qui met l'adresse de la variable paramètre (tp, np) en sommet de NPS;
 - $np \text{ tp XPARAM}$ qui met l'adresse de la variable paramètre ($tp, np + \text{valeur courante du compteur de boucle}$) en sommet de NPS;
 - des instructions classiques de gestion de pile:
 - PDUP , duplication de l'élément supérieur de NPS;
 - PSWAP , échange des 2 éléments supérieurs de NPS;
 - POVER , copie du deuxième élément de NPS en sommet de pile;
 - PROT , transfert du 3e élément de NPS en sommet de pile;
 - PDROP , suppression du premier élément de NPS;

LE SYSTEME SARAH

P2SWAP, échange des premier et deuxième éléments de NPS avec les 3e et 4e;

P2DROP, suppression des 2 premiers éléments de NPS.

- <compilation champ étiquette> spécifie un message destiné en-ligne à l'opérateur et généré par la construction:

nom chaîne ETIQ, éventuellement suivie de np tp REF ou XREF, REF ou XREF indiquant que le nom de la variable paramètre (tp, np) ou (tp, np + valeur courante du compteur de boucle) sera ajouté à la chaîne de caractères pré-citée.

Le corps (XXX) d'un enchaînement XXX ayant été créé de la manière précédemment exposée, la structure de glomode peut maintenant être écrite sous la forme:

GLOMODE XXX .XXX -XXX (XXX),

à laquelle on adjoindra dans le cas d'un glomode atomique l'un des indicateurs de couplage suivants:

- MSYM: mode symétrique;
- MDEC: mode découplé;
- MINDIFF: mode indifférent;
- MIMAUT: mode automatique dont la nature est fonction du paramètre IMAUT qui lui est associé (test et/ou exécution, recopie passive du maître ou non).

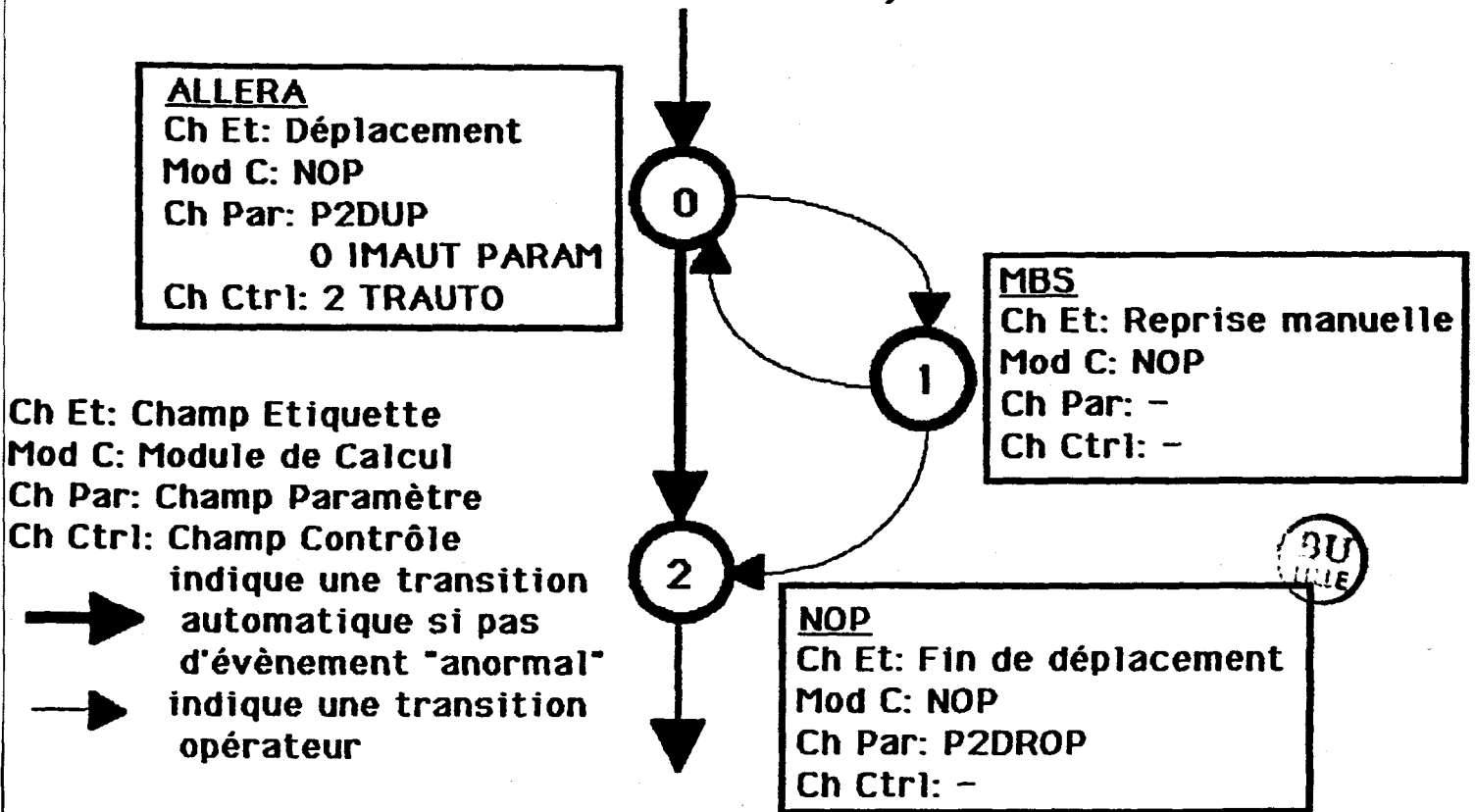
IV.2.3 EXEMPLES

Afin d'illustrer notre propos, nous allons détailler ici 2 exemples de glomodes évolués. Le premier est relatif à un déplacement automatique avec possibilité de reprise manuelle (deplauto) assez similaire à celui présenté sur la figure III.7. Les modes de commande impliqués dans ce deplauto sont:

- ALLERA, déplacement automatique sans contrainte sur la trajectoire; ce mode demande les paramètres suivants:
 - indicateur IMAUT: exécution/test-recopie maître/sans recopie;
 - paramètre POS: position à atteindre;
 - paramètre FORS: force scalaire dont le dépassement par les

**Figure IV.4: Implantation SARAH du glomode deplauto
(déplacement automatique avec reprise manuelle sur collision)**

Paramètres d'entrée: FORS, POS -->



efforts appliqués à l'esclave génère une fin de mode (butée en effort);

- paramètre POIDS 0: valeur du poids à compenser dans le retour d'effort;
- MBS, mode bilatéral symétrique qui nécessite une valeur de poids (POIDS 0) et renvoie l'état de la pince dans PINCE 0;
- NOP, mode no operation qui n'a d'intérêt que pour le fonctionnement interne du superviseur et ne donne pas lieu à un échange avec le système d'exécution.

Les composantes de deplauto étant définies, l'implantation est

LE SYSTEME SARAH

décrite ci-dessous (figure IV.4):

```
.deplauto $STRING deplauto"
```

```
$deplauto0 $STRING Déplacement"
```

```
$deplauto1 $STRING Reprise manuelle"
```

```
$deplauto2 $STRING Fin de déplacement"
```

```
3 DEFRES (deplauto) ( FORS, POS )
```

```
0 ETAPE ALLERA NOP $deplauto0 ETIQ 1 2 2 ARC
```

```
P2DUP 0 IMAUT PARAM 2 TRAUTO
```

```
1 ETAPE MBS NOP $deplauto1 ETIQ 0 2 2 ARC
```

```
2 ETAPE NOP NOP $deplauto2 ETIQ 0 ARC
```

```
P2DROP
```

```
FINRES
```

```
: -deplauto <PTEST POS PTEST FORS PTEST PTEST> ;
```

```
GLOMODE deplauto .deplauto -deplauto (deplauto)
```

Nous passerons rapidement sur le double rôle du NOP final qui, d'une part, assure la modularité du glomode (une étape d'entrée, une étape de sortie) et, d'autre part, met en évidence pour l'opérateur les différents échelons d'imbrication d'un enchaînement de haut niveau (cf. IV.3.3). Concernant la gestion des paramètres, la variable POIDS 0 (réservée système) est supposée contenir la valeur courante du poids transporté par l'effecteur (mesurée par exemple grâce au mode ACQPOIDS) et n'exige pas de précision supplémentaire. D'une manière générale, la sélection d'un indicateur tel que IMAUT se fait parmi un ensemble de valeurs discrètes pré-définies et protégées système; le choix de IMAUT 0 est ainsi spécifié dans le champ paramètre de l'étape 0 et correspond à l'exécution d'un déplacement automatique sans recopie du maître. A l'inverse, deplauto exige la présence sur la pile NPS des adresses des paramètres de type POSITION (POS) et FORCE SCALAIRE (FORS) à utiliser. Elles pourront y être placées,

LE SYSTEME SARAH

soit par l'opérateur (sollicité par la routine -deplauto, voir plus loin), soit par des instructions de manipulation de pile issues d'un glomode de plus haut niveau. Ces adresses sont dupliquées avant le lancement de ALLERA (P2DUP) de façon à permettre une évolution étapes 0-1-0 correcte, puis détruites (P2DROP) afin de ne pas encombrer inutilement la pile NPS. Autre composante importante du glomode, la procédure -deplauto vérifie que l'état de la pile est compatible avec l'enchaînement demandé. Elle interrogera l'opérateur si les adresses paramètres requises ne se trouvent pas sur NPS, ou si les valeurs associées restent non définies. L'opérateur aurait ici à choisir un paramètre de type POS parmi ceux précédemment appris (mode ACQPOS, par exemple), ainsi qu'un paramètre de type FORS dans une gamme de valeurs pré-sélectionnées (protection locale) qui autorise un réglage de la sensibilité de détection des collisions.

Notre deuxième exemple traite de la saisie automatique d'un outil dans son ratelier. Le bras est d'abord amené en position d'approche au-dessus du ratelier, puis déplacé verticalement afin d'insérer un ergot solidaire de l'outil dans le dispositif de fixation attaché à la pince. L'outil est ensuite verrouillé pneumatiquement avant que le bras ne regagne la position d'approche. Le glomode outsaisie_auto (figure IV.5) proposé ici illustre l'utilisation d'un modèle des objets de l'environnement. Dans le cas présent, ce modèle contient pour chaque outil:

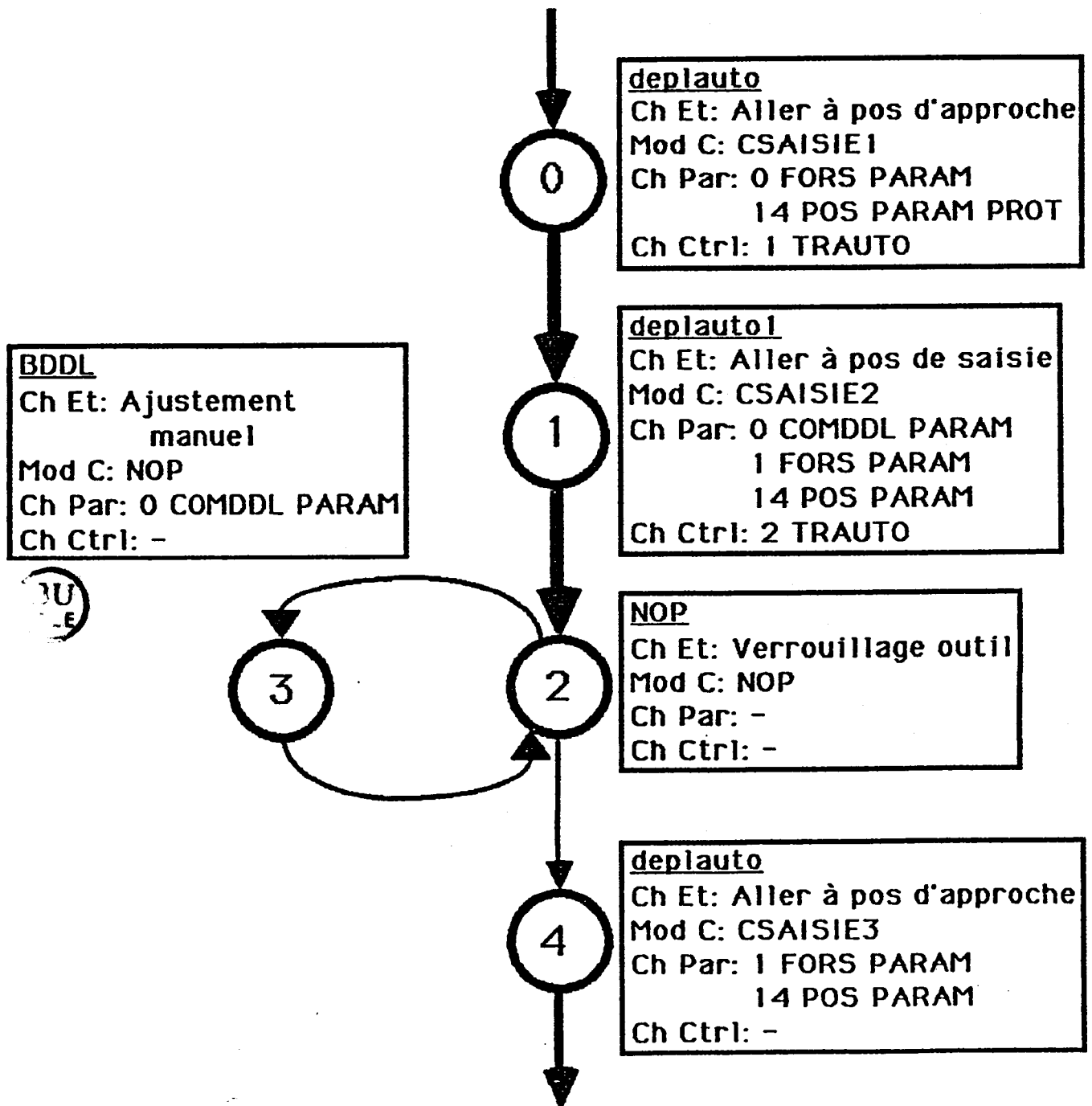
- son poids;
- sa position d'approche;
- sa position de saisie.

La principale difficulté rencontrée avec outsaisie_auto résulte de la précision demandée dans les mouvements, précision qui nécessite une compensation fine des flexions induites sur l'esclave par le poids des objets transportés. L'enchaînement se décompose ainsi en:

- étape 0:
 - chargement de la pile NPS avec les adresses paramètres FORS 0 (force anticollision, protection locale, valeur: 5 kg) et POS 14 (réservée système, valeur indéterminée à ce stade);
 - transfert de l'adresse de la variable OUTIL à utiliser en sommet de pile (PROT);

**Figure IV.5: Implantation SARAH du glomode outsaisie_auto
(saisie automatique d'un outil dans son ratelier)**

Paramètre d'entrée: OUTIL -->



LE SYSTEME SARAH

- partant de la donnée de l'outil, le module de calcul CSAISIE1 affecte les variables POIDS 0 et POS 14 avec le poids de la pince et les coordonnées de la position d'approche extraites du modèle;
- exécution de deplauto vers la position d'approche avec compensation du poids de la pince et détection des collisions (butée en effort);
- étape 1:
 - CSAISIE2 affecte POS 14 avec les coordonnées de la position de saisie;
 - déplacement automatique avec reprise manuelle en blocage de ddl (deplauto1); ce glomode utilise les paramètres COMDDL 0 (rotations bloquées, protection système), FORS 1 (force sécurité, protection système, valeur: 20 kg) et POS 14 (le choix de FORS 1 se justifie par le contact attendu entre l'outil et la pince qui ne doit pas générer d'alarme intempestive);
- étape 2:
 - verrouillage de l'outil (la commande n'en est pas encore informatisée) qui demande à être validé par l'opérateur et n'autorise donc aucune transition automatique de sortie;
- étape 3:
 - reprise en blocage de ddl (BDDL) rotations bloquées dont l'assistance s'est avérée la plus efficace pour l'ajustement manuel du dispositif de fixation;
- étape 4:
 - affectation par CSAISIE3 de POIDS 0 et POS 14 avec le poids de l'outil et les coordonnées de la position d'approche;
 - mouvement vers la position d'approche, compensation du poids de l'outil et faible sensibilité en détection des collisions (FORS 1).

IV.3 INTERPRETATION DES GLOMODES

En-ligne, le superviseur SARAH exploite les différentes informations fournies par les structures de glomode qui traduisent les actions demandées. Le système gère ainsi les enchaînements de modes de commande, les passages de paramètres, les compte-rendus d'exécution et les échanges homme-calculateur. Dans notre présentation, nous décrirons tout d'abord l'interpréteur interne, avant de détailler le fonctionnement de l'interface opérateur. Cette partie se terminera par 2 exemples d'interprétation (glomodes `deplauto` et `outsaisie_auto`) significatifs des problèmes rencontrés en phase de travail et de l'assistance symbolique apportée.

IV.3.1 INTERPRETEUR INTERNE

L'implantation du noyau SARAH est largement inspirée de Forth; dans le parcours des réseaux imbriqués, elle utilise 2 pointeurs:

- NPTR qui, à tout moment, contient l'adresse de l'étape de plus bas niveau en cours de traitement;
- GPTR qui mémorise l'adresse `adr XXXn` du glomode `XXXn` associé à l'étape `n` pointée par NPTR.

L'interpréteur interne dispose en outre d'une pile de retour NRS (type LIFO) manipulée par les routines:

- empiler (`XXXn` est alors nécessairement un glomode non atomique):
 - sauvegarde de NPTR en sommet de NRS;
 - NPTR reçoit l'adresse de la première étape du réseau représentant `XXXn`;
 - GPTR reçoit l'adresse du glomode attaché à cette étape;
- dépiler:
 - transfère dans NPTR de l'adresse en sommet de NRS;
 - GPTR reçoit l'adresse du glomode (non atomique) attaché à l'étape pointée par cette adresse.

Exposée de façon un peu schématique, la structure de l'interpréteur interne (cf. figure IV.2) est la suivante (les pointeurs sont

LE SYSTEME SARAH

initialisés par l'interpréteur externe: NPTR <- 0, GPTR <- adresse du glomode appelé; la pile NRS est vide):

```

: NINTER          nom de la procédure
  BEGIN          début de boucle
    <initialisation indicateurs, variables, etc.>
    NINTER1      empile jusqu'à rencontrer une étape atomi-
                  que dont il lance le moloc associé
    WAIT         traitement des compte-rendus d'exécution
    NINTER2      dépile jusqu'à trouver un réseau susceptible
                  d'évoluer
    CTRL         traite le champ contrôle de l'étape achevée
    TRAUTO? IF   si transition automatique
      NINTER4A   alors chargement de NPTR et GPTR,
                  la boucle continue
    ELSE         sinon
      NINTER3     affichage du menu d'évolution
      NINTER4     acquisition et traitement du choix opéra-
                  teur, positionnement de l'indicateur de
                  fin de boucle
    ENDIF        fin si
  UNTIL         test de l'indicateur de fin de boucle
  NINTER5 ;     affichage de la fin de glomode

```

Pour une bonne compréhension du système, nous donnons ci-dessous une description plus précise de certaines sous-routines.

- NINTER1

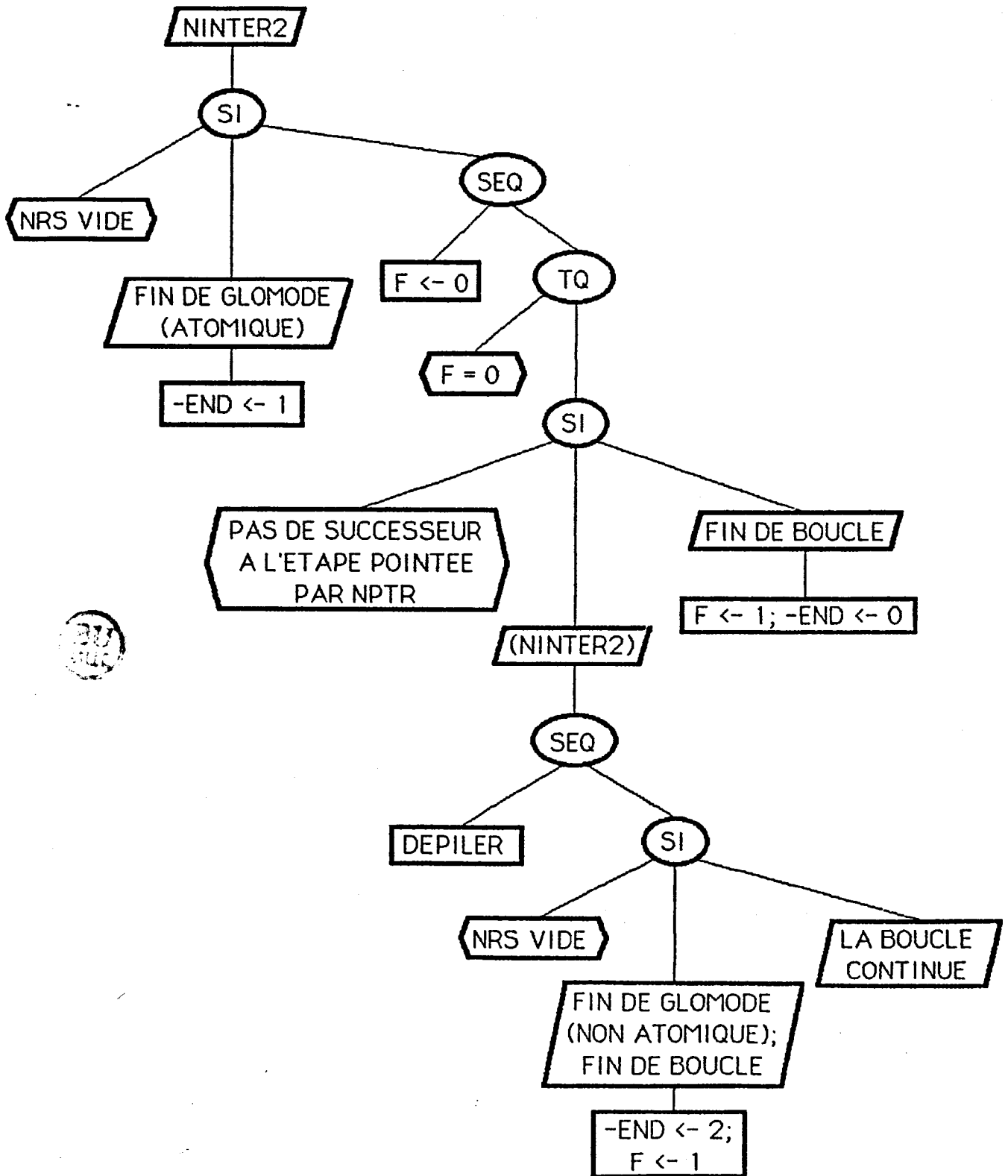
ET désignant l'étape pointée par NPTR, NINTER1 s'écrit:

```

: NINTER1
  BEGIN          début de boucle
    .LABEL1      affiche le contenu du champ étiquette de ET
    CONFIG-NPS   traite le champ paramètre de ET et configu-
                  re la pile NPS
    CMODULE      exécute le module de calcul associé à ET
    ?NET WHILE   sortie de boucle immédiate si le glomode
                  associé à ET est atomique

```

Figure IV.6: Organigramme de la routine NINTER2



LE SYSTEME SARAH

NBRAN	empile
REPEAT	répète la boucle
MINTER ;	lance le moloc associé à ET (éventuellement avec un recalage préalable et après validation des paramètres).

- NINTER2

La routine NINTER2 (figure IV.6) dépile NRS dans NPTR afin de lui faire pointer un réseau non achevé. Si cela n'est pas possible, NINTER2 signale par l'indicateur -END que l'interprétation est terminée.

- NINTER3

Appelée à la réception d'un compte-rendu de fin de mode, la routine NINTER3 affiche le menu d'évolution et charge une table MF avec les adresses des successeurs de l'étape désignée par NPTR. Outre ces successeurs, le système offre systématiquement les options:

- retour au mode précédent;
- fin de glomode;
- interruption.

- NINTER4

NINTER4 fait l'acquisition du choix opérateur et, selon le cas:

- extrait l'adresse d'un successeur de la table MF et la charge dans NPTR avant d'affecter GPTR;
- restitue le contexte sauvegardé au lancement du mode précédent;
- force la sortie de la boucle d'interprétation;
- sauvegarde le contexte courant en vue d'une reprise ultérieure, affiche le menu de configuration et, suite à la sélection opérateur, relance NINTER par appel récursif.

IV.3.2 INTERFACE OPERATEUR

Nous décrivons ici l'interface opérateur développée dans le cadre de l'expérimentation canonique ARA et attachée à l'interpréteur précédent. Sa conception repose sur un principe de manipulation directe qui favorise la

LE SYSTEME SARAH

rapidité et la fiabilité des échanges homme-calculateur en-ligne. Nous avons ainsi opté pour un dialogue par menus que l'on adressera au moyen d'une souris. Par ailleurs, l'analyse des interactions avec l'opérateur a conduit à différencier plusieurs classes d'information parmi les retours symboliques nécessaires au processus de commande. Pour la supervision, nous nous sommes dès lors orientés vers un écran multi-fenêtres géré dynamiquement en fonction de l'évolution au sein de ce processus. Dans un tel contexte, on ne s'étonnera pas du choix d'un ordinateur Mac Intosh comme support hardware de l'interface.

Considérant le fonctionnement de l'interpréteur interne, les informations à restituer peuvent être structurées en diverses catégories de retours symboliques. On distingue de la sorte:

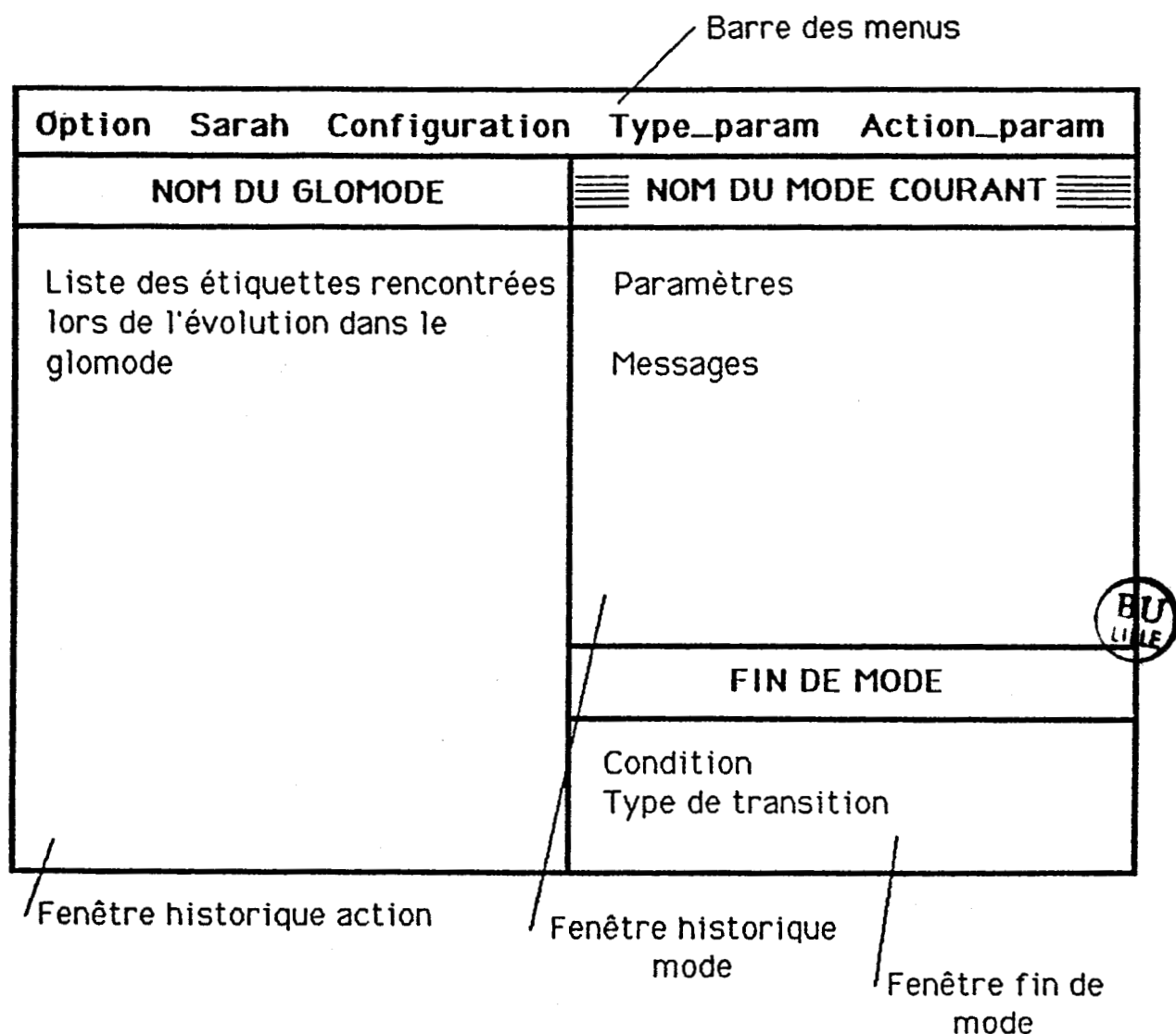
- les informations relatives au comportement de la machine de TAO, qui incluent:
 - le nom du moloc courant et les paramètres qui lui ont été associés;
 - les messages émis par le système d'exécution, mais n'entraînant pas de progression dans le glomode interprété (ex: "recalage", "fin de recalage", "butée mécanique sur l'axe 4", etc.);
 - les conditions de fin de mode;
 - les types de transition effectuée (automatique ou opérateur);
- le but du mode en cours spécifiant l'objectif localement assigné à ce mode à l'intérieur du glomode interprété;
- les informations témoignant de l'évolution dans la tâche, qui visent à faciliter le suivi d'exécution par l'homme;
- la visualisation des paramètres accessibles (nom, attribut, valeur).

On classera également les entrées opérateur en:

- invocation d'un glomode;
- sélection dans le menu d'évolution;
- sélection dans le menu de configuration;
- choix et affectation des variables paramètres.

D'une manière générale, les interactions homme-calculateur dans la conduite de SARAH présentent une succession de cycles comportant les

Figure IV.7: Ecran opérateur dans le suivi d'exécution d'un mode de commande



phases suivantes:

- mise en oeuvre d'un mode de commande;
- contrôle de son évolution.

Dans une de ces deuxièmes phases, l'écran de l'interface de supervision est divisé en 4 zones (figure IV.7):

- une barre de menu temporairement inactive;
- une fenêtre historique action dont le titre est le nom du glomode

Figure IV.8: Ecran opérateur en phase de transition

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
N Liste de lors de glomode	Mode précédent Interruption Fin d'action Paramètres	trées	===== MENU D'EVOLUTION =====	
			☐ Nom successeur 1 Etiquette associée ☐ Nom successeur 2 Etiquette associée etc.	
			FIN DE MODE	
			Condition Type de transition	

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
		Recalage Apprentissage Porteur MBS	FHOM DIST DEPLS VITS FORS POIDS PINCE POSPAM POS DEPLV VITV FORV OUTIL	Visualisation Valeur Nom Protection Autre param Autre type Exit

LE SYSTEME SARAH

appelé et qui affiche le contenu des différents champs étiquette rencontrés au cours de l'interprétation; respectant une tabulation qui traduit le niveau hiérarchique de chaque étiquette, cette fenêtre permet à l'opérateur de reconstituer le chemin parcouru au travers des réseaux imbriqués;

- une fenêtre historique mode qui informe du mode courant (titre de la fenêtre), des paramètres utilisés et des messages relatifs à son exécution (l'objectif local attaché à ce mode est en permanence indiqué par le dernier label de la fenêtre historique action);
- une fenêtre fin de mode spécifiant la condition d'arrêt du moloc antérieur, de même que la nature de la transition réalisée.

En cas de transition automatique, la fenêtre historique mode est simplement ré-initialisée en regard du successeur programmé et les fenêtres fin de mode et historique action sont mises à jour. Lors d'une transition manuelle, le menu d'évolution proposant l'ensemble des successeurs possibles (désignés par leur nom et leur étiquette) se superpose à la fenêtre historique mode; par ailleurs, le menu SARAH (options systématiques) accessible par la barre des menus est activé. L'opérateur peut ainsi (figure IV.8):

- pointer un des successeurs offerts dans le menu d'évolution;
- cliquer sur le menu SARAH et choisir entre les options:
 - Retour au mode précédent;
 - Interruption, qui affiche le menu de configuration;
 - Fin d'action, qui entraîne la sortie de l'interpréteur interne;
 - Paramètres, qui donne accès à l'éditeur de paramètres via les menus Type_param et Action_param, permettant de visualiser toutes les variables paramètres d'un même type (nom, attribut et valeur), d'en modifier la valeur, de leur donner un nom ou d'en changer l'attribut (du moins, lorsque l'attribut courant l'autorise); cet éditeur fait appel à une fenêtre paramètre qui occupe la totalité de la surface disponible sur l'écran.

Quelle que soit la transition effectuée, le lancement d'un mode implique un dialogue avec l'opérateur si les variables paramètres nécessaires ne sont pas toutes définies ou affectées. La fenêtre paramètre est alors affichée, ainsi que l'état des variables du type concerné.

IV.3.3 EXEMPLES

Afin d'illustrer le fonctionnement de l'interface opérateur, nous présentons ci-dessous 2 scénarios représentatifs des interactions symboliques en phase de travail. Ils concernent les glomodes deplauto et outsaisie_auto précédemment décrits (figures IV.4 et IV.5) que l'opérateur invoque en frappant leur nom au clavier. Dans le scénario deplauto, les paramètres POSITION et FORCE SCALAIRE n'ayant pas été donnés au préalable, le système affiche la fenêtre paramètre et demande l'acquisition des variables à utiliser (figure IV.9.a). Après validation des entrées opérateur, l'ordre de lancement du moloc ALLERA est donné (figure IV.9.b), auquel nous supposons que le niveau exécution répond immédiatement par un événement "fin de mode sur position inatteignable". Cette condition d'arrêt étant "anormale", la transition automatique programmée est inhibée; SARAH engage alors un dialogue de détermination des actions à mener, en libérant l'accès aux menus d'évolution et SARAH (figure IV.9.c). Avec la souris, l'opérateur sélectionne ainsi l'option "interruption" du menu SARAH (sauvegarde du contexte deplauto et activation du menu de configuration), puis l'option "porteur" du menu de configuration qui appelle un glomode de déplacement du porteur, de manière à rendre atteignable la position visée. Au terme de cet enchaînement, le contexte deplauto est restitué et un "retour au mode précédent" permet de remettre en oeuvre le ALLERA qui s'exécute correctement, le glomode suivant dès lors une évolution sans problème (figure IV.9.d).

Dans le deuxième scénario, la ligne de commande "outsaisie_auto perceuse_rouge" suffit à initialiser l'interpréteur externe de SARAH. Les paramètres du glomode sont entièrement spécifiés et l'interpréteur interne lance sur le champ la première étape (deplauto position d'approche) que l'opérateur interrompt peu après lorsqu'il détecte un risque de collision. La transition automatique étant invalidée par la condition de fin de mode, le système affiche le menu d'évolution (figure IV.10.a) dont l'option "reprise manuelle" donne lieu à un recalage (ALLERA est un mode découplé), puis au mode bilatéral symétrique MBS qui autorise l'évitement de l'obstacle repéré. L'opérateur repasse ensuite en déplacement automatique afin de rejoindre

Figure IV.9: Affichages en cours d'exécution d'un deplauto

IV.9.a

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
deplauto			ALLERA	
PARAMETRES				
<Le paramètre POS à utiliser n'est pas défini>				
0	POS 0	Défini		
1	POS Perçage 1	Prot. locale		
2	POS Perçage 2	Prot. locale		
3	POS Perçage 3	Prot. locale		
4	POS 4	Non défini		
5	POS 5	Non défini		
6	POS Repos	Prot. locale		
7	POS Poubelle	Prot. locale		
8	POS 8	Non défini		
9	POS 9	Non défini		
<Entrer le numéro du paramètre POS à utiliser>				7

IV.9.b

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
deplauto			ALLERA	
Déplacement			<PARAMETRES> POS Poubelle FORS Anticollision IMAUT=Exécution	
			FIN DE MODE	

IV.9.c

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
	depl	Recalage Apprentissage	=====	MENU D'EVOLUTION =====
Déplacement		Porteur MBS	☐ MBS Reprise manuelle ☐ NOP Fin de déplacement	
				FIN DE MODE
				Position inatteignable Transition opérateur

IV.9.d

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
		Mode précédent Interruption	=====	MENU D'EVOLUTION =====
Déplacer Porteur Déplacement Fin de déplacement		Fin d'action Paramètres		
				FIN DE MODE
				Fin de tâche Transition opérateur

Figure IV.10: Affichages en cours d'exécution d'un outsaisie_auto

IV.10.a

Option Sarah Configuration	Type_param	Action_param
outsaisie_auto	MENU D'EVOLUTION	
Aller à pos d'approche Déplacement	☒ MBS	Reprise manuelle
	☐ NOP	Fin de déplacement
	FIN DE MODE	
	Interruption opérateur Transition opérateur	



IV.10.b

Option Sarah Configuration	Type_param	Action_param
outsaisie_auto	ALLERA	
Aller à pos d'approche Déplacement Reprise manuelle Déplacement Fin de déplacement Aller à pos de saisie Déplacement	<PARAMETRES> POS 14 FORS Sécurité IMAUT=Exécution	
	FIN DE MODE	
	Fin de tâche Transition auto	

IV.10.c

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
outsaisie_auto			MENU D'EVOLUTION	
Aller à pos d'approche Déplacement Reprise manuelle Déplacement Fin de déplacement Aller à pos de saisie Déplacement Fin de déplacement Verrouillage outil			☐ deplauto	Aller à pos d'approche
			☒ BDDL	Ajustement manuel
			FIN DE MODE	
			Fin de tâche Transition opérateur	



IV.10.d

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
outsaisie_auto			NOP	
Aller à pos d'approche Déplacement Reprise manuelle Déplacement Fin de déplacement Aller à pos de saisie Déplacement Fin de déplacement Verrouillage outil Ajustement manuel Verrouillage outil Aller à pos d'approche Déplacement Fin de déplacement				
			FIN DE MODE	
			Fin de tâche Transition opérateur	

LE SYSTEME SARAH

avec précision la position d'approche de la perceuse, position qu'il apprécie difficilement sur les images caméra 2D. Le premier deplauto accompli, SARAH lance le déplacement vers la position de saisie (figure IV.10.b) et propose le verrouillage de l'outil (figure IV.10.c). En cas d'échec, un ajustement manuel en BDDL rotations bloquées permet de rectifier la position du dispositif de fixation et de retenter le verrouillage. Le bras revient enfin en position d'approche, dégageant l'outil de son ratelier (figure IV.10.d).



Considérant ces 2 scénarios, on admettra la faible utilité d'un glomode isolé de bas niveau tel que le deplauto présenté. Pour déposer un déchet dans la poubelle, l'opérateur préférera directement un mode manuel (MBS en l'occurrence) qui ne l'oblige pas à sélectionner les paramètres pertinents ou d'éventuelles procédures de reprise. Ce type de glomode est cependant à la base d'enchaînements comme outsaïsie_auto dont l'intérêt ne fait aucun doute. D'une part, l'emploi d'un changeur d'outil assure une fixation rigide de la charge qui évite les incidents rencontrés avec la pince bidigitale (perte de l'outil, glissement des mors, etc.). L'expérience montre d'autre part qu'avec la précision exigée et un retour visuel souvent masqué par la pince et le poigné du manipulateur esclave, la saisie manuelle d'un outil par un dispositif spécifique nécessite une pénible succession de mouvements tatonnants. Sans assistance, cette opération demande plusieurs minutes et peut même s'avérer impossible pour un opérateur débutant; avec le glomode proposé au contraire, la saisie est menée à bien en quelques secondes et avec un faible taux d'incident. Tout fonctionnement automatique suppose néanmoins un minimum de connaissance de l'environnement (ici, 2 positions et une valeur de poids) qui conduit à l'écriture de glomodes d'apprentissage (cf. annexe B, glomode apsaisie).

CONCLUSION

Le système de supervision SARAH décrit dans ce chapitre permet une préparation hors-ligne des tâches, visant en-ligne à la détermination

LE SYSTEME SARAH

interactive des enchaînements de modes de commande les plus pertinents vis-à-vis du travail à réaliser. Inspiré de Forth, il est fondé sur la notion de glomode que l'on pourrait définir comme des "squelettes de programme" représentant une action de TAO sous une forme modulaire, redondante et incomplète. Suite à cet exposé général, nous abordons maintenant la mise en oeuvre du superviseur sur le site canonique ARA avant de détailler les expérimentations effectuées.

CHAPITRE V

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

Pour le pôle téléopération ARA, une expérimentation canonique intégrant l'ensemble des systèmes et des fonctions nouvelles développés dans le cadre du projet, était indispensable. En effet, les recherches entreprises avaient essentiellement pour but d'assister l'homme dans la conduite d'un télémanipulateur maître/esclave; elles nécessitaient ainsi une validation globale, tenant compte des interactions entre les diverses composantes, homme et machine. L'expérimentation canonique a débuté par la construction d'un site juxtaposant un système aussi complet que possible à un environnement de travail réaliste. En parallèle, le choix des tâches d'évaluation s'est fait selon les critères suivants:

- représentativité vis-à-vis des domaines courants d'application;
- complexité justifiant une approche TAO;
- faisabilité en regard des moyens disponibles.

Dans un premier temps, la richesse des tâches rencontrées dans le nucléaire, les compétences CEA en la matière et les facilités pratiques offertes dans la réalisation du site, ont conduit à la sélection du domaine d'application. Par la suite, les scénarios d'évaluation ont été classés en 3 catégories:

- inspection où la prépondérance des problèmes de suivi de surface et de

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

perception fine ouvre un vaste champ d'étude des modes référencés capteurs et des assistances sensorielles en général (stéréovision, etc.);

- démantèlement qui pose des difficultés de mise en oeuvre des outillages de découpe (meule, tronçonneuse, torche plasma, ...) et rentabilise ainsi les assistances automatiques ou semi-automatiques telles que les modes découplés (robot) ou hybrides (blocage de ddl, par exemple);
- maintenance qui exige dextérité autant que précision, et oblige à combiner des séquences automatiques, des modes assistés et des retours d'information synthétiques.

Après avoir présenté le site expérimental ARA, nous détaillerons certaines des tâches d'évaluation considérées. Le chapitre s'achèvera enfin sur quelques éléments de discussion découlant des essais menés et permettant d'envisager de futurs développements.

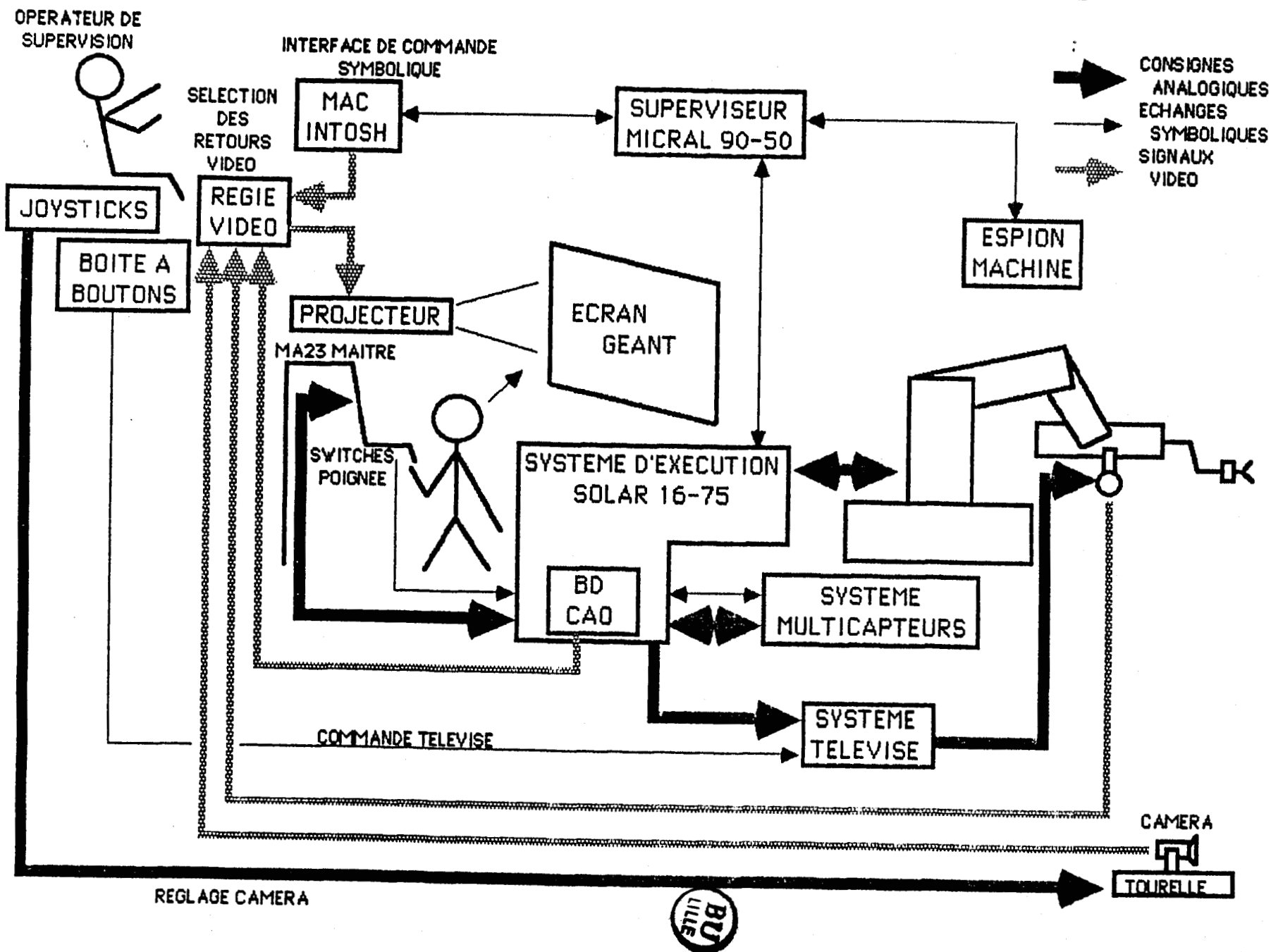
V.1 LE SITE CANONIQUE

V.1.1 DESCRIPTION

Pour cet exposé traitant du site expérimental ARA (figure V.1) [Fournier-Gaillard 86], nous distinguerons: univers esclave, poste maître et système de commande. Théoriquement situé à distance et inaccessible à l'homme, l'univers esclave (figure V.2) se compose dans notre cas:

- d'un environnement de type nucléaire avec cuve, tubes, vannes et autres pièces de tuyauterie, ainsi que différents panneaux métalliques;
- d'un manipulateur MA23 monté sur un porteur PANDA à 4 ddl (pilotage tout ou rien en vitesse); à l'heure actuelle, le bras esclave peut être équipé:
 - soit d'une pince bidigitale munie des proximètres infra-rouges nécessaires aux modes référencés capteurs (IRISA);
 - soit d'une pince bidigitale associée à un dispositif pneumatique

Figure Y.1: Organisation matérielle de la machine de TAO ARA



IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

de saisie d'outillage (UGRA/CEA);

- d'une gamme d'outils variés (perceuse, clé à choc, meule, tronçonneuse, etc.) alimentés en air comprimé via le changeur d'outil et qui disposent chacun d'un support assurant leur placement dans un ratelier, ainsi que d'un ergot de fixation pour la saisie;
- de capteurs d'images:
 - 2 caméras couleur avec objectif motorisé (zoom, mise au point et diaphragme), vissées sur des tourelles orientables en site/azimut et positionnées de manière à offrir des vues latérales de l'espace de travail;
 - une caméra noir et blanc grand angle fixée en hauteur afin de fournir une vue plongeante de l'univers esclave;
 - une caméra suiveuse noir et blanc solidaire de la base du manipulateur et donnant constamment, grâce à un prisme mobile commandé par ordinateur, une image de la zone entourant l'organe terminal (système télévisé [Vertut-Coiffet 85]);
 - un dispositif de vision 3D conçu par l'ETCA a, par ailleurs, été évalué sur le site;
- d'un système multicapteurs (IRISA) composé des proximateurs infra-rouges montés sur la pince du bras esclave et d'un module d'acquisition et de pré-traitement implanté sur cartes Intel (convertisseurs A/D, Z80 et coprocesseur arithmétique) [André 85];
- d'un espion machine (LAIM) visant à la détection des pannes franches au niveau des actionneurs esclaves et de leur électronique.

Outre ces éléments physiquement présents dans l'espace de travail, il nous faut mentionner 2 systèmes de CAO intégrés à la structure de commande, mais assimilables à des capteurs virtuels:

- le système CARO (LAMB [Quaro 85]) porté sur Intel 86380 et cartes MATROX, qui génère des images réalistes de l'environnement esclave, animées en temps réel à partir des signaux de position émis par le manipulateur;
- le logiciel de simulation SIEL tournant sur SOLAR et qui, dans son utilisation en-ligne, délivre des informations pertinentes extraites d'une base de données géométrique; selon le cas (fonction de la tâche en cours), ces informations peuvent donner lieu à un retour d'effort

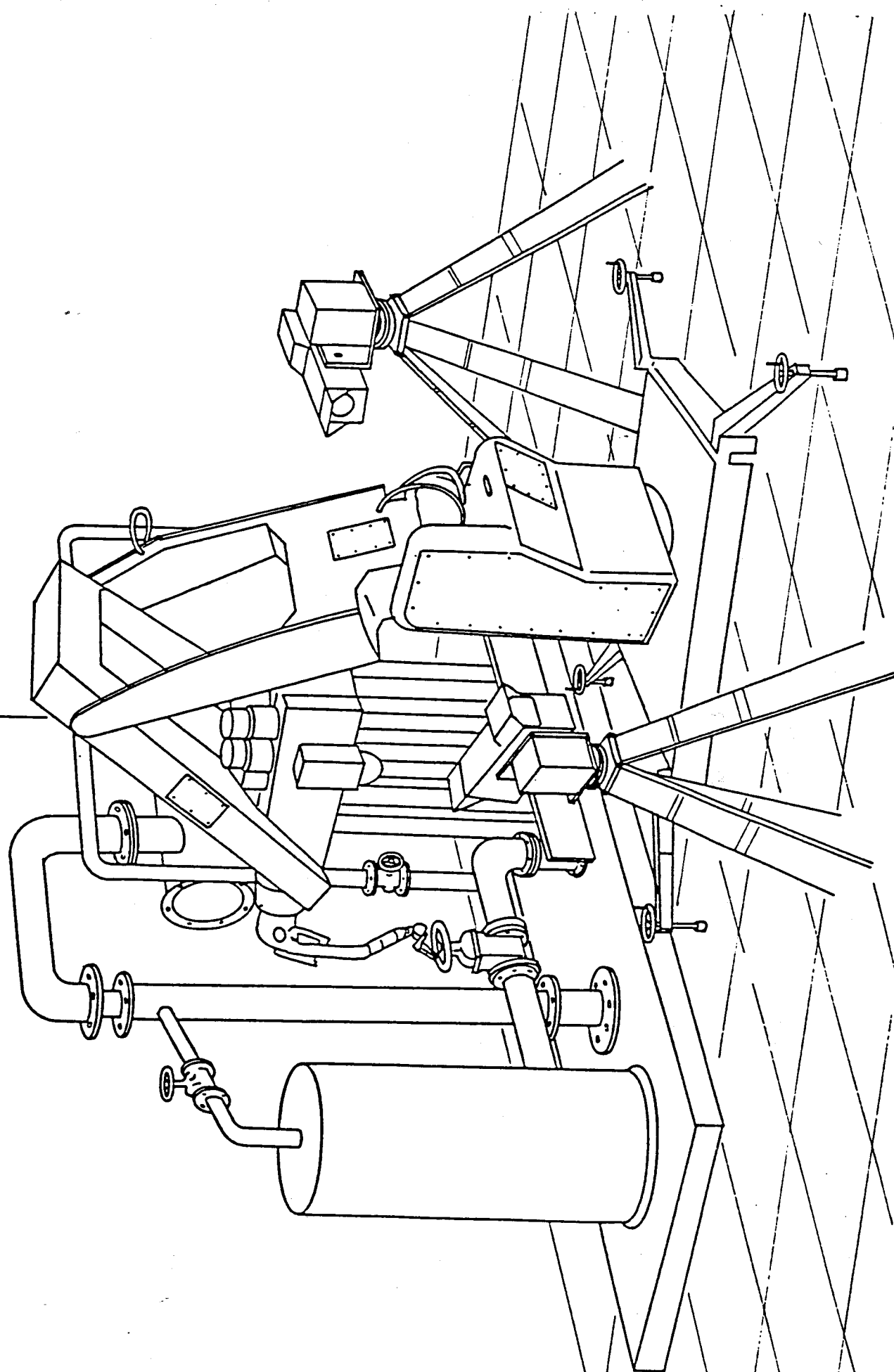


Figure V.2: Expérimentations ARA:
l'univers esclave

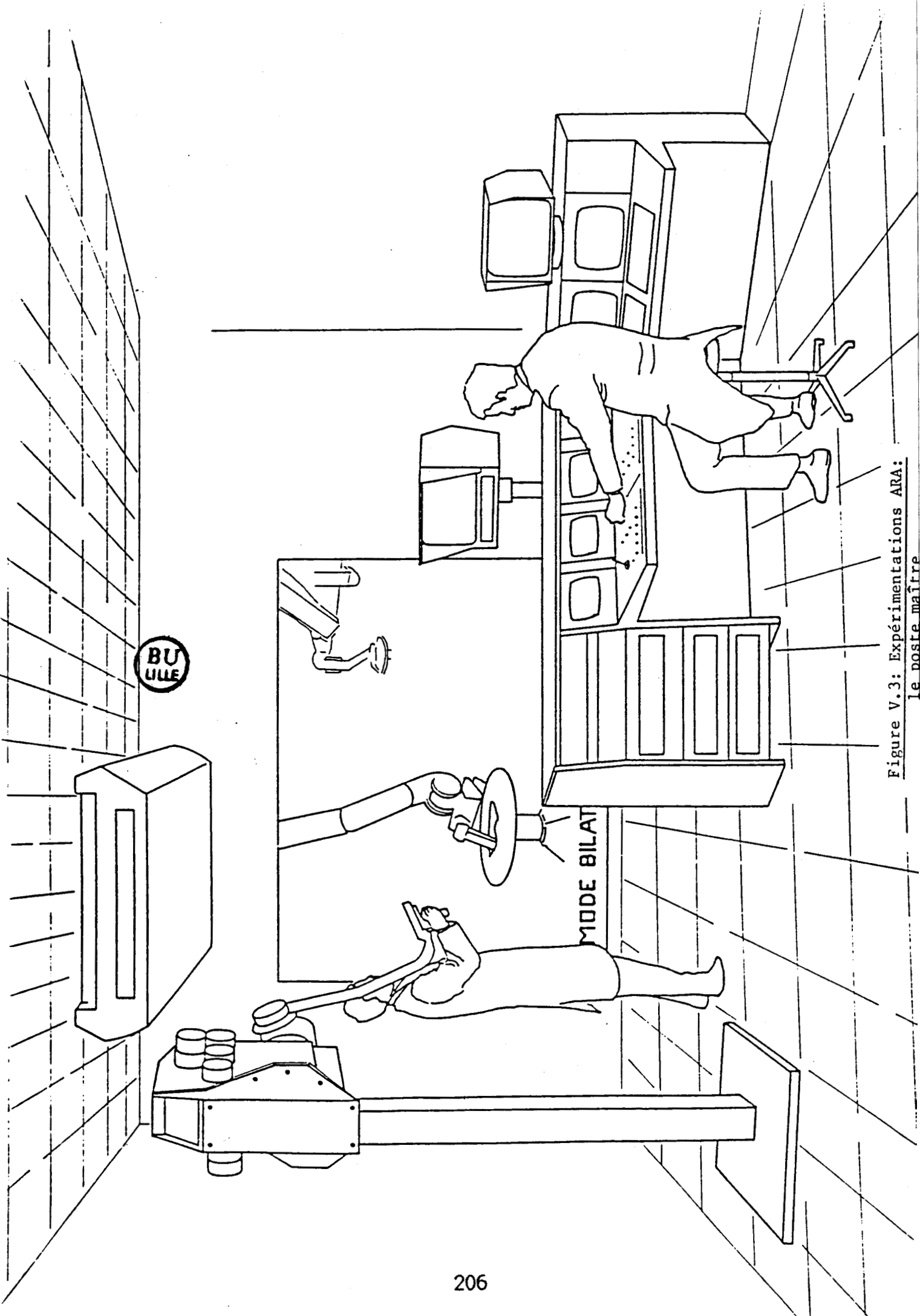


Figure V.3: Expérimentations ARA:
le poste maître

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

synthétique (modes référencés modèle) attractif ou répulsif, aussi bien qu'à un affichage graphique (ex: indicateurs de navigation) [André-Fournier 86].

De son côté, le poste maître (figure V.3) regroupe l'ensemble des organes de commande et de restitution de la machine. Ces organes sont:

- un bras maître MA23 dont la poignée dispose de plusieurs boutons dédiés:
 - à la signalisation des événements "fin de mode sur arrêt ou interruption opérateur";
 - à l'activation de la fonction suppression de poids (cf V.2.1);
 - au passage d'un sous-mode à un autre (cf. V.2.1);
- un écran géant qui, à la différence d'un moniteur classique, offre à l'opérateur une zone de confort visuel importante et l'autorise à se déplacer sans craindre de dégradation dans sa perception de l'univers esclave;
- une régie vidéo capable de combiner plusieurs images, soit en surimpression, soit dans des fenêtres séparées; par l'intermédiaire d'un projecteur, elle permet en particulier d'afficher simultanément sur l'écran géant:
 - 2 vues latérales de la zone de travail;
 - 1 vue latérale et une vue plongeante;
 - 1 vue réelle et une image synthétique;
 - 1 vue réelle et des indicateurs graphiques;
 - des images et du texte;
- les dispositifs de commande des caméras et de leur tourelle:
 - 3 boutons pour l'objectif motorisé de chaque caméra couleur;
 - 2 joysticks pour le pilotage en site et azimuth des tourelles de ces mêmes caméras;
 - 1 boîtier de commande télévisé autorisant le réglage de certains paramètres et le pilotage manuel;
- une interface de commande symbolique constituée d'un Mac Intosh et supportant le logiciel d'interaction homme-calculateur de SARAH; les messages imprimés sur cette console peuvent être relayés vers l'écran géant via un Apple II chargé de la conversion des chaînes ASCII en un

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

signal vidéo compatible avec la régie.

Le couplage entre les 2 univers précédemment décrits passe par le système de commande dont la structure repose sur les niveaux:

- exécution implanté en Fortran sur SOLAR 16-75 (système d'exploitation RTES/D) où à chaque mode de commande correspond une tâche gérée par un moniteur de dialogue baptisé MONICA;
- supervision (SARAH) écrit en Fig-Forth sur micro-ordinateur Micral 90-50 (système d'exploitation CP/M).

Géographiquement, les 3 parties de la machine sont placées dans 3 pièces différentes, les univers maître et esclave étant séparés par un rideau qui interdit toute vision directe de la zone de travail par les opérateurs.

V.1.2 LES DEUX OPERATEURS

Comme le montrent les figures V.1 et V.3, la machine ARA est mise en oeuvre par 2 opérateurs:

- un opérateur d'exécution placé en face de l'écran géant et qui manipule le bras maître;
- un opérateur de gestion assis derrière la régie vidéo, en retrait par rapport à l'opérateur d'exécution, afin d'avoir une vue d'ensemble du poste de contrôle/commande.

La dichotomie des fonctions opérateur trouve sa justification dans l'analyse des activités humaines liées à la conduite d'une machine de TAO. L'action simultanée de 2 opérateurs permet tout d'abord d'améliorer considérablement les temps d'exécution en autorisant le pilotage parallèle du manipulateur et des systèmes annexes tels que les dispositifs de vision, la régie vidéo ou le porteur. Par ailleurs, si l'assistance apportée au niveau analogique diminue en règle générale la charge de travail physique de l'homme, il subsiste néanmoins nombre de tâches dont la réalisation réclame un savoir-faire manuel et une forte concentration. A l'échelon symbolique, la supervision gagne ainsi à être menée par un opérateur dégagé, autant que

Tableau V.I: Fonctions des 2 opérateurs
[Fournier-Gaillard 86]

	OPERATEUR D'EXECUTION	OPERATEUR DE GESTION
Niveau d'intervention	tactique	stratégique
PERCEPTION: Informations disponibles: - retours proximétriques et d'effort - retour visuel - état du système	restitution kinesthésique ou graphique images réelles et/ou synthétiques sélectionnées et affichées sur l'écran géant messages fugitifs	 les retours symboliques sont mémorisés sur l'écran de supervision
DECISION: - connaissance de la tâche - connaissance des états du système - responsabilité	objectif immédiat limitée au mode courant réalisation d'objectifs restreints, signalisation des événements locaux	objectif global étendue au glomode en cours d'interprétation sélection des modes de commande sélection des retours visuels contrôle d'exécution gestion des incidents
ACTION: type de comportement action physique	réflexe et rapide pilotage manuel du bras	cognitif dialogue homme-calculateur réglage des caméras commande de la régie vidéo

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

possible, de toute participation physique à la commande et n'ayant à se préoccuper que de stratégie à plus long terme.

Dans ce contexte, le partage du travail a été effectué comme indiqué ci-dessous:

- opérateur d'exécution:
 - pilotage maître/esclave du manipulateur dans le mode de commande où l'a placé l'opérateur de gestion;
 - contrôle de la progression dans la tâche et signalisation des événements anormaux (switch "interruption opérateur") ou des fins de mode manuel (switch "arrêt opérateur");
 - activation de certaines fonctions locales ou de confort (transitions entre sous-modes, suppression de poids, cf. V.2.1);
- opérateur de gestion:
 - conduite symbolique de la machine (choix des modes de commande);
 - pilotage des caméras et autres systèmes annexes (porteur, fixation et alimentation des outillages);
 - sélection des retours visuels et de leurs modes de restitution à l'opérateur d'exécution (commande de la régie vidéo).

Cette répartition des rôles opérateur appelle cependant plusieurs observations:

- elle résulte dans une certaine mesure de contraintes attachées à la liberté de mouvement de l'opérateur d'exécution, l'utilisation d'une commande vocale permettrait en particulier d'envisager un partage légèrement différent; l'allocation proposée s'appuie toutefois sur 2 types d'activité humaine bien distinctes (tableau V.1);
- la présence de 2 opérateurs ne signifie pas a priori que l'un dirige l'autre, ce qui peut poser des problèmes de responsabilité civile dans un environnement à haut risque;
- d'une manière générale, le concept de commande à 2 opérateurs demande encore une étude ergonomique approfondie touchant aux relations d'équipe et aux conflits possibles.

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

V.1.3 SYSTEME DE COMMUNICATION

Lors de l'assemblage du site ARA, la mise en oeuvre d'un système de communication assurant le dialogue symbolique entre les divers éléments de la machine a occupé une part importante du temps d'intégration. En effet, de nombreuses difficultés ont eu pour cause l'hétérogénéité des calculateurs (tableau V.2), ainsi que les modifications apportées à l'architecture informatique qui ne fut que tardivement figée. Dans un tel cadre, nous avons envisagé le développement d'un réseau en étoile à base de liaisons série RS-232 comme une solution économique permettant la transmission asynchrone (et suffisamment rapide) de messages courts. Le Centre d'Automatique de Lille a pris en charge ce travail, qui s'est matérialisé par:

- la définition d'un protocole robuste de communication en code ASCII sur une liaison série 3 fils (sans signaux de service);
- un centre de transit (noeud du réseau) implanté en Fig-Forth sur Apple II et supportant le protocole précédent [Agricole 85].

V.1.3.a Définition du protocole

En fonctionnement normal, le protocole considéré a la forme décrite ci-dessous:

	<u>EMETTEUR</u>	<u>RECEPTEUR</u>
<u>Phase d'ouverture</u>	demande de transmission ODT -->	<-- ADT autorisation de transmettre
<u>Phase d'échange</u>	message M -->	
<u>Phase de fermeture</u>	fin de message FDM -->	<-- V validation du message reçu

Cette première définition s'accompagne des remarques suivantes:

- afin d'éviter toute perte de synchronisation en cours d'échange, l'interruption des processus communicants est interdite au terme de la phase d'ouverture;
- les impératifs de fiabilité supposent pour chaque correspondant

**Tableau V.2: Matériels informatiques mis en oeuvre
sur le site TAO ARA**

	Calculateur	Processeur	Système d'exploitation	Langage de programmation
Système d'exécution	SOLAR 16-75	Cablé	RTES/D	Fortran 77
Traitement proximétrique	Système Intel	Z80		Assembleur
Espion machine	Cartes Motorola	6809		Assembleur
Vision synthétique	Cartes Matrox Système Intel	8086	RMX-86	Pascal
CAO	SOLAR 16-75	Cablé	Système SIEL sous RTES/D	Fortran 77
Superviseur	Micral 90-50	8086	CP/M	Fig-Forth
Interface d'exécution	T09	6809		Basic
Interface symbolique	Mac Intosh	68000		Mac Forth
Serveur	Apple II	6502	Apple-Dos	Fig-Forth



IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

l'existence de tampons d'émission et de réception.

Ce deuxième point découle de la robustesse exigée du protocole. Avec nos choix initiaux, les dégradations susceptibles d'affecter la voie de communication sont:

- la coupure de la liaison;
- le bruitage des informations transmises.

Lors de l'échange, la détection d'erreur est effectuée par le récepteur (contrôle de parité) qui valide ou non (V ou $\bar{V}$) le message reçu. L'exploitation de celui-ci n'a lieu qu'après la validation, d'où la nécessité d'un tampon de réception. L'émetteur, pour sa part, conserve une copie du message dans son tampon d'émission, qui sera retransmise si l'échange initial se cloture sur $\bar{V}$.

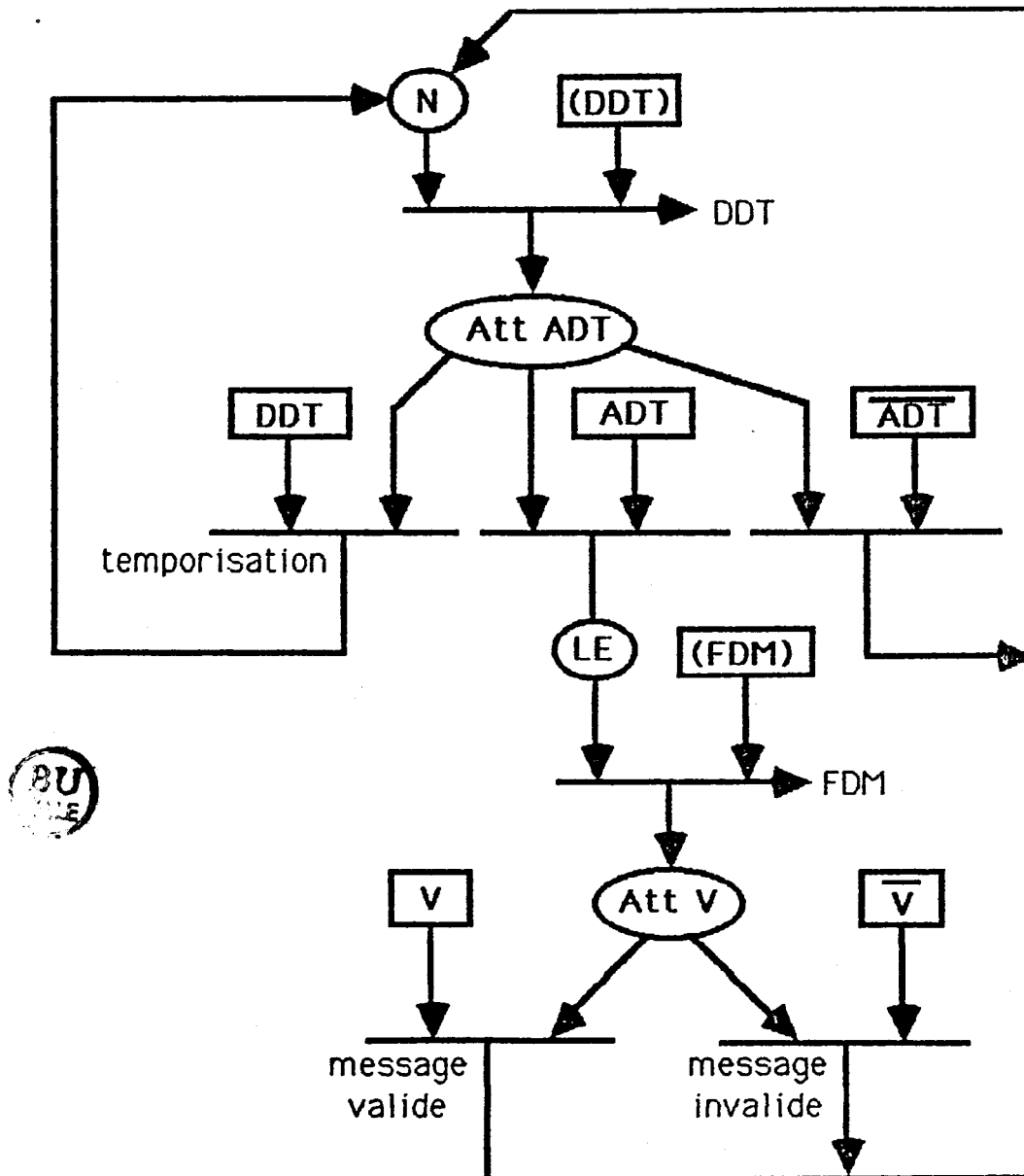
D'une manière générale, les moments critiques pouvant déboucher sur des situations d'interblocage sont les phases d'ouverture et de fermeture. La disparité des calculateurs impliqués dans la machine ARA nous a fait écarter l'utilisation des signaux de service, certains systèmes n'étant pas capables d'en assurer la gestion. Nous nous sommes ainsi orientés vers un protocole reposant sur une liaison 3 fils: masse, émission et réception. Ce choix proscriit a priori tout traitement satisfaisant des cas de coupure (la ligne détection de porteuse est inemployée); considérant le caractère expérimental du système, une telle restriction au cahier des charges a été jugée acceptable.

Pour conclure cette partie, nous retiendrons que les caractères de contrôle risquant d'être bruités en cours de transmission, leur multiplication va de pair avec le nombre de situations critiques à envisager. Il importe donc de concevoir un schéma de synchronisation capable d'éviter les cas de blocage les plus courants, tout en restant aussi simple que possible.

V.1.3.b Description approfondie

Une première approche de notre protocole est présentée à l'aide de

Figure V.4.a: Protocole côté émetteur



N: état neutre

Att ADT: attente de ADT

Att V: attente de V

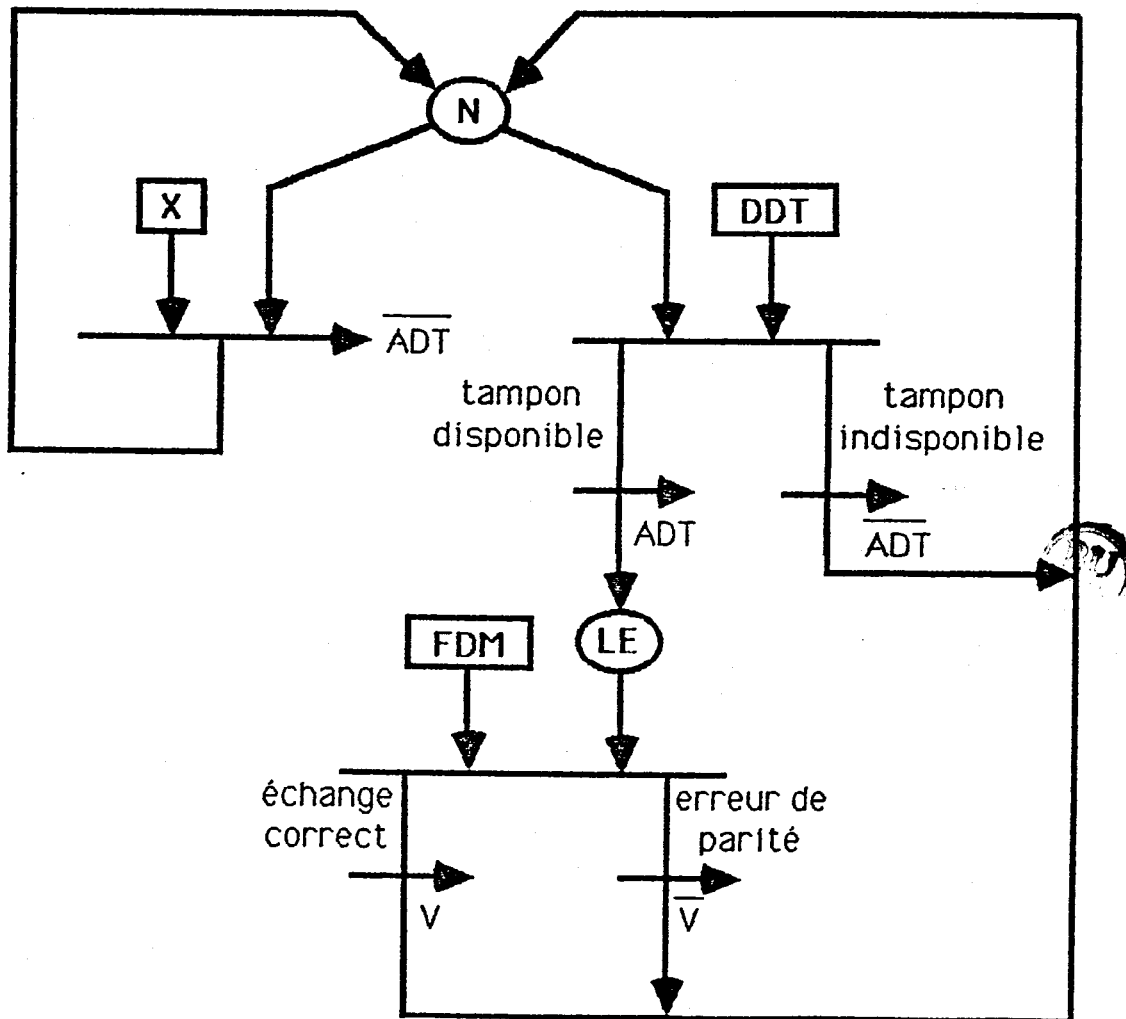
LE: liaison établie

(DDT): décision d'envoyer DDT

(FDM): décision d'envoyer FDM

graphes d'évaluation [Cornafion 81] sur les figures V.4.a et b.

Figure V.4.b: Protocole côté récepteur



X désigne un signal quelconque, différent de DDT

V.1.3.c Adaptation aux liaisons série et étude de la fiabilité

Avec les contraintes adoptées (liaison 3 fils), les signaux de synchronisation sont des caractères ASCII sensibles à d'éventuelles déformations (tableau V.3).

Tableau V.3: Correspondance signaux de synchronisation/ caractères ASCII

Signal de synchronisation	Signification	Caractère ASCII
DDT	demande de transmission	TXR
ADT	autorisation de transmettre	ACK
$\overline{\text{ADT}}$	interdiction de transmettre	NACK*
FDM 	fin de message	EOT
V	validation	ACK
$\overline{\text{V}}$	invalidation	NACK*

* ou tout caractère différent de ACK

Pour les signaux ADT et V, nous avons décidé d'utiliser un unique caractère ACK; de même, les signaux $\overline{\text{ADT}}$ et $\overline{\text{V}}$ se traduiront par un caractère NACK aussi différent que possible de ACK (variation de plusieurs bits). En prenant comme principe de faire interpréter tout caractère différent de ACK reçu par le processus émetteur en état Att ADT ou Att V comme un signal $\overline{\text{ADT}}$ ou $\overline{\text{V}}$, on obtient une bonne résistance de $\overline{\text{ADT}}/\overline{\text{V}}$. Il faudrait en effet une dégradation considérable de la voie de communication

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

pour qu'un signal $\overline{ADT}/\overline{V}$ soit modifié au point d'être compris comme ADT/V. On admettra ultérieurement que $\overline{ADT}/\overline{V}$ est insensible au bruitage.

Suivant cette hypothèse, l'étude de la fiabilité montre 2 cas d'interblocage:

- situation A: déformation du signal FDM

Le processus récepteur reste bloqué en réception, tandis que l'émetteur attend V ou $\overline{V}$.

- situation B: bruitage de ADT interprété par le processus émetteur comme ADT

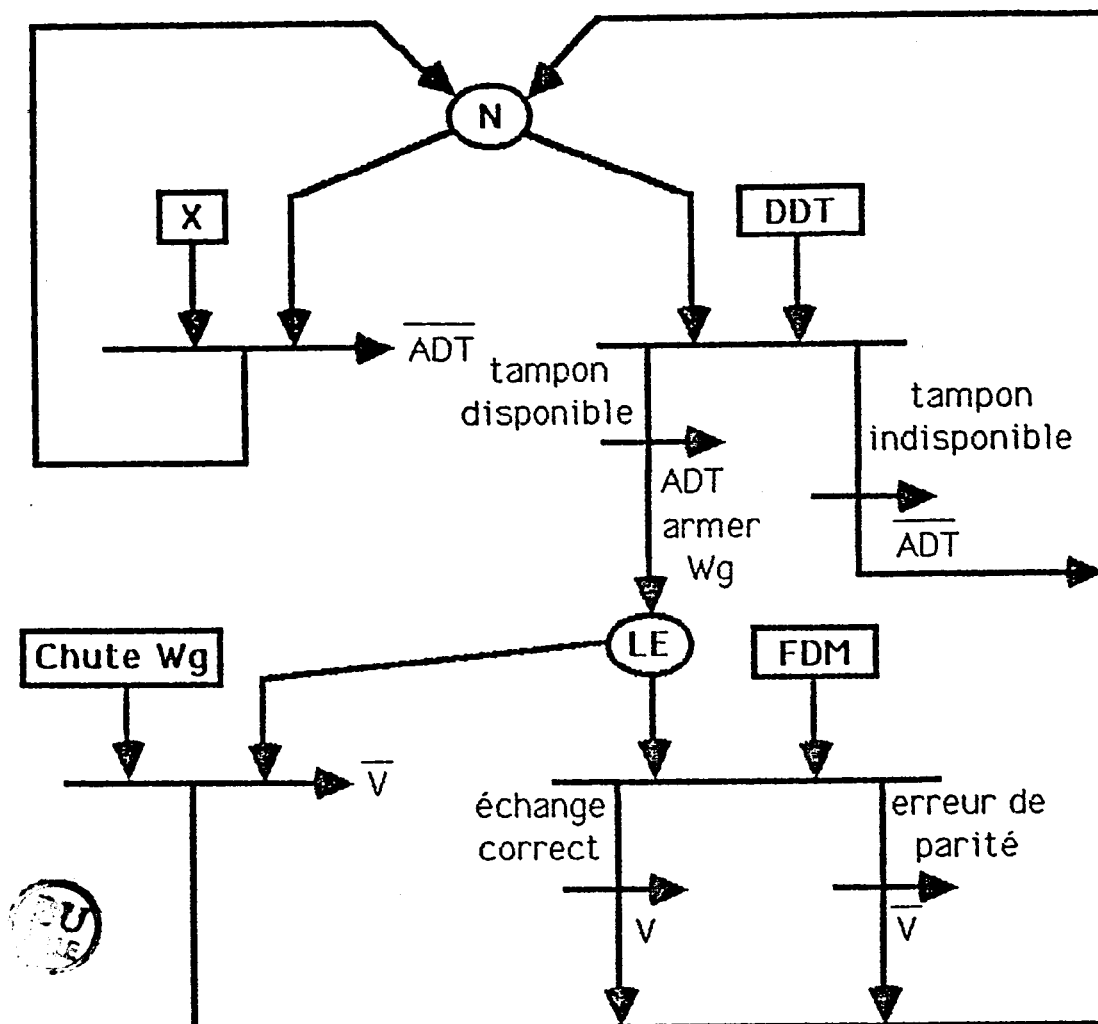
L'émetteur tente un nouvel échange et envoie DDT que le récepteur va considérer comme le premier caractère du message. Les 2 processus sont alors bloqués, l'émetteur en attente de ADT ou $\overline{ADT}$, le récepteur en attente de la fin du message.

Face à ce genre de difficulté, la solution retenue consiste en la mise en oeuvre sur le récepteur d'un chien de garde W_g . Avec un délai de garde supérieur à la durée maximale d'un échange, W_g est armé à l'émission du signal ADT et sa chute décide de l'envoi de NACK. Dans la situation A, l'émetteur interprète NACK comme un signal $\overline{V}$ et les 2 processus reviennent en état neutre, comme après un échange invalidé. Dans la situation B, NACK est compris comme $\overline{ADT}$ et on retrouve de nouveau un état neutre, cette fois comme après un échange avorté.

La représentation du protocole côté récepteur avec chien de garde est donnée par la figure V.5.

Dans la pratique et bien qu'il soit particulièrement simple, le protocole décrit n'a pu être utilisé tel quel sur tous les calculateurs. L'exemple du SOLAR équipé d'une carte d'interface console (répétition de chaque caractère reçu) est significatif des problèmes posés. L'étude et l'implantation de plusieurs variantes du schéma d'échange initial ont ainsi demandé un temps non négligeable qui aurait certainement été mieux employé à d'autres tâches. A posteriori, il apparaît que le choix d'un système de

**Figure Y.5: Protocole côté récepteur
avec chien de garde Wg**



X désigne un signal quelconque, différent de DDT

communication type réseau local, s'il exige un certain investissement financier, se justifie sur un projet de l'ampleur d'ARA. Nous observerons cependant, qu'après dévermissage, le réseau construit s'est révélé remarquablement fiable, les incidents imputables à des erreurs de transmission ayant été quasi inexistantes.

V.2 L'EXPERIMENTATION CANONIQUE

Après une conception "sur le papier" du système SARAH, nous décrivons maintenant les modifications dictées par la mise en oeuvre du superviseur sur le site, ainsi que par les essais préliminaires. Nous aborderons ensuite les diverses expérimentations menées avec la machine ARA. Parmi celles-ci, toutes ne font pas intervenir le système de supervision, soit pour des causes mineures, soit du fait de raisons plus profondes susceptibles d'orienter les recherches futures. Outre leurs aspects démonstratifs, ces expérimentations posent de la sorte des problèmes pertinents quant à l'exploitation exhaustive au niveau symbolique des concepts de CMEG/RIG, et justifient de leur place dans ce chapitre.

V.2.1 MISE EN OEUVRE DU SYSTEME SARAH

Les adaptations essentielles nécessaires à l'intégration de SARAH au sein du site expérimental ont été d'ordre humain et découlaient du principe de conduite à 2 opérateurs. L'implantation d'un mécanisme de transition automatique a tout d'abord décidé de la structure de l'interface de contrôle. Destinée à la génération des événements "arrêt" et "interruption opérateur", cette interface a déjà été largement documentée. Nous nous contenterons ici d'exposer notre approche d'un point de vue ergonomique. Fondamentalement, elle consiste à proposer à l'homme 2 choix simples répondant aux situations ci-dessous:

1. l'objectif local attaché au mode en cours est convenablement atteint et l'évolution dans la tâche peut s'effectuer selon le chemin nominal programmé hors-ligne, donc de façon non réversible (une transition automatique ne permet pas le retour au mode précédent);
2. pour une quelconque raison, l'opérateur d'exécution désire interrompre le mode courant, quitte ensuite (via l'opérateur de supervision):
 - à le reprendre;
 - à poursuivre dans l'évolution nominale;
 - à lancer une procédure de reprise ou de configuration.

Remarque: en l'absence de transition automatique programmée, les effets

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

des 2 événements précédents sont absolument identiques.

L'interface symbolique associée à l'opérateur d'exécution comprend ainsi 2 boutons que l'on caractérisera comme suit:

- arrêt opérateur:
 - enchaîne en général sur une transition rapide ne demandant pas d'intervention de l'opérateur de supervision;
 - usage fréquent;
 - action non réversible donc dangereuse en cas d'erreur humaine;
- interruption opérateur:
 - emploi plus exceptionnel (incident), mais toujours inoffensif;
 - oblige à un échange homme-calculateur dans la sélection du mode suivant.

La disposition spatiale de ces boutons suppose une réflexion ergonomique qui, sur la machine ARA, s'est soldée par un placement latéral légèrement au-dessus et en avant de la poignée de commande:

- l'arrêt à droite est manipulé par l'index droit de l'opérateur, un maniement aisé du bras maître lui imposant d'éloigner son doigt du switch pour saisir fermement la poignée;
- l'interruption opérateur à gauche est alors actionnée par la main gauche qui souvent reste libre en cours de manipulation.

Globalement, les essais préliminaires ont montré une trop grande rigidité dans le partage du travail entre les 2 opérateurs. Ils ont conduit à une redistribution partielle des fonctions symboliques dont certaines se sont révélées très liées au confort de l'opérateur d'exécution et devaient donc lui être confiées. Dans ce cadre, une fonction suppression de poids a été proposée sur chacun des modes manuels. Elle est mise en oeuvre par un bouton placé sous la poignée de commande du bras maître et donne lieu à l'enchaînement suivant, réalisé automatiquement en moins d'une seconde:

- arrêt du mode en cours;
- lancement d'une mesure de poids (ACQPOIDS);
- reprise du mode initial avec la nouvelle valeur du paramètre POIDS 0.

Dans le même ordre d'idée, des sous-modes ont été introduits au sein de molocs comme BDDL (blocage de ddl) ou HOMDEC (homothétie/décalage). Le

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

switch précédent actionné en sens inverse y assure:

- en mode BDDL, le passage en sous-mode libre permettant l'ajustement du repère pince, c'est à dire des ddl à bloquer dans un repère absolu;
- en mode HOMDEC (facteur d'homothétie supérieur à 1), le découplage du bras maître afin de le ramener dans une position de confort et d'effectuer des déplacements de grande amplitude par "pompage".

Ce glissement de la commande symbolique vers l'opérateur d'exécution est à l'origine de l'interface de réglage décrite en III.3.2.c qui généralise l'approche esquissée ici. Dans quelques cas, il risque cependant d'entraîner des conflits dont l'arbitrage dépend de la tâche considérée. Sur SARAH, on interdira par exemple l'activation de la suppression de poids lors des modes automatiques, qui peut avoir un effet néfaste à la précision des mouvements (cf. la gestion de la compliance dans le glomode outsaisie_auto).

Parallèlement, les premières expériences ont imposé une redistribution des retours d'information. Les messages affichés sur la console de supervision sont ainsi relayés vers l'écran géant via un Apple II et la régie vidéo (surimpression). Ils occupent alors une zone restreinte au bas de cet écran et ne spécifient que l'état présent de la machine, à la différence du Mac Intosh qui conserve l'historique des modes et glomodes appelés.

V.2.2 EXPERIMENTATION SUPERVISION

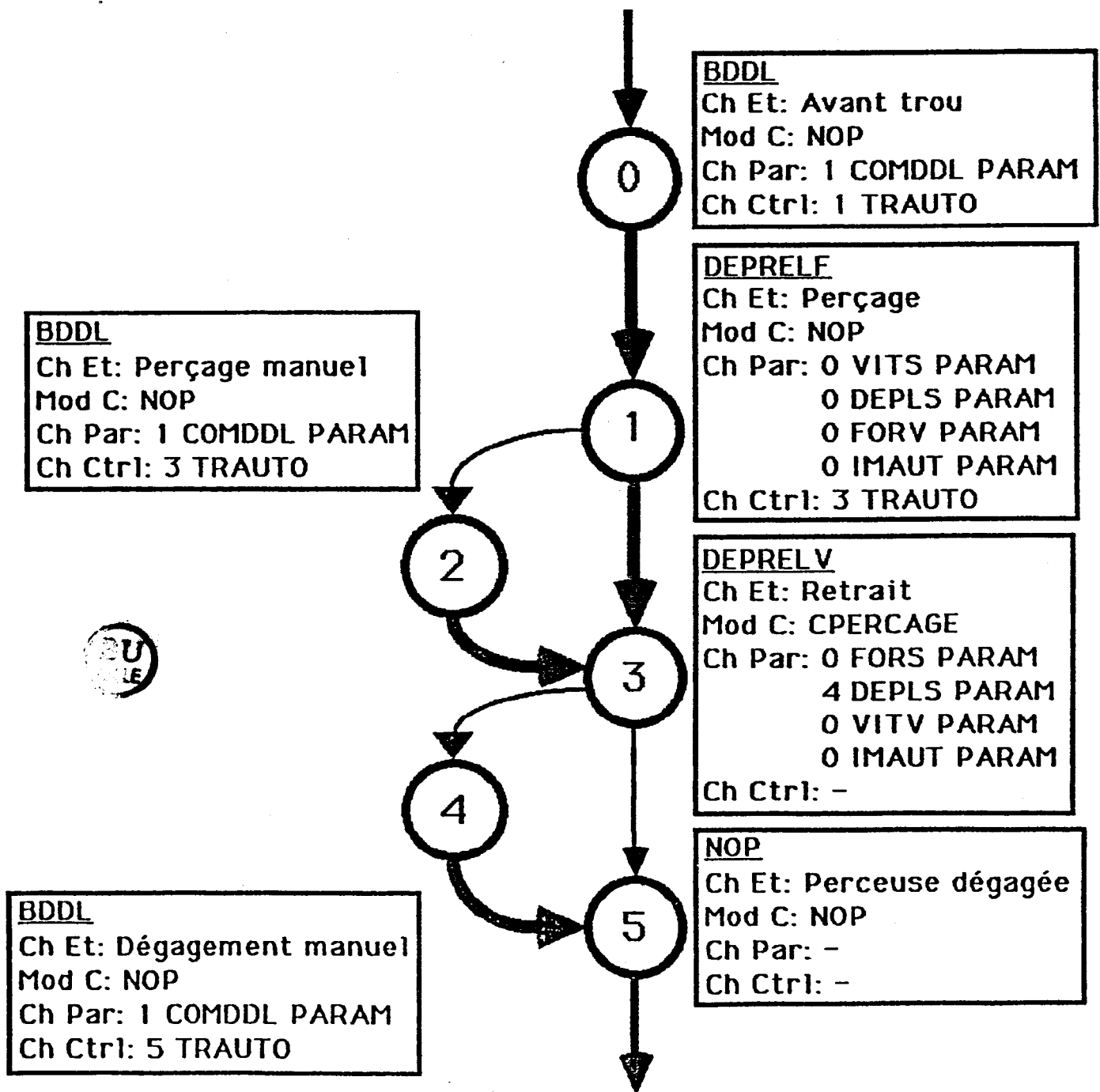
Afin de valider le système SARAH d'une manière un peu approfondie, l'expérimentation sur une tâche d'ampleur moyenne était indispensable. Elle devait pouvoir être menée à bien avec les seules ressources du site et nous la voulions démonstrative:

- de l'utilisation combinée de modes manuels ou assistés et automatiques;
- des passages de paramètre;
- du suivi par l'opérateur de supervision;
- de la mise en oeuvre des procédures de reprise sur incident.

Répondant à ces critères, la tâche sélectionnée consiste en un

Figure Y.6: Glomode perçage

Paramètre d'entrée: - -->



IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

perçage de n trous d'axe parallèle, n étant choisi en-ligne par l'opérateur.

Une tâche de ce type réalisée manuellement pose des problèmes difficiles:

- sûreté de fonctionnement dans l'emploi de l'outil (cassure des forets);
- qualité du travail au niveau des trous percés et du parallélisme de leurs axes;
- contrôle des efforts d'interaction perceuse/matériau.

Dans un premier temps, un glomode perçage a été développé, intégrant (figure V.6):

- un mode BDDL sur l'axe de la perceuse (COMDDL 1), qui permet à l'opérateur d'effectuer l'avant trou en manuel;
- une avance automatique en force (DEPRELF) associée aux paramètres:
 - vitesse max lors du déplacement: VITS 0;
 - profondeur du trou: DEPLS 0;
 - force d'appui sur la perceuse: FORV 0;
- un retrait automatique à vitesse constante (DEPRELV) après calcul par le module CPERCAGE de la distance de retrait (DEPLS 4 reçoit la profondeur du trou plus 5 cm);
- des procédures de reprise manuelle (BDDL sur axe perceuse) destinées à assurer le perçage ou le dégagement de l'outil en cas de blocage du foret dans le trou.

Parmi les caractéristiques intéressantes de ce glomode, on remarquera notamment:

- l'avant trou manuel qui évite une modélisation complexe des efforts appliqués à l'outil en cours de pré-perçage où plusieurs facteurs concourent à faire glisser le foret sur la surface (l'emploi d'un foret auto-pointeur autoriserait l'automatisation à peu de frais de cette phase);
- le perçage automatique qui assure une bonne qualité du travail;
- les procédures de reprise en blocage sur l'axe de la perceuse garant de la sécurité de l'outil;
- le contrôle opérateur dans la phase de retrait qui se traduit par l'absence de transition programmée en sortie de l'étape 3, obligeant à une validation opérateur avant l'enchaînement du mode suivant (perceuse dégagée ou non).

**Figure V.7: Glomode mulperçage
(perçage de n trous parallèles)**

Paramètre d'entrée: - -->

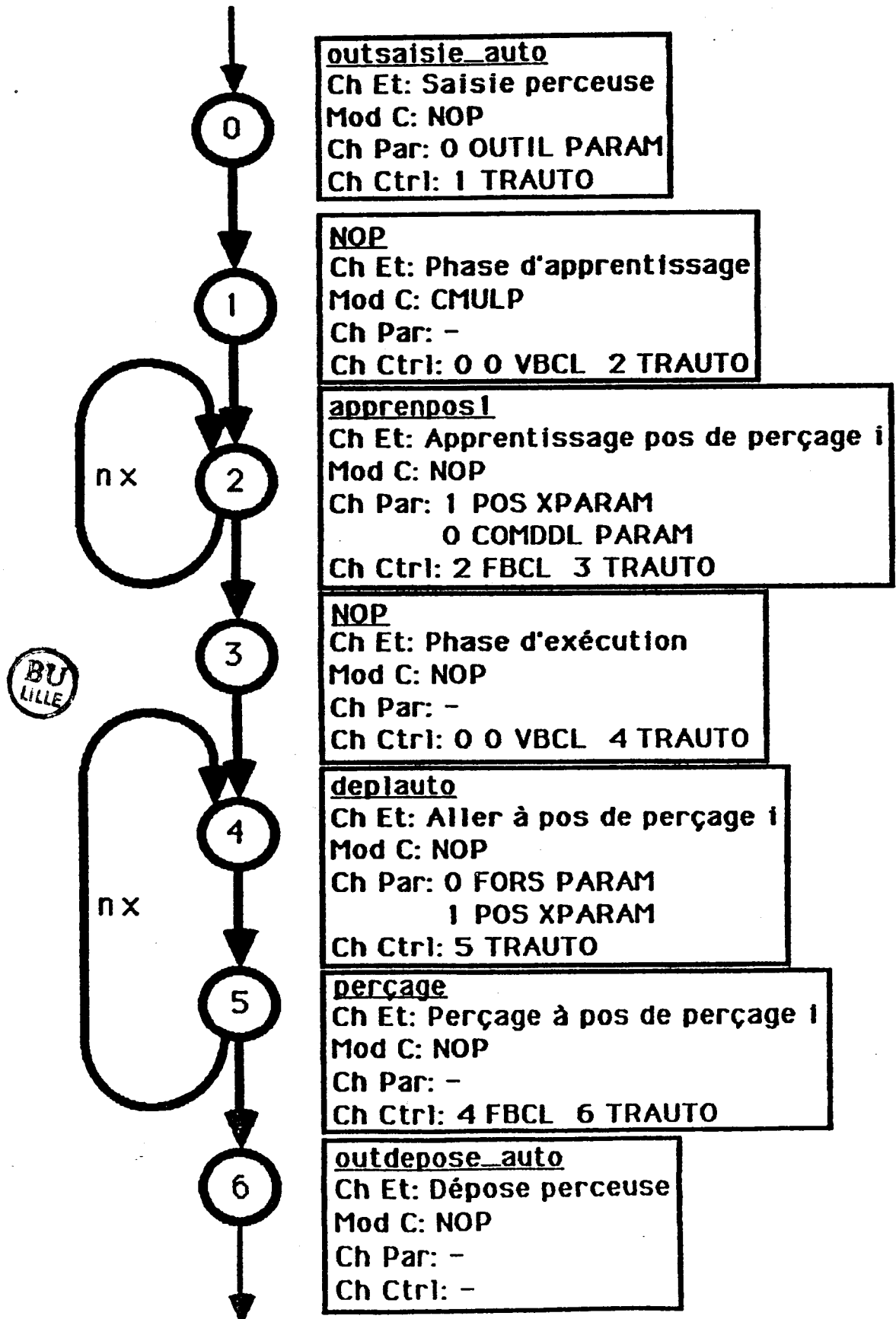


Figure V.8: Affichage en cours de mulperçage (n=2)

Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
perçage multiple			BDDL	
Déplacement			/Recalage/	
Fin de déplacement			/Fin de recalage/	
Phase d'apprentissage				
Apprentissage pos de perçage 1			<PARAMETRES>	
Pointer la position			BLOCAGE SUR AXE	
Apprentissage				
Apprentissage pos de perçage 2			Mode bloqué	
Pointer la position			Mode libre	
Apprentissage			Mode bloqué	
Phase d'exécution				
Aller à pos de perçage 1			FIN DE MODE	
Déplacement				
Fin de déplacement				
Perçage à pos de perçage 1			Fin de tâche transition auto	
Avant trou				



Option	Sarah	Configuration	Type_param	Action_param
perçage multiple			MENU D'EVOLUTION	
Phase d'apprentissage			☐ NOP Perceuse dégagée ☒ BDDL Dégagement manuel	
Apprentissage pos de perçage 1				
Pointer la position				
Apprentissage				
Apprentissage pos de perçage 2				
Pointer la position				
Apprentissage				
Phase d'exécution				
Aller à pos de perçage 1				
Déplacement				
Fin de déplacement			FIN DE MODE	
Perçage à pos de perçage 1			Fin de tâche transition opérateur	
Avant trou				
Perçage				
Retrait				

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

Le glomode perçage a ensuite servi à l'écriture du glomode mulperçage (figure V.7) où l'on distingue:

1. la saisie automatique de la perceuse (paramètre OUTIL 0);
2. une phase d'apprentissage incluant:
 - une étape d'initialisation chargée d'acquérir auprès de l'opérateur le nombre de trous demandé, puis de transférer la valeur obtenue dans la variable CTRL 0 (module de calcul CMULP), avant d'affecter les paramètres de boucle (l'instruction 0 0 VBCL met le compteur à 0 et lui donne la valeur de CTRL 0 comme valeur de chute);
 - un glomode d'apprentissage (apprenpos1) relancé autant de fois qu'il y a de trous à percer et qui comprend:
 - un pointage de la position à apprendre en mode BDDL rotations bloquées (COMDDL 0), de manière à contraindre le parallélisme des trous;
 - un mode d'acquisition (ACQPOS) qui enregistre les coordonnées esclaves dans la variable paramètre POSITION 1 + valeur courante du compteur de boucle (instruction 1 POS XPARAM);
3. une phase d'exécution réalisée, après initialisation du compteur de boucle, en répétant la séquence:
 - deplauto position mémorisée;
 - perçage;
4. la dépose automatique de l'outil (outdepose_auto).

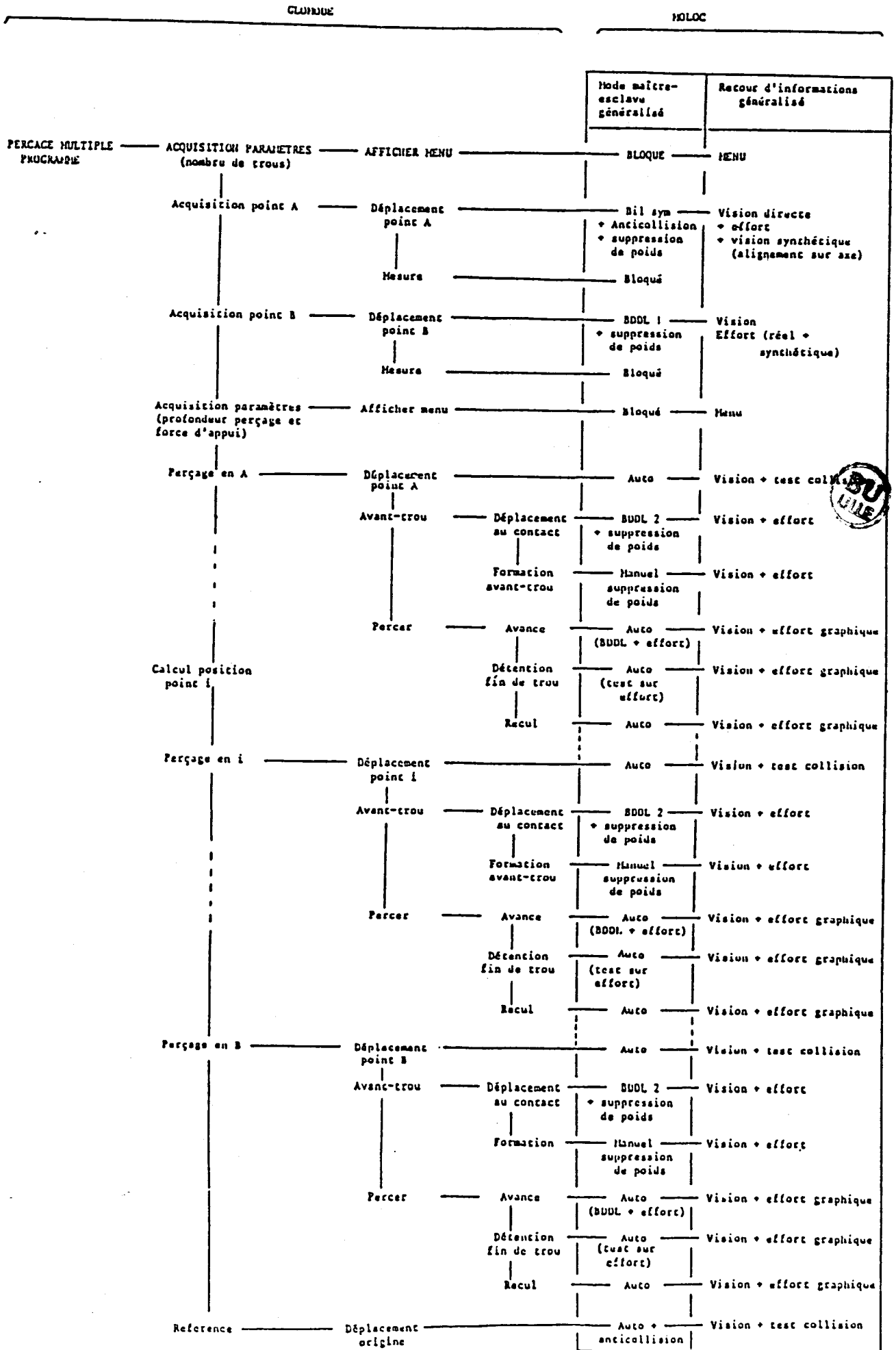
Remarque: la succession phase d'apprentissage/phase d'exécution est évidemment toute théorique, cette première n'ayant d'intérêt que si elle est entreprise à l'occasion d'une sous-tâche antérieure.

La mise en oeuvre du glomode mulperçage montre clairement le bénéfice de la supervision:

- temps d'exécution plus faible qu'en manuel;
- qualité de travail améliorée;
- plus grande sûreté de fonctionnement résultant autant de l'automatisation du perçage, que de l'emploi d'un changeur d'outil (fixation rigide de la perceuse sur le bras) qui suppose une précision de mouvement péniblement atteinte en mode manuel.

Les expérimentations ont cependant fait apparaître la difficulté éprouvée

Tableau V.4: Scénario de perçage multiple (Fournier-Gaillard 86)



par les opérateurs dans le suivi des évolutions au sein des glomodes, en particulier lors de modes robots entrecoupés de transitions automatiques. Il semble qu'à ce niveau, les seuls retours d'information symbolique (figure V.8) ne suffisent pas à une compréhension rapide de la progression dans la tâche. Ce problème pose en fait un dilemme ergonomique majeur, à savoir que la prise en compte intégrale par l'opérateur de la commande symbolique rend fastidieux le traitement de la supervision, alors que l'allocation de certaines fonctions au calculateur (transition automatique, par exemple) ne permet pas toujours à l'homme de maîtriser l'évolution de la machine, le plaçant dans l'incapacité de prendre immédiatement la relève en cas d'incident. Une étude poussée portant sur un domaine d'application précis devrait néanmoins relativiser les inconvénients signalés ici.

Dans un but de généralisation, nous présentons sur le tableau V.4 [Fournier-Gaillard 86] un scénario complet de perçage multiple, faisant intervenir plusieurs des aides évaluées dans le cadre de ARA, dont quelques unes vont maintenant être abordées.

V.2.3 AUTRES EXPERIMENTATIONS

En parallèle des études sur la supervision, le site expérimental a constitué un remarquable banc d'essai pour diverses techniques d'assistance essentiellement orientées vers les retours d'information opérateur. Un système de stéréovision développé par l'ETCA a pu ainsi être testé dans des conditions réalistes. Avec le principe retenu sur ce matériel, l'équipement nécessaire à la restitution 3D de la scène esclave comprend:

- 2 caméras montées sur un support commun leur donnant un léger angle de convergence;
- une paire de lunettes disposant chacune d'un obturateur formé par empilement:
 - d'un filtre polarisant;
 - d'une céramique ayant la propriété, lorsqu'elle est soumise à une différence de potentiel électrique, de faire tourner de 90 degrés le champ de polarisation de la lumière;

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

- d'un deuxième filtre polarisant complémentaire du premier;
(la lumière naturelle possédant 2 composantes, de polarisation verticale et horizontale, l'obturateur ne laisse passer une de ces composantes qu'en état excité);
- un commutateur électronique.

Attaqué par les signaux vidéo issus des caméras, ce dernier sélectionne alternativement à une fréquence de 50 Hz un canal puis l'autre. L'image combinée résultante est alors projetée sur l'écran géant et perçue par l'homme au travers des lunettes dont les obturateurs changent d'état à chaque commutation. L'opérateur peut de la sorte appréhender le relief et piloter le bras esclave comme s'il disposait d'une vision directe sur la zone de travail. Les essais menés avec ce dispositif 3D ont porté sur une tâche de dévissage des 6 vis de fixation d'une bride avec une clé à choc. Ils ont permis de mesurer un gain de temps d'environ 30 %, particulièrement évident sur les phases de pointage. Par ailleurs, l'équipement stéréo n'a pas entraîné de fatigue oculaire sensible sur la durée (quelques minutes) de l'opération.

Sur un plan très voisin, la machine ARA a montré les potentialités offertes par une base de données CAO dans la conduite d'un télémanipulateur [André-Fournier 86]. A priori, l'utilisation d'un modèle de l'environnement esclave répond à un double besoin:

- la production d'images synthétiques réalistes susceptibles de pallier à toute dégradation du retour visuel (point de vue inadéquat, opacité du milieu, retard de transmission, débit insuffisant, etc.) ou même de fournir une prédiction sur le comportement futur de l'organe piloté (application en téléopération des véhicules);
- l'extraction d'informations pertinentes en regard de la tâche locale considérée (proximité d'une cible ou d'un obstacle, par exemple).

Dans ce contexte, le système CARO [Quaro-Fournier 84] étudié au LAMM joue un rôle de caméra virtuelle (figure V.9) en assurant l'animation d'une scène modélisée où les mouvements d'un manipulateur sont générés à partir des signaux de position délivrés par le calculateur de commande.

Relativement au 2e point, l'IRISA a travaillé sur l'exploitation

Figure V.9: Exemples d'image synthétique
(André-Fournier 86)

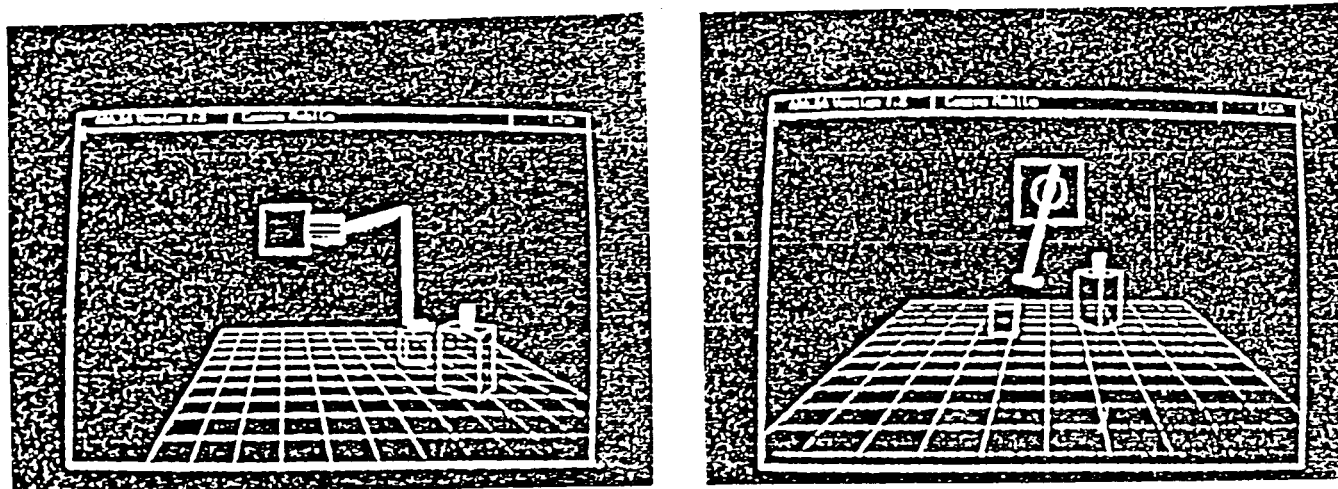


Figure V.10: Indicateurs de navigation (pointage)
[André-Fournier 86]

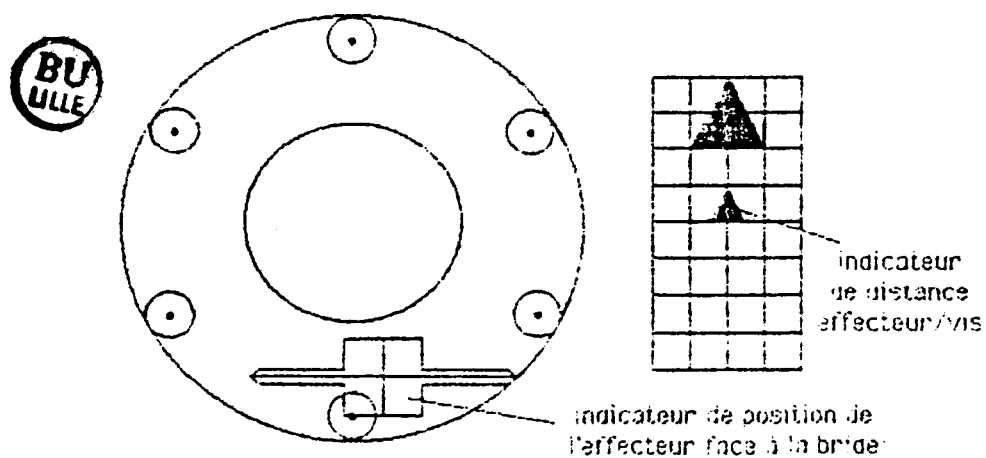
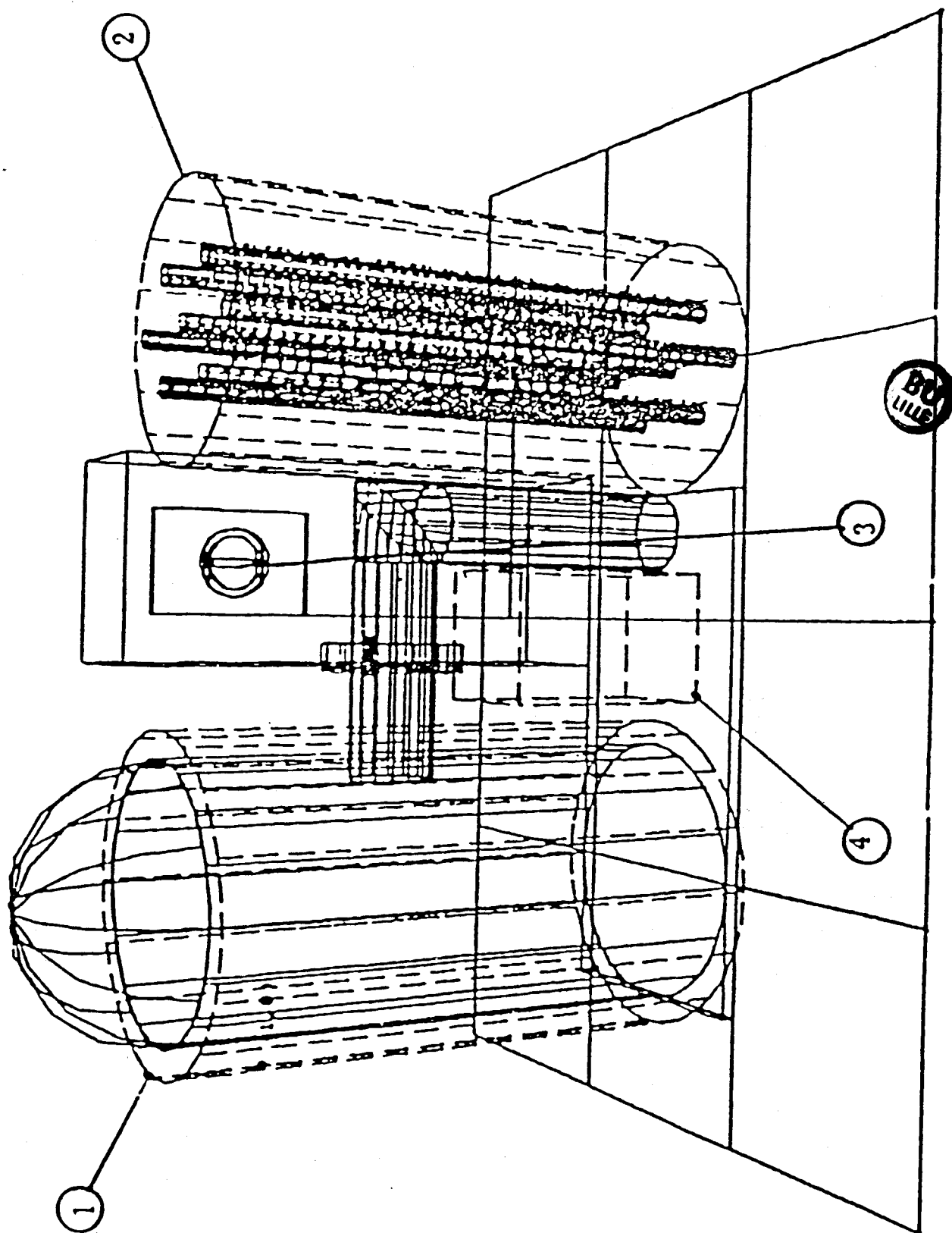


Figure V.11: Exemple de description de zones de potentiel
(André-Fournier 86)

1-2 Champs répulsifs 3 Champ attractif 4 Espace libre



analytique de modèles 3D (partiels ou complets) de l'environnement esclave, construits sur le logiciel de simulation SIEL [André-Boulic 85]. Avec la tâche de dévissage précédemment mentionnée, cette recherche s'est traduite par l'affichage d'indicateurs graphiques de navigation (figure V.10) intégrant l'ensemble des informations nécessaires au pointage manuel de la clé à choc. L'expérimentation réalisée commence par un processus de recalage du modèle de la bride sur l'univers physique, où l'opérateur positionne l'outil sur la vis supérieure à l'aide du retour caméra. Par la suite, il est à même de travailler sans vision réelle (ou en complément de celle-ci), ne recourant qu'aux indicateurs graphiques qui restituent sur l'écran géant la distance effecteur-vis et la projection de la clé à choc dans le plan de la bride. Les mesures effectuées à cette occasion ont mis en évidence une amélioration des temps d'exécution (y compris la phase de recalage) du même ordre que celle obtenue avec la vision 3D.

Avec une restitution kinesthésique plutôt que visuelle, la base de données SIEL a également conduit à l'implantation de modes réflexes où un retour d'effort artificiel rend compte de connaissances modélisées, combinées avec les signaux de position esclave. Le système y calcule la distance de l'effecteur vis-à-vis de zones de potentiel attractif ou répulsif [André-Fournier 86] et renvoie l'information de proximité sur le bras maître. De telles zones sont définies sous forme de primitives volumiques que l'homme superpose au modèle de l'environnement (figure V.11). La représentation simulée de l'espace de travail étant projetée en-ligne sur l'écran géant, l'apparition de cercles concentriques autour d'un de ces volumes indique que le bras est sous l'influence de la zone de potentiel associée et évite toute erreur d'interprétation du retour d'effort. Bien qu'aucune étude de performance n'ait été faite, les expérimentations ont clairement montré la faisabilité de cette approche pour laquelle on imagine facilement nombre d'applications (navigation dans un univers encombré, par exemple).

D'une manière générale, la prise en charge au niveau supervision des assistances décrites ici pose un problème à un système du type SARAH fondé sur la notion de glomode. Comment en effet, disposant d'une connais-

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

sance générique d'un certain travail, décider a priori d'attacher l'un de ces modes de restitution à une étape donnée de l'enchaînement correspondant? Leur utilité ne se manifeste souvent qu'en-ligne et dépend des caractéristiques de l'environnement, plus que de la nature intrinsèque de la tâche. Cette difficulté conceptuelle est à l'origine de l'interpréteur de molocs développé en III.3.2.b (ce module en cours de définition devrait s'inspirer de l'interface TAO1, voir II.3.3) et qui autorise l'opérateur à compléter les comportements machine planifiés par des fonctions d'assistance non programmées.

V.3 DISCUSSION

Globalement, l'expérimentation canonique ARA démontre sans équivoque le potentiel d'une machine de téléopération intégrant les principes de commande maître/esclave et de retour d'information généralisés qui permettent une plus grande efficacité dans le travail. En contrepartie, elle dessine une problématique de la supervision dont l'étude ergonomique est particulièrement délicate. La validation de notre concept passe de la sorte par une appréciation d'ensemble du système homme-machine, prenant en compte, d'une part, les avantages des assistances analogiques offertes, d'autre part, l'augmentation de la charge mentale imposée à l'opérateur.

V.3.1 TELEPRESENCE ET TELEASSISTANCE

Considérant les aides proposées à l'homme dans le pilotage à distance d'un télémanipulateur, nous sommes amenés à différencier:

- les assistances orientées système axées sur la transparence de la machine et dont l'apport est pertinent quel que soit le travail entrepris (la stéréovision, par exemple);
- les assistances orientées tâche qui tendent à configurer la machine d'une manière appropriée à l'exécution de tâches précises, et conduisent à la notion de mode (de commande ou de restitution) ne possédant qu'un domaine d'efficacité limité.

Une telle distinction débouche a priori sur 2 approches complémentaires ayant chacune qualités et inconvénients.

La première, baptisée téléprésence, vise la projection de l'opérateur dans l'univers de travail. Elle repose avant tout sur une transparence maximale de la machine, fondée sur la reproduction fidèle des fonctions motrices de l'homme au niveau de la partie opérative du robot, ainsi que sur le choix de dispositifs de commande et de restitution compensant les effets de l'éloignement. Dans ce contexte, un système idéal de téléopération pourrait être constitué par:

- un organe esclave anthropomorphe disposant approximativement des

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

mêmes degrés de liberté que le bras ou que la totalité du corps humain;

- un organe de commande du type exosquelette qui envelopperait tout ou partie du corps de l'opérateur et autoriserait une conduite manuelle à retour d'effort aussi conviviale que possible (pour une application partielle de ce principe, voir [Ohmichi 85] qui décrit une pince à 3 doigts et 9 ddl pilotée en maître/esclave bilatéral par l'intermédiaire d'un gant);
- une caméra stéréoscopique positionnée vis-à-vis de l'organe terminal de façon à respecter la relation tête-main chez l'homme, et asservie en site et azimut aux mouvements céphaliques de l'opérateur;
- un casque de restitution visuelle (un écran devant chaque oeil) délivrant un retour 3D similaire à celui qu'aurait l'opérateur s'il était physiquement présent dans l'univers de travail [Tachi 84 et 85].

Outre divers problèmes technologiques qui, à l'heure actuelle, restreignent trop lourdement la transparence des systèmes maître/esclave, la téléprésence se heurte à quelques obstacles majeurs:

- elle entraîne des coûts financiers que ne justifient pas nombre de tâches usuelles;
- d'un point de vue ergonomique, on peut s'interroger sur les effets de la sensation d'ubiquité éprouvée par un opérateur qui, présent dans un lieu, en perçoit un autre, chaque mouvement effectué dans l'univers maître (se gratter la tête, par exemple) ayant une répercussion dans l'univers esclave;
- il nous faut enfin remarquer que l'hostilité d'un milieu ne résulte pas toujours de son inaccessibilité à l'homme; l'application du concept de téléprésence à la micro-chirurgie ou au transport de masses lourdes (plusieurs tonnes) implique un changement d'échelle dont les conséquences psychologiques sont encore mal connues.

La démarche suivie dans le cadre de ARA se fonde essentiellement sur la notion de téléassistance et se distingue de la précédente par la recherche de configurations machine optimales en regard des tâches à réaliser. Recourant à tous les artifices de la TAO (partage de la commande,

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

traitement des retours d'information, ...), elle est à même d'offrir à l'homme des assistances ponctuelles mais très efficaces. Néanmoins, le concept de base présente lui aussi des inconvénients importants:

- son intérêt doit être mis en balance avec la charge de travail supplémentaire induite par la commande symbolique; il est clair, par exemple, qu'aucune aide analogique ne sera employée si cela oblige en-ligne à un dialogue homme-calculateur trop laborieux;
- il ne s'adresse qu'à des tâches relativement déterministes que l'on aura analysées au préalable;
- la définition des assistances utiles à l'exécution téléopérée d'un certain travail s'appuie nécessairement sur une étude des facteurs humains pour laquelle les outils théoriques font cruellement défaut, et qui repose donc sur une évaluation empirique et itérative, parfois fort difficile à mener.

A l'évidence, les 2 approches décrites ci-dessus ne sont pas contradictoires. Ayant des caractéristiques complémentaires, elles peuvent avantageusement s'épauler dans le cadre d'un compromis spécifique à chaque domaine d'application. Nous en résumerons la problématique en termes de versatilité et de performance:

- la téléprésence assure en effet au système homme-machine le profit de la formidable adaptativité de l'opérateur humain face à des situations imprévues;
- de son côté, la téléassistance apporte une remarquable efficacité dans la réalisation des tâches les plus fréquemment rencontrées (les expérimentations ARA permettent ainsi d'espérer dans quelques cas un facteur d'efficacité temporel proche de 1).

V.3.2 PARTAGE DU TRAVAIL ENTRE L'HOMME ET LE CALCULATEUR

Si la richesse du concept de téléassistance ne fait aucun doute, encore faut-il fournir à l'opérateur une aide satisfaisante au niveau symbolique. Un système tel que SARAH ouvre précisément le champ des assistances utilisables en-ligne de manière effective. Les essais entrepris

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

ont cependant attiré l'attention sur une difficulté non résolue dans le partage du travail entre l'homme et le calculateur. Classiquement, 2 stratégies d'allocation des tâches, l'une qualifiée de statique, l'autre de dynamique, sont proposées pour répondre à ce problème.

L'allocation statique des tâches [Licklider 60] se base sur une comparaison des aptitudes de l'homme et de la machine (tableaux de Fitts [Fitts 62]). Elle se traduit en général par un partage hiérarchique où l'homme définit les buts à atteindre et formule des hypothèses, tandis que la machine exécute le travail et accomplit les calculs complexes. La commande supervisée de Sheridan qui attribue à l'opérateur un rôle de planification, de surveillance et d'intervention, relève de cette stratégie transposée à la téléopération. Sa faisabilité a été affirmée grâce au système SUPERMAN qui témoigne pourtant d'une considérable évolution du concept initial. De la recherche d'une véritable autonomie de l'organe opératif fondée sur des techniques d'intelligence artificielle [Sheridan-Ferrel 69, Whitney 69], la commande supervisée s'est en effet orientée vers une programmation par apprentissage plus en rapport avec l'état de l'art actuel. Combinant ordres symboliques et enregistrements de consignes analogiques, cette dernière approche offre un intérêt essentiellement limité à des tâches répétitives [Sheridan 84]. A long terme, l'allocation statique est par ailleurs indirectement responsable de notables dégradations de la performance humaine qui concourent à mettre l'opérateur dans l'incapacité d'intervenir vite et efficacement en cas d'incident. Parmi ces facteurs de dégradation, nous citerons [Bainbridge 82]:

- la diminution du savoir-faire manuel de l'homme par manque ou absence de pratique;
- la diminution de sa connaissance profonde du système, pour les mêmes raisons;
- la perte de vigilance et de motivation induite en-ligne par le caractère fastidieux des tâches de surveillance.

A la différence de la stratégie précédente, l'allocation dynamique des tâches [Rouse 77 et 81] s'appuie sur l'idée que les capacités de l'homme et du calculateur sont relativement équivalentes dans beaucoup de

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

domaines. Nombre de tâches peuvent ainsi être assignées à l'un ou à l'autre, fonction de leur disponibilité respective. Les avantages d'un tel principe sont multiples:

- meilleure utilisation des ressources humaines;
- constance dans la charge de travail de l'opérateur;
- plus grande opportunité d'apprentissage (aussi bien manuel que cognitif) pour l'homme;
- tolérance du système aux défaillances de l'opérateur ou de la machine.

Plaçant l'homme et le calculateur en étroite concurrence, l'allocation dynamique risque cependant de provoquer des conflits nuisibles à l'efficacité globale du système. Elle implique donc que l'un au moins des 2 partis (de préférence la machine) soit informé de ce que fait l'autre, afin de modérer ses actions en conséquence. Pour répondre à ce besoin, de récents travaux ergonomiques ont dégagé 2 approches:

- la communication implicite qui repose sur un modèle prédictif de l'opérateur permettant à la machine de définir son rôle en complément de celui de l'homme;
- la communication explicite où l'homme informe directement le calculateur de ses intentions.

Des expérimentations limitées à des tâches de surveillance de plusieurs process identiques [Greenstein-Rouse 82, Revesman-Greenstein 83] ont conduit à valider la communication implicite qui, même avec un modèle très imparfait, donne des résultats significatifs. En l'absence d'investigations plus poussées, nous résumerons comme suit les caractéristiques de chaque forme de communication:

- communication implicite:
 - n'impose pas de charge supplémentaire dans le dialogue homme-calculateur;
 - est susceptible de prendre en compte des situations dont l'opérateur n'est pas conscient (par exemple, une perte de vigilance);
 - laisse une totale liberté à l'homme qui n'a pas à se préoccuper du calculateur;
- communication explicite:
 - assure un partage du travail plus optimal, au prix d'une augmen-

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

tation de l'activité mentale de l'opérateur, allant de pair avec un accroissement du volume des échanges homme-machine (ceci restera vrai tant que l'on ne disposera pas de modèle suffisamment fidèle).

En comparaison des stratégies d'allocation proposées par les ergonomes, la distribution des rôles observée sur la machine ARA résulte:

- de contraintes fixées a priori traduisant une connaissance générique de la tâche envisagée:
 - au niveau analogique: choix des molocs associés en réseau;
 - au niveau symbolique: structure des glomodes et contenu des champs qui gèrent leur évolution (transitions automatiques programmées, etc.);
- d'informations relatives à la tâche en cours d'exécution, introduites lors de l'appel d'un glomode, de la sélection du chemin à suivre dans un réseau ou de la signalisation d'un événement anormal;
- des ressources machine disponibles (modèle de l'environnement, par exemple).

En-ligne, l'homme ne participe au partage du travail qu'au travers de sa fonction de "capteur intelligent" qui identifie les situations rencontrées et en informe la machine. Dans ce contexte, le processus d'allocation ne permet pas directement à l'opérateur de se réserver une tâche gratifiante ou d'en rejeter une autre pour cause de fatigue. C'est ainsi le calculateur qui dicte à l'homme son canevas de travail, alors que l'inverse serait éminemment préférable.

Dans une large mesure, les inconvénients mentionnés à propos de SARAH sont inévitables. Ils ont des causes profondes dont les principales nous semblent être:

- le couplage des tâches de supervision qui n'autorise pas l'homme et le calculateur à travailler de manière indépendante, en parallèle ou séquentiellement;
- l'absence de critère d'allocation implantable, prenant en compte l'état de l'opérateur et de la machine, tout autant que la nature de la tâche à réaliser.

De fait, la démarche fondamentale de SARAH revient à appuyer les configurations successives du système de TAO sur les méthodes empiriques existantes, c'est-à-dire sur une préparation hors-ligne des tâches.

V.3.3 DEVELOPPEMENTS FUTURS

Dans un premier temps, l'étude exhaustive d'un domaine d'application concret nous paraît être une phase indispensable à la validation définitive de l'approche SARAH. Après avoir déterminé les difficultés qui entravent la conduite du manipulateur, une telle étude s'attacherait à spécifier un ensemble cohérent de stratégies d'assistance. Elle permettrait alors une analyse globale de l'activité opérateur et contribuerait, d'une part, à la prise en compte des facteurs humains les plus sensibles, d'autre part, à la définition d'un catalogue de glomodes structurés conduisant à un langage de description des tâches inhérentes au domaine choisi. De ce point de vue, le nucléaire demeure un thème porteur, notamment dans les actions de démantèlement et de retraitement. Outre que Sarah est une étape obligée à une exploitation d'envergure des aides analogiques orientées tâche, il constituerait ainsi un remarquable outil de développement.

Parallèlement à ce travail de validation, la recherche en TAO ne peut rester aveugle aux récents progrès de l'intelligence artificielle. Bien que les retombées pratiques de cette discipline soient encore assez imprécises, les besoins de la téléopération semblent se focaliser sur les axes suivants:

- modélisation objet de l'environnement et planification des tâches (le système CoPILOTe abordé en III.3.3.a dessine une solution tout à fait prometteuse);
- aide à la conception des glomodes;
- simulation des stratégies proposées à l'opérateur et évaluation de leur faisabilité et de leur coût;
- assistance à la commande symbolique des systèmes annexes (porteurs, caméras, etc.);
- sélection des informations pertinentes et de leur mode de restitution,

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

- en rapport avec les conditions d'environnement et les caractéristiques de la tâche en cours;
- interprétation des compte-rendus d'exécution de bas niveau dans un contexte tâche spécifique.

Parmi ceux-ci, le point 2 est probablement le plus intéressant à long terme. Toute aide informatique apportée hors-ligne à la définition des assistances pertinentes adressant une tâche donnée, poserait en effet les bases d'une véritable stratégie de configuration dynamique susceptible en-ligne d'affranchir la supervision d'un certain manque de souplesse attaché à la notion de glomode pré-programmé.

En plus des développements cités ci-dessus, les techniques de la TAO peuvent être transposées au pilotage de systèmes télécommandés autres qu'un bras manipulateur. Sur ce plan, la conduite à distance d'un robot mobile offre un large champ d'investigation. L'emploi d'un organe de commande à retour d'effort permettrait en particulier l'implantation d'une commande maître/esclave généralisée et autoriserait la restitution sous une forme kinesthésique des informations relatives:

- à la dynamique du véhicule où la sensation des efforts d'accélération et de freinage éviterait à l'opérateur de faire patiner les roues ou de les bloquer;
- à sa stabilité, l'organe maître informant l'homme du sens des actions à entreprendre pour retrouver une position convenable du centre de gravité du robot;
- à l'environnement au travers de modes référencés modèle ou capteurs qui faciliteraient, par exemple, le suivi de mur, l'anti-collision et la navigation dans des espaces encombrés ou étroits (corridor, palier d'escalier, etc.).

CONCLUSION

D'une manière générale, les expérimentations menées sur le site canonique ARA ont démontré la validité de notre approche en supervision. Elles ont cependant mis en lumière 2 points importants: d'une part, la

IMPLANTATION ET MISE EN OEUVRE DE SARAH

nécessité de prendre en compte au niveau symbolique les modes de retour d'information tels que vision synthétique ou indicateurs de navigation, d'autre part, la qualité très imparfaite des stratégies actuelles de partage des tâches entre l'homme et la machine. Cette campagne d'évaluation s'est par ailleurs révélée riche en enseignements et va ainsi permettre de jeter les bases d'un système de supervision plus convivial et opérationnel, tout en conservant les mêmes fondements conceptuels.

CONCLUSION

L'intégration d'un ordinateur dans les boucles perception-action d'un système maître/esclave conduit à la définition de nombreux modes de commande orientés tâche. S'ils sont susceptibles d'apporter à l'opérateur humain une aide efficace dans le pilotage du bras, ils impliquent cependant un dialogue homme-ordinateur en-ligne et se traduisent donc par une charge de travail mentale accrue. Afin d'assister l'opérateur, nous avons proposé une structure de commande symbolique fondée sur 2 niveaux fonctionnels que l'on caractérisera comme suit:

- niveau planification:
 - construction hors-ligne d'un plan séquentiel;
 - prise en compte de l'environnement de la tâche au travers de modèles pré-établis;
- niveau supervision:
 - compilation de glomodes (enchaînements de modes de commande) indépendamment de tout contexte particulier;
 - spécification de stratégies alternatives et des procédures de reprise sur incident les plus usuelles;
 - génération en-ligne de séquences de molocs (modes de commande) dont l'adéquation à la tâche résulte en grande partie des interactions avec l'opérateur.

Le processus de commande s'appuie ainsi sur une décomposition hiérarchique des descriptions de tâche fournies. Comme en robotique de substitution, cette approche s'accompagne d'"échanges verticaux" au sein du système. L'intervention d'un opérateur humain y ajoute des "échanges horizontaux" qui permettent à l'homme de compléter ou de préciser le traitement informatique. Etant de nature différente, ces 2 formes de communication n'obéissent pas aux mêmes contraintes. La commande symbo-

CONCLUSION

lique de la machine se doit en outre de considérer certains facteurs humains relatifs à l'opérateur d'exécution. Il s'en déduit que l'étape suivante du développement de notre système est une étude pratique portant sur un domaine d'application concret et dont on attendra une meilleure connaissance de l'influence respective des facteurs tâche et humains. Ce travail sera entrepris au CEA/UGRA dès lors qu'un nouveau site de téléopération sera opérationnel.

BIBLIOGRAPHIE

- [Agricole 85] C. Agricole, Réseau Local pour Téléopération Assistée par Ordinateur, Rapport Interne L.A. 370, Centre d'Automatique de Lille, janvier 85.
- [Albus-Barbera 79] A. J. Barbera, J. S. Albus et M. L. Fitzgerald, Hierarchical Control of Robots Using Microcomputers, Proc. 9th Int. Symp. on Industrial Robots, Washington, mars 79, pp. 405-420.
- [André 83] G. André, Conception et Modélisation des Systèmes de Perception Proximétriques: Application à la Commande en Téléopération, thèse de Dr.-Ing., IRISA, Rennes, 1983.
- [André-Fournier 85] G. André et R. Fournier, Generalized End Effector Control in a Computer Aided Teleoperation System with Application to Motion Coordination of a Manipulator Arm on an Oscillating Carrier, Proc. ICAR '85, Tokyo, sept. 85, pp. 337-344.
- [André-Fournier 86] G. André et A. Fournier, The Generalized Information Feedback Concept in Computer-Aided Teleoperation, Proc. 6th RoManSy, Cracovie, sept. 86.
- [Autechaud 83] P. Autechaud, Contrôle Homme-Machine dans l'Exécution d'une Tâche en Robotique, thèse de 3e cycle, Univ. des Sciences et Tech. de Lille, 8 juillet 83.
- [Bainbridge 82] L. Bainbridge, Ironies of Automation, Proc. of the IFAC Conf. on Analysis, Designs and Evaluation of Man-Machine Systems, Baden-Baden, 1982, pp. 129-135.
- [Bejczy 81] A. K. Bejczy et M. Handlykken, Generalization of Bilateral Force-Reflecting Control of Manipulators, Proc. 4th RoManSy, Zaborow, sept. 81, pp. 242-255.
- [Bejczy 85] S. Lee, G. Bekey et A. K. Bejczy, Computer Control of Space-Borne Teleoperators with Sensory Feedback, Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, mars 85, pp. 205-214.
- [Ben Gayed-Guerrouad 86] A. Guerrouad, M. Ben Gayed et al., Advanced Control Micromanipulator for Surgical Applications, Int. Conf. on Systems Science, Wroclaw, sept. 86.

BIBLIOGRAPHIE

- [Bicker 86] R. Bicker et L. Maunder, Force Feedback in Telemanipulators, Proc. 6th RoManSy, Cracovie, sept. 86.
- [Binford 79] T. Binford, The AL Language for Intelligent Robot, Séminaire IRIA: Langages et Méthodes de Programmation des Robots Industriels, Rocquencourt, juin 79.
- [Bonner-Shin 82] S. Bonner et K. G. Shin, A Comparative Study of Robot Languages, Computer, dec. 82, pp. 82-96.
- [Book 84] W. J. Book, S. Lee et V. Sangveraphunsiri, The Bracing Strategy for Robot Operation, Proc. 5th RoManSy, Udine, juin 84, pp. 139-146.
- [Brodie 81] L. Brodie, Starting Forth, Prentice-Hall, 1981.
- [Brooks 79] T. L. Brooks, Superman: A System for Supervisory Manipulation and the Study of Human/Computer Interactions, Master Thesis, MIT, 11 mai 79.
- [Chatila-Laumond 85] R. Chatila et J.-P. Laumond, Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots, Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, 25-28 mars 85, pp. 138-145.
- [Chermette 86] D. Chermette, TAO1 Manuel Opérateur, CEA/UGRA, 1986.
- [Coiffet-Vertut 84] P. Coiffet et J. Vertut, Les Robots T. 3A: La Téléopération, Evolution des techniques, Hermès, 1984.
- [Coiffet-Vertut 85] P. Coiffet et J. Vertut, Les Robots T. 3B: Téléopération Assistée par Ordinateur, Hermès, 1985.
- [Cornafion 81] Cornafion (collectif), Systèmes Informatiques Répartis, Concepts et Techniques, Dunod, 1981.
- [Diaz 85] C. Diaz, thèse de 3e cycle, USTL, Lille, 1985.
- [Ehrich-Williges 86] R. W. Ehrich et R. C. Williges, Human-Computer Dialogue Design, Elsevier, 1986.
- [Espiau 78] B. Espiau et al., La téléthèse Spartacus: Saisie Semi-Automatique, Colloque IRIA: Int. Conf. on Telemanipulators for the Physically Handicapped, Rocquencourt, 4-6 sept. 78, pp. 301-304.
- [Espiau 82] B. Espiau, Prise en Compte de l'Environnement Local dans la Commande de Robots Manipulateurs, Thèse d'Etat, Rennes, juin 82.
- [Espiau 86] B. Espiau, The Advanced Teleoperation Project, Proc. 6th RoManSy, Cracovie, sept. 86.
- [Espiau-André 81] B. Espiau et G. André, Using Proximity Sensors in Computer Enhanced Telemanipulation, Proc. 4th RoManSy,

BIBLIOGRAPHIE

Zaborow, sept. 81, pp. 231-241.

- [Evrard-Farreny-Prade 83] F. Evrard, H. Farreny et H. Prade, Contrôle d'Exécution de Plans et Communication Homme-Machine en Langage Naturel, Journées ARA (Pôle Robotique Générale), Besançon, nov. 83, pp. 159-177.
- [Evrard 84] F. Evrard, Interface Langage Naturel Langage de Commande, Journées ARA, Toulouse, 26-28 sept. 84.
- [Farreny 80] H. Farreny, Un Système pour l'Expression et la Résolution de Problèmes Orienté vers le Contrôle de Robots, thèse d'Etat, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, sept. 80.
- [Ferrel 65] W. R. Ferrel, Remote Manipulation with Transmission Delay, IEEE Trans. HFE Vol. 6, sept. 65, pp. 24-32.
- [Fikes-Nilsson 71] R. E. Fikes et N. J. Nilsson, STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving, Artificial Intelligence, Vol. 2, 1971, pp. 189-208.
- [Fikes-Nilsson 72] R. E. Fikes, P. E. Hart et N. J. Nilsson, Learning and Executing Generalized Robot Plans, Artificial Intelligence, Vol. 3, 1972, pp. 251-288.
- [Fiori-Acquaviva-Lescoat 83] N. Fiori et D. Acquaviva-Lescoat, Contribution to the Study of Man-Manipulator Interface at a Simple Manipulation Task, Proc. 31st Conf. on Remote Systems Technology, Vol. 1, Detroit, juin 83, pp. 26-29.
- [Fitts 62] P. M. Fitts, Functions of Man in Complex Systems, Aerospace Engineering Vol. 27, No. 1, 1962, pp. 34-39.
- [Fournier-Gaillard 86] R. Fournier, J. P. Gaillard, N. Fiori et B. Espiau, Advanced Teleoperation (III), An Integrated Experiment, Proc. 6th RoManSy, Cracovie, sept. 86.
- [Fournier-Gravez-Mangeot 87] R. Fournier, P. Gravez et C. Mangeot, High Level Hierarchical Control in Computer Aided Teleoperation, Proc. ICAR '87, Paris, oct. 87.
- [Galerie-Quetin 86] S. Galerie et N. Quetin, Projet Spartacus: Bilan de l'Interface Homme-Machine, Rapport LRE, mars 86.
- [Ghallab 84] M. Ghallab, Task Execution Monitoring by Compiled Production Rules in an Advanced Multi-Sensor Robot, Proc. 2nd ISRR, Kyoto, août 84.
- [Ghallab-Dufresne 84] M. Ghallab et P. Dufresne, Moteurs d'Inférence pour Règles de Production: Techniques de Compilation et d'Interprétation, Coll. Int. d'IA, Marseille, 24-27 oct. 84.
- [Gini 85] M. Gini, R. Doshi, M. Gluch, R. Smith et I. Zualkernan, The Role of Knowledge in the Architecture of a Robust Robot Control, Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 25-28 mars 85, St. Louis, pp. 561-567.

BIBLIOGRAPHIE

- [Goertz 64] R. C. Goertz, Some Work on Manipulator Systems at ANL, Past, Present and a Look at the Future, Proc. 1964 Seminars on Remotely Operated Special Equipment, US Atomic Energy Commission Rept. CONF-640508, mai 64.
- [Gravez 86] P. Gravez, B. Lepers, R. Fournier et G. André, Control and Supervision in Computer Aided Teleoperation, Proc. 6th RoManSy, Cracovie, sept. 86.
- [Greenstein-Rouse 82] J. S. Greenstein et W. B. Rouse, A model of Human Decisionmaking in Multiple Process Monitoring Situations, IEEE Trans. SMC Vol. 12, No. 2, mars-avril 82, pp. 182-193.
- [Guittet 76] J. Guittet, The Spartacus Project: Aids for the Physically Handicapped, Proc. 2nd Int. Congress on the Technology for Prosthetics and Functional Rehabilitation, Cannes, 1976.
- [Guittet 78] J. Guittet, H. H. Kwee, N. Quetin et J. Yclon, The Spartacus Telethesis: Manipulator Control and Experimentation, Colloque IRIA: Int. Conf. on Telem manipulators for the Physically Handicapped, Rocquencourt, 4-6 sept. 78, pp. 79-100.
- [Habchi 81] A. Habchi, Intégration du Contrôle d'un Robot par un Opérateur Humain, thèse Dr.-Ing., Univ. des Sciences et Tech. de Lille, 8 mai 81.
- [Hayes 81] P. Hayes, E. Ball et R. Reddy, Breaking the Man-Machine Communication Barrier, Computer, mars 81, pp. 19-30.
- [Hirai-Sato 85] S. Hirai et T. Sato, Advanced Master-Slave Manipulator Augmented with World Model, Proc. 15th Int. Symp. on Industrial Robots, Tokyo, 1985, pp. 137-144.
- [Hohn 78] R. E. Hohn, Computed Path Control for an Industrial Robot, Proc. 8th Int. Symp. on Industrial Robots, Stuttgart, juin 78, pp. 327-337.
- [Kogge 82] P. M. Kogge, An Architectural Trail to Threaded-Code systems, Computer, mars 82.
- [Koudela 73] J. Koudela Jr., The Past, Present and Future of Minicomputers: A Scenario, Proc. IEEE, Vol. 61, No. 11, nov. 73.
- [Kwee 78] H. H. Hwee, The Spartacus Telethesis: Soft Touch, Colloque IRIA: Int. Conf. on Telem manipulators for the Physically Handicapped, Rocquencourt, 4-6 sept. 78, pp. 305-308.
- [Latombe 79] J.-C. Latombe, Une Analyse Structurée d'Outils de Programmation pour la Robotique Industrielle, Séminaire IRIA: Langages et Méthodes de Programmation des Robots

BIBLIOGRAPHIE

- Industriels, Rocquencourt, juin 79, pp. 5-22.
- [Latombe 83] J.-C. Latombe, Toward Automatic Robot Programming, Proc. ICAR '83, Tokyo, 12-13 sept. 83.
- [Licklider 60] J. C. R. Licklider, Man-Computer Symbiosis, IEEE Trans. HFE Vol. 1, mars 60, pp. 4-11.
- [Lieberman 77] L. I. Lieberman et M. A. Wesley, AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly, IBM J. Research & Development, Vol. 21, No. 4, juil. 77, pp. 321-333.
- [Lopez-Foulc 84] P. Lopez et J.-N. Foulc, Introduction à la Robotique (2 volumes), EdiTests, 1984.
- [Lyman 71] A. Freedy, F. C. Hull, L. F. Lucaccini et J. Lyman, A Computer-Based Learning System for Remote Manipulator Control, IEEE Trans. SMC Vol. 1-4, oct. 71, pp. 356-363.
- [Mangeot 86] C. Mangeot et R. Fournier, Planification et Configuration en Téléopération Avancée, Rapport Interne CEA/UGRA 267/86, juin 86.
- [Mangeot 87] C. Mangeot, thèse de 3e cycle (à paraître), Paris VI.
- [Mazer 83] E. Mazer, LM-GEO Geometric Programming of Assembly Robots, Proc. Int. Meet. on Advanced Software and Robotics, Liège, mai 83.
- [McCain 85] H. G. McCain, A Hierarchically Controlled, Sensory Interactive Robot in the Automated Manufacturing Research Facility, Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 25-28 mars 85, St. Louis, pp. 931-939.
- [Miribel-Mazer 84] J.-F. Miribel et E. Mazer, Le Langage LM: manuel de référence, CEPADUES Editions, 1984.
- [Moore-Rather 73] C. H. Moore et E. D. Rather, The Forth Program for Spectral Line Observing, Proc. IEEE, Vol. 61, No. 9, sept. 73.
- [Moore-Rather 76] C. H. Moore et E. D. Rather, The Forth Approach to Operating Systems, Proc. ACM 76, oct. 76.
- [Nilsson 82] N. J. Nilsson, Principles of Artificial Intelligence, Springer, New York, 1982.
- [Norman 82] D. A. Norman, Steps toward a Cognitive Engineering: Design Rules Based on Analyses of Human Error, Proc. Human Factors in Computer Systems, 15-17 mars 82, pp. 378-382.
- [Ohmichi 85] T. Ohmichi et al., Analysis and Evaluation for Fingered Manipulators Supported by Master Slave Control, Proc. 15th ISIR, Tokyo, 1985, pp. 423-429.

BIBLIOGRAPHIE

- [Picardat 86] J.-F. Picardat, An A.I. Robot Programming Architecture: MUCAR, Proc. 16th ISIR, Bruxelles, 30 sept-2 oct. 86, pp. 765-774.
- [Paul 77] R. P. Paul, WAVE: A Model-Based Language for Manipulator Control, The Industrial Robot 4-1, mars 77, pp. 10-17.
- [Paul 83] R. P. Paul, Sensors and the Off-Line Programming of Robots, Proc. ICAR '83, Tokyo, 12-13 sept. 83, pp. 307-312.
- [Paul 84] R. P. Paul et V. Hayward, Robot Control and Computer Languages, Proc. 5th RoManSy, Udine, juin 84, pp. 147-154.
- [Quaro 85] C. Quaro, Etude et Réalisation d'un Système Graphique Interactif pour la Robotique, thèse de Dr.-Ing., USTL, Montpellier, 1er octobre 1985.
- [Quaro-Fournier 84] C. Quaro, A. Fournier, Computer Aided Bilateral Manipulator Control using a Computerized Picture as Visual Feedback, Proc. IASTED 84, Amsterdam, juin 84.
- [Quetin 83] N. Quetin, Couplage d'un Syntaxeur Manuel et d'un Manipulateur MA23 dans un Repère Relatif, Congrès AFCET: Productique et Robotique Intelligente, Besançon, 15-17 nov. 83, pp. 163-170.
- [Revesman-Greenstein 83] M. E. Revesman et J. S. Greenstein, An Empirical Validation of a Model of Human Decision Making for Human-Computer Communication, Proc. of the Human Factor Society, 27th Annual Meeting, Norfolk, oct. 83, pp. 958-962.
- [Rouse 75] W. B. Rouse, Design of Man-Computer Interfaces for On-Line Interactive Systems, Proc. IEEE Vol. 63, No. 6, juin 75, pp. 847-857.
- [Rouse 77] W. B. Rouse, Human-Computer Interaction in Multitask Situations, IEEE Trans. SMC Vol. 7, No. 5, mai 77, pp. 384-392.
- [Rouse 81] W. B. Rouse, Human-Computer Interaction in the Control of Dynamic Systems, Computing Surveys, Vol. 13, No. 1, mars 81.
- [Salman-Tisserand-Toulout 83] W. P. Salman, O. Tisserand et B. Toulout, Forth, Eyrolles, 1983.
- [Sato-Hirai 85] T. Sato et S. Hirai, Language-Aided Robotic Teleoperation System (LARTS) for Advanced Teleoperation, Proc. ICAR '85, Tokyo, sept. 85, pp. 329-336.
- [Sheridan 67] W. R. Ferrel et T. B. Sheridan, Supervisory Control of Remote Manipulation, IEEE Spectrum, oct. 67, pp. 81-88.

BIBLIOGRAPHIE

- [Sheridan 69] T. B. Sheridan et W. R. Ferrel, Human Control of Remote Computer-Manipulators, Proc. 1st Int. Conf. on Artificial Intelligence, 1969, pp. 483-494.
- [Sheridan 76] T. B. Sheridan, Toward a General Model of Supervisory Control, in Monitoring Behavior and Supervisory Control (T. B. Sheridan et G. Johannsen), Plenum, New York, 1976, pp. 271-281.
- [Sheridan 84] T. B. Sheridan, Supervisory Control of Remote Manipulators, Vehicles and Dynamic Processes, in Advances in Man-Machine Systems, Vol. 1, pp. 49-137, JAI Press, 1984.
- [Sheridan 84a] T. B. Sheridan, Forty-Five Years of Man-Machine Systems: History and Trends, Proc. 9th IFAC, Budapest, 1984, pp. 5-13.
- [Smith 81] S. L. Smith, Exploring Compatibility with Words and Pictures, Human Factors, Vol. 23, No. 3, juin 81, pp. 305-315.
- [Tachi 84] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya et M. Kaneko, Study on Tele-Existence (I), Proc. 5th RoManSy, Udine, juin 84, pp. 206-215.
- [Tachi 85] S. Tachi et H. Arai, Study on Tele-Existence (II), Proc. ICAR '85, Tokyo, sept. 85, pp. 345-352.
- [Vertut 73] J. Vertut, L. Papot, C. Rossignol et A. Tiret, Contribution to Define a Dexterity Factor for Manipulators, Proc. 21st Conf. on Remote Systems Technology, San Francisco, nov. 73, pp. 38-46.
- [Vertut 74] J. Vertut et J. Charles, MA23-6000: Underwater Bilateral Servo Master Slave Manipulator, Coll. Int. sur l'Exploitation des Océans, Bordeaux, 1974.
- [Vertut 76] J. Vertut et al., The MA23 Bilateral Servomanipulator System, Proc. 24th Conf. on Remote Systems Technology, Washington, nov. 76, pp. 175-187.
- [Vertut 81] J. Vertut, The MAT-1: A Computer Enhanced Remote Manipulator for Severely Handicapped Operators, Proc. 4th RoManSy, Zaborow, 8-12 sept. 81, pp. 256-268.
- [Vertut 83] J. Vertut et al., Human Factor Aspects of Computer Enhanced Teleoperation, Proc. 31st Conf. on Remote Systems Technology, Vol. 1, Detroit, juin 83, pp. 40-43.
- [Vertut 84] J. Vertut, R. Fournier, B. Espiau et G. André, Advances in a Computer Aided Bilateral Manipulator System, Proc. Meet. on Robotics and Remote Handling in Hostile Environment, Gatlinburg, avril 84, pp. 367-374.

BIBLIOGRAPHIE

- [Yclon 79] J. Yclon, Système d'Expérimentation Spartacus: Dossier Technique Informatique, Rapport IRIA, mai 79.
- [Whitney 69] D. E. Whitney, State Space Model of Remote Manipulation Task, Proc. 1st IJCAI, Washington, mai 69, pp. 495-507.

ANNEXE A

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

1. PARAMETRES ET INDICATEURS

Les indicateurs et paramètres échangés entre le Solar et le Micral sont transmis sous forme d'entier codé en binaire sur 16 bits. Les différents formats possibles pour les paramètres définis ci-dessous sont:

- scalaire à valeur sur 1 entier;
- vectoriel à 2 composantes (pince);
- vectoriel à 4 composantes (porteur Pamda);
- vectoriel à 7 composantes (position, vitesse et force: 6 coordonnées + 1 indicateur donnant le repère de référence).

Indicateur de repère

IREP

Définit le repère de référence:

- IREP = 0 => repère tâche;
- IREP = 1 => repère bras esclave (dépend de la position du porteur Pamda);
- IREP = 2 => repère pince (dépend des positions Pamda et MA23).

Format: 1 entier (2 octets).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Indicateur de ddl

IDDL

En cas de butée mécanique, donne le numéro (1-6) du ddl concerné.

Format: 1 entier (2 octets).

Indicateur de commande Pamda

ICPAM

Avant un déplacement du porteur, détermine si la commande Pamda s'exécute ou non selon une consigne et avec assistance opérateur:

- ICPAM = 0 => commande Pamda sans consigne;
- ICPAM = 1 => commande Pamda avec consigne.

Format: 1 entier (2 octets).

Indicateur Pamda

IHPAM

Indicateur envoyé par le Solar après un déplacement Pamda et tel que:

- IHPAM = 0 => la base du MA23 n'est pas horizontale;
- IHPAM = 1 => la base du MA23 est horizontale.

Format: 1 entier (2 octets).

Indicateur mode robot

IMAUT

Indicateur émis par le superviseur avant un mode robot et tel que:

- IMAUT = 0 => exécution immédiate du déplacement demandé;
- IMAUT = 1 => test de la trajectoire puis exécution si test positif;
- IMAUT = 2 => pas de déplacement, essai à blanc;
- IMAUT = 3 => exécution immédiate avec recopie du maître;
- IMAUT = 4 => test puis exécution avec recopie du maître.

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre rapport d'homothétie

FHOM

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre distance

DIST

Exprimé en mm.

Format: 1 entier (2 octets).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Paramètre déplacement scalaire DEPLS

Exprimé en mm (ordre de grandeur plus important que DIST).

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre vitesse scalaire VITS

Exprimé en mm/s.

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre force scalaire FORS

Exprimé en g.

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre poids POIDS

Exprimé en g.

Format: 1 entier (2 octets).

Paramètre pince PINCE

Valeurs de consigne et de recopie pince.

Format: 2 entiers (4 octets).

Paramètre position Pamda POSPAM

4 variables articulaires du porteur Pamda.

Format: 4 entiers (8 octets).

Paramètre position POS

6 coordonnées (X, Y, Z et angles d'Euler) du manipulateur esclave exprimées en mm et mrd + indicateur IREP (en général, le repère de référence sera le repère tâche d'où IREP = 0).

Format: 7 entiers (14 octets).

Remarque: le Solar mémorise la consigne pince d'un mode à l'autre.

Paramètre déplacement vectoriel DEPLV

6 composantes (selon X, Y, Z et angles d'Euler-mm et mrd) d'un déplacement relatif + indicateur IREP donnant le repère de référence.

Format: 7 entiers (14 octets).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Paramètre vitesse vectorielle VITV

6 composantes (selon X, Y, Z et angles d'Euler-mm/s et mrd/s) d'une vitesse + indicateur IREP.

Format: 7 entiers (14 octets).

Paramètre force vectorielle FORV

6 composantes (selon X, Y, Z et angles d'Euler-g et g.m) d'une force + indicateur IREP.

Format: 7 entiers (14 octets).

Paramètre commande des ddl COMDDL

6 indicateurs donnant pour chaque ddl de l'effecteur (X, Y, Z et angles d'Euler) le type de commande à appliquer: soit, pour un ddl A:

- COMDDL(A) = 0 => A est libre (commande manuelle);
- COMDDL(A) = 1 => A est bloqué;
- COMDDL(A) = 2 => A est commandé en boucle fermée par asservissement sur les capteurs proximétriques;

+ 1 indicateur IREPINCE qui définit le repère pince de référence:

- IREPINCE = 0 => repère pince actuel;
- IREPINCE = 1 => autre repère pince (à préciser).

Format: 7 entiers (14 octets).

2. MESSAGES DE COMPTE-RENDU

envoyés par un mode de commande Solar à destination du superviseur.

Type 2: fin de mode

Format: type de message (entier 2) + indicateur d'origine (1 entier)
(+ indicateur IDDL).

L'indicateur d'origine IOR2 complète l'information fin de mode selon le codage:

- IOR2 = 0: ordre superviseur;
- IOR2 = 1: arrêt opérateur (modes télémanipulés);
- IOR2 = 2: fin de tâche (modes automatiques);
- IOR2 = 3 suivi d'un indicateur IDDL: butée mécanique sur l'axe spéci-

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

- fié, IDDL = 1000 => déplacement impossible (modes automatiques);
- IOR2 = 4: interruption opérateur (modes télémanipulés ou automatiques);
 - IOR2 = 5: erreur de paramètre (modes automatiques: vitesse trop lente ou trajectoire trop longue);
 - IOR2 = 6 suivi d'un indicateur IDDL: butée en effort sur l'axe spécifié (modes automatiques: collision);
 - IOR2 = 7: pas d'accrochage capteurs (modes référencés capteurs automatiques);
 - IOR2 = 8: interruption opérateur sur mise en référence;
 - IOR2 = 9: déplacement max atteint (CTRAUTO et SAISIE).

Type 3: suppression de poids

Format: type de message (entier 3) + indicateur d'origine IOR3 (1 entier), avec IOR3 tel que:

- IOR3 = 1: activation de la fonction suppression de poids (à l'initiative de l'opérateur d'exécution, le Solar transmet une demande d'évaluation du poids conduisant au relancement du mode courant avec la valeur obtenue);
- IOR3 = 2: désactivation de la suppression de poids (demande de relancement du mode courant avec une valeur de poids nulle).

Type 4: fin de sous-mode

Format: type de message (entier 4).

Type 5: affichage

Format: type de message (entier 5) + indicateur d'origine (1 entier)
(+ indicateur IDDL).

L'indicateur d'origine IOR5 spécifie l'information à présenter à l'opérateur:

- IOR5 = 1 suivi d'un indicateur IDDL: butée mécanique sur l'axe spécifié, IDDL = 0 => fin de butée mécanique (modes télémanipulés);
- IOR5 = 2: mise en contrainte de l'effecteur (BDDL);
- IOR5 = 3: fin de mise en contrainte (BDDL);
- IOR5 = 4: dégauchissage (DGCH et DGCHRF);
- IOR5 = 5: fin de dégauchissage (DGCH et DGCHRF);

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

- IOR5 = 6: centrage (SAISIE);
- IOR5 = 7: avance pince (SAISIE);
- IOR5 = 8: fermeture pince (SAISIE);
- IOR5 = 9: accrochage capteurs (modes référencés capteurs réflexes);
- IOR5 = 10: pas d'accrochage capteurs (modes référencés capteurs réflexes);
- IOR5 = 11: accrochage modèle (modes référencés modèle);
- IOR5 = 12: pas d'accrochage modèle (modes référencés modèle).

Type 6: fin de recalage

Format: type de message (entier 6).

Type 7: acquisition de paramètre(s)

Format: type de message (entier 7) + paramètre(s).

Type 8: fin de mode sur fin de tâche avec acquisition de paramètre(s)

Format: type de message (entier 8) + paramètre(s).

3. MODES DE COMMANDE

Recalage

REC

Description: recalage du maître sur l'esclave.

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 6 (fin de recalage).

Mise en référence

REF

Description: recalage du maître et de l'esclave dans la position de référence.

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 2 (fin de mode) sur:

- fin de tâche (2): maître et esclave couplés;
- interruption opérateur (8): maître et esclave découplés.

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Acquisition d'un paramètre poids ACQPOIDS

Description: le Solar évalue le poids d'un objet saisi par la pince et transmet la valeur obtenue (éventuellement nulle) au Micral.

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 8 + paramètre POIDS.

Remarque: suppression de poids

La plupart des modes suivants intègrent la fonction suppression de poids et leur mise en oeuvre fait appel à un paramètre POIDS dont la valeur sera nulle si cette fonction n'est pas désirée. Parmi eux, les modes télémanipulés peuvent être interrompus sur un message de type 3 pour se voir relancés après une ré-évaluation du paramètre POIDS.

Acquisition de la position du manipulateur ACQPOS

Description: le Solar transmet au superviseur la position courante du MA23.

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 8 + paramètre POS (dans repère tâche donc avec IREP = 0) + paramètre PINCE.

Acquisition de la position Pamda ACQPAM

Description: le Solar transmet au superviseur la position courante du Pamda (variables articulaires).

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 8 + paramètre POSPAM.

Commande Pamda COMPAM

Description: déplacement manuel du Pamda éventuellement avec assistance visuelle (lorsqu'une position de consigne est donnée).

Mise en oeuvre:

- commande sans consigne: ordre + indicateur ICPAM (ICPAM = 0);
- commande avec consigne: ordre + indicateur ICPAM (ICPAM = 1) + paramètre POSPAM (vers Solar et système d'assistance).

Fin de mode: message type 8 + indicateur IHPAM.

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Mode bilatéral symétrique

MBS

Description: recopie des mouvements du maître par l'esclave avec retour d'effort annulant éventuellement le poids de l'objet transporté.

Mise en oeuvre: ordre + paramètre POIDS.

Message type 5 (affichage) + paramètre IDDL si butée mécanique (1).

Fin de mode: message type 3 ou message type 7 + paramètre PINCE, puis message type 2 (fin de mode) sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

Homothétie/décalage

HOMDEC

Description: en sous-mode homothétie, l'esclave reproduit les mouvements du maître avec un rapport d'homothétie entraînant un décalage M/E (retour d'effort annulant éventuellement le poids de l'objet transporté); en sous-mode décalage, l'esclave recopie les mouvements du maître en tenant compte du décalage introduit précédemment (retour d'effort annulant éventuellement le poids de l'objet transporté).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre FHOM + paramètre POIDS.

Fin de sous-mode: message type 4.

Message type 5 (affichage) + paramètre IDDL si butée mécanique (1).

Fin de mode: message type 3 ou message type 7 + paramètre PINCE, puis message type 2 (fin de mode) sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

Blocage de ddl

BDDL

Deux sous-modes: blocage de ddl/mode bilatéral symétrique.

Description du blocage de ddl: mode télémanipulé symétrique avec contraintes spatiales: blocage de certains ddl de l'effecteur (retour d'effort annulant éventuellement le poids de l'objet transporté).

Mise en oeuvre:

- ordre + paramètre COMDDL + paramètre POIDS, si IREPINCE = 0 (repère pince courant);
- ordre + paramètre COMDDL + paramètre POS (dans repère tâche, donc avec IREP = 0) + paramètre POIDS, si IREPINCE = 1 (autre repère

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

pince); dans ce deuxième cas, le mode va commencer par un déplacement automatique de l'esclave (avec recopie du maître) vers la position POS.

Fin de sous-mode: message type 4.

Message type 5 (affichage):

- sur butée mécanique (1) en phase télémanipulée;
- si IREPINCE = 1 (autre repère pince), sur mise en contrainte de l'effecteur (2)/fin de mise en contrainte (3).

Fin de mode: message type 3 ou message type 7 + paramètre PINCE, puis message type 2 (fin de mode) sur:

- arrêt opérateur (1);
- butée mécanique (3) dans la phase de mise en contrainte;
- interruption opérateur (4).

Remarque: suppression de poids en mode automatique

L'utilisation de la fonction suppression de poids sur les modes suivants permet de corriger le décalage entre consigne et recopie esclave introduit par le poids d'un objet transporté.

Déplacement absolu

DEPABS

Description: déplacement automatique rectiligne (M/E découplés ou recopie du maître) vers une position spécifiée.

Mise en oeuvre: ordre + indicateur IMAUT

- + paramètre POS (consigne: position à atteindre exprimée dans le repère tâche, donc avec IREP = 0)
- + paramètre VITS (consigne: vitesse sur la trajectoire)
- + paramètre FORS (contrainte: force max à appliquer)
- + paramètre POIDS.

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- erreur de paramètre (5);
- butée en effort (6).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Déplacement relatif à vitesse constante

DEPRELV

Description: déplacement automatique (M/E découplés ou recopie du maître) selon un vecteur vitesse constant et sur une distance donnée.

Mise en oeuvre: ordre + indicateur IMAUT

- + paramètre VITV (consigne: direction et amplitude de la vitesse)
- + paramètre DEPLS (contrainte: déplacement max)
- + paramètre FORS (contrainte: force max à appliquer)
- + paramètre POIDS.

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- erreur paramètre (5);
- butée en effort (6).

Déplacement relatif à force constante

DEPRELF

Description: déplacement automatique (M/E découplés ou recopie du maître) selon un vecteur force constant et sur une distance donnée.

Mise en oeuvre: ordre + indicateur IMAUT

- + paramètre FORV (consigne: direction et amplitude de la force à appliquer)
- + paramètre DEPLS (contrainte: déplacement max)
- + paramètre VITS (contrainte: vitesse max)
- + paramètre POIDS.

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- erreur paramètre (5).

Déplacement auto

ALLERA

Description: déplacement automatique sans contrainte sur la trajectoire (M/E découplés).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre POS

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

+ paramètre FORS (contrainte: force max).

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- butée en effort (6).

Fermeture pince

SERPINCE

Description: fermeture en effort de la pince.

Mise en oeuvre: ordre + paramètre FORS.

Fin de mode: message type 8 + paramètre PINCE.

Ouverture pince

DESERPINCE

Description: ouverture de la pince.

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Fin de mode: message type 8 + paramètre PINCE.

Remarque: suppression de poids en mode référencé capteurs

Les modes capteurs ne font généralement pas intervenir d'outil ni de déplacement avec charge, c'est pourquoi il n'a pas paru utile de leur associer une fonction suppression de poids.

Dégauchissage et suivi de surface

DGCHAUTO (4 capteurs)

Description: dégauchissage de la pince normalement à une surface, puis déplacement automatique le long de cette surface selon un vecteur vitesse donné (mode référencé capteurs, M/E découplés).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre VITV (consigne: vecteur vitesse exprimé dans le repère pince, donc avec IREP = 2)

+ paramètre DIST (consigne: distance d'asservissement)

+ paramètre DEPLS (contrainte: déplacement max)

+ paramètre FORS (contrainte: force max à appliquer).

Message type 5 (affichage) sur dégauchissage (4)/fin de dégauchissage (5).

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

- interruption opérateur (4);
- erreur paramètre (5);
- butée en effort (6);
- pas d'accrochage capteurs (7).

Dégauchissage et suivi de surface réflexe DGCHRFX (4 capteurs)

Description: dégauchissage de l'effecteur normalement à une surface et suivi de cette surface en mode télémanipulé avec retour d'effort généralisé (mode référencé capteurs, M/E couplés).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre DIST (consigne: distance d'asservissement).

Message type 5 (affichage) sur butée mécanique (1), accrochage capteurs (9)/ pas d'accrochage capteurs (10) et dégauchissage (4)/fin de dégauchissage (5).

Fin de mode: message type 2 sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

Centrage automatique CTRAUTO (2 capteurs)

Description: centrage automatique sur un objet à saisir (mode référencé capteurs, M/E découplés).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre DEPLS (contrainte: déplacement max).

Fin de mode: message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- pas d'accrochage capteurs (7);
- déplacement max atteint (9).

Centrage réflexe CTRRFX (2 capteurs)

Description: centrage télémanipulé sur un objet à saisir avec retour d'effort généralisé (mode référencé capteurs, M/E couplés).

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Message type 5 (affichage) sur butée mécanique (1) et accrochage capteurs (9)/ pas d'accrochage capteurs (10).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Fin de mode: message type 2 sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

Asservissement en distance-anticollision

DISREF (1 capteur)

Description: mode télémanipulé avec asservissement réflexe en distance (mode référencé capteur, M/E couplés).

Mise en oeuvre: ordre + paramètre DIST (consigne: distance d'asservissement).

Message type 5 (affichage) sur butée mécanique (1) et accrochage capteurs (9)/ pas d'accrochage capteurs (10).

Fin de mode: message type 2 sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

Saisie automatique

SAISIE

Description: saisie automatique d'un objet avec centrage, avance et fermeture pince (mode référencé capteurs, M/E découplés).

Mise en oeuvre: ordre sans paramètre.

Message type 5 (affichage) sur centrage (6), avance (7) et fermeture pince (8).

Fin de mode: message type 7 + paramètre PINCE, puis message type 2 sur:

- fin de tâche (2);
- butée mécanique (3);
- interruption opérateur (4);
- pas d'accrochage capteurs (7);
- déplacement max atteint au centrage (9).

Attraction/répulsion CAO

ATRCOA/REPCOA

Description: mode télémanipulé avec retour d'effort réflexe en attraction ou répulsion relativement à des surfaces définies dans une base de données CAO (mode référencé modèle; M/E couplés).

Mise en oeuvre: ordre + liste de numéros de primitive (volume).

Message type 5 (affichage) sur butée mécanique (1) et accrochage modèle (11)/ pas d'accrochage modèle (12).

CATALOGUE DES MODES DE COMMANDE (TAO-ARA)

Fin de mode: message type 2 sur:

- arrêt opérateur (1);
- interruption opérateur (4).

ANNEXE B

DESCRIPTION DES GLOMODES CITES

- deplauto;
- deplauto1;
- apprenpos;
- apprenpos1;
- outsaisie_auto;
- outdepose_auto;
- outapp;
- perçage;
- mulperçage.

Figure B.1: glomode deplauto
(déplacement automatique avec reprise manuelle sur collision)

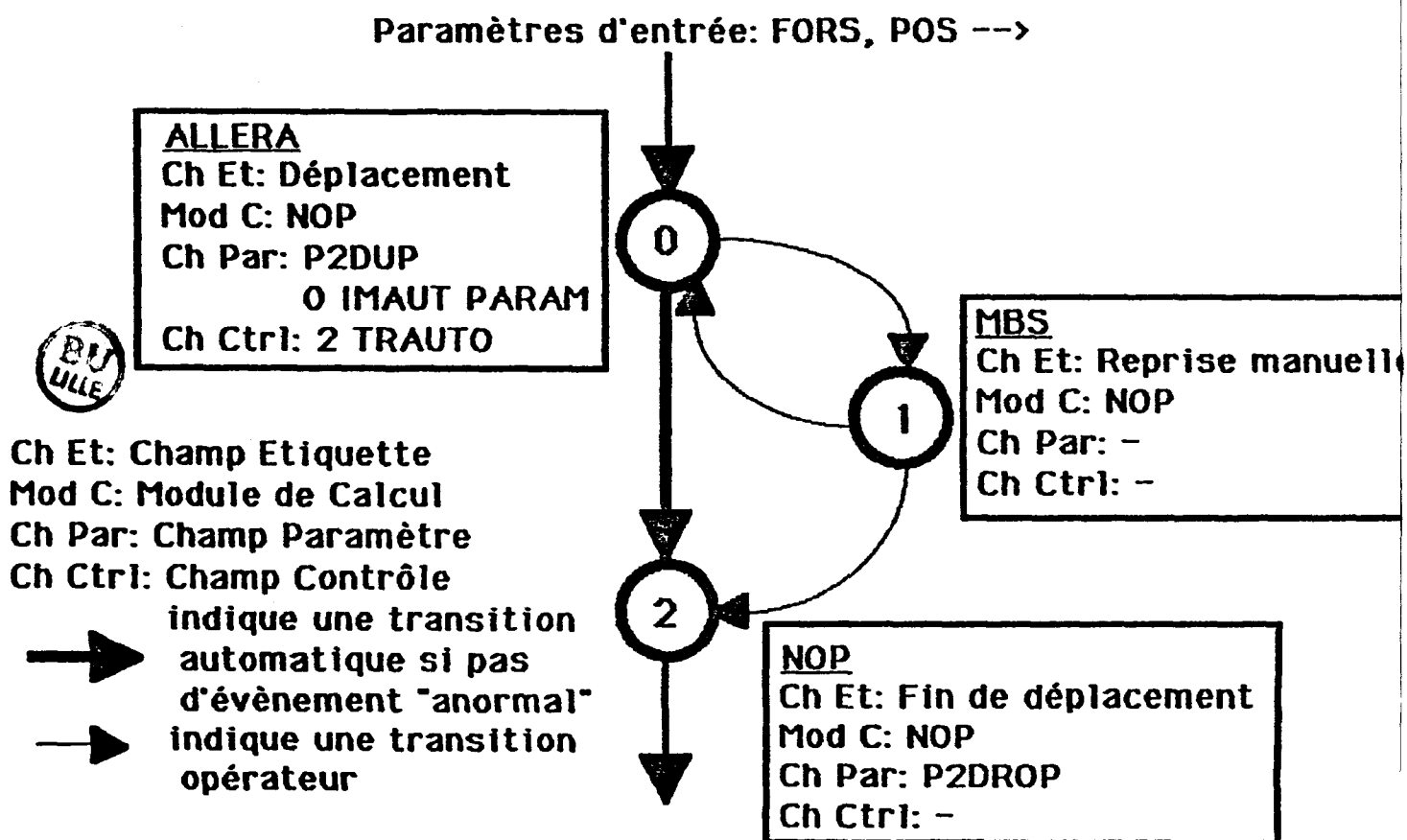


Figure B.2: glomode deplauto1
(déplacement automatique avec reprise manuelle en BDDL)

Paramètres d'entrée: COMDDL, FORS, POS -->

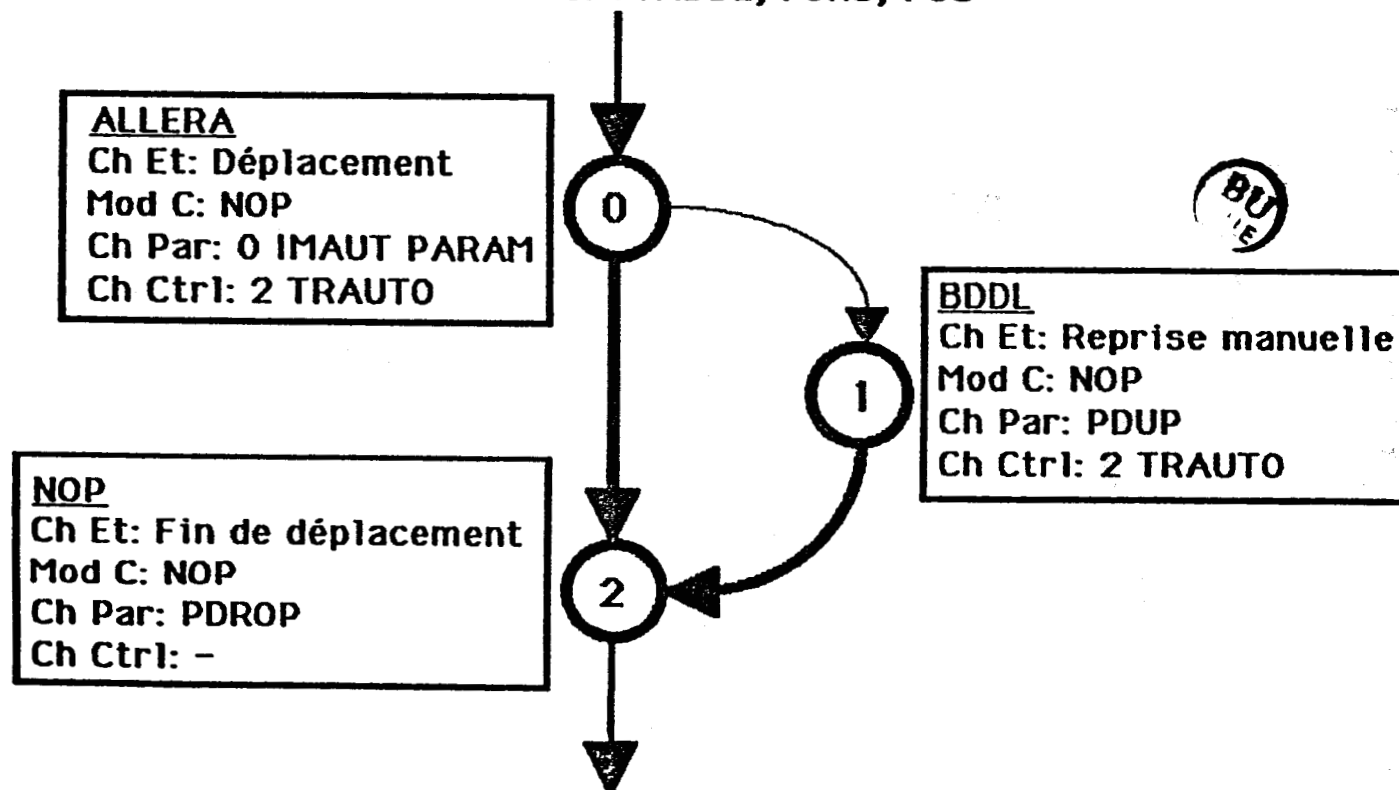


Figure B.3: glomode apprendpos
(apprentissage d'une position pointée en MBS)

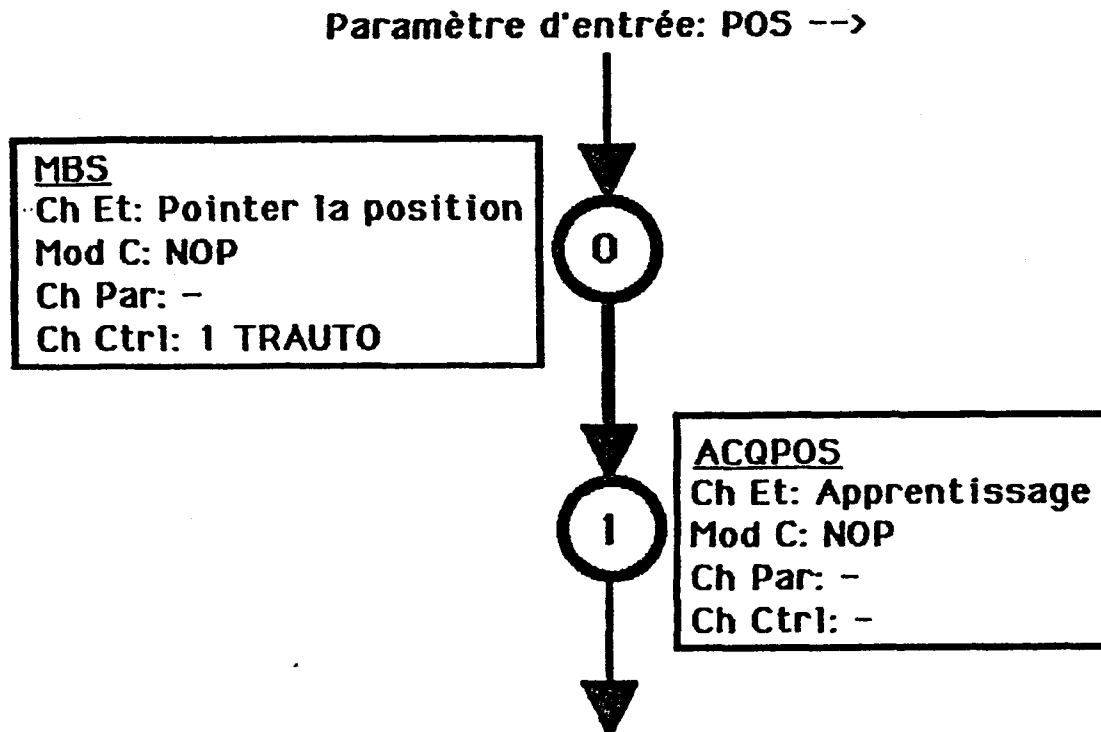
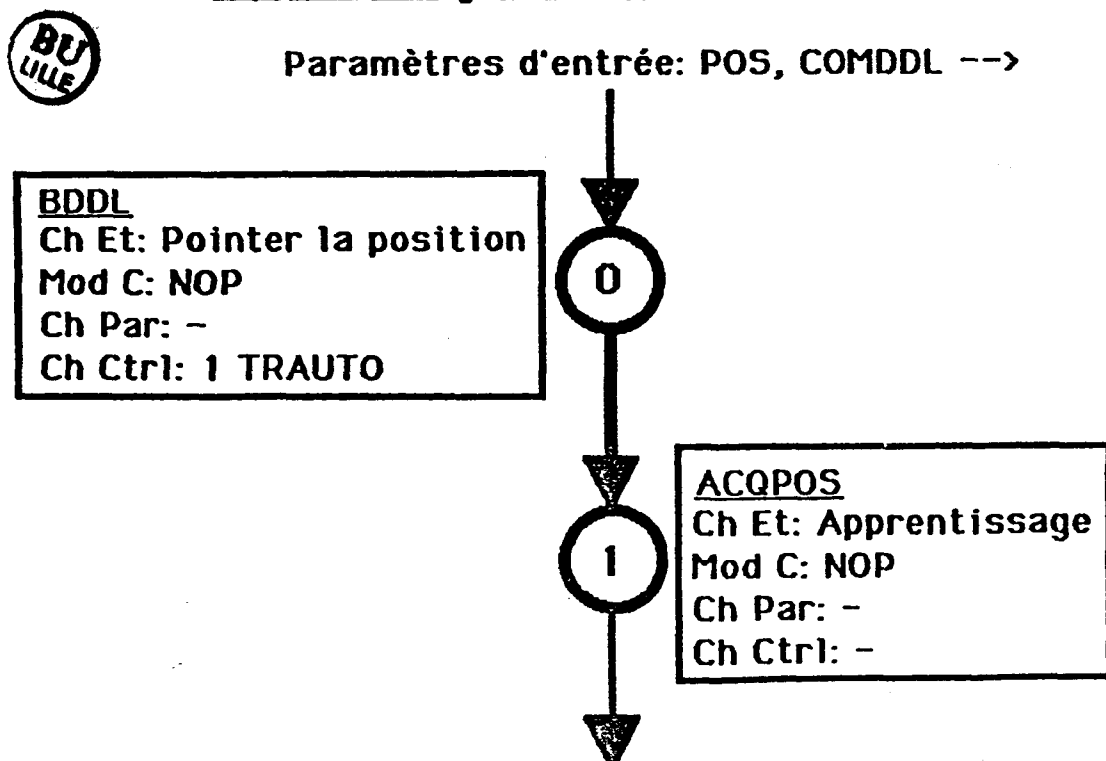
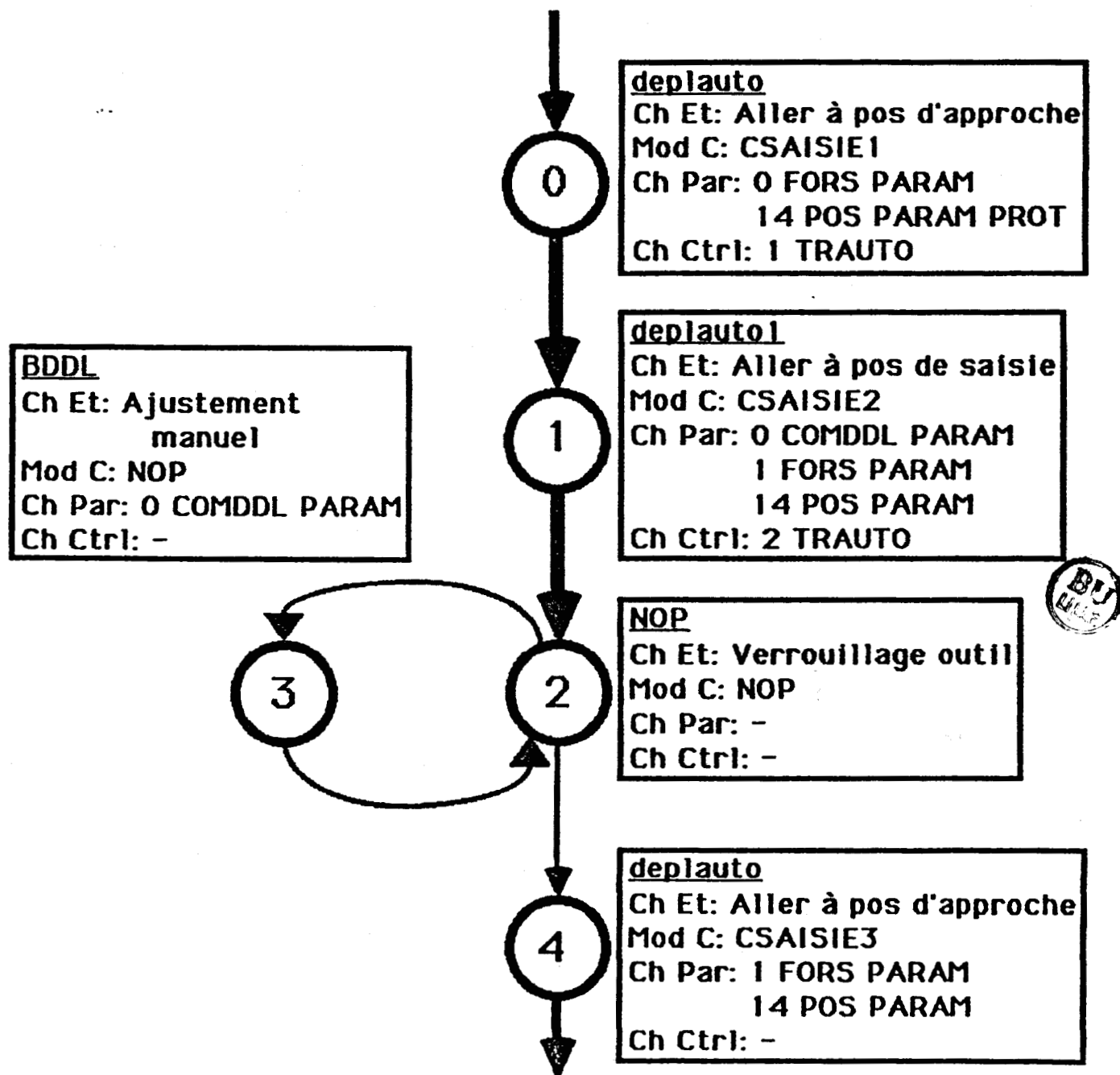


Figure B.4: glomode apprendpos1
(apprentissage d'une position pointée en BDDL)



**Figure B.5: glomode outsaisie_auto
(saisie automatique d'un outil dans son ratelier)**

Paramètre d'entrée: OUTIL -->

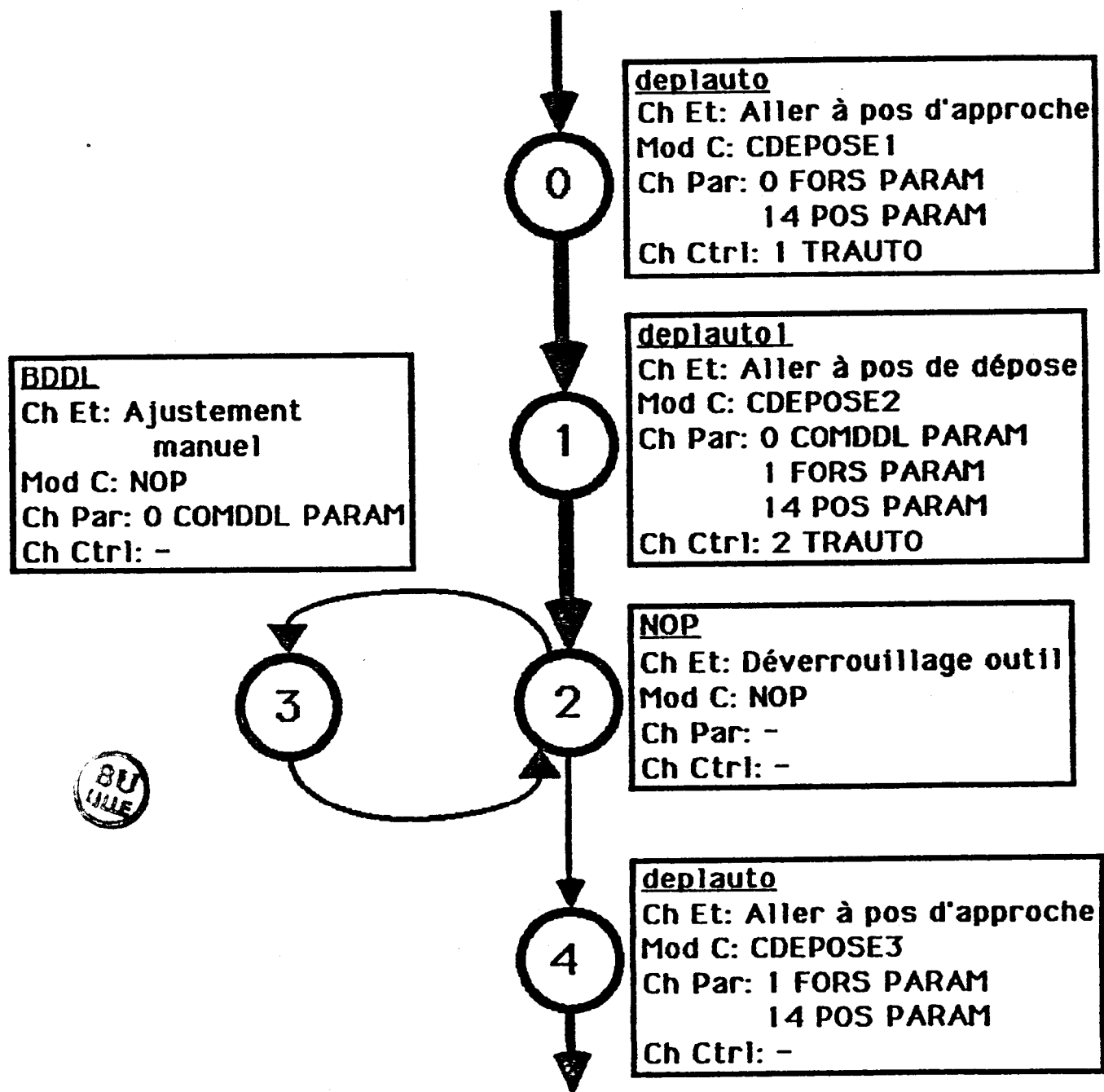


Notes: partant de la donnée de OUTIL:

- CSAISIE1 charge POSITION 14 avec position d'approche (outil) et POIDS 0 avec poids (pince);
- CSAISIE2 charge POSITION 14 avec position de saisie (outil) et POIDS 0 avec poids (outil);
- CSAISIE3 charge POSITION 14 avec position d'approche (outil); le numéro de l'outil est en outre mémorisé dans la variable -OUTIL.

**Figure B.6: glomode outdepose_auto
(dépose automatique d'un outil dans son ratelier)**

Paramètre d'entrée: - -->



Notes: connaissant l'outil fixé sur l'effecteur (variable -OUTIL):

- CDEPOSE1 charge POSITION 14 avec position d'approche (outil) et POIDS 0 avec poids (outil);
- CDEPOSE2 charge POSITION 14 avec position de saisie (outil);
- CDEPOSE3 charge POSITION 14 avec position d'approche (outil) et POIDS 0 avec poids (pince); il indique par ailleurs dans -OUTIL que le dispositif de fixation est vide.

**Figure B.7: glomode outapp
(chargement d'un descripteur outil)**

Paramètre d'entrée: OUTIL -->

Notes:

- BDDL CMDDL 2 bloque l'effecteur sur son axe Z (vertical);
- la mesure du poids de l'outil par ACQPOIDS est trop imprécise pour nos besoins; ce poids est donc supposé connu et chargé a priori;
- COUTAPP1 charge poids (outil) dans POIDS 0;
- COUTAPP2 affecte position d'approche (outil) avec POSITION 14;
- COUTAPP3 affecte position de saisie (outil) avec POSITION 14.

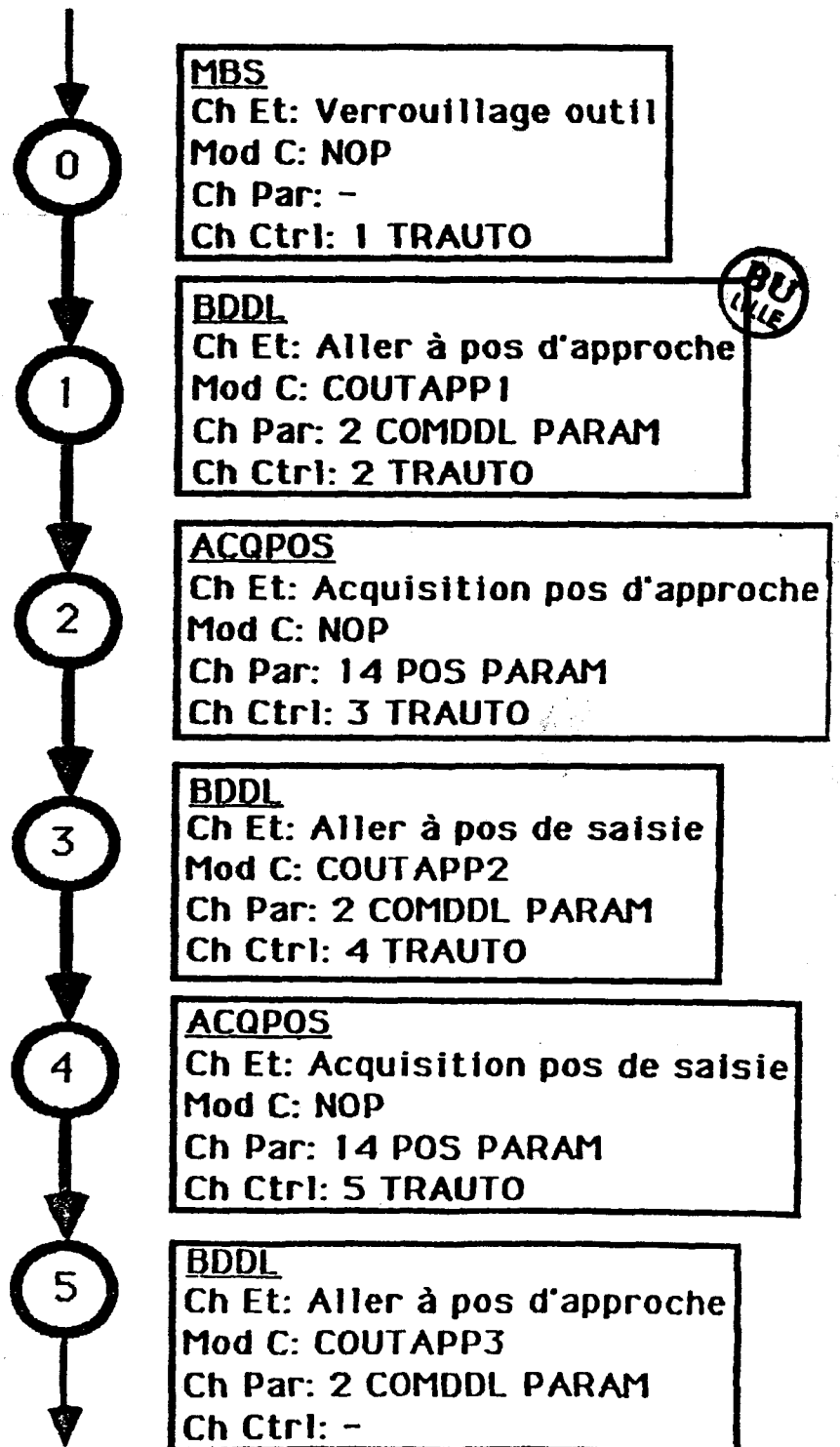
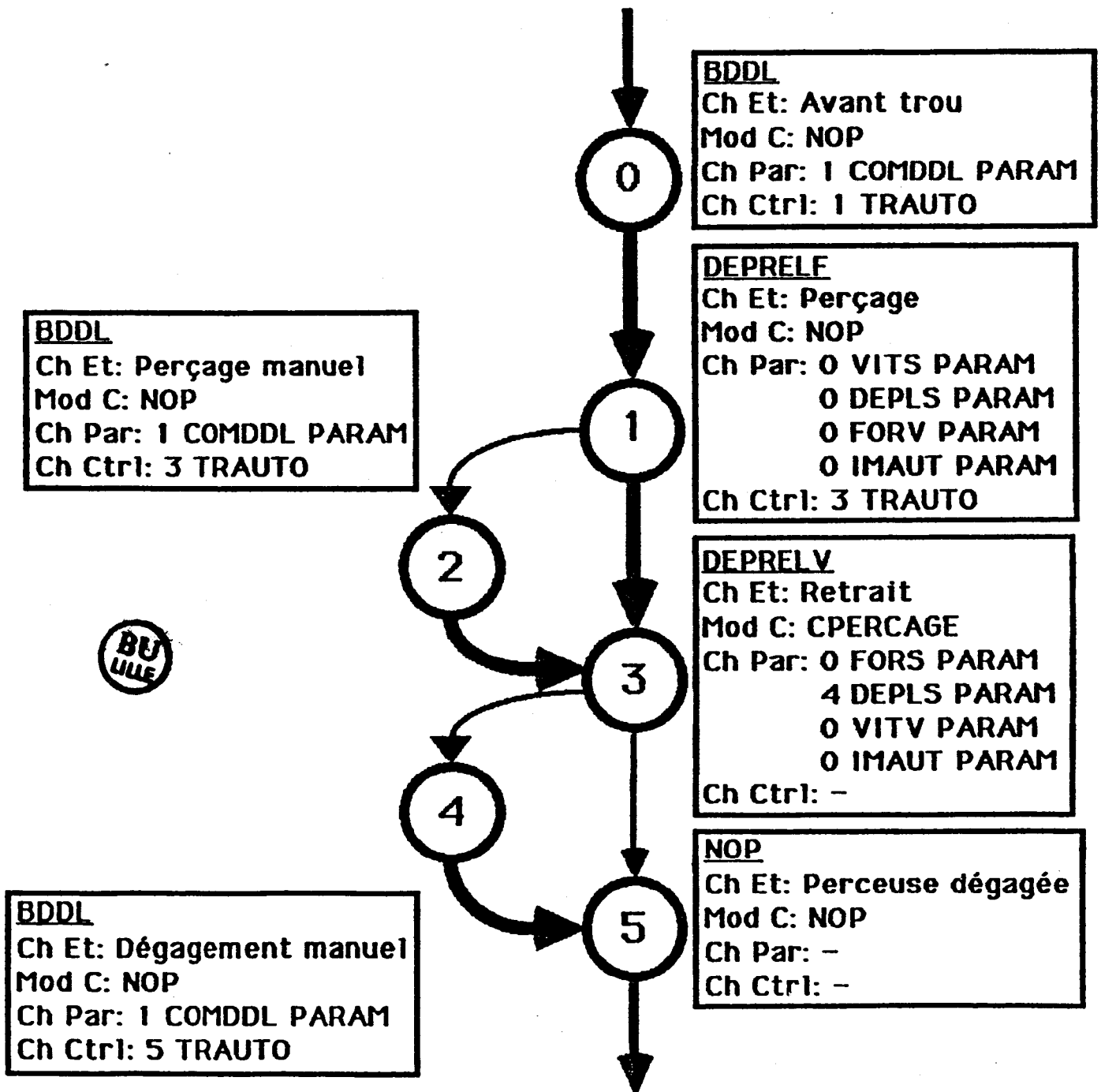


Figure B.8: glomode perçage

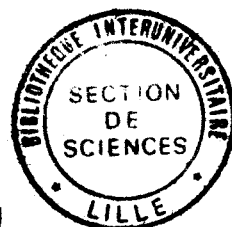
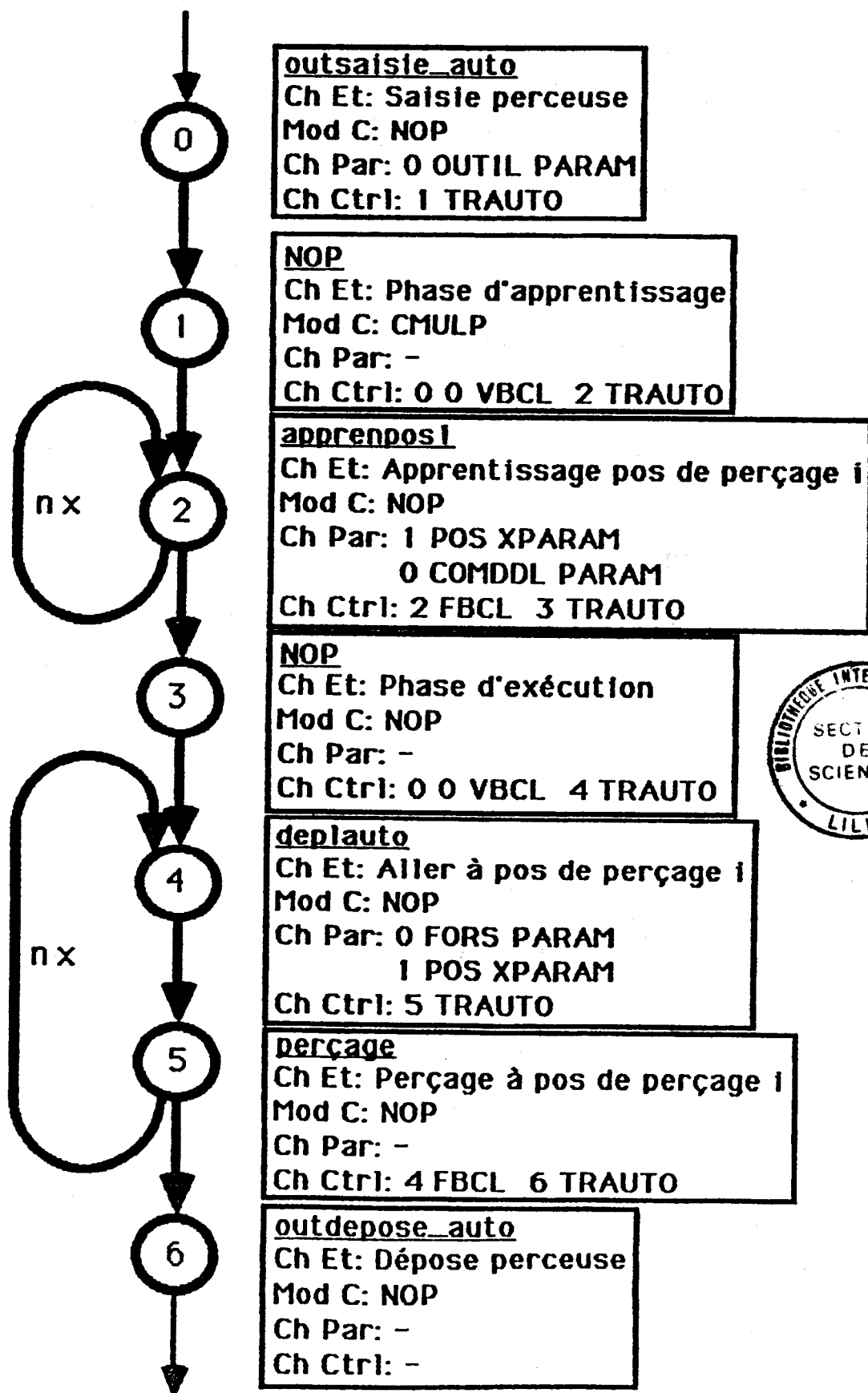
Paramètre d'entrée: --->



Note: CPERCAGE charge DEPLS 4 avec la valeur profondeur du trou (DEPLS 0) + 5 cm.

**Figure B.9: glomode mulperçage
(perçage de n trous parallèles)**

Paramètre d'entrée: - -->



RESUME

Sur une machine de Téléopération Assistée par Ordinateur (TAO), le système de commande permet différentes relations de couplage entre les organes opérateur et les organes de perception et d'exécution. Cette approche apporte à l'homme des assistances spécifiques des sous-tâches à réaliser et conduit à la notion de mode associée à un domaine de pertinence limité. Elle implique l'intégration au système d'un niveau de commande chargé de la gestion des configurations machine dans le contexte de la tâche considérée. Le processus de commande se décompose ainsi en une commande "analogique" qui implante les algorithmes de couplage assurant l'exécution manuelle, semi-automatique ou automatique de la tâche, et une commande "symbolique" (supervision) qui gère l'enchaînement des configurations machine. Après une étude générale de la supervision en TAO, notre mémoire décrit le système SARAH fondé sur une représentation générique, incomplète et redondante des tâches de téléopération. Il se termine par un exposé des expérimentations menées sur le site de téléopération du projet Automatisation et Robotique Avancées.

ABSTRACT

In Computer Aided Teleoperation (CAT), the control system allows the implementation of various coupling relations between, on one hand, operative and sensory units in the workspace, on the other hand, control and restitution devices in the master station. This approach provides the operator with specific assistances according to the considered sub-tasks and leads to the mode notion associated with a limited validity domain. An added control level dedicated to the management of the CAT machine configurations, is therefore needed. The global control process is then splitted into 2 parts: "analog" control which implements the coupling algorithms involved in the manual, semi-automatic or automatic task performing, and "symbolic" control (supervision) related to the scheduling of machine configurations. Following a general analysis of supervision problems in CAT, our work deals with the SARAH system based on a generic, incomplete and redundant description of teleoperation tasks. It ends with a presentation of the experiments carried out in the frame of the French national project: Advanced Automation and Robotics (Teleoperation group).