

50376  
1990  
101

# THESE

présentée à

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

pour obtenir le titre de

## DOCTEUR

(PRODUCTIQUE: AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE)

par

**Bernard LEPEERS**

Maître es sciences mathématiques

Ingénieur E.N.S.T



## COOPERATION DYNAMIQUE ET SECURITE HOMMES-MACHINES.

Applications en téléopération et chirurgie assistées par Ordinateur

Thèse soutenue le 26 mars 1990 devant la commission d'Examen

Jury

- Président: P.VIDAL, Professeur à l'USTL Flandres-Artois.
- Rapporteurs: J.C.BERTRAND, Professeur à la faculté des sciences et techniques de Marseille.
- Examineurs: N.MALVACHE, Professeur à l'Université de Valenciennes.
- J.C.HACHE, Professeur à la Faculté de Médecine de Lille.
- J.M. TOULOTTE, Professeur à l'USTL Flandres-Artois.
- D.JOLLY, Maître de conférences à l'USTL Flandres-Artois.
- S.MAUCHE, Maître de conférences à l'USTL Flandres-Artois.

*A mes parents,*

*A Catherine  
et Marie-Noëlle*

## INTRODUCTION

## CONTEXTE

Les travaux exposés dans ce mémoire ont été motivés par la recherche d'une réponse à la question suivante: " En quoi les avancées en robotique et dans le domaine des systèmes hommes/machines permettent-elles de rendre plus efficaces les techniques chirurgicales?"

Depuis le début des années 70, la commande assistée par ordinateur n'a cessé d'étendre le domaine d'application des télémanipulateurs, point de rencontre de ces deux domaines. Pourtant, bien que des applications médicales de la téléopération commencent à apparaître (comme le MAT 11 du projet Spartacus d'aide aux handicapés ou le système de rééducation de la marche de l'INSERM de Montpellier etc.), très peu de réalisations avancées existent à ce jour en chirurgie. Un frein semble donc devoir exister à une utilisation directe des manipulateurs automatisés lors d'une opération sur l'homme.

La généralisation du microscope opératoire, l'utilisation d'un nouveau type d'instrumentation où l'informatique joue un rôle prépondérant, l'apparition de monitoring plus sophistiqués, semble annoncer d'autre part l'avènement du "chirurgien-ingénieur", dont l'existence est difficilement compatible avec celle de ce frein.

Le problème que nous nous sommes posé fut donc de déterminer, en profitant de la conjonction de ces évolutions, un compromis satisfaisant permettant d'étendre la pratique actuelle de la chirurgie, en y incluant des aides automatisées, sans toutefois générer de rejet potentiel de la part des chirurgiens. Nous avons pour cela tenté de mettre au point une méthodologie respectant au mieux leurs styles de conduite propre dans la préparation, l'organisation et la réalisation de l'opération.

Il s'est donc agi pour nous, non seulement de construire des mécanismes articulés spécifiques, mais de façon parallèle un ensemble de modes opératoires dont la programmation et l'agencement puissent être aisément adaptés en fonction des "préférences opérationnelles" du chirurgien.

Des aides informatisées s'avéraient également nécessaires pour pallier aux difficultés liées au changement de modes opératoires. Lors d'opérations réputées dangereuses ou particulièrement contraignantes, il fallait ainsi prendre en compte les modifications entraînés par ces nouveaux moyens de commande de manière à assurer un niveau de sécurité satisfaisant.

Tout ceci constitue un programme à la fois nécessaire et très ambitieux, en particulier si nous considérons le degré de formalisation actuelle du domaine concerné, l'importance qu'y tient le "savoir-faire" et les exigences de qualité demandées à tout système nouveau prétendant y être introduit.

Abordant ce problème, nous nous sommes vite aperçu qu'il fallait être en mesure de modifier, de façon conjointe à l'utilisation du calculateur, certains aspects des techniques opératoires elles-mêmes: ceci changeait corrélativement la nature même du geste chirurgical et semblait à priori devoir entrer en contradiction avec la relative transparence vis à vis des techniques existantes..

Cette thèse n'est donc bien sûr qu'une première contribution à la réalisation d'un tel programme. Ce mémoire expose les premiers résultats auxquels nous sommes parvenus. Ceux-ci sont présentés sous la forme d'une proposition d'organisation de la commande adaptée à ce contexte précis. Nous pensons cependant celle-ci généralisable non seulement en téléopération avancée, mais aussi dans le cadre plus général des systèmes hommes/machines où des contraintes importantes de compression et de bruitage des informations de retour vers le ou les opérateurs existent.

En effet, l'application à la chirurgie, qui servit de fil rouge à nos travaux, présentait un domaine d'application très particulier, dans lequel des problèmes commençant seulement à être mis en évidence en téléopération "classique", se révélaient d'une importance cruciale:

1°) La sûreté de fonctionnement des opérations doit pouvoir être garantie à un niveau correct, supérieur à celui actuellement estimé sur des opérations à la main. Ce niveau devait pouvoir être quantifié, sa signification étudiée de façon pragmatique.

Or, si de nombreux travaux de ces vingt dernières années, ont permis de clarifier les concepts relatifs à la sûreté de fonctionnement (en particulier la nécessité de distinguer nettement les notions de fiabilité, de sécurité, de disponibilité et de maintenabilité), en revanche, un nombre réduit d'entre eux s'appliquait de façon réaliste au système homme-machine envisagé dans son ensemble.

Nous avons donc tenté, en s'appuyant sur une définition actuellement bien acceptée de la sûreté de fonctionnement (confiance que l'on accorde au service rendu) de trouver des méthodes de synthèse de la commande respectant au mieux la façon dont cette confiance est accordée.

Pour une opération en télémanipulation, il s'agit bien entendu de considérer la sûreté de fonctionnement du manipulateur lui-même; mais il faut également agir sur les conséquences induites sur les relations homme/système.

Réduire les temps d'indisponibilité et de maintenabilité implique d'agir dès la conception sur l'organisation du système, et donc de prévenir les erreurs du concepteur dès l'analyse des besoins.

D'autre part, la fiabilité et la sécurité sont modifiées par la présence et la qualification des opérateurs, susceptibles d'engendrer de nouvelles classes de dysfonctionnement. Ces problèmes qui, suite à certaines catastrophes spectaculaires (TMI, Tchernobyl etc..) reçurent une attention grandissante, montrèrent également l'absence de méthodologie générale permettant de les aborder.

2°) Les aides aux opérateurs demandent également une attention particulière. Il s'agit en effet de réaliser des systèmes nouveaux, évalués relativement à des critères difficilement réductibles en des termes manipulables aisément par l'ingénieur (sauf, artificiellement en se ramenant à des temps d'exécution). La souplesse d'adaptation aux différentes techniques opératoires existantes demandait donc une réflexion nouvelle.

3°) L'opérateur-chirurgien pose enfin un problème nouveau: à la fois manuel dans sa pratique et intellectuel par les connaissances médicales nécessaires et ses responsabilités, il était fort peu identifiable aux schémas d'opérateurs en usage en robotique et téléopération. Il s'agissait de l'intégrer de façon plus fine, selon ces deux dimensions sous peine d'essuyer un refus complet d'utilisation du système. Un nouveau type de programmation des modes de commande permettant de mêler étroitement programmations textuelles, gestuelles et graphiques devait également être développé à son intention.

Tout en reconnaissant l'importance de ces trois domaines nous abordons essentiellement dans ce mémoire le deuxième où fort peu de travaux ont conduit à une approche opérationnelle et où le plus souvent ces problèmes sont résolus par des solutions ad hoc, limitant les possibilités (de mouvement, d'intervention directe) des opérateurs.

De façon plus générale nous essayons de dégager une méthodologie de conception du système homme /machine tenant compte du respect de contraintes de sécurité. Nous étendons pour cela une démarche suggérée par Habchi [HAB 81], et

proposons l'introduction du concept de mode coopératif, dont nous allons rapidement résumer la problématique de manière à situer le plan de ce mémoire.

### Problématique.

En robotique comme en automatique "classique", la machine dont le rôle est d'aider l'opérateur humain dans des tâches fastidieuses à la limite de ses capacités physiques ou intellectuelles, modifie en profondeur les fonctions assumées par celui-ci. Nous considérons, pour mettre en évidence l'importance des modifications induites par l'automatisation, une tâche confiée à un système homme/machine comme décomposable en trois parties :

- la première est supposée résolue automatiquement par la machine.
- la seconde est confiée directement à l'opérateur.
- la troisième constitue l'articulation homme/machine (d'interaction et de coordination) des deux parties précédentes.

A cette troisième partie, correspond un protocole d'interaction entre les deux autres qui se traduit le plus souvent par la spécification des instants et des moyens selon lesquels sont transmises les informations à l'opérateur pour validation ou sélection. Ceci fixe le cadre d'allocation des fonctions entre l'homme et la machine et permet de déterminer un certain nombre de points forts de leurs interaction qui sont désignés dans la suite sous le terme de décisions. De façon générale celles-ci englobent des concepts intervenant à des degrés divers: choix de paramètres, choix d'une transition entre modes de commande (supposés caractérisables par une certaine stabilité structurelle), choix d'un moyen d'interaction.

Le concepteur d'un système technique peut alors adopter, face à cette décomposition de la tâche, différentes attitudes:

#### Attitude 1: l'élimination de l'opérateur

Le critère de sélection des solutions est basé sur l'estimation d'un coût généralisé, celui-ci pouvant inclure des coûts directs (liés à la rentabilité) et des coûts indirects (amélioration de la qualité par exemple). Les contraintes seront fonction des possibilités technologiques disponibles, mais pourront également tenir compte de facteurs plus difficilement mesurables (contexte socio-technique de l'entreprise par exemple).

Cette attitude ne tente pas d'utiliser au mieux les possibilités de l'opérateur: celui-ci n'intervient que comme "béquille" suppléant momentanément aux insuffisances des techniques d'automatisation.

Exemple: Les projets "d'usine sans hommes". A un coût raisonnable, l'élimination totale de l'opérateur semble, si l'on tient compte des contraintes de sûreté de fonctionnement, déraisonnable à moyen terme. Le souci de rentabiliser au mieux sa présence conduit à développer l'attitude 2.

#### Attitude 2: la supervision dynamique

Celle-ci consiste essentiellement en la mise en place de modes de conduite semi-automatiques. Elle prend son origine dans les différents systèmes "à guide-opérateur" et a été considérablement améliorée par les travaux de Sheridan [SHE 76] (sur la commande supervisée) puis de Rouse.[ROU 80]

La présence des opérateurs (en nombre plus réduit) est déterminée par la nécessité de préserver l'ouverture du système sur l'environnement externe, tout en gardant une modélisation de celui-ci incertaine ou incomplète: l'opérateur est considéré comme élément d'auto-adaptativité du système. Il n'est pas intégré lors de la conception

des étages de bas niveau du système, mais est supposé intervenir à un niveau "supérieur", de coordination ou de supervision pour pallier à des insuffisances de modélisation. La détection d'un défaut de concordance entre prévisions du modèle et évolution du système conduit à la décision, soit par l'opérateur (mode semi-automatique "classique"), soit par un algorithme évaluant sur une base multicritère les avantages relatifs des modes manuels et automatiques. La tâche globale est découpée en sous-tâches allouées en ligne (aspect dynamique) à l'opérateur ou à la machine. Le plus souvent le mode manuel est considéré comme un mode de fonctionnement dégradé du système que l'on essaie d'éliminer. Si la procédure employée est très différente de celle de l'attitude 1, l'objectif est donc toujours, ramené à la sous-tâche, d'éliminer l'opérateur.

Les critères essentiels sont cette fois liés à l'adaptabilité et à la versatilité exigées du système. C'est l'attitude classique adoptée pour les systèmes de production complexe ou pour les systèmes de téléopération "classiques" où les automates doivent faire face à un environnement difficilement mobilisable et changeant.

Il apparaît nécessaire de modéliser les comportements de l'opérateur dans des activités diverses de pilotage ou de surveillance, puis d'intégrer correctement ces modèles dans la commande.

Cette attitude prévalait en téléopération à la fin des années 70. Elle entraînait cependant une nouvelle classe de problèmes mal résolus: l'opérateur, auquel est selon elle dévolu un rôle stratégiquement plus important, est confronté à la complexité croissante du système automatique. Il y voit ses "décisions" prendre plus de poids, tout en étant plus "éloigné" de la logique de comportement et de contrôle du système.

D'où l'apparition au sein de ces systèmes d'aides aux opérateurs visant à recréer un contexte au sein duquel il puisse se retrouver (concept, très en vogue aux Etats-Unis, de téléprésence). Simultanément on voit également apparaître la nécessité de filtrages plus sophistiqués d'ordres en provenance des opérateurs.

On crée ainsi progressivement l'analogue de nouvelles "boucles de commande" dans lesquelles sont imbriqués les opérateurs. Selon les possibilités des systèmes d'information, de communication et de calcul utilisables, ces boucles jouent des rôles très différents. C'est ainsi, par exemple, que se posent les problèmes de télécommande de systèmes dans lesquels les constantes de temps sont importantes soit, comme en robotique spatiale du fait des temps de transmission soit, comme dans les aides aux handicapés, du fait des temps de réaction des opérateurs.

En s'appuyant sur les bases apportées par l'automatique "classique", il s'agit de faire cohabiter des notions issues des sciences de l'ingénieur et de l'ergonomie. Leur étude conjointe, par l'objectif qu'elle se fixe, montre la nécessité d'une discipline charnière: celle des systèmes hommes /machines équilibrés. Un domaine d'étude qualitativement nouveau apparu au début des années 80 [AND 80],[ROU 80] nous semble relever d'une troisième attitude qualitativement nouvelle:

### Attitude 3: la coopération homme/machine

L'essentiel de ce mémoire est consacré à sa présentation dans le domaine spécifique de la micromanipulation chirurgicale; nous situons en premier lieu la continuité logique par rapport aux attitudes précédentes ainsi que l'apport qui peut en être attendu.

Lorsqu'on effectue la décomposition évoquée précédemment, on se trouve pratiquement devant une situation où le contrôle d'activités parallèles est nécessaire à l'accomplissement global de la tâche. A chacune de ces activités correspond la mise en oeuvre de fonctions diverses qui peuvent être soit automatiques, soit assurées par l'opérateur. On se trouve devant un problème d'enchaînement de micro-décisions hétérogènes que l'approche classique ne permet pas de prendre en compte .

Exemple: en téléopération le cas de sous-tâches entièrement automatisables est rare et l'approche dichotomique manuel/automatique peu adaptée. La démarche usuelle consiste, en partant d'opérations effectuées manuellement, d'ajouter des fonctions d'assistance changeant les caractéristiques fonctionnelles de certains degrés d'action du système (par homothétie, translation de mouvement ou leur pilotage automatique). La recombinaison des différents degrés d'action, pour un système possédant un nombre important de degrés d'actions conduit naturellement à un problème de décomposition/recombinaison des modes de commande et de leurs enchaînements.

D'autre part, à partir d'un certain degré de complexité de la tâche, renforcé d'ailleurs par la multiplicité des aides disponibles, on s'aperçoit de la nécessité d'aider l'opérateur pour la sélection des fonctions qu'il prend en charge. Différentes approches sont possibles pour résoudre ce problème, nous avons choisi une voie qui semble s'adapter de façon réaliste à un bon nombre de situations pratiques.

Nous nous sommes appuyés sur une méthodologie générale développée par l'école française de recherche opérationnelle généralisant la notion d'optimisation pour la rendre plus conforme aux situations réelles d'aide à la décision. Nous nous efforçons d'expliquer son fondement et de l'intégrer dans une démarche de conception de système automatique. Celle-ci est faite à partir de la notion de modes et permet en particulier de dégager:

1) Une organisation spécifique descriptible en terme de hiérarchie. Ceci permet de réduire efficacement la complexité de la conception.

2) Une façon d'utiliser les redondances présentes dans le système ( commande par l'opérateur ou le calculateur de certains degrés de liberté, gestion d'une situation multiopérateurs à aptitudes multiples, ou redondances physiques et/ou logicielles des modes "normaux" et de secours ) et donc d'y intégrer explicitement la sûreté de fonctionnement.

La notion de "poste opérateur" dont la fonction est bien délimitée en téléopération avancée "classique" (i.e. lorsque seuls des modes manuels ou automatiques existent) est étendue au travers de la notion de station de travail en Téléopération assistée par ordinateur.



## Plan du mémoire.

Nous situons dans le chapitre 1 la façon d'intégrer la sûreté de fonctionnement dès l'étape de conception d'un système de téléopération. Nous centrons essentiellement notre analyse sur celle de l'interaction hommes/machines. Nous précisons comment exprimer de façon objective la confiance que nous attendons d'un système, en insistant sur le cas des systèmes pilotés. L'étape de spécification des besoins, essentielle pour la détermination précise des problèmes de sécurité est abordée. Nous examinons également comment ces problèmes ont été traités en robotique et téléopération, en particulier en tenant compte des différents niveaux de langages.

Bien poser un problème suppose tout d'abord un cadre d'analyse adéquat. Ceci nous amène à présenter au chapitre 2 les problèmes de modélisation des systèmes hommes/machines; nous donnons brièvement la façon classique dont y sont intégrés les problèmes de sûreté de fonctionnement. Après avoir souligné l'apport des techniques floues (prise en compte de "facteurs de formes") et informationnelles (objectifs de sécurité exprimés au niveau de l'interface homme/machine), nous en tentons une synthèse s'inspirant d'un modèle de type réseau informatique réparti.

Celui-ci permet une expression simple de la notion de coopération générale comme une forme particulière de réseau. Les capacités structurelles de reconfiguration de ce réseau qualifient les possibilités de tolérance aux pannes du système hommes/machines. Nous comparons celui-ci aux modèles multiniveaux proposés dans la littérature. La façon dont y est considérée la sûreté de fonctionnement a conduit au développement de systèmes de classification des erreurs humaines. Ces systèmes constituent autant de grilles d'analyse des situations à risque. Ils permettent de situer les types de couplage homme/machine soit suivant des axes situationnels ou analytiques, soit en analysant l'action à effectuer.

Cette première approche, assez globale, doit pour conduire à une définition précise de la commande, être complétée par une analyse plus fine de l'activité. Nous présentons à cet effet, au chapitre 3, une première méthode d'analyse de la tâche ainsi qu'une grille d'aptitudes comparées permettant de concevoir l'allocation statique des tâches hommes/machines. Après en avoir situé les limitations nous introduisons, en la comparant aux méthodes classiques, une méthodologie générale permettant d'effectuer l'allocation dynamique des tâches hommes/machines.

Nous en décrivons les principales variantes, et montrons en particulier comment elle permet de généraliser la notion de mode mixte. Les algorithmes correspondants nécessitent l'identification d'indices mesurés sur l'homme, la machine ou l'environnement : c'est l'objet des processeurs espions qui sont décrits ensuite.

La méthodologie précédente pose deux types de problèmes:

- d'ordre théorique d'abord: l'approche proposée ne cadre plus avec l'optimisation telle qu'on la conçoit en automatique. Une généralisation des résultats classiques est donc nécessaire.

- d'ordre pratique ensuite: sa mise en oeuvre implique la définition précise des protocoles de communication entre opérateurs et système automatisé. Les langages d'interaction auront donc des caractéristiques spécifiques.

Nous donnons au chapitre 4 les éléments de solution auxquels nous sommes parvenus ainsi que les principales conséquences qui nous sont apparues au niveau de l'organisation de l'interactivité en téléopération. Nous pouvons généraliser de différentes manières l'approche précédente : nous considérons deux voies, l'une basée sur la notion de scénarios interactifs, l'autre utilisant des recherches récentes rapprochant systèmes experts et méthodologies multicritères.

Le chapitre 5 explicite, dans le contexte de la chirurgie assistée par ordinateur, la mise en oeuvre des approches méthodologiques précédentes. Nous y donnons les réalisations concrètes effectuées. Le but essentiel de ce chapitre est de montrer non seulement l'intérêt d'une telle approche, mais également la façon d'aborder les adaptations nécessaires dans un cas particulier. Nous soulignons les problèmes d'implantation liés au parallélisme dans l'exécution des modes, ainsi que l'intérêt de développer un système de programmation à base d'objet: les simulations réalisées dans un langage de ce type servent de base pratique à cette discussion.

**CHAPITRE I : SECURITE EN TELEOPERATION AVANCEE  
GENERALITES ET APPROCHES METHODOLOGIQUES**

## I-INTERACTIONS HOMMES/MACHINES ET SECURITE.

I-1. Estimation a priori des risques.	
I-1.1. Perception des risques.....	p 4
I-1.2. Lois empiriques de Chauncey-Starr.....	p 6
I-1.3. Critère d'acceptabilité de Farmer.....	p 6
I-1.4. Critères et objectifs de sécurité.....	p 7
I-2. Le dilemme sécurité des systèmes/fiabilité.....	p 8
I-3. Sécurité des systèmes pilotés.....	p 10
I-3.1. S.P.P et S.P.I.....	p 11
I-3.2. Lois de pilotage et paramètres tactiques.....	p 11
I-3.3. Paramètres de fonctionnement.....	p 11
I-3.4. Paramètres stratégiques.....	p 11

## II- ANALYSE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT EN ROBOTIQUE INDUSTRIELLE.

II-1. Spécification des besoins.....	p 13
II-2. Spécificités du problème en téléopération assistée par ordinateur.....	p 16
II-3. Langages de programmation et sûreté de fonctionnement.....	p 16
II-3.1. Le compromis coût/performance/sécurité.....	p 16
II-3.2. Structure de la commande et langages de programmation.....	p 17

<u>CONCLUSION.</u> .....	p 21
--------------------------	------

<u>ANNEXE 1</u> : Rappel sur le concept de fiabilité.....	p 23
---	------

<u>ANNEXE 2</u> : Boucles de sécurité.....	p 24
--	------

<u>ANNEXE 3</u> : Analyse fonctionnelle du système par SADT.....	p 28
--	------

## Preliminaire.

Lors d'un colloque organise en 1987 par l'association des cadres de l'industrie [ACA 87], les discussions d'experts de differents secteurs industriels ont permis de mettre en evidence de nombreuses convergences dans la facon dont est abordee actuellement la maitrise des risques technologiques. La recherche d'une meilleure productivite, la mise en oeuvre d'une politique de qualite totale, conduisent a rechercher des methodologies permettant la prise en compte systematique et la gestion efficace des risques.

Reservee autrefois au domaine du haut risque, l'etude systematique previsionnelle des dysfonctionnements tend actuellement a se repandre. Malgre leurs insuffisances (amplement demontrees lors des analyses des accidents de Tchernobyl, Seveso ou Challenger) certaines etudes apparaissent neanmoins indispensables. En particulier, l'integration equilibree et sure de l'operateur humain aux differentes phases du cycle de vie d'une installation automatisee est un sujet de preoccupation majeur.

Une reflexion multidisciplinaire reste malgre tout a construire dans ce domaine. Celle-ci necessite en particulier :

- *d'abandonner l'illusion du risque nul, de mesurer, temporer et prevenir les risques en s'en donnant les moyens scientifiques et techniques.*
- *de resister a l'angoisse du faux risque en permettant une appreciation et un jugement raisonne de celui-ci [VIG 87].*

Parmi les problemes a resoudre, il semble en particulier essentiel d'approfondir de facon generale:

- le controle de la veracite de l'information traitee.
- l'analyse des defaillances d'interface entre sous-systemes.
- la fiabilite des interactions hommes/machines.

Notre objectif dans ce chapitre sera de preciser les concepts nous paraissant essentiels pour resoudre les problemes de defaillance du systeme dus a une mauvaise interaction hommes/machines, et d'examiner comment ceux-ci peuvent etre abordes en s'aidant de methodologies classiques en conception de systemes.

Nous degagerons ensuite les specificites du probleme en teleoperation, et viserons a mettre en evidence les differents niveaux de securite hommes/machines qu'il peut etre utile de differencier.

Nous essaierons tout d'abord de nous poser les questions classiques:

- peut-on, a partir de risques "generaux" definir des seuils d'acceptabilite de risque?
- comment evaluer le risque pour le comparer a ce seuil, quels sont les objectifs de securite qui en resultent?

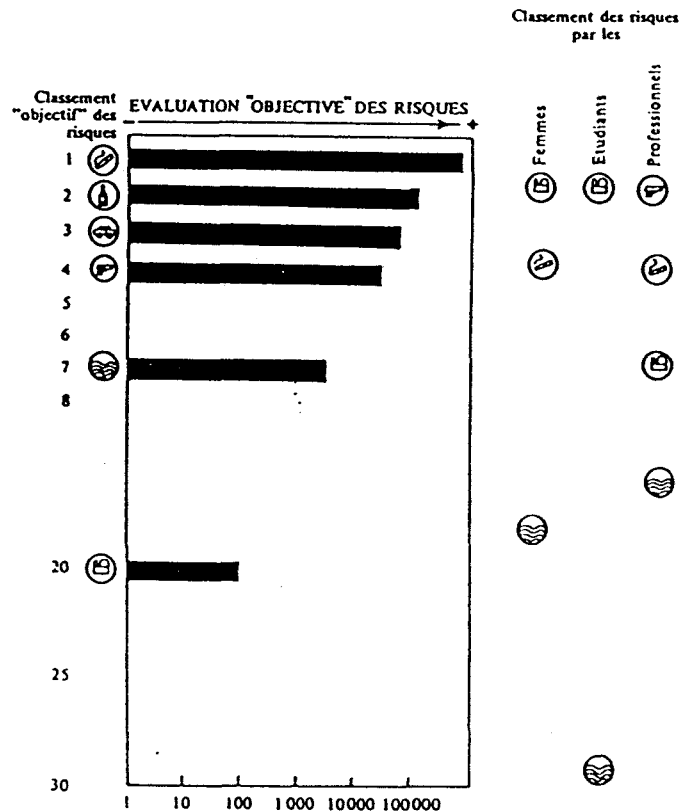
## I- INTERACTIONS HOMMES/MACHINES ET SECURITE.

### I-1 Estimation a priori des risques

#### I-1-1 Perception des risques

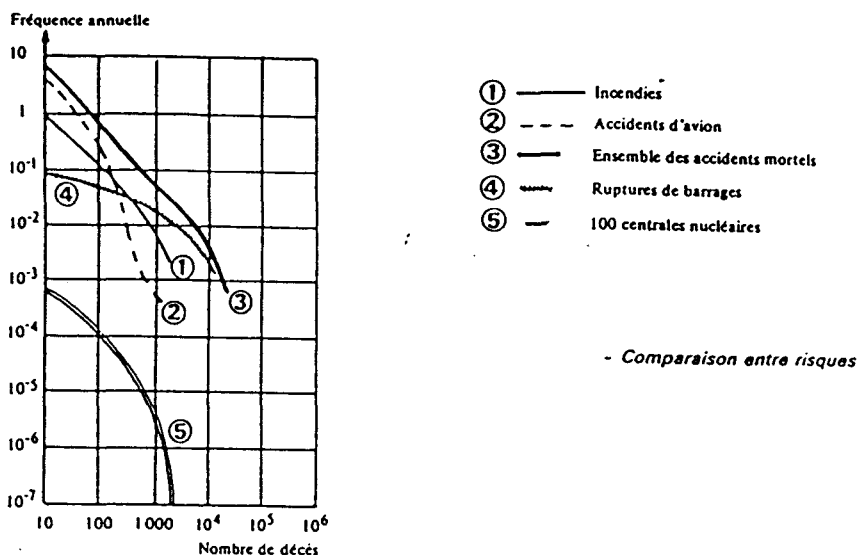
La relativité dans la perception des risques est démontrée par de nombreuses études statistiques [PAR 87],[RAS 87],[NIC 85].

En particulier des hiérarchisations très différentes dans la perception des risques apparaissent suivant l'appartenance de l'échantillon de population étudié à différentes catégories d'âge , de culture etc..(voir figure I-1)



*figure I-1- Perception des risques (d'après [NIC 85])*

N.B.: l'appréciation des risques est de plus influencée par d'autres facteurs difficiles à maîtriser: celui d'estimer des risques "lointains" au sens propre ou figuré semble être le plus délicat.(voir figures I-2 et I-3 page suivante). Pour la traduire en termes utilisables pour une aide à la décision, il s'est donc avéré nécessaire de développer des méthodes quantitatives



Type d'accident	Nombre total (États-Unis)	Chance individuelle, par an
Véhicules à moteur	55 791	1 sur 4 000
Chutes	17 827	1 sur 10 000
Incendies et substances à haute température	7 451	1 sur 25 000
Noyades	6 181	1 sur 30 000
Armes à feu	2 309	1 sur 100 000
Voyages aériens	1 778	1 sur 100 000
Chutes d'objets	1 271	1 sur 160 000
Électrocution	1 148	1 sur 160 000
Foudre	160	1 sur 2 000 000
Tornades	91	1 sur 2 500 000
Ouragans	93	1 sur 2 500 000
Tous accidents	111 992	1 sur 1 600
Accidents des réacteurs nucléaires (100 centrales)	0	1 sur 5 000 000 000

Source : D. Blanc, *La sûreté nucléaire*, P.U.F.

figures I-2 et I-3: Risques de mort suivant différentes causes  
d'après [NIC 85] et le rapport Rasmussen

La conception d'un nouveau système pour lequel la sécurité est considérée comme primordiale, doit donc débiter par une détermination a priori du niveau de risque "acceptable" dans un contexte nominal d'utilisation. La rationalité de celle-ci doit être considérée comme une hypothèse de travail, nécessaire, mais pouvant être par nature sujette à caution .

Diverses approches ont été proposées dans la littérature pour établir des critères, ou des lois empiriques, pouvant servir de référence pour cette spécification et améliorer cette rationalité.. Nous allons en présenter deux, utilisées en aviation, puis nous exposerons, la façon dont nous pensons que peut être fixé un objectif de sécurité.

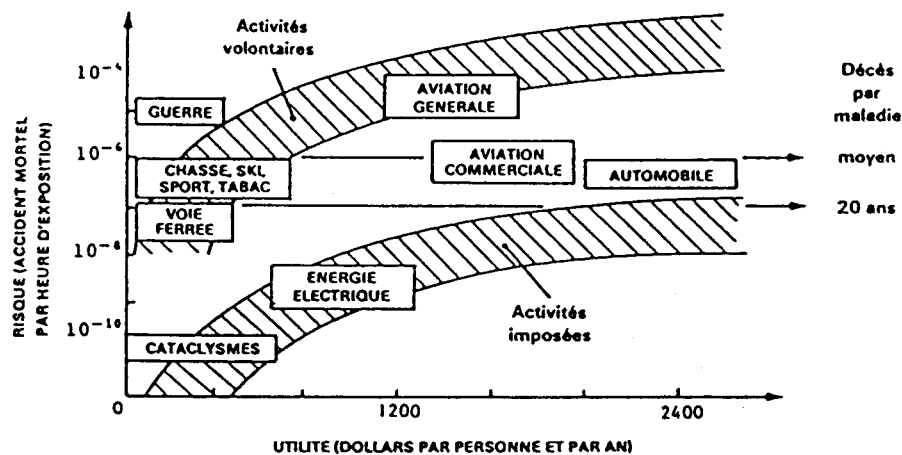
## I-1-2 Lois empiriques de Chauncey Starr.

Celles-ci résultent d'une analyse comparée, pour diverses activités pouvant conduire à un accident mortel :

- de la probabilité d'accident mortel par heure d'exposition au risque.

- de "l'utilité" résultant de cette activité (mesurée, par exemple, par sa contribution au revenu annuel moyen de son acteur).

On obtient des courbes du type suivant:



Critère de Chauncey STARR.

*figure I-4: courbes de risques de Chauncey Starr  
(d'après [LIE 76])*

Chauncey Starr en a déduit les lois empiriques suivantes :

- |   |
|---|
| <i>1) le risque acceptable est sensiblement proportionnel au cube de l'utilité.</i>                       |
| <i>2) le risque acceptable varie en sens inverse du pourcentage d'individus concernés par l'activité.</i> |

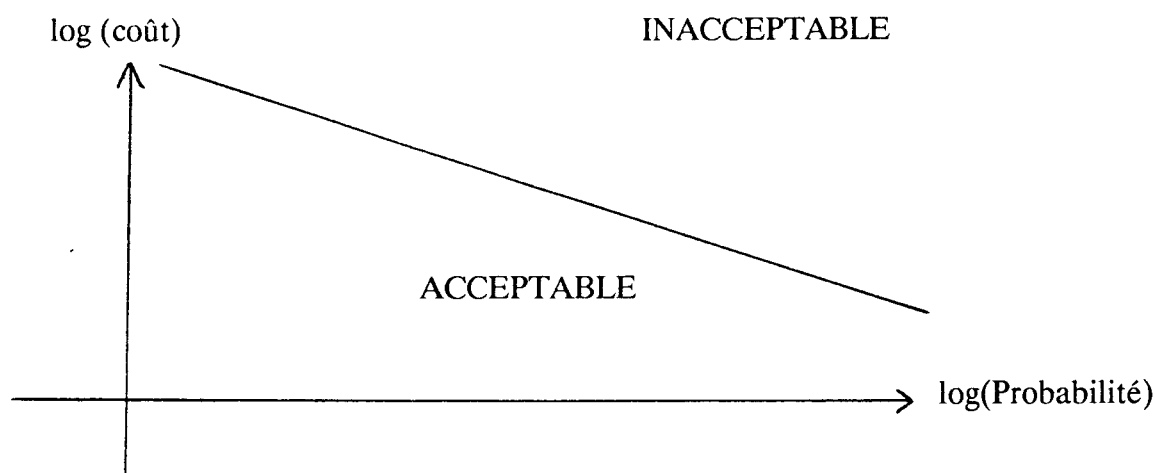
Une différence de l'ordre de 1000 à 10000 est observée entre les niveaux acceptables du risque suivant qu'il s'agit d'activités volontaires ou imposées. La référence de base est le risque de décès par maladie. Une variation importante également est constatée suivant l'aspect plus ou moins spectaculaire des accidents concernés (exemple: aviation, attentat terroriste...).

## I-1-3 Critère d'acceptabilité de FARMER [FAR 67]

On représente, suivant des échelles logarithmiques, le coût d'un accident en fonction de sa probabilité a priori. Le plan peut alors être séparé en 2 zones où le risque est considéré acceptable ou inacceptable.



On obtient la figure suivante (fig I-5). La probabilité maximale d'accident y apparaît fonction croissante de la gravité:



*figure I-5 :critère de FARMER .*

Pour évaluer une action on situera donc les points relatifs des accidents qu'elle peut engendrer dans le plan de Farmer: si aucun d'entre-eux ne se trouve en zone inacceptable on considérera l'action "sûre".

On s'aperçoit aisément que ce critère simple peut être d'utilisation dangereuse. En effet si l'on décompose convenablement un événement inacceptable en 2 sous-événements, ceux-ci peuvent traverser la frontière, et devenir ainsi "acceptables".

Il n'est donc pas possible, avec ce seul critère, d'avoir une idée juste du risque encouru lors de cette traversée si l'on ne peut assurer l'atomicité des événements évalués.

*N.B: l'adjonction de marges de sécurité, parfois suggérée pour pallier ce défaut, n'est en fait qu'une solution ad hoc en l'absence d'autres informations a priori.*

Il est nécessaire de le considérer avec d'autres critères qui ne possèdent pas cette propriété de décomposabilité décroissante.

#### I-1-4 Critères et objectifs de sécurité

Selon le sens commun, un objectif de sécurité d'un système est déterminé par:

- 1) la sécurité obtenue dans le passé pour des systèmes ayant des fonctionnalités comparables.
- 2) la sécurité actuelle des systèmes concurrents, dont certaines fonctionnalités peuvent différer.
- 3) le coût acceptable.
- 4) la gravité des conséquences associées à une panne de l'un de ses éléments.
- 5) l'apport attendu de son utilisation.
- 6) la technologie disponible

Les trois premiers points qui ont un caractère plus "objectif" que les trois derniers, peuvent être approchés au moyens de "grilles de probabilité".

On module celles-ci en fonction du contexte par les trois derniers, à caractère plus subjectifs: ceci permet d'obtenir des tables de référence utilisées pour l'analyse préliminaire.

Une autre présentation de la même idée consiste à présenter les classes de conséquences en fonction des classes de probabilités, ce qui permet de définir formellement un objectif de sécurité (local ou global) comme sous-ensemble du produit cartésien des classes (voir figure I-6).

Mineure Légère dégradation des caractéristiques ou un faible accroissement de la charge de travail de l'équipage.	A	Objectifs de sécurité		
		ZONE DES RISQUES ACCEPTABLES		
Majeure Dégradation notable de marge de sécurité. Augmentation sensible de charge de travail de l'équipage.	D	→ Frontière réglementaire		
Critique Dangereuse dégradation des marges de sécurité. Dangereux accroissement des charges de travail équipage. Conditions marginales pour les occupants.	ZONE DES RISQUES NON ACCEPTABLES			
	Aucune panne ne doit conduire à une combinaison probabilité/conséquence dans cette zone.			
Catastrophique Perte de l'avion et/ou accidents mortels.		B		C
		$10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$
Classe de conséquences	Probable	Rare	Extrêmement rare	Extrêmement improb.
	Peut arriver de temps en temps pendant la vie opérationnelle de chaque avion	N'arrive pas à chaque avion, mais peut se produire plusieurs fois dans la vie d'une flotte	N'arrive pas dans la vie d'une flotte en général, mais considéré comme possible.	Un tel événement n'arrivera pas.
Classe de probabilités				

figure I-6 :tableau des risques .

*Remarque générale : On constate que l'augmentation des performances des produits de haute technologie va de pair avec la complexité des systèmes (resp. des réseaux) nécessaires à leur mise en oeuvre. L'importance des défaillances potentielles susceptibles d'y être engendrées semble à la base du risque perçu, même si objectivement ce risque reste dans les limites de "l'acceptable". Ceci sera particulièrement vrai dans des domaines (tel la chirurgie) à forte consonance affective.*

### I-2 Le dilemme sécurité des systèmes / fiabilité

Si elle avait déjà connu des résultats importants en automatique, l'approche "système" n'avait pas, jusque dans les années 50, été utilisée pour l'étude des problèmes de sécurité où les méthodes de réduction de complexité (ou de recherche du chaînon défaillant), prévalaient.

C'est vers les années 60 qu'apparut nettement, d'abord en aviation puis en milieu industriel (centrale nucléaire...), le rôle primordial joué par les *interaction* entre sous-systèmes.

On vit apparaître également un formalisme, appuyé sur des bases probabilistes, qui eut pour premier effet de lever certaines ambiguïtés de terminologie. En se rapprochant de celui-ci nous emploierons les concepts suivants dont les définitions précises n'ont fait l'objet d'un consensus qu'assez récemment [LAP 88]:

système : ensemble structuré ou auto-organisé d'éléments soumis à des interactions mutuelles, cet ensemble faisant l'objet d'une commande.

sécurité d'un système: absence de danger ; le danger étant une circonstance susceptible d'occasionner soit la mort ou des blessures de personnes, soit des dommages ou des pertes de bien ou d'équipements (Norme MIL - STD 882 ).

Bien que les techniques sous-jacentes d'analyse des systèmes (arbre des pannes etc...) puissent s'appliquer à des cas simples (un exemple historiquement célèbre est l'aspirateur), les systèmes considérés auront en général les caractéristiques suivantes :

- *une complexité technique importante (technologies variées, multiplicité des intervenants ou des sous-traitants...)*

- *un coût élevé: il s'agira donc de tenir compte dans les contraintes du problème du compromis coût-efficacité.*

Pour maîtriser cette complexité, LIEVENS [LIE 76] proposa une classification hiérarchique générale des systèmes en 6 niveaux. Nous la repreneons ci-dessous en l'interprétant de façon à faire apparaître le degré d'ouverture du système et de son environnement. Celui-ci semble un élément clé pour comprendre les problèmes de fiabilité de systèmes hommes-machines.

NIVEAU 0 : le système n'a pas d'échange avec l'extérieur.

NIVEAU 1 : le système s'adapte pour réagir aux informations ou à l'énergie qu'il échange avec l'extérieur.

NIVEAU 2 : le système s'adapte en prédisant les évolutions de son environnement (*capacités tactiques* ).

NIVEAU 3 : le système apprend de nouveaux comportements lui permettant d'atteindre son objectif (*capacités stratégiques*).

NIVEAU 4 : le système peut modifier ses objectifs et son environnement en fonction de ses échanges externes.

NIVEAU 5 : le système peut changer de structure en fonction des informations externes (*capacités auto-organisatrices*).

Chacun des niveaux précédents inclut bien entendu les niveaux inférieurs.

La notion classique de fiabilité (Annexe 1) que nous voudrions y introduire repose implicitement sur certaines hypothèses importantes dont en particulier :

#### 1) Un fonctionnement élémentaire selon 2 modes possibles

ou plus généralement une décomposition selon un réseau logique : il résultera de cette hypothèse la nécessité de fixer un seuil fixant la séparation entre mode normal et mode dégradé.

2) L'existence d'une norme, d'un modèle de comportement du système

La mesure de fiabilité n'a de sens que dans le cadre de celle-ci.

3) Un critère unique de déviation par rapport à cette norme

Nous verrons, au chapitre III comment une approche réaliste de la sécurité des systèmes hommes/machines conduit à remettre en cause cette hypothèse.

Si les notions de sécurité-système et de fiabilité peuvent être considérées comme complémentaires, leurs optimisations simultanées peuvent néanmoins s'opposer sur un certain nombre de points, que nous résumons sur le tableau suivant ( figure I-7).

FIABILITE	SECURITE
Met l'accent sur les modules de base.	Met l'accent sur les interaction.
Les facteurs humains sont peu pris en compte	L'homme est intégré dans la boucle.
Se concentre sur les conditions de "bon fonctionnement"	Etudie les fonctionnements dégradés,pathologiques.
La défaillance a le même coût que le bon fonctionnement.	La défaillance a un coût bien supérieur au bon fonctionnement
S'intéresse aux effets "moyens".	S'intéresse aux combinaisons à faibles probabilités.
La mise en parallèle d'éléments la diminue (en général).	La mise en parallèle d'éléments l'augmente (en général).

figure I-7 comparaison entre les études de fiabilité et de sécurité

Nous voyons en particulier, dans ce tableau, le rôle que joue le facteur humain. Depuis une vingtaine d'années environ la fiabilité humaine a fait l'objet d'une attention croissante, mais c'est essentiellement grâce à des études portant sur la sécurité, que la sûreté de fonctionnement des systèmes pilotés a pu être sensiblement améliorée. On est passé ce faisant de la recherche de la cause humaine des accidents et de sa quantification, à celle de l'étude des erreurs de systèmes hommes/machines. Etant donnée l'importance de ce problème en téléopération, nous précisons au paragraphe suivant les différents types de sécurité qu'il est utile de distinguer ainsi que les paramètres caractéristiques associés;

I-3 Sécurité des systèmes pilotés

L'opérateur humain dispose pour acquérir des informations sur son environnement de capteurs extéro et proprioceptifs de natures et de capacités très variées (annexe 2).

Dans la conduite ou la supervision d'un système, le rôle de l'opérateur est, de ce fait, très particulier : élément fondamental d'ouverture du système, l'opérateur en sera, de façon paradoxale, un agent de fiabilité et de non fiabilité.

L'analyse des risques liés à sa présence dans les boucles de commande nécessite une modélisation adaptée à son comportement ambivalent : différents modèles ont été

développés dans ce sens que nous détaillerons au chapitre II.

Auparavant, nous allons préciser ce que nous entendons par "boucles de sécurité" dans la suite de ce mémoire. Pour cela nous nous conformerons à une typologie classique introduite en aéronautique, dont nous avons adapté la terminologie au domaine de la téléopération.

### I-3-1 S.P.P. et S.P.I.

La tâche globale sera supposée décomposable en objectifs élémentaires de pilotage correspondant à des phases de conduite distinctes. Nous décomposerons celles-ci en sous-phases principales (S.P.P) et intermédiaires (S.P.I.).

Les S.P.P. correspondent à une décomposition fonctionnelle des phases, les S.P.I. à la transition entre S.P.P. A chaque sous-phase est associé un ensemble de tolérance, dans lequel il s'agit de maintenir l'état du système pour assurer la sécurité.

*N.B.: différentes appellations, recouvrant des concepts voisins se rencontrent dans la littérature avec une terminologie un peu différente suivant les secteurs: on parle par exemple en téléopération de sous-phases de recalage entre un mode automatique et un mode télémanipulé, la SPI généralise cette notion.*

### I-3-2 Lois de pilotage et paramètres tactiques

La relation entre certains paramètres, devant être maintenue pour assurer le succès de l'objectif de pilotage aux tolérances près, sera appelée loi de pilotage. Les paramètres associés seront dits tactiques.

Nous leur associons la notion de sécurité à court terme.

### I-3.3. Paramètres de fonctionnement

Leur définition provient d'une constatation : parmi les paramètres décrivant le système, certains doivent rester à l'intérieur d'un domaine "de bon fonctionnement", hors duquel la probabilité d'accident est inacceptable.

Les paramètres concernés seront dits "de fonctionnement". Ils peuvent différer entre deux phases distinctes.

Le domaine "de bon fonctionnement" est décomposé en un domaine autorisé à faible risque et un domaine périphérique où la probabilité de sortie, sous l'effet des perturbations, est jugée excessive ; les limites entre ces deux sous-domaines sont établies suivant un compromis entre facilité d'éviter les accidents et souplesse d'utilisation.

*N.B: Celle-ci a pu être l'objet d'une normalisation dans certains secteurs, comme par exemple en aéronautique.*

Nous leur associons la notion de sécurité immédiate.

### I-3.4. Paramètres stratégiques

Ceux-ci permettent de décider si la sous-phase en cours est opportune, s'il faut passer à la sous phase suivante ou en changer. A ces paramètres sera associée, par exemple, la commutation de modes de conduite (position, vitesse) en téléopération. Leur étude sera l'objet des chapitres 3 et 4.

Nous leur associons la notion de sécurité à long terme.

*N.B: La notion d'effort utilisée dans la suite doit être prise au sens de force généralisée et n'implique pas forcément une notion de force musculaire. Le système peut ne pas y faire appel. (voir figure I-8)*

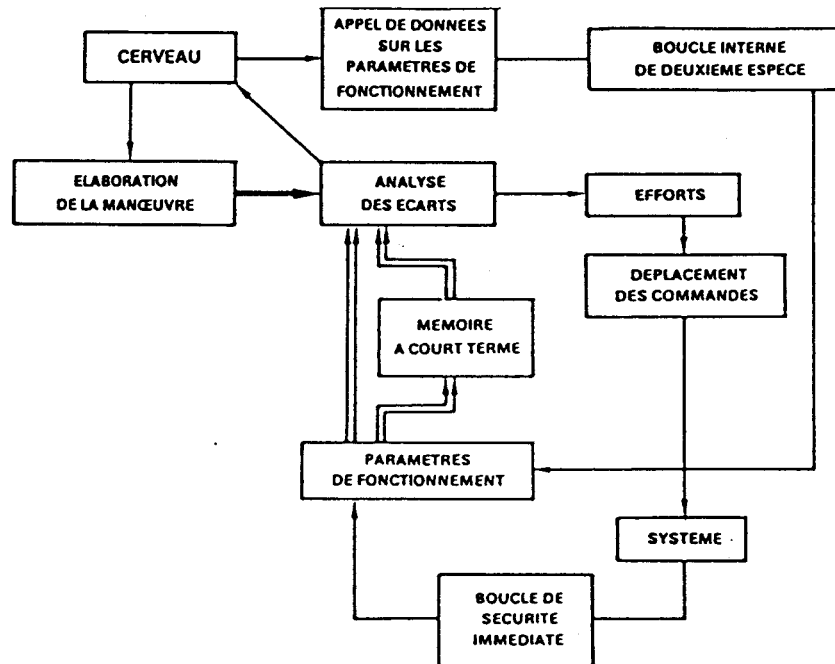


figure I-8: Cas où il n'y a pas de boucles d'efforts.

A ces trois types de sécurité peuvent être associés trois niveaux d'organisation de la commande se superposant au contrôle de la boucle primaire ( dite des efforts), qui seule est considérée en télémanipulation classique (voir Annexe 2 où sont présentées ces boucles).

La représentation de l'organisation de la commande sous la forme d'une factorisation en "modes coopératifs" que nous introduirons aux chapitres III et IV, permet de retrouver naturellement ces différents niveaux, tout en étant bien adaptée à une implantation informatique effective.

## II ANALYSE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT EN ROBOTIQUE INDUSTRIELLE.

De par la complexité des systèmes industriels mis en jeu dans un processus commandé ou assisté par ordinateur, la mise au point d'outils supportant les différentes phases de leurs cycles de vie s'avère actuellement indispensable.

Plus précisément, nous sommes confrontés à un problème où l'absence de méthodologie générale directement applicable peut s'avérer pénalisante et, de ce fait réduire l'impact des analyses de sécurité.

*N.B.: En effet, il s'agit de pouvoir maîtriser à la fois les parties transformationnelles et réactives du processus automatisé. Si pour la première nous pouvons disposer de méthodes bien éprouvées de génie logiciel (voir [MEY 85] pour une synthèse de celles-ci), la deuxième est pour le moment du domaine de l'empirisme quasi généralisé, mises à part quelques tentatives encore naissantes [HAR 85]: nous sommes conscients de n'avoir abordés qu'une part de cette question (celle-ci reste actuellement scientifiquement très ouverte)*

Après avoir souligné les spécificités du problème en téléopération, où la composante interactive demande un intérêt particulier, nous verrons comment certains de ces concepts se retrouvent dans les langages de programmation en robotique. Ceci nous permettra de souligner la correspondance entre niveaux de sécurité et niveaux de langage de programmation des robots.

Les premières questions à se poser sont: "quelles sont les fonctions attendues par les utilisateurs de notre système, et quelles implications pouvons nous en tirer sur le travail restant à réaliser". Celles-ci font l'objet du paragraphe suivant.

### II-1. Spécification des besoins

De manière à structurer la démarche de rédaction des spécifications du système, en y faisant apparaître les problèmes de sécurité hommes-machines, il est utile de disposer d'une méthode d'analyse fonctionnelle permettant d'exprimer de façon synthétique les résultats partiels obtenus. En effet si les méthodes structurées de conception augmentent le coût de l'analyse préliminaire, ce coût est largement compensé dans la suite du projet. ( 2 erreurs sur 3 commises dans une automatisation sont commises lors des phases de spécification et de conception).

Cette constatation est d'ailleurs à la base du développement des méthodes de spécifications des automatismes "classiques" (grafcet, gemma,...). On recherchera de façon plus précise une méthodologie permettant une analyse de l'environnement du système, une analyse des besoins et aidant la structuration globale de celui-ci.

Parmi les différentes possibilités, la méthode SADT de Ross [ROS 77] nous a paru particulièrement adaptée. Après un bref exposé des avantages de cette méthode nous ayant conduit à son choix, nous montrerons son application aux problèmes de sécurité hommes/machines, application que nous particulariserons au chapitre V.

Cette technique structurée d'analyse et de modélisation repose sur certains concepts de base :

- formaliser sous forme graphique.
- séparer le quoi du comment.
- consigner le maximum d'informations utiles.
- rester proche de la réalité par recours aux notions d'objets et d'activités.
- discipliner la démarche d'analyse (elle sera ainsi modulaire, hiérarchisée, structurée et descendante).

Elle a pour objectifs, en particulier de faciliter le travail d'équipe lors des étapes de conception préliminaire et de codage, mais aussi de permettre un suivi efficace pour les développements ultérieurs ou les opérations de formation, de maintenance etc..

*N.B.: son souci d'exhaustivité donne à la méthode une certaine lourdeur qui l'a cantonnée longtemps à la modélisation d'applications critiques (systèmes d'armes, applications informatiques à haut degré de sécurité ou de grande taille).*

*informatiques à haut degré de sécurité ou de grande taille ).*

Un modèle SADT est un diagramme composé de "boîtes" (éléments de la décomposition du problème) dont chaque côté à une signification.

On peut représenter ainsi

- soit une donnée (le résultat est un datagramme)
- soit une activité (le résultat est un actigramme)

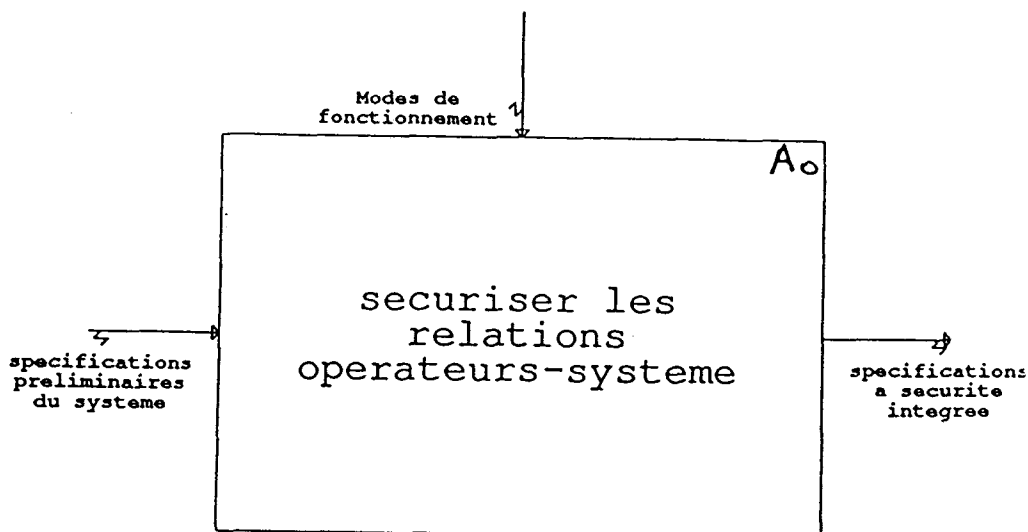
On obtient une hiérarchie comprenant:

- au plus haut niveau Ao :le problème global. Dans notre cas, sécuriser les relations opérateurs-système.
- aux niveaux inférieurs des diagrammes-fils raffinant progressivement les diagrammes- pères.

On peut ainsi mettre en évidence comment les problèmes de sécurité hommes/machines s'articulent par rapport au problème de sécurité global.



Le problème A<sub>0</sub> est cette fois :



Celui-ci sera décomposé en 4 sous-activités au niveau inférieur, correspondant à des problèmes dont l'analyse est du ressort, le cas échéant, de disciplines différentes (voir Annexe 3).

Le SADT permet donc une représentation explicite des interactions entre les équipes de différentes spécialités intervenant dans la réalisation d'un système complexe. Elle en facilite la coordination, lors de l'étape d'intégration système, et nous semble donc un élément intéressant pour déterminer et suivre de façon précise l'intégration de la sécurité hommes-machines dans le cycle de vie de celui-ci.

L'application de l'analyse fonctionnelle à l'aide de ce type d'outil nous fournit donc :

- un *support de communication* ( une notation claire et non-ambigüe) pour exprimer les résultats et les documenter.
- une aide à la *répartition statique des tâches* de conception/réalisation /utilisation dont une partie pourra éventuellement être automatisée.
- un contrôle aisé des résultats partiels obtenus.

Ce type d'approche nous paraît indispensable au dialogue concepteurs/utilisateurs.

*N.B.: l'idée d'appliquer la méthode SADT à l'analyse d'un système homme/machine ne nous est pas propre. L'application au domaine de la productique semble être due à Vögrig [VOG 86].*

*N.B.: La conception et la semi-automatisation d'opérations microchirurgicales, dont il sera question au chapitre V, nous ont particulièrement sensibilisé à l'utilité de structurer la démarche de cette façon. Bien qu'elle n'apparaisse que de façon implicite dans les développements des 3 chapitres suivants, nous voulons souligner son importance relativement aux problèmes évoqués. Nous pensons que l'absence, en situation réelle, d'une telle approche vaine une automatisation même partielle du système. Les procédures chirurgicales qui, pour des raisons déontologiques doivent être assurées, exigent une rigueur scientifique conduisant naturellement à décomposer ainsi le problème.*

Malgré tout l'application a priori du SADT, ou de méthodes analogues, dès le début d'un projet réellement nouveau présente un certain nombre de difficultés. En particulier, la recherche de l'exhaustivité des causes, ou celle des actions à engendrer nécessite une certaine expérience sur la façon d'automatiser le processus, difficilement compatible avec la nouveauté. Le SADT synthétise donc le plus souvent un processus non-linéaire d'essais-erreurs.

*N.B.: C'est une mémoire appréciable pour le suivi d'une "ligne de projets", surtout dans un contexte multidisciplinaire, dont la réalisation est parfois contraignante. Elle s'avère nécessaire aux différentes étapes clés des projets (passage de la maquette au prototype, industrialisation, expérimentation réelle etc...)*

## II-2. Spécificités du problème en téléopération assistée par ordinateur.

Nous nous plaçons dans le cadre le plus général de TAO dans lequel la relation entre un bras-robot esclave effectuant une tâche à distance et le bras-maître manipulé par l'opérateur peut ou non être automatisée. L'apport du calculateur pourra, comme nous le verrons dans la suite, être soit de soulager l'opérateur du contrôle direct d'une partie des variables commandées soit de l'aider dans ses tâches de supervision.

L'analyse de sécurité visera à assurer la protection autant du mécanisme esclave que celle de son environnement, ce qui peut nécessiter [VER 82] "une prise de décision automatique et rapide en cas d'urgence".

En particulier, il est indispensable d'assurer le respect des contraintes suivantes :

- les butées angulaires du bras esclave (chocs de fin de course)
- la limitation des efforts et des vitesses de l'esclave
- les interdictions de déplacements en l'absence d'opérateur (i.e. si celui-ci lâche la poignée.
- les mises en références, initialisations de modes et couplages des bras
- la détection automatique de pannes (mécanique ou électronique) par un processeur indépendant et visualisation simple et immédiate des causes présumées sur le poste maître".

*N.B.: Les systèmes d'anti-collision (capteurs proximétriques, volumes interdits par modélisation a priori) et les retours artificiels kinesthésiques induisent également une limitation des possibilités de mouvement pouvant conduire à l'accident.*

De façon plus général, il est essentiel de prendre en compte les possibilités de dialogue disponibles au niveau de l'interface homme/machine ("les langages" utilisés aux différents moments du cycle de vie du système) dans l'étude de sûreté de fonctionnement du système: c'est ce que nous détaillons au paragraphe suivant..

## II-3. Langages de programmation et sûreté de fonctionnement

### II-3-1 Le compromis coût/performance/sécurité

Les limitations de performance des robots industriels sont avant tout imposées par l'imperfection de la structure mécanique (rigidité, précision de réalisation) et les

performances réduites des capteurs.

Face à ces problèmes le roboticien se doit d'élaborer des modèles :

- simples pour permettre une implantation "on-line"
- . complets,i.e; utilisable pour définir des comportements adaptés

Il s'ensuit le plus souvent une situation où l'on accepte un compromis acceptable coût/performance dans un contexte de fonctionnement nominal du robot.

Les imperfections du modèle sont néanmoins la source d'incidents ou d'accidents potentiels (Ex : une modélisation imparfaite de la "souplesse" du manipulateur entraînant des collisions non prévues). Suivant la capacité du système de commande à prendre en compte des informations extéroceptives, nous sommes ainsi amené à introduire différents niveaux de sécurité. Dombre [DOM 81] a proposé d'introduire ainsi explicitement la sûreté de fonctionnement dans les langages de programmation utilisés en robotique industrielle.

### II-3-2 Structure de la commande et langages de programmation.

On sépare habituellement les fonctions d'un robot en 3 sous-familles :

- de COMMANDE
- de PERCEPTION
- de DECISION

Celles-ci peuvent être articulées selon le schéma de la figure II-1

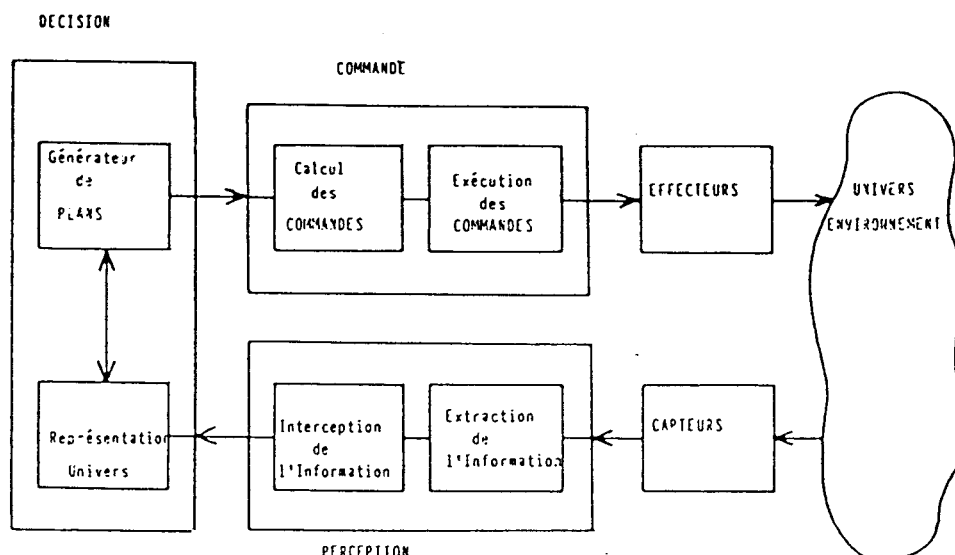


Figure II-1 articulation des fonctions de perception/commande/décision

D'autre part, ALBUS [ALB 80] a proposé une décomposition hiérarchique perception/commande basée sur 4 niveaux principaux.

A chaque niveau correspond un module élémentaire de calcul  $H_i$

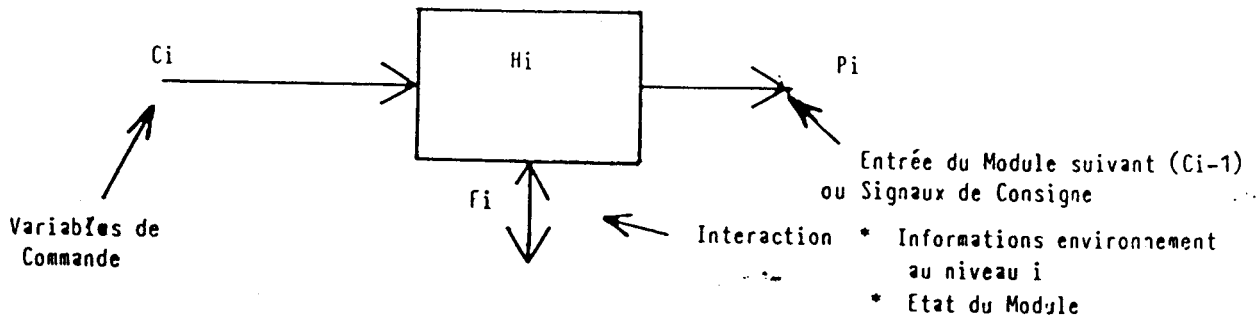


Figure II-2 module élémentaire de calcul

On peut considérer ce module comme un générateur de phrases formées d'instructions valides à ce niveau équivalente à une seule macro-instruction au niveau supérieur: on retrouve implicitement ici l'idée d'un "langage" permettant de lier perception et commande.

*N.B. : un modèle analogue sera développé par SARIDIS [SAR 84] qui, lui insistera plus particulièrement sur la syntaxe liant les "mots" du dictionnaire ainsi générés. Ceci induit des possibilités de vérification de la cohérence des phrases de "commande/perception".*

L'interaction entre commande et traitement des données de l'environnement dépend bien sûr du niveau  $i$  considéré. On arrive aux schémas suivants : le premier selon la conception d'Albus, l'autre présentant les différents niveaux de langage de programmation que l'on peut logiquement en déduire.

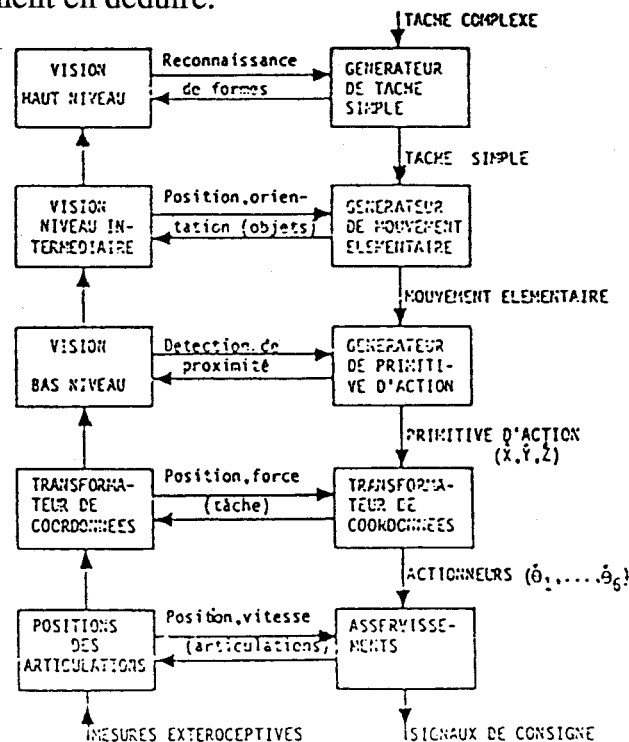


Figure II-3: Décomposition hiérarchisée perception/commande.

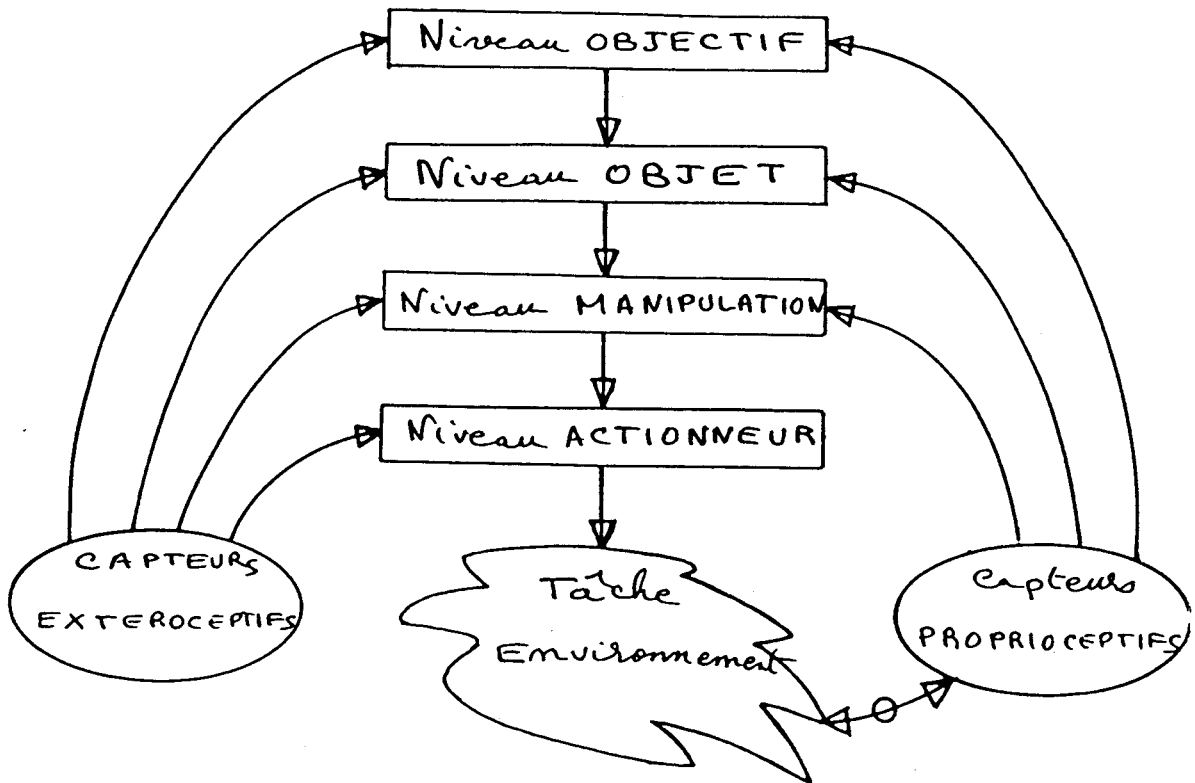


Figure II-4: Niveaux de langages en robotique industrielle.

Ces différents niveaux correspondent à ceux désormais utilisés classiquement en robotique. Le passage d'un niveau à l'autre s'effectue via un interpréteur : on retrouve la conception de système Homme/Robot multiniveaux proposée par Malvache [MAL 81] et rappelée sur la figure II-5.

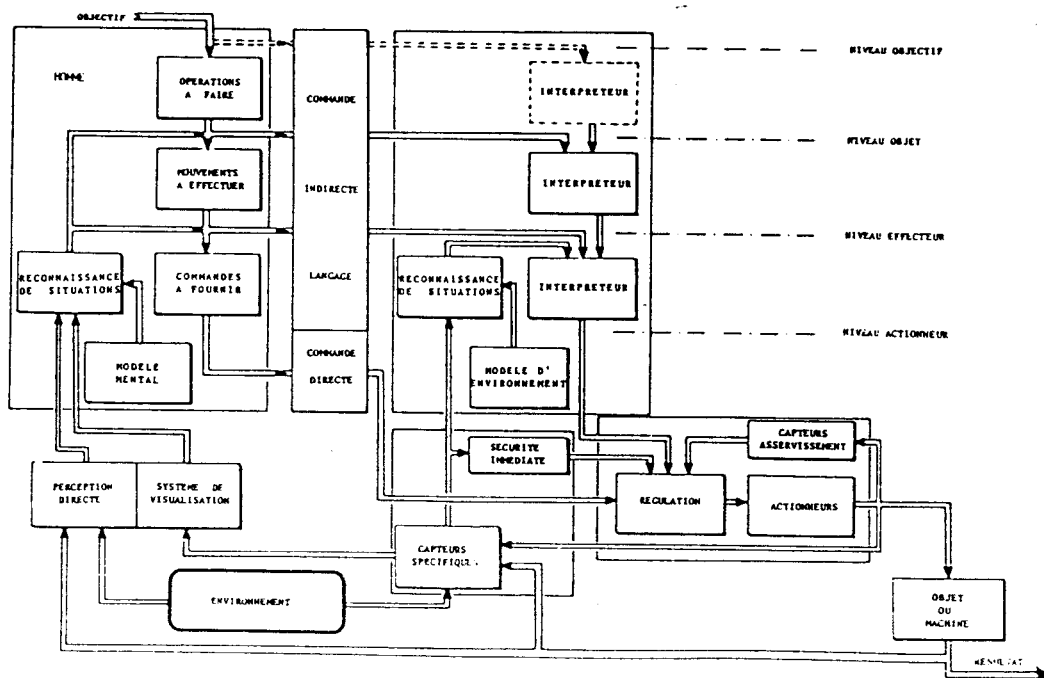
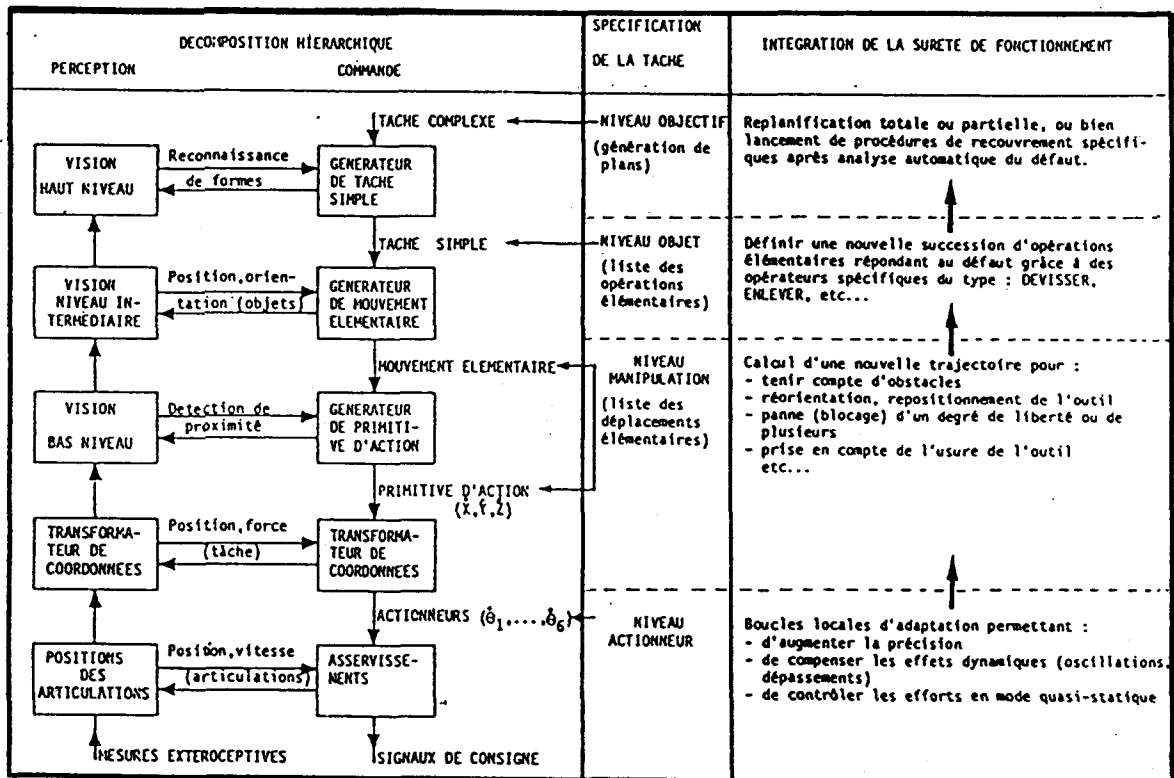


Figure II-5 Système Homme/robot multiniveaux.

Dombre [DOM 81] en déduit une hiérarchie parallèle dans l'intégration de la sûreté de fonctionnement, résumée à la figure suivante (fig II-6).



Nous y distinguons en particulier l'intervention des 4 niveaux classiques, qu'il est possible de placer en parallèle avec ceux étudiés précédemment correspondant aux boucles de sécurité. A chacun de ces niveaux correspond donc une action corrective propre. L'introduction de l'opérateur va avoir pour conséquence en téléopération de "faire communiquer ces niveaux", alors que ceci était supposé impossible en robotique ( les niveaux de langage correspondant à des phases de programmation disjointes).

De manière à aborder ce problème, nous sommes amenés à modéliser de façon plus fine l'interaction hommes/machines: ceci fait l'objet du chapitre suivant.

## CONCLUSION

### Paradoxes de la confiance dans les systèmes d'aide à l'opérateur.

La présentation générale de ce chapitre, ainsi que d'ailleurs la suite de ce mémoire, envisage les problèmes de sécurité hommes/machines du point de vue d'un observateur externe au système lui-même. Si ceci peut sembler justifié pour la conception d'un système technique classique, l'idée d'envisager le cycle de vie complet du système ( et y compris son étape de conception) oblige à remettre en cause cette hypothèse.

Bien que ce problème ait été relativement peu abordé, des premiers travaux ergonomiques ont récemment mis en évidence un autre aspect de la sûreté de fonctionnement méritant une attention particulière (voir par exemple [VAL 88]): la confiance que l'opérateur impliqué accorde au système qu'il manipule.

Ceci conduit à la situation paradoxale suivante:

1) pour accroître la fiabilité de l'opérateur humain (et donc la confiance d'un tiers), on l'assiste d'aides automatisées; mais celles-ci le placent dans une relative dépendance à leur égard et, en fait, restreignent son adaptabilité face à des situations inattendues.

2) pour vérifier la cohérence du système, il est nécessaire de pouvoir se placer hors du cadre logique de ce système (sous peine de tomber sur des problèmes d'indécidabilité )

La complexité des situations possibles implique que le seul élément qui puisse décider que l'aide est cohérente est justement l'opérateur qu'elle aide.

Résoudre ce type de paradoxes conduit classiquement à considérer qu'en fait différents niveaux logiques sont impliqués dans ces énoncés, et que c'est leur association qui conduit au paradoxe d'une situation indécidable (en l'occurrence ici l'opérateur est à la fois sujet de l'action et intervient en observateur à un niveau supérieur).

Les mathématiques de la confiance de Le Cardinal et Guyonnet, basées sur la théorie des types logiques et celle des jeux, permettent une approche intéressante de ce problème. Leur application aux problèmes de sécurité hommes/machines semble une voie en développement prometteuse [LEC 84].

De notre point de vue nous considérerons ces paradoxes comme situant les limites des modèles d'automatisation classique, surtout utilisés seuls, dans le cadre de l'étude de systèmes hommes/machines considérés simultanément à différents niveaux. On ne peut en effet supposer une indépendance des niveaux de "décomposition" de l'opérateur sans s'exposer à ce type de paradoxe. Il faudra donc considérer certains des modèles que nous abordons dans le chapitre suivant comme une représentation d'une classe d'interaction proposée à l'opérateur, dont le sens ne peut être dissocié des autres niveaux d'interactions simultanément présents.

Ceci complique évidemment la situation, par rapport à un système complexe "classique". Le problème évoqué dans cette thèse est donc de savoir s'il est possible d'obtenir des énoncés valides permettant d'inférer des lois de commande sur un système à comportement paradoxal. Les situations catastrophiques pouvant en découler conduisent à une certaine prudence quant à l'extension de l'observation.

C'est pourquoi une approche parallèle "extérieure", de type ergonomique permettant de détecter des situations paradoxales, nous paraît être indispensable, pour valider la démarche de l'automaticien et détecter les "boucles paradoxales" (i.e. faisant

intervenir plusieurs niveaux).

Nous pensons qu'il est nécessaire, avant d'aborder les principaux modèles d'ingénieur qui ont été développés pour modéliser le système hommes/machines, de rappeler que ceux-ci n'ont de sens que confrontés à des modèles cognitifs moins frustrés qui en délimitent le cadre.

Nous reviendrons sur ce point au chapitre IV, en discutant des limites actuelles à l'utilisation de systèmes experts comme extension des méthodes proposées pour la spécification des systèmes hommes/machines.

Il a pu être montré que les schémas utilisés par un opérateur ne sont valides que dans un "univers" particulier et que parmi ses connaissances, une part importante est constituée de méta-savoirs permettant d'identifier le bon modèle adapté à une situation donnée. L'étape de recollement des modèles que nous évoquerons au chapitre II est donc essentielle, bien qu'encore naissante à ce jour: l'approche multidisciplinaire que nous proposons en est une étape nécessaire.



## ANNEXE 1 : RAPPEL SUR LE CONCEPT DE FIABILITE

On supposera vouloir exprimer par un facteur simple la confiance technique que l'on peut mettre dans un appareil (au sens large la complexité pouvant en être très variable de la résistance au système économique).

Un problème de cet ordre se pose par exemple dans le choix d'une politique de maintenance (loi de renouvellement d'équipement); l'essentiel des outils afférant au concept de fiabilité ont été développés dans ce cadre. Une hypothèse implicite est alors souvent admise : le temps est la variable essentielle dont dépend la fiabilité, les autres facteurs (EX: conditionnement de la résistance en électronique etc...) étant les paramètres de l'étude.

On considère alors la durée de vie T comme le temps séparant la mise en service de l'appareil de sa défaillance totale (c'est à dire d'un écart du comportement de l'appareil par l'apport à une norme de fonctionnement déterminée supérieur à un seuil donné.

T est une variable aléatoire

$f_i(t) = \text{Prob}(T > t)$  sera appelée fiabilité. (ou fonction de fiabilité de l'appareil).

$f_i(t)$  est une fonction monotone non décroissante du temps.

$1 - f_i(t)$  est la probabilité cumulative de panne.

si  $f_i(t)$  est dérivable:

$\lambda(t) = -f_i'(t)/f_i(t)$  est le taux d'Avarie.

$$\text{N.B: MTBF} = \int_{\tau} f_i(t) dt$$

## ANNEXE 2 : BOUCLES DE SECURITE EN TELEOPERATION.

Celles-ci ont pu être classées en différentes espèces, reliées aux constantes de temps fondamentales qui leur sont caractéristiques:

### 1 - Boucles internes de 1ère espèce

Elles est reliée à la boucle des efforts généralisés, appliquant et régulant les efforts souhaités sur l'une des commandes du système

### 2 - Boucles internes de 2ème espèce

Recueillant les données sur les paramètres de fonctionnement. Elles sont reliées aux boucles de sécurité immédiate, et correspondent à l'exécution de manoeuvres élémentaires

### 3 - Boucles internes de 3ème espèce

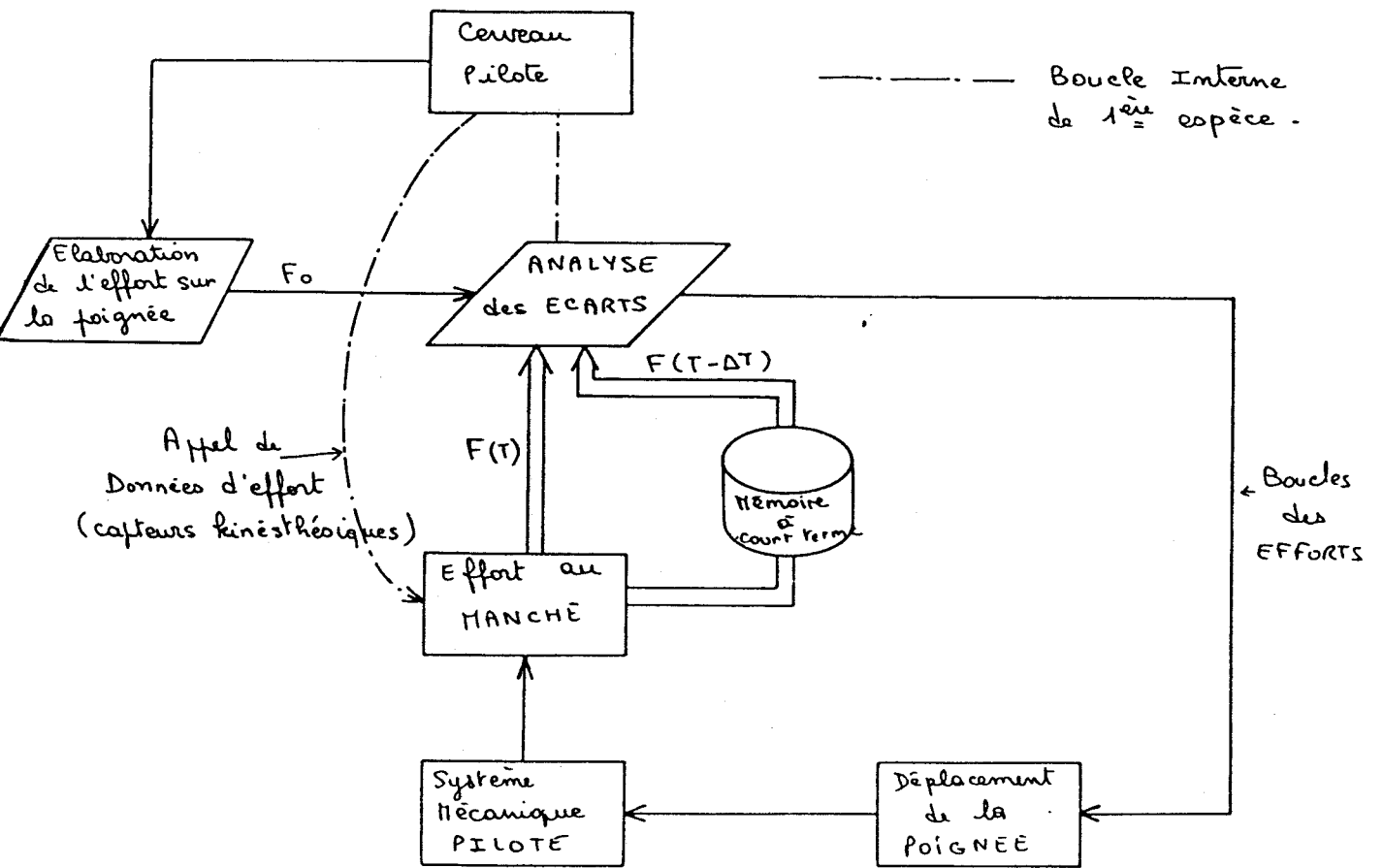
Recueillant les données des paramètres tactique, elle sont reliées aux boucles de sécurité à court terme et suivent les lois de pilotage

### 4 - Boucles internes de 4ème espèce.

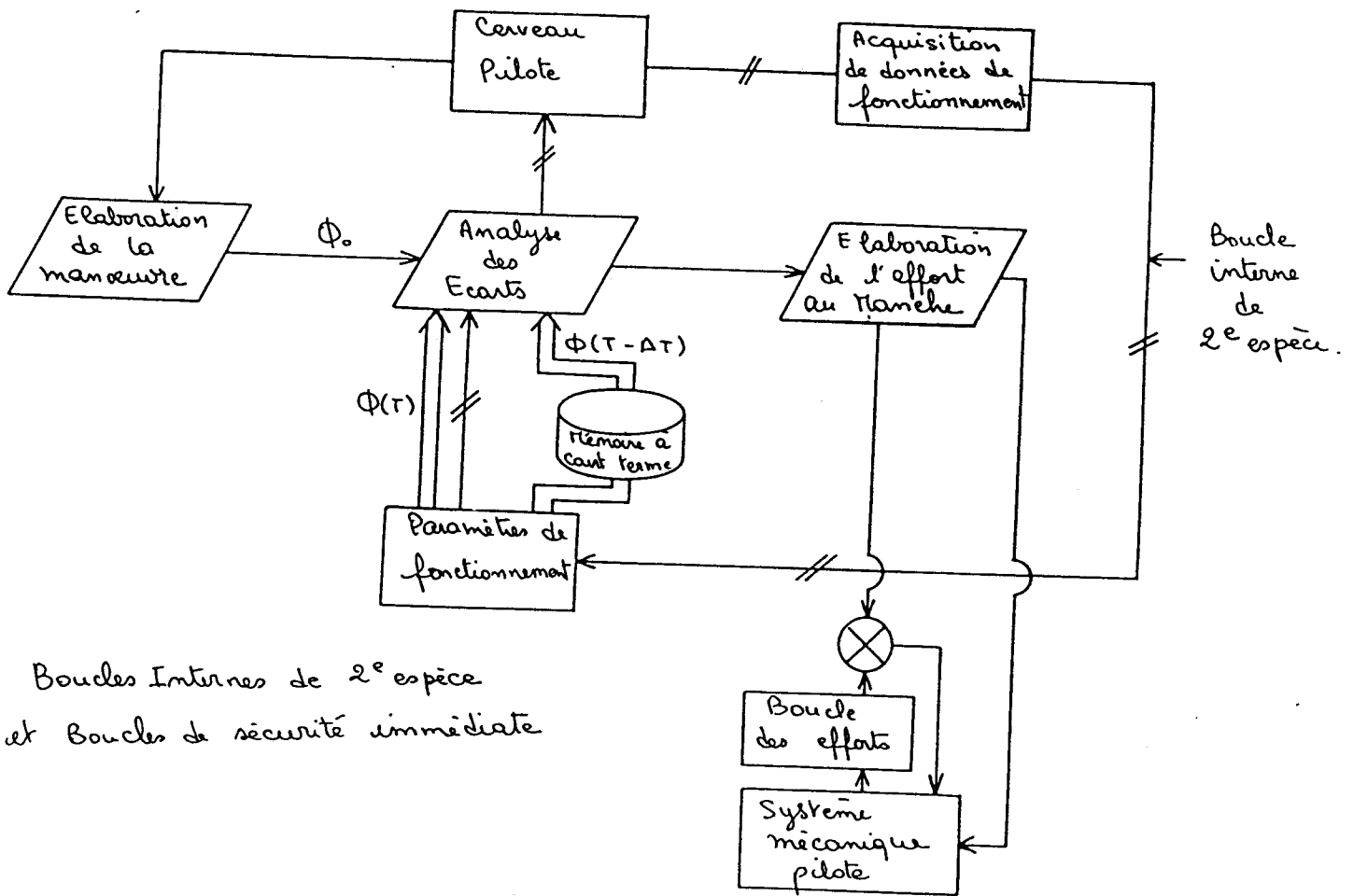
Recueillant les données des paramètres stratégiques. Elles sont reliées aux boucles de sécurité à long terme, conduisant aux décisions d'enchaînement de phases et de sous-phases. Elles ont été présentées dans le chapitre précédent.

N.B. : cet "enchaînement" est un processus complexe lié à l'organisation de la commande, dépendant de l'apprentissage, de l'appréciation par le pilote de l'urgence de la réaction nécessaire.

Boucles internes de première espèce.

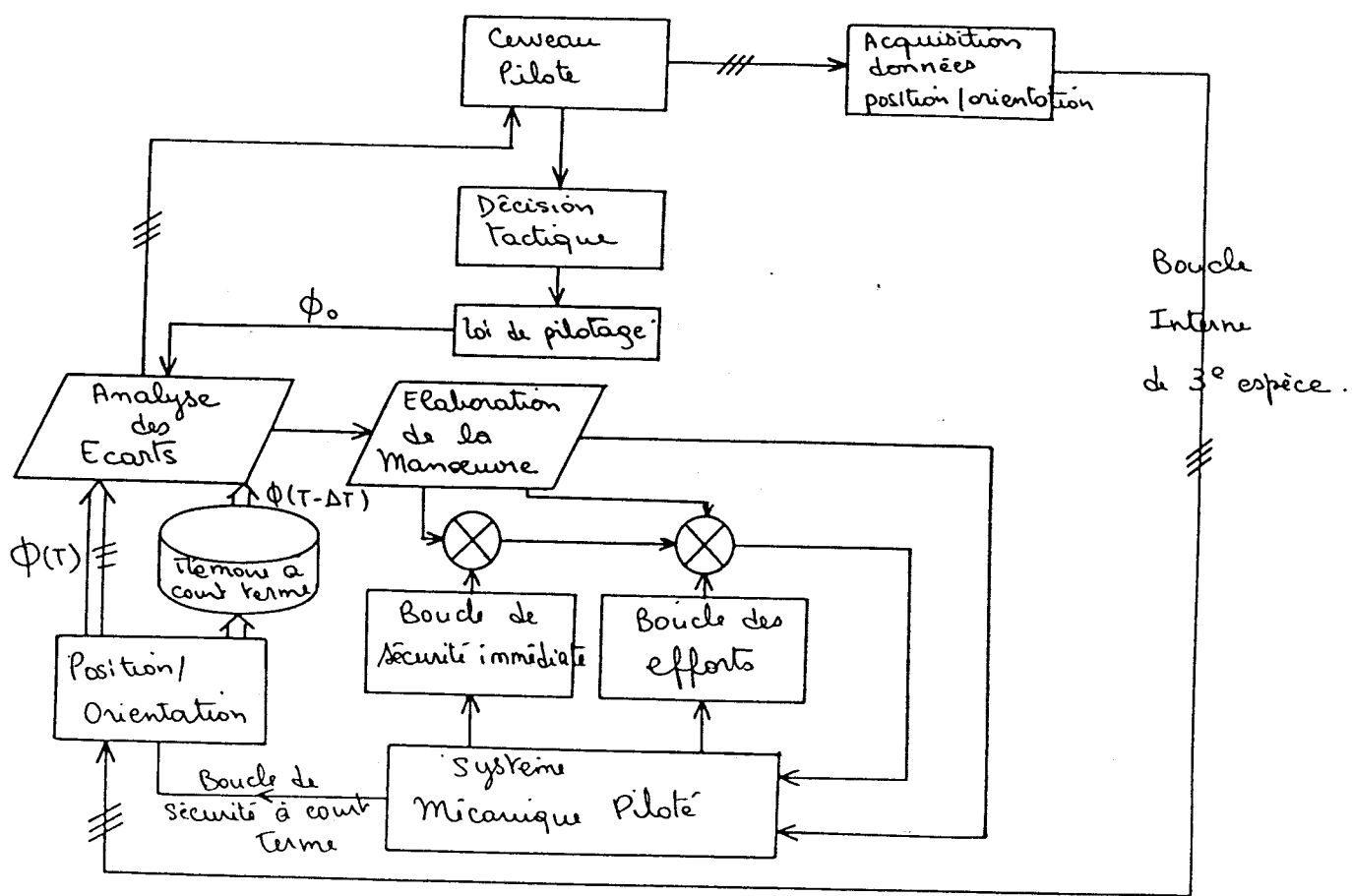


Boucles internes de deuxième espèce et boucles de sécurité immédiate.



Boucles Internes de 2<sup>e</sup> espèce et Boucles de sécurité immédiate

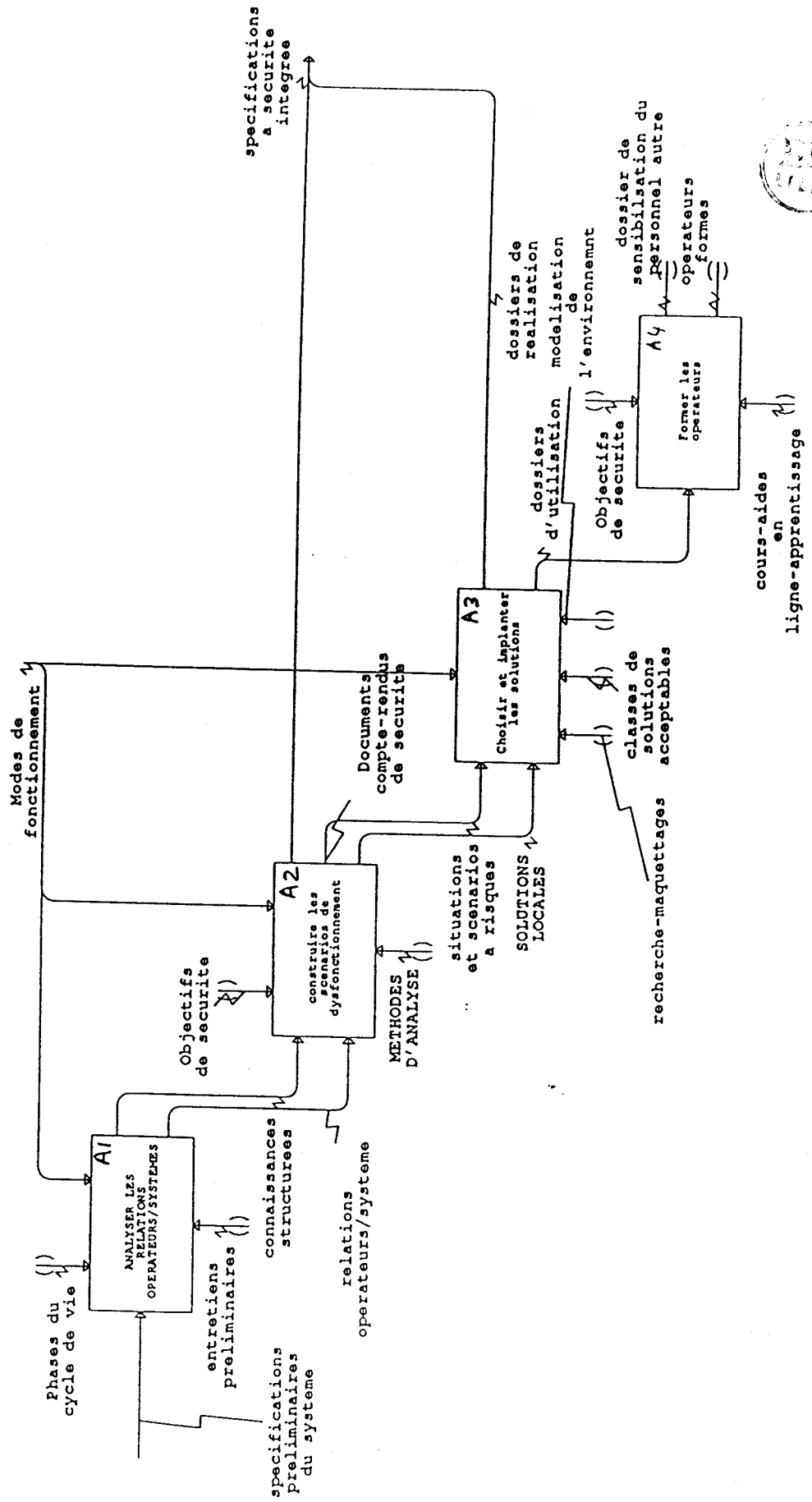
Boucle de sécurité à court terme-boucle interne de troisième espèce (d'après [LIE 76] adapté)



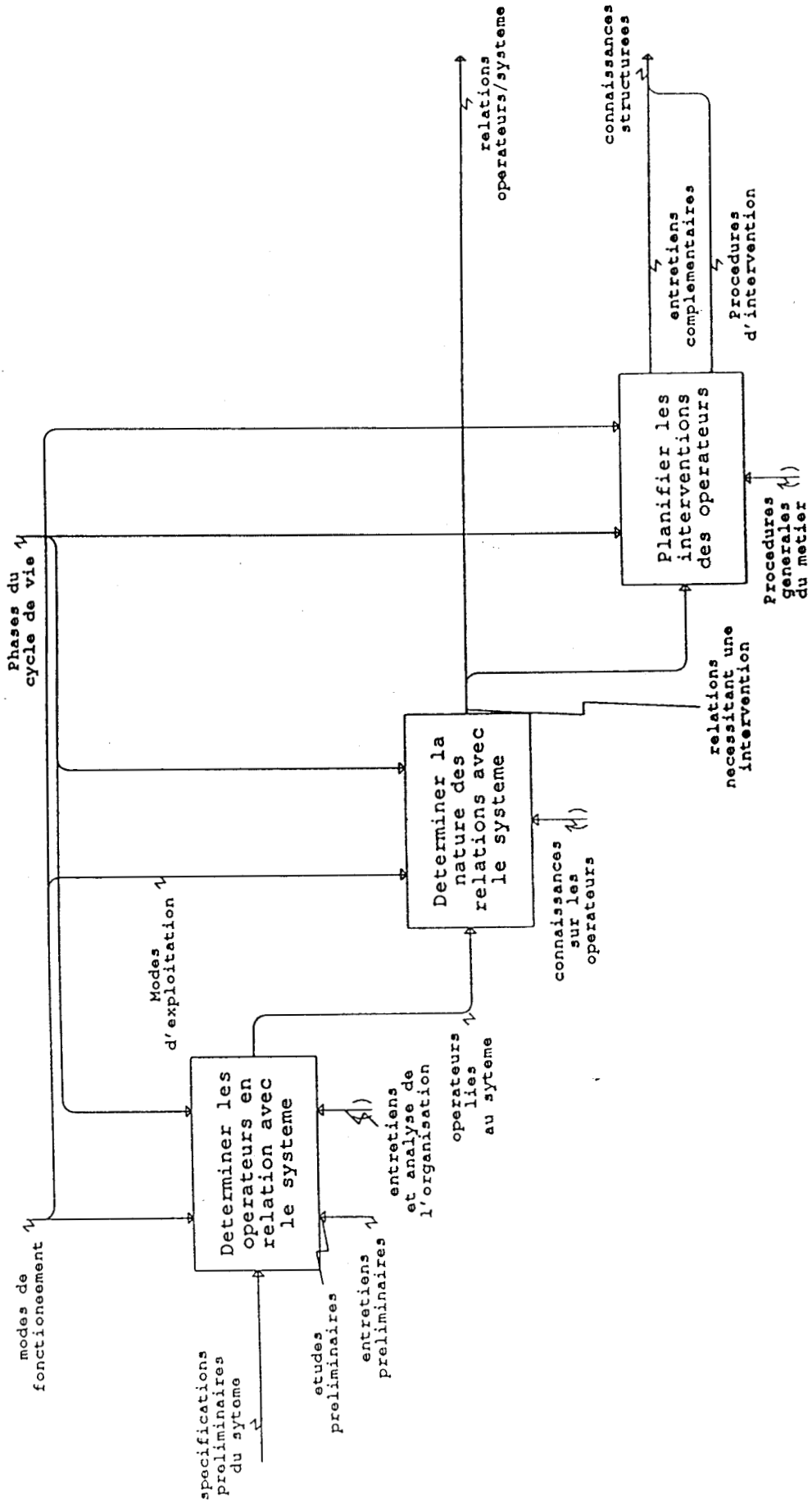
### ANNEXE 3: ANALYSE FONCTIONNELLE PAR SADT.

Le problème global A0 est décomposé en 4 sous-problèmes dont nous ne reprenons dans la suite de cette annexe que ceux dont il sera question dans ce mémoire. Ces différents diagrammes nous fournissent en particulier les produits attendus, permettant de constater l'accomplissement du bloc ( documents compte-rendus de sécurité, dossiers d'utilisation, dispositif expérimental, etc..)

A0: SECURISER LES RELATIONS OPERATEURS-SYSTEME

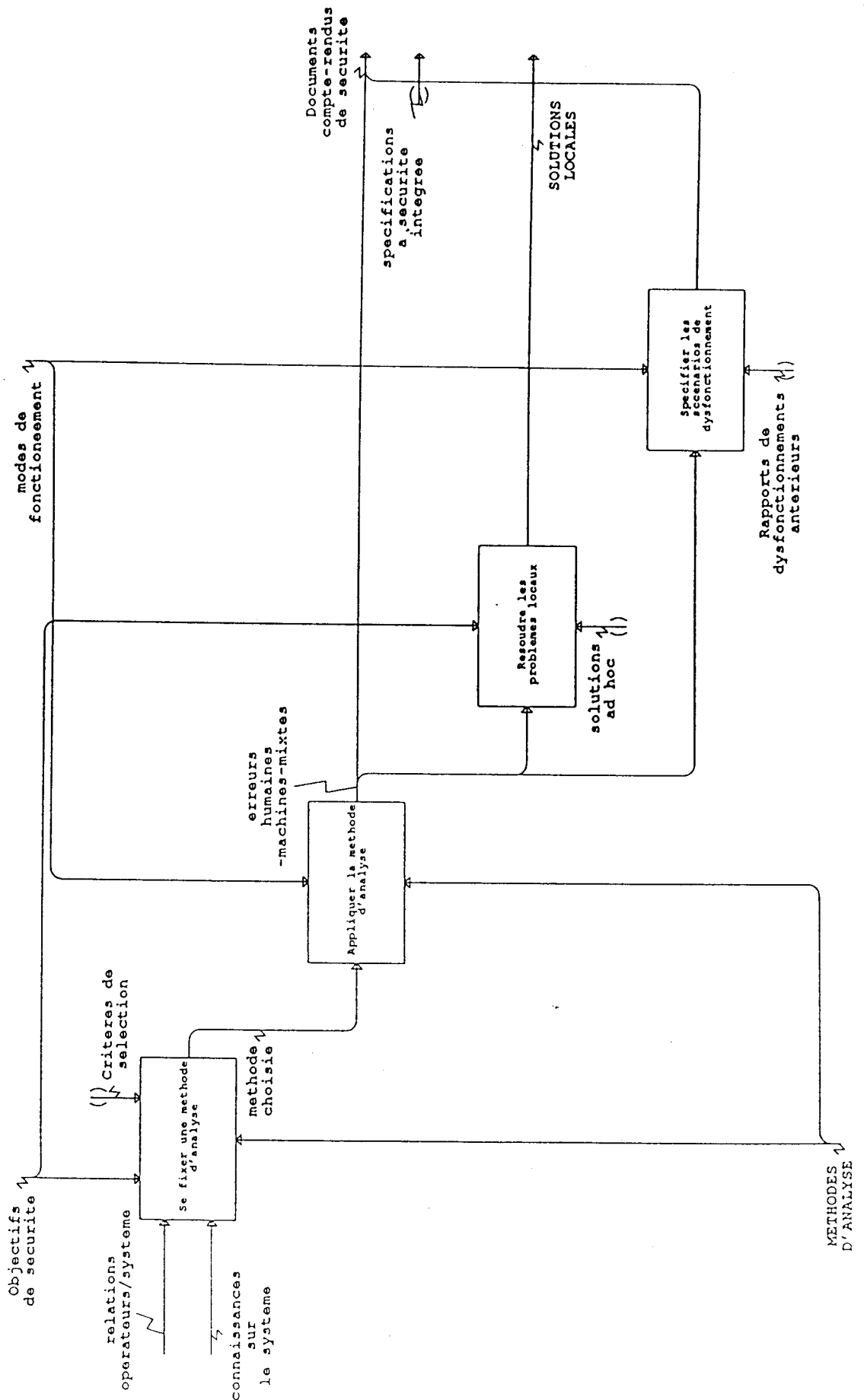


# A1: ANALYSER LES RELATIONS OPERATEURS/SYSTEME

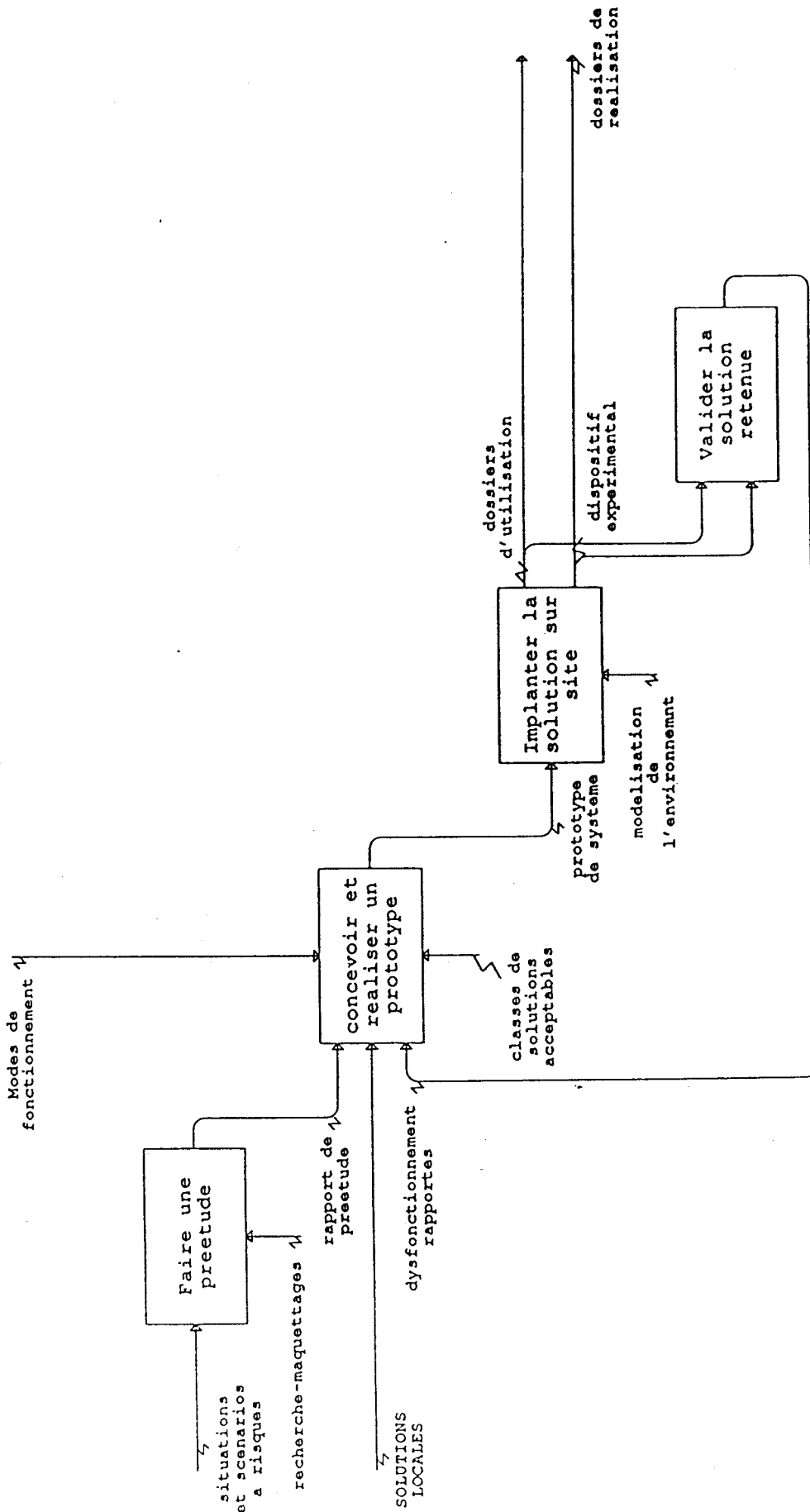




## A2: CONSTRUIRE LES SCENARIOS DE DYSFONCTIONNEMENT



# A3: CHOISIR ET IMPLANTER LES SOLUTIONS.



CHAPITRE II : MODELISATION DE L'OPERATEUR  
ET SECURITE HOMME/MACHINE

## I- MODELES ELEMENTAIRES D'INTERACTION.

I-1. Modèles déduits de la théorie de la fiabilité.....	p4
I-1.1. Modèles probabilistes.....	p4
I-1.2. Prise en compte des PSF.....	p4
I-1.3. Modèles de Terano et Onisawa. ....	p6
I-2. Modèles d'opérateur idéal en environnement aléatoire.....	p7
I-2.1. Théorie de l'estimation et modélisation de l'opérateur.....	p8
I-2.2. Modèle stochastique de type O.C.M.....	p10
I-3. Modèle du type "Traitement de l'information". ....	p12
I-3.1. Approches informationnelles. ....	p12
I-3.2. Application à l'analyse d'une tâche de pilotage.....	p13
I-3.3. Objectifs de sécurité. ....	p14
I-3.4. Temps de traitement et quantité d'information.....	p16
I-3.5. Traitement de l'information en reconnaissance des formes. ....	p17
I-4. Modélisation situationnelle et procédurale.....	p18
I-5. Modélisation proposée : le réseau situationnel hommes/machines.....	p19

## II-MODELES MULTINIVEAUX.

II-1. Un modèle informatique : les grammaires emboîtées.....	p20
II-2. Modèle de TAO de Coiffet.....	p22
II-3. Modèles qualitatifs. ....	p23
II-3.1. Arche de Rasmussen.....	p23
II-3.2. Modèle qualitatif de Hess.....	p25

## III-CLASSIFICATION DES "ERREURS HUMAINES".

III-1. Systèmes de classification à but descriptif.....	p27
III-2. Classification de Rouse.....	p28
III-3. Approche basée sur la structure de l'action.....	p30

<u>CONCLUSION.</u> ....	p32
-------------------------	-----

<u>ANNEXE 1:GRANDEURS INFORMATIONNELLES CLASSIQUES.</u> .....	p33
---	-----

<u>ANNEXE 2:DUPLICATION DES PROCESSEURS ET SECURITE.</u> .....	p35
--	-----

## PRELIMINAIRE

De nombreuses approches ont été proposées dans la littérature pour modéliser le comportement de l'opérateur humain que ce soit en situation de contrôle ou de supervision [MAL 81], [ROU 80]. Celles-ci utilisent habituellement les modèles mathématiques développés pour décrire le comportement des systèmes automatisés eux-mêmes.

Bien que ceci puisse-t-être justifié par l'adaptativité de l'opérateur (qui "apprend" un comportement adéquat dont la description dans des conditions normales suit celle du processus sous jacent), quelques difficultés peuvent survenir pour leur application à des problèmes liés à la sécurité homme-machine.

En effet, ceux-ci apparaissent dans des conditions souvent pathologiques correspondant souvent à des ruptures de modèles de comportement du système hommes/machines. Ces ruptures peuvent même, d'un point de vue général, être considérés comme des signes précurseur à une défaillance s'ils se produisent sans changement de situation externe. Par exemple ils signaleront la fatigue de l'opérateur, une perte de vigilance ou une situation de stress.

Néanmoins, tout en percevant les problèmes sous-jacents, en particulier en conception, ces modèles s'avèrent utiles pour délimiter le cadre dans lequel l'automatique peut apporter des solutions au problème de l'allocation de tâches hommes/machines.

Nous décrirons dans ce chapitre les principaux modèles qui, à notre connaissance, ont été élaborés à cette fin. Nous essaierons de dégager la façon dont ils intègrent la notion de sécurité, et d'en déduire quelques conséquences sur l'organisation de la commande.

Ceux-ci seront présentés suivant deux grandes catégories:

- celle des modèles "élémentaires" qui correspondent à une étude expérimentale du comportement face à une tâche simple (de commande ou de supervision).

- celle des modèles "multiniveaux" qui sont des tentatives de recollement cohérent de modèles élémentaires. Parmi ceux-ci le modèle de TAO, apparu progressivement lors du projet ARA, sera présenté.

Ces modèles restent néanmoins trop généraux pour une application réaliste : l'analyse de la tâche qui fera l'objet d'un développement au chapitre suivant montrera comment l'approche ergonomique permet d'adapter les modèles dans le contexte d'une situation de travail réelle.

L'analyse de quelques questions ouvertes nous permettra de délimiter les limites d'application de ces modèles.

Différentes classifications de ces modèles sont envisageables : par domaines (psycho-physiologiques/psychologiques/automatiques), par types de théorie utilisée.. Nous examinerons trois de celles-ci, qui chacune propose une prise en compte différente de l'erreur humaine.

Le modèle en réseau situationnel que nous proposons effectue un recollement "à plat" des différents modèles. Sa complémentarité par rapport aux modèles multiniveaux sera soulignée en conclusion de ce chapitre.

## I- Modèles élémentaires d'interaction

### I-1 Modèles déduits de la théorie de la fiabilité

Ces modèles sont à la base des études sur "la fiabilité de la composante humaine" et conduisent à l'introduction d'un indice de fiabilité humaine.

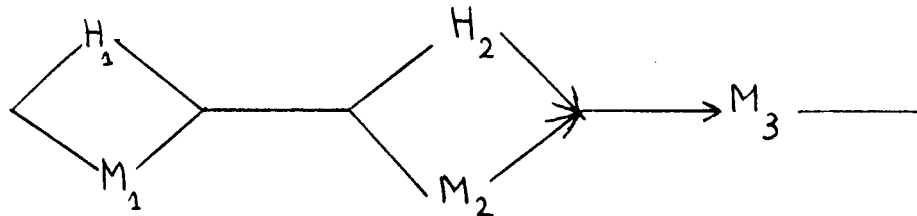
#### I-1.1 Modèles probabilistes

L'opérateur humain est considéré comme un composant, que l'on caractérise par son taux d'avarie ( voir annexe 1). Cette modélisation simple permet ,après étude structurelle du système[KAU 69], de construire un réseau de fiabilité associé au système Hommes/Machines.

On en déduit :

- une probabilité de panne globale de l'ensemble
- les chaînes (associations d'éléments) fragiles du système et donc de prévoir (de façon statistique) les principaux modes de panne .

Bien que semblant très simplifiés, ces modèles se prêtent bien à une analyse globale des redondances nécessaires et de l'organisation en cas de panne d'un élément. Ainsi, pour des situations multiopérateurs, elles permettent une allocation statique des tâches en situation normale ou accidentelle.



Exemple :une "panne" sur M3 peut nécessiter le passage en Mode automatique (H1 remplace M3 en se plaçant en Mode automatique M1).

*NB: Ces différents éléments sont en fait inclus dans des chaînes beaucoup plus complexes. Ceci nécessite une analyse fine de la fonction de structure associée et de son évolution dans cette transformation (dite de "cannibalisation") en utilisant le réseau de fiabilité associé. Les approches modélisant le système H/M sous forme de réseaux peuvent servir de base à leur construction [BER 79].*

Ce modèle, visant à définir des choix globaux d'architecture (nombre d'opérateurs ,estimation grossière des flux d'informations associés),est donc intéressant comme première approche .

#### I-1.2 Prise en compte des PSF .

De par sa nature fondamentalement ouverte, le comportement d'un opérateur humain peut difficilement être modélisé à partir d'une approche uniquement probabiliste .En particulier,il faut pouvoir aisément rendre compte de son adaptativité, de sa flexibilité vis à vis de contraintes d'environnement.

C'est ce que permet la prise en compte des "performances shaping factors",que

nous introduisons comme des *facteurs de modulation des densités de probabilités, rendant compte des modifications de celles-ci sous l'influence de conditions physiques, psychologiques ou sociologiques* (par exemple de constitution des équipes).

Ces facteurs sont donc d'une certaine manière introduits pour "se ramener au cas précédent et pouvoir ainsi continuer à appliquer des méthodes classiques d'amélioration de la sûreté de fonctionnement basés sur des calculs probabilistes. Leur utilisation ont des conséquences essentielles sur la signification, et donc sur l'utilité des méthodologies fiabilistes dans l'étude des facteurs humains.

#### Quel est en fait le but visé ?

Si l'on s'en réfère aux articles de Terano [TER 83] il s'agissait initialement de façon relativement simple de prendre en compte l'influence de facteurs tels que:

- la coopération et la compétition entre opérateurs,
- l'adaptativité d'un opérateur face à des situations inconnues .

Si l'on considère par exemple une même tâche accomplie par des opérateurs isolés puis dans différentes configurations groupées, des résultats très différents et d'apparence paradoxale peuvent être obtenus selon les modes d'entente imposés au groupe .

On observe par exemple que la fiabilité augmente dans un mode compétitif et décroît dans un mode coopératif.

Ceci est explicable par le fait qu'un opérateur adapte son comportement suivant qu'il considère que les autres opérateurs peuvent éventuellement rattraper ses erreurs ou non. D'où une dégradation ,en l'absence de consignes supplémentaires, dans une situation où il "fait confiance" aux autres participants.

Pour un système hommes/machines on observera ainsi des modes distincts suivant que les opérateurs considèrent les calculateurs (i.e. les autres opérateurs ) comme des partenaires fiables, non fiables ou concurrents.

Dans le premier cas on observera localement un mode coopératif; dans le second cas, alternativement un mode coopératif ou compétitif, en fonction de la charge de travail de l'opérateur; dans le troisième cas un mode compétitif.

La confiance subjective attribuée à la machine a donc une influence essentielle sur la fiabilité et évolue de différentes façons, en situation dégradée, en fonction en particulier des possibilités de dialogue offertes (la confiance accordée à un logiciel auto-explicatif ou même simplement convivial se trouvant pratiquement automatiquement renforcée).

Il convient malgré tout de pouvoir donner un sens mathématique précis aux facteurs de modulation de la probabilité .Ceci nous conduit à une extension de la théorie des probabilités vers celle des possibilités : celle-ci s'effectue en utilisant des facteurs spécifiques ( performance shaping factors ou PSF) .

Nous développons cette approche au paragraphe suivant en utilisant l'approche d'Onisawa et Terano([ONI 88] [TER 83] ).

### I-1.3 Modèle de Terano et Onisawa.

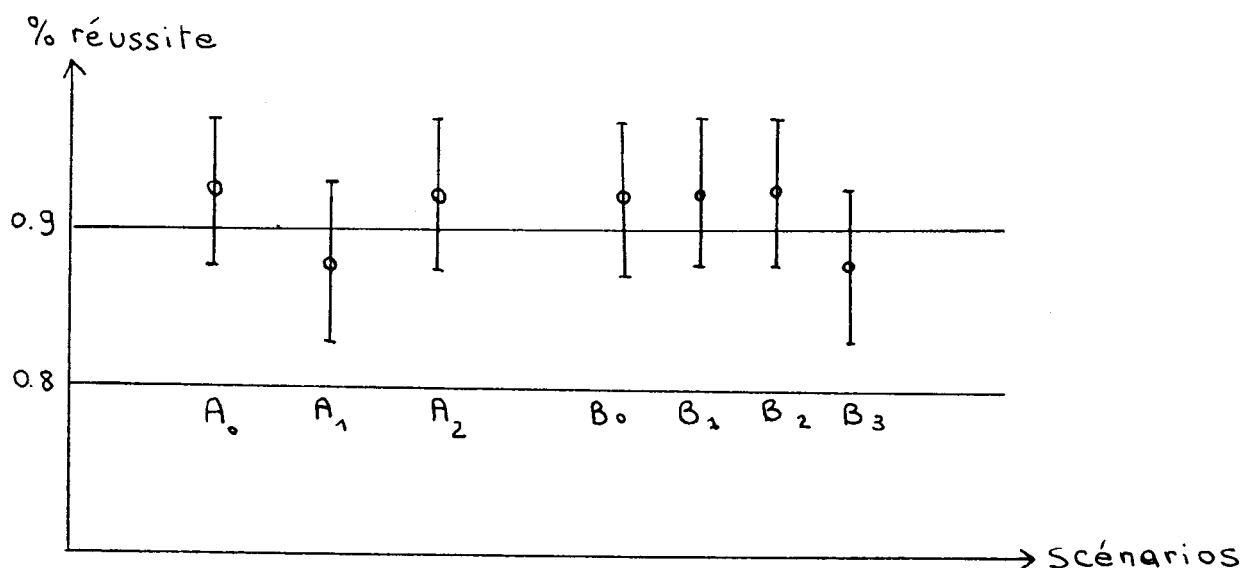
Nous partons pour cela d'une expérience simple suggérée par Terano [TER 83]: il s'agit dans celle-ci de reconnaître en avec un temps de réponse limité (par exemple ici 0.5 s) la parité d'un nombre présenté sur un écran .

Cette expérience est effectuée suivant deux scénarios de base :

-scénario A: 2 opérateurs auxquels on donne des consignes différentes.

-scénario B: 1 opérateur et un calculateur effectuant des erreurs aléatoires

Les résultats obtenus par Terano sont présentés en figure I-1 (avec un intervalle de confiance à 95 %):



Les sous scénarios testés étant les suivants:

A0 : les opérateurs ne communiquent pas (isolés)

A1 : on demande aux opérateurs de coopérer entre eux .

A2 : on place les opérateurs en compétition (jeux à 2 joueurs)

B0: le calculateur et l'opérateur sont isolés (i.e. l'opérateur ,ne connaît pas les résultats du tirage aléatoire)

B1: le calculateur est moins fiable que l'opérateur .

B2: le calculateur a la même fiabilité que l'opérateur .

B3: le calculateur est plus fiable que le calculateur .

Ces différentes expériences ont été reprises avec des variantes: les résultats diffèrent essentiellement par la façon d'ajuster les taux d'erreurs relatifs des deux participants ,on peut retrouver assez aisément les constatations qualitatives évoquées au paragraphe précédent.

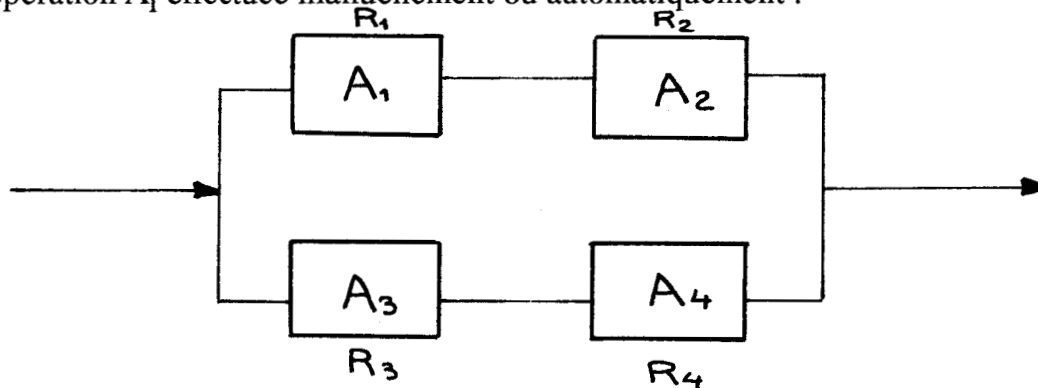


On introduit ,dans un scénario donné un facteur  $psf(A_i)$  (resp  $psf(B_i)$ ) qui sera supposé être *une caractéristique du couple ainsi formé dans les conditions fixées par les contraintes du scénario* .Ce facteur lié au contexte vient moduler la probabilité d'erreur et correspondra implicitement à une prise en compte des capacités de raisonnement (respectivement d'adaptativité) de l'opérateur dans une situation donnée .

Ce facteur sera supposé inférieur à 1 et assimilé à un nombre flou. Le résultat de la multiplication de la densité de probabilité par ce facteur donne donc une densité de possibilité au sens de la théorie des sous-ensembles flous [KAU 72].

Ce facteur interviendra donc essentiellement dans l'évaluation de la fiabilité associée à une combinaison de tâches partagées entre calculateur et opérateur,certaines étant effectuées en parallèle .

Exemple: soit le schéma d'exécution suivant où  $R_i$  représente la fiabilité de l'opération  $A_i$  effectuée manuellement ou automatiquement :



si  $R$  représente la fiabilité globale nous avons : $R = (R_1 \wedge R_2) \vee (R_3 \wedge R_4)$

On retrouve ainsi une forme classique de composition des fiabilités avec changement des opérateurs de conjonction et disjonction.

Si  $R_1, R_2, R_3$  sont effectuées par l'opérateur , $R_4$  par le calculateur ,la possibilité globale pourra être représentée par une relation du type suivant (entre nombre flous):

$$R = b \prod_1 R_i + (1-b) [1 - \prod_1 (1-R_i)]$$

Ce que nous interprétons en disant que l'opération résultante doit,pour tenir compte des capacités de prise en compte du contexte externe de l'opérateur être considérée comme intermédiaire entre l'union et l'intersection .

On introduit ainsi une opération intermédiaire entre la mise en série (au sens du schéma de fiabilité) et la mise en parallèle.

Ce modèle est plus adapté à délimiter les études de fiabilité, dans le cas d'un schéma de couplage hommes /machines complexe,qu'à fournir un cadre de mesure adéquat permettant d'effectuer des prévisions (étant données les suppositions fortes à effectuer pour supposer constants les facteurs de forme dans des contextes "identiques").

## I-2 Modèles d'observateur idéal en environnement aléatoire

Ces modèles sont issus de la théorie de l'estimation et ont été par la suite intégrés dans des modèles plus complets ( de type OCM). Ils ont conduit à des modèles de détection de pannes ou d'alarmes et d'estimation de performance de l'opérateur dans des tâches de supervision.

### I-2-1 Théorie de l'estimation et modélisation de l'opérateur

L'objectif de ces modèles est une prise en compte des incertitudes (bruits) agissant sur le système dynamique Homme/Machine. Nous l'exposons dans le cas d'un système linéaire (cadre le plus souvent utilisé) et en choisissant une représentation sous forme de variables d'états.

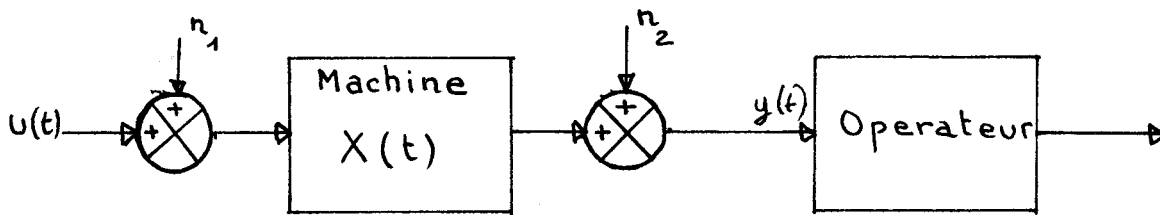


Figure I-2 Modèle d'observateur idéal en environnement aléatoire.

Trois types de bruits sont envisagés :

sur les entrées : M1

sur la mesure: M2 (bruit de perception)

sur les paramètres : M3 (bruit de modèle interne de l'opérateur)

Nous désignons par:

$U(t)$  : le vecteur des entrées; dim = r

$Y(t)$  : le vecteur des observations; dim = m

$X(t)$  : le vecteur d'état; dim = n ordre du système

$X$  résume les connaissances "appries" par l'opérateur utilisées pour l'estimation de la sortie.

On distingue alors : (le système est supposé étudié à des temps discrets)

L'équation d'observation  $Y(t) = g(X(t), t)$

sous forme récurrente  $Y_n = g(X_n)$

L'équation d'évolution mise sous forme récurrente

$$X(t+1) = \Psi_n(X(t), U(t))$$

N.B. : L'hypothèse d'observabilité est le plus souvent implicite pour la partie déterministe de ces modèles. i.e. on suppose que l'observation étant faite sur un

horizon  $T$ ,  $\forall t_0 \in [0, T[ \exists t_1 \in [0, T] t_1 \geq t_0$

t.q.  $X(t_0)$  se calcule à partir des  $Y(t)$  et  $U(t)$  sur  $[t_0, t_1]$ .

Pratiquement, quand cela n'est pas le cas, l'opérateur ne peut se contenter d'observer  $Y(t)$  pour déterminer "ce qui se passe dans la machine".

En supposant le système linéaire :

$$\begin{cases} X(t+1) = A_t X_t + B_t U_t \\ Y(t) = C_t X_t \end{cases}$$

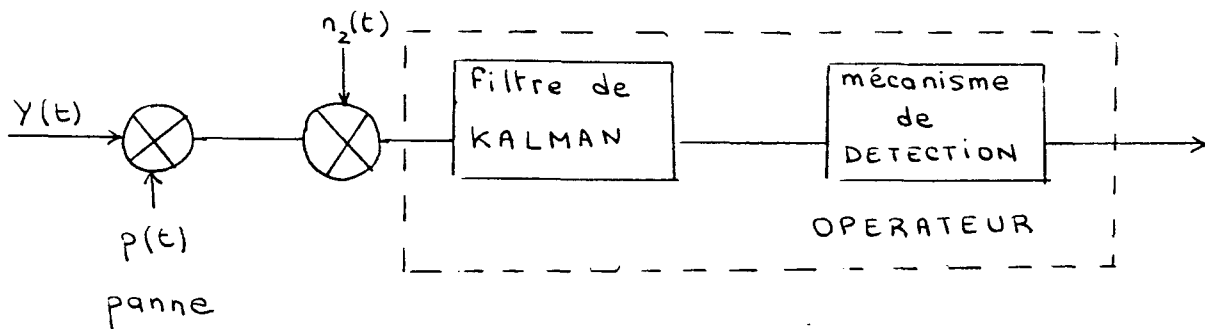
Exemple d'application

Modélisation d'un opérateur dans une tâche de détection de panne.

La tâche allouée à l'opérateur est de détecter, en observant la sortie  $Y$  l'arrivée d'une panne; on suppose que l'effet de la panne se traduit par une fonction  $P(t)$  s'ajoutant à la sortie:

$$Y_m(t+1) = C \cdot X(t) + P(t) + n_2(t) \text{ l'observation modifiée}$$

Gai et Curry (GAI 76) ont proposé en se servant du modèle précédent un schéma de type :



Comme en psychophysique classique (loi de Weber-Fechner) on suppose la variance du bruit de perception proportionnelle à la variance du signal "visualisé".

Le mécanisme de détection suppose que l'opérateur base sa décision sur le résidu du filtre de KALMAN (Processus d'innovation)

$$\tilde{Y}(t) = Y(t) - \hat{Y}(t/t-1)$$

l'observateur détecte en fait un changement de moyenne.

La fonction de décision utilisée à l'instant T est :

$$\tilde{F}_d(T) = \sum_1^T (\tilde{Y}(t) - \Theta/2)$$

pour un saut  $\Theta > 0$

Applications où ce modèle a été effectivement utilisé :

- détection d'erreur de contrôle d'un pilote suite à un échelon de position ou de vitesse .
- supervision d'un atterrissage .
- détection de pannes franches sur un processus .

## 2- Modèle stochastique de type O.C.M.

Ce modèle a été étudié initialement comme représentation d'un système pilote/avion en boucle fermée .Il se base sur un comportement de l'opérateur entraîné considéré comme un contrôleur optimal au sens de la théorie de la commande .

On établit donc la correspondance suivante :

Afficheurs <-----> matrice d'observation du système

Opérateur <-----> contrôleur

Processeur <-----> estimateur de Kalman + Prédicteur d'état X.

Les limitations humaines sont prises en compte par:

- un seuil de perception (fonction des caractéristiques ergonomiques du poste .
- un générateur de bruit à l'observation .
- un retard pur .

Une fonction  $f_i$  de l'attention de l'opérateur est supposée allouée à la  $i^{\text{ème}}$  variable à contrôler .

L'action manuelle est représentée par un système du premier ordre .L'action est choisie pour minimiser un coût, fonction de X et de  $f_i$  .Le modèle est décrit sur la figure I-3.

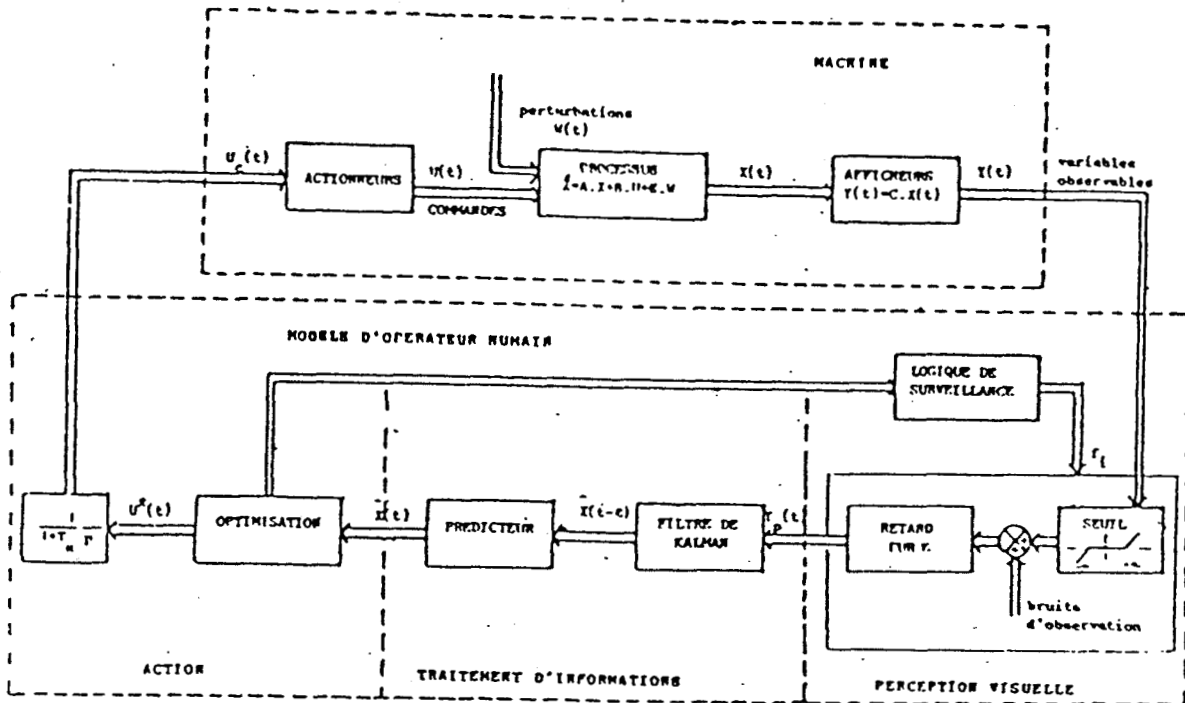


fig.I-3 Modèle O.C.M.

N.B: ce modèle, bien adapté à l'étude de la conduite manuelle monoopérateur [BAR 73], a pu être étendu au cas multiopérateurs en tenant compte d'un modèle d'interaction de type psychologique (modèle PROCURU [PEW 82]).

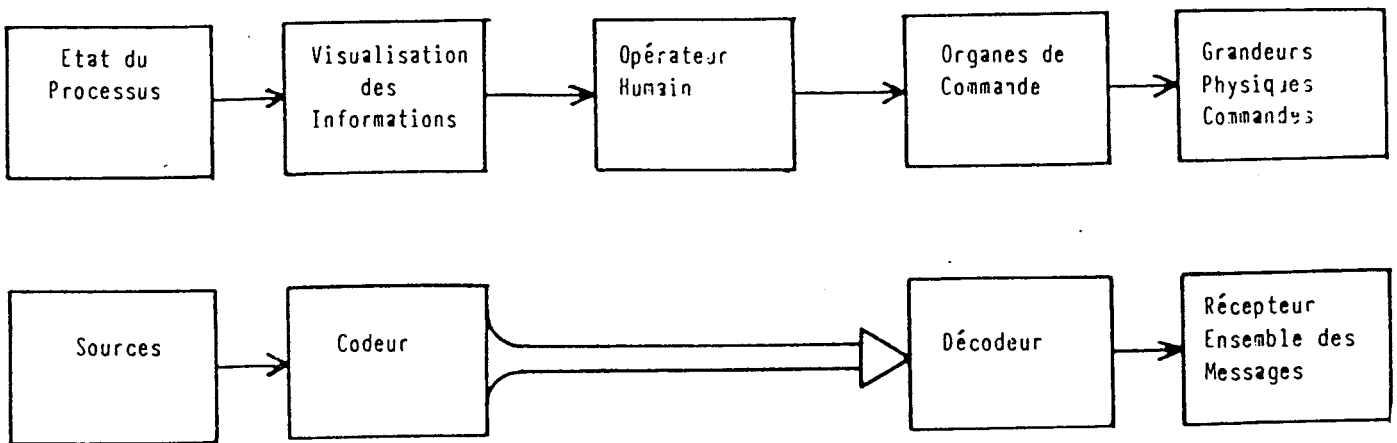
### I-3 Modèle du type "Traitement de l'information"

#### I-3-1 Approches informationnelles.

Dans cette approche, l'opérateur humain, sous certaines hypothèses de stationnarité et de linéarité, est assimilé à un canal de traitement de l'information. Ceci permet une analyse globale des échanges d'informations dans des tâches de pilotage.

Des travaux conduits actuellement au centre d'automatique de Lille, visent à l'utilisation de celles-ci pour une utilisation adaptée des différents canaux de transmission de l'information dans une station de travail intégrée multimédia. A terme, ceux-ci conduisent, en téléopération, à des postes de travail à reconfiguration dynamique (voir au Chapitre IV le lien avec le modèle SUPERWOMAN )

Formellement on établit donc l'analogie suivante :



*figure I-4 Analogie opérateur = codeur.*

Les erreurs apparaissent :

- lors du CODAGE MACHINE (bruit de fond des capteurs, bruit d'interpolation de quantification, erreurs d'étalonnage)
- lors du CODAGE OPERATEUR: la tâche est trop complexe ou dense, l'état psychologique de l'opérateur varie...On résume l'ensemble par un bruit additif gaussien.
- lors des opérations de décodage correspondantes.

### I-3-2-Application à l'analyse d'une tâche de pilotage .

A partir d'une analyse ergonomique de la tâche de pilotage (par exemple : approche ILS), nous voulons comparer les canaux d'information des chaîne de commande (par exemple longitudinale et latérale d'un avion).

En faisant varier les conditions de turbulence et par simulation de pannes moteurs on modifie la difficulté de la tâche. On peut ainsi tracer les courbes critère de qualité de la tâche en fonction du rendement du canal (voir définitions Annexe 1).

Les tracés font apparaître des zones correspondant à des modes de pilotage distinct.

- de défaillance
- à forte charge
- à faible charge
- de travail normal

Ceci peut être repris en téléopération et permet de déterminer grossièrement les zones de travail "à risque". Dans ces différentes zones il est ensuite nécessaire de fixer

une limite de capacité en dessous de laquelle le canal de communication sera considéré en panne pour la tâche en cours.

### I-3-3 Objectifs de sécurité.

Nous précisons la notion d'objectif de sécurité introduite au chapitre précédent en la définissant comme la probabilité de confusion  $q$  entre les ordres transmis, elle doit être inférieure à un seuil  $\Theta_s$ , appelé objectif de sécurité.

Ceci suppose le choix d'un code correspondant, tenant compte de la valeur éventuellement sémantique non déterminée par l'analyse informationnelle.

EX :  $\Theta_s = 10^{-10}$  dans le pilotage d'engins de transports. On peut rapprocher la fixation de ce seuil de la discussion du chapitre I sur celle des risques acceptables.

On en déduit en particulier [OUA 86] une inégalité entre le nombre de bits  $n$  des mots du code et le nombre  $m$  des bits d'information.

La sécurité du code peut être améliorée en utilisant des algorithmes du type Jelinek ou Earley [QUI 82]; c'est ce qui est fait en particulier dans certains systèmes de dialogue en langage naturelle.

### I-3-4 Temps de traitement et quantité d'information.

Un dernier résultat, utile dans l'étude de la sécurité, concerne la relation entre le temps de (traitement/décision) et la quantité d'informations. Beyaert et Malvache [BEY 79] ont montré que celle-ci était bien représentée par une fonction linéaire par morceaux:

$$TR = C1 + HC2 \text{ si } H > 3 \text{ bits}$$

$$TR = C'1 + HC'2 \text{ si } H < 3 \text{ bits}$$

Ce modèle peut servir de base dans la construction d'un répartiteur optimal d'informations en supervision

Millot [MIL 87,89] a proposé d'utiliser, pour la modélisation du système Homme/Machine l'approche de Levis et Boetcher [BOE 82]. Celle-ci consiste à considérer un ensemble hiérarchisé d'équipes de décideurs en interaction mutuelle, chacun d'eux étant "à rationalité limitée".

Une coordination informationnelle est réalisée au niveau du système Homme/Machine à l'aide d'un répartiteur d'information TT délivrant les informations d'entrée ( $X1, X2$  dans le cas d'un système à opérateur et machine uniques) à partir de l'information globale  $X$  (figure I-5)

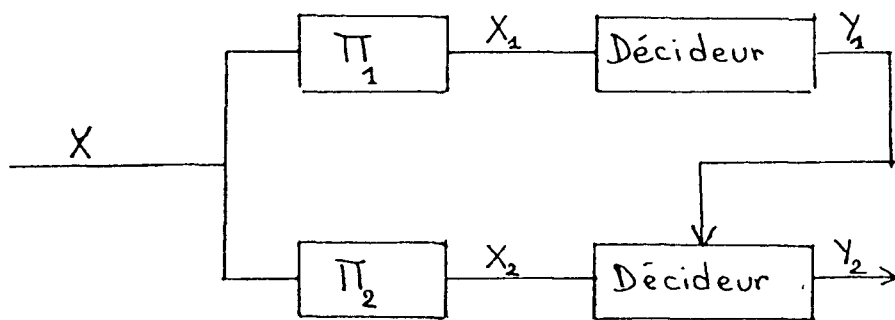


Figure 1-5

Le décideur 1 fournit, à partir de  $X_1$  une procédure  $Y_1$  qui est reprise comme commande par le décideur 2 qui à partir de  $X_2$  et  $Y_1$  délivre la procédure  $Y_2$

L'information totale traitée dans le modèle  $i$  ( $i1,2$ ) est décomposée sous la forme :

$$G_i = G_{ti} + G_{bi} + G_{ni} + G_{ci}$$

selon la méthode proposée par Conant [CON 76]

$G_{ti}$ : information transmise

$G_{bi}$ : information non transmise (perdue ou bloquée)

$G_{ni}$ : bruit d'entrée (ajoutée à  $G_{ti}$ )

$G_{ci}$ : coordination, information mutuelle entre les différents sous-systèmes du modèle

Le "raisonnement" (rationalité) limité du décideur  $i$  est déterminé à partir du temps de réponse  $TR_i$  et de l'information transmise selon la formule:  $TR_i = C_{i1} + C_{i2}$   
 $G_{ti} < T_m$  avec

- $C_{i1}$ : constante caractéristique de l'opérateur  $i$ .
- $1/C_{i2}$ : taux de transmission de l'information (bits/s).

$T_m$  = temps moyen entre 2 informations envoyées à  $i$ ; en tenant compte de la remarque initiale ce modèle suppose un  $C_{i2}$  correspondant à l'opérateur humain différent suivant que:  $G_{ti} <$  ou  $>$  à 3 bits/s.

N.B.: en posant  $C_{i1}/C_{i2} = G_{bi} + G_{ni} + G_{ci}$  la contrainte s'exprime par :  $G_i < T_m/C_{i2}$

Ce modèle est à la base de méthodes de répartition dynamique des tâches en supervision des processus industriels [MIL 87]. On utilise les évaluations précédentes pour commander un répartiteur optimal d'information (en l'occurrence des alarmes, une partie étant visualisée à l'opérateur, l'autre étant traitée par le système de contrôle-commande).

N.B.: Les modèles précédents ne permettent pas aisément de prendre en compte les résultats, maintenant classiques en psychologie, sur les processus de reconnaissance des



formes : l'analogie du Pandemonium (démons spécialistes coopérants) nous donnera, dans le paragraphe suivant, une modélisation imagée simple des processus neuronaux dont nous partirons pour "justifier" certains points de notre approche. Il est à noter que certaines notions associées, tableau noir, démons spécialistes ont maintenant trouvé application en intelligence artificielle.

Nous rappellerons d'abord une extension de ce modèle, à notre connaissance due à Boy, introduisant la distinction entre modélisation situationnelle et procédurale (I-4), puis nous construirons notre modèle au I-5, prenant explicitement en compte la répartition (modèle en réseau situationnel). Ceci nous permettra d'une part de mieux situer notre approche, d'autre part de mettre en évidence certaines difficultés d'implémentation.

#### I-3-4 Traitement de l'information en reconnaissance de formes : le modèle du PANDEMONIUM (ou du tableau noir).

Préambule: l'analyse du fonctionnement du système nerveux ([NOR 80],[CHA 83]) montre l'existence de cellules nerveuses qui semblent avoir des fonctions spécialisées et extraient de façon sélective les *caractéristiques* des signaux sensoriels (segments d'une certaine orientation, angles, mouvements, couleurs).

En "remontant" dans la hiérarchie des cellules jusqu'au centres cervicaux l'analyse des caractéristiques devient plus explicite dans la description des signaux auxquels ils répondent.

Le modèle classiquement utilisé pour décrire le processus de reconnaissance de formes sous jacent est celui de l'appariement de gabarits : pour chaque forme il existe une représentation interne ou gabarit ; pour reconnaître un signal il "suffit" de le comparer à ce gabarit.

Pour tenir compte de la nature multiforme du processus d'extraction de caractéristiques conduisant à cet appariement, il est commode d'utiliser le modèle du Pandemonium introduit par Selfridge [SEL 59].

Ce modèle utilise des processeurs virtuels spécialisés, les démons, chacun d'entre eux accomplissant une tâche différente en vue de la reconnaissance de la forme : dans le cas d'une reconnaissance visuelle nous aurons par exemple :

- des démons dits "de l'Image": qui enregistrent les signaux issus de l'image.
- des démons des Caractéristiques : répondant à une caractéristique donnée
- des démons Cognitifs : responsables de la reconnaissance d'une forme spécifique
- des démons de la Décision : qui choisissent le démon cognitif ayant la réponse la plus forte.

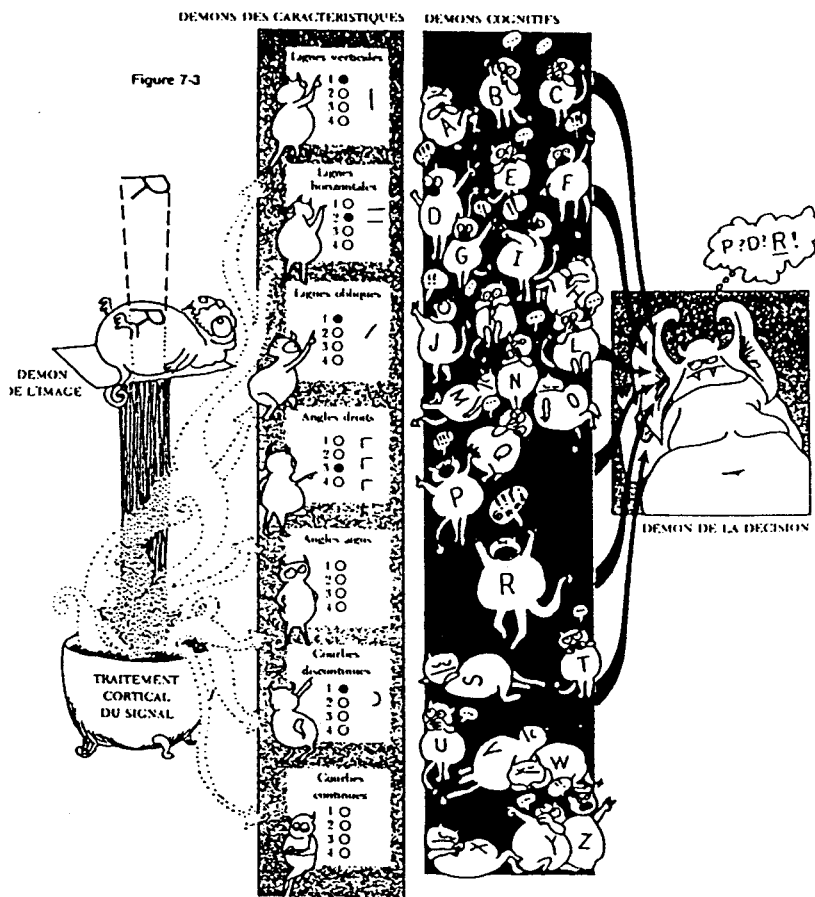


Figure I-6: Reconnaissance des formes et Pandemonium

Prise en compte des erreurs

Celle-ci peut être effectuée sur une classe de formes à reconnaître (caractères...) en établissant expérimentalement la matrice de confusion [KIN 66]

EX: la matrice de confusion indiquée par les caractères.

Conf(P,R) donne le nombre de fois où le caractère P a été reconnu comme étant R

Il est à noter qu'en général, cette matrice n'est pas symétrique, certains signes étant plus facilement reconnus que d'autres.

I-3-5 Contexte, traitements dirigés par données et dirigés par concepts :

Le schéma décrit précédemment, ne permet pas de tenir compte de l'attente, c'est à dire du rôle actif joué par la recherche des formes en fonction de la connaissance générale du contexte, de l'organisation des événements courants que nous avons pu mémoriser. Ces attentes orientent les étapes d'analyse à tous les niveaux.

Pour tenir compte de ce phénomène, il est nécessaire d'introduire :

- des démons spécialistes du contextes et des attentes

- un schéma de communication:

*N.B: Un schéma de communication généralement introduit à ce niveau est celui du Tableau noir les démons agissent de façon indépendante les uns des autres et "communiquent" en allant chercher les informations ou en écrivant le résultat de leur analyse sur un Tableau Noir ("base de données communes" à l'ensemble des démons).*

L'ensemble des activités des démons sur ce tableau nécessite une COORDINATION particulière : celle ci est assurée par un SUPERVISEUR (directeur du tableau) qui est en fait un démon spécialiste chargé de résoudre les conflits d'accès au tableau. Le fonctionnement de ce superviseur est en fait analogue à celui régissant l'accès à des ressources utilisées en temps partagés en informatique.

#### I-4-Modélisation situationnelle et procédurale.

Le modèle proposé par Boy pour les systèmes de type Message [BOY 88] est un développement du modèle de traitement de l'information de Newell et Simon .

L'opérateur est modélisé sous la forme d'un superviseur gérant trois types de canaux (processus bidirectionnels):

- de réception
- d'émission
- cognitifs

Ceux-ci assurent la liaison avec l'environnement réel .

Ce modèle est essentiellement destiné à modéliser les processus de reconnaissance de situation. En effet un canal cognitif est un tampon utilisant la mémoire à court terme de l'opérateur associée à :

- un résolveur de problèmes .
- un reconnaisseur de situation
- un activateur procédural de mode.

On suppose que la mémoire à court terme contient plusieurs sous-ensembles des faits perceptibles classés en deux parties:

- la première constituant la situation perçue par l'opérateur
- la seconde la situation désirée .

Un pattern situationnel caractérise la situation attendue par l'opérateur. Il y a appariement des faits perçus aux patterns avec choix le cas échéant du candidat le plus fréquemment rencontré.

Les faits sont représentés sous forme d'un ensemble de couples :  $(v_j, TF_{i,j})$

avec  $v_j$ : variable numérique ou logique .

$TF_{i,j}$  : fonction de tolérance appréciant le degré de confiance à accorder à la valeur de la variable  $j$  dans la situation  $i$  .

## I-5- Modélisation proposée: le réseau situationnel hommes/machines.

La modélisation proposée généralise celle donnée au paragraphe précédent et donne une représentation satisfaisante du système effectivement implanté pour gérer les activités du système Homme/Machine. Celle-ci a été établie par analogie avec la modélisation générale des systèmes répartis, telle qu'elle est utilisée en téléinformatique [MAC 87].

Nous définirons pour cela:

Une activité : ensemble cohérent d'actions élémentaires organisé dans la poursuite d'un but défini

Une entité : les actions élémentaires sont exécutées par des entités

Ces 2 notions recouvrent la notion de processus utilisée en informatique la définition de l'activité est réursive, une activité pouvant être considérée comme entité de niveau supérieur pour une autre activité.

Pour tenir compte du parallélisme on considérera également l'activité comme le résultat des actions d'un ensemble d'entités coopérantes. Celles-ci utilisent une collection évolutive dans le temps de ressources partagées .

A l'activité unique dont le but incluerait l'utilisation optimale des ressources physiques on substitue la technique suivante : l'ensemble de l'activité du réseau de relations Homme/Machine est décomposé en activités élémentaires; on introduit des activités d'allocation de ressources qui ont pour but de distribuer, d'allouer les ressources aux activités qui en ont besoin.

Les activités consommatrices utilisent donc des ressources virtuelles affectées dynamiquement à des ressources physiques par les activités d'allocation. Ces ressources virtuelles peuvent être simples ou composées d'activités et d'entités, elles mêmes réelles en virtuelles : le processus d'allocation s'effectue donc simultanément à plusieurs niveaux.

Cette description correspond mieux aux situations que nous rencontrerons en téléopération, ou l'affectation simple Homme ou Machine n'est pas suffisamment fine.

*La COOPERATION GENERALE entre entités est ramenée à un ensemble de coopérations (et donc d'interfaces) élémentaires entre couple d'entités : nous définissons ainsi un protocole de coopération, c'est à dire un ensemble de relations entre les différentes entités de l'activité, exprimées par ces contraintes d'interface.*

Dans les cas pratiques que nous rencontrerons, la coopération sera de type Réseau général, chaque entité étant en relation avec un certain nombre d'autres entités sans qu'il soit possible, de façon simple de décomposer l'ensemble des relations impliquées.

Très peu d'outils pratiques permettent de décomposer une activité en réseau (en téléinformatique par exemple, on évite ce type d'organisation sauf pour l'acheminement dynamique de paquets d'information) : une structuration en couches permet d'encapsuler les activités, la coopération s'effectue au travers d'interfaces à différents niveaux.

Nous pouvons ainsi interpréter certains cas limites :

- Le partage Homme/Machine dichotomique correspond à la situation dite de dipôle, considérée comme atome de base de pour la constructions des structures plus élaborées.L'interface externe de ce dipôle est unique .

- Le partage Homme/Machine ou supervision par un opérateur d'un ensemble de Machines, correspond à une structure de type étoile : la coopération s'effectue entre une entité centrale (l'opérateur) et des entités satellites. Celle-ci est l'analogie de la multiprogrammation informatique et peut se ramener au cas du I-3-2-1.

- Enfin une chaîne complexe d'interactions Homme/Machine peut se décomposer en une cascade de dipôles (cette dernière possibilité que nous n'avons pas utilisée effectivement, permettrait de considérer des reroutages d'activités en cas de panne).

Après ce premier exposé situant le cadre général de notre approche,nous allons maintenant étudier et comparer le modèle de représentation proposée par rapport aux modèles multiniveaux conduisant également à une approche globale de la sécurité hommes/machines.Ceci nous amènera à déterminer les complémentarités entre approches.

## II MODELES MULTINIVEAUX

Le but de ce paragraphe est de montrer comment,on peut recoller les modèles précédents.La discussion des méthodes exposée sera poursuivie au paragraphe III pour les classifications de dysfonctionnements s'en déduisant.

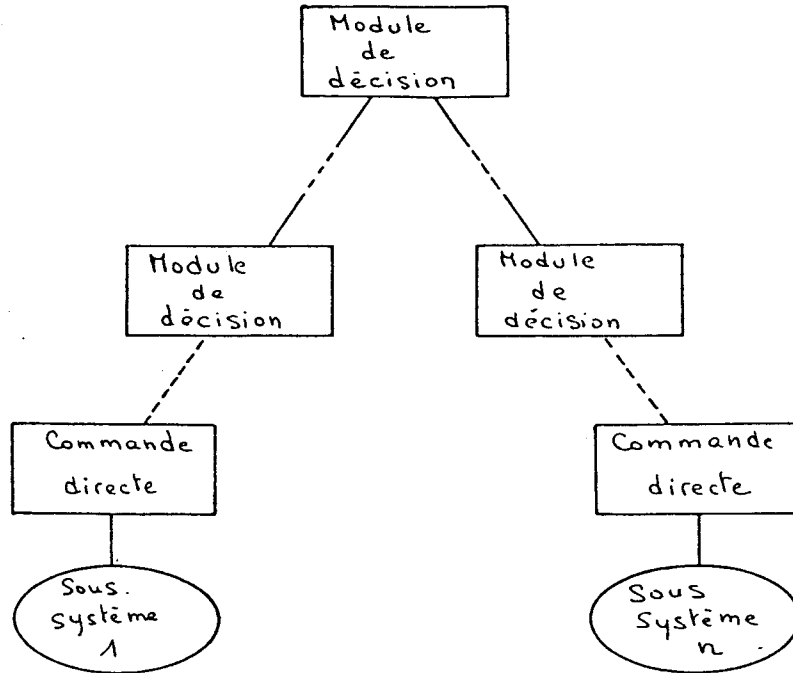
### II-1- Un modèle informatique:les grammaires emboîtées.

Saridis [SAR 85 ] introduit ce modèle comme schéma général de décomposition applicable à tous les niveaux de la hiérarchie de commande en utilisant la théorie des langages formels. Il s'agit là, à notre avis, d'un modèle opératoire, bien adapté à la description des comportements procéduraux du système homme/machine.

Le principal avantage de cette approche est de donner à la fois un cadre théorique permettant de décomposer le système, et un ensemble d'outils (pour la plupart dérivés des compilateurs de langages associés) pour en synthétiser la commande.

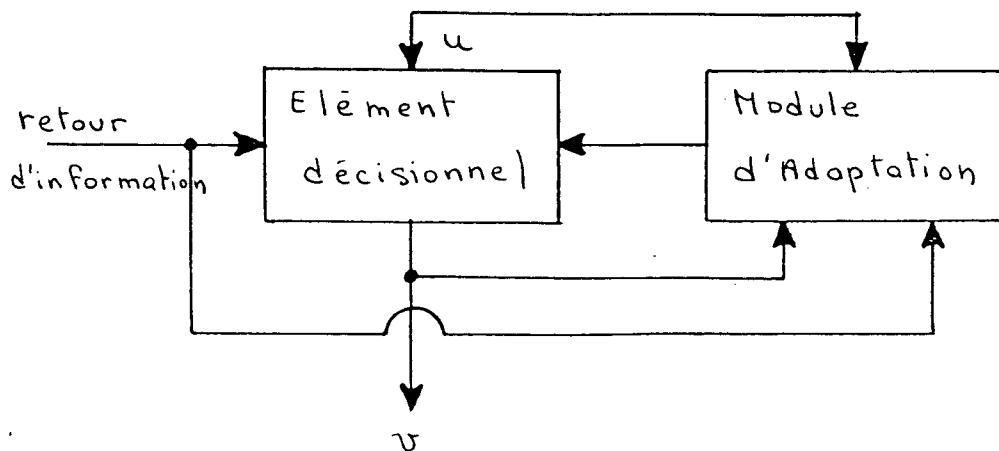
N.B.: une généralisation au cas des grammaires floues a permise à Saridis de tenir compte de possibilités de pattern matching et donc de modéliser des comportements situationnels.

Le schéma général est le suivant :



*Figure II-1: Modèles de Saridis.*

Chacun des modules précédents est représentable par un ensemble de règles de réécritures (ou de production) permettant la décomposition d'une commande de niveau  $n+1$  en une séquence de commandes au niveau  $n$ , en utilisant les informations disponibles à ce niveau suivant le schéma de la figure II-2 ci-dessous:



*Figure II-2: interpréteur de commandes.*

Un tel module réalise donc l'interpréteur entre les deux langages au niveaux  $n$  et  $n+1$ , le module d'adaptation étant constitué de métarègles permettant la modification des grammaires utilisées dans les modules interpréteurs.

La généralité de ce modèle a été essentiellement utilisé par Saridis pour générer des modèles de contrôleur non linéaires, ou auto-adaptatif, dont la méthode de génération précédente assure la réalisabilité.

On voit également que ce modèle permet, via l'introduction des règles de production d'utiliser des outils issus de l'IA (moteurs d'inférences) qui réaliseront les compilateurs associés à ces langages .

Nous croyons utile de conserver les deux approches (d'ailleurs équivalentes) par construction de langages et par décomposition à base de règles. Cela nous permettra d'envisager des stratégies mixtes combinant des techniques issues de la recherche opérationnelle ( que l'on pourrait qualifier de power based) et de techniques à bases de connaissances (knowledge-based) .

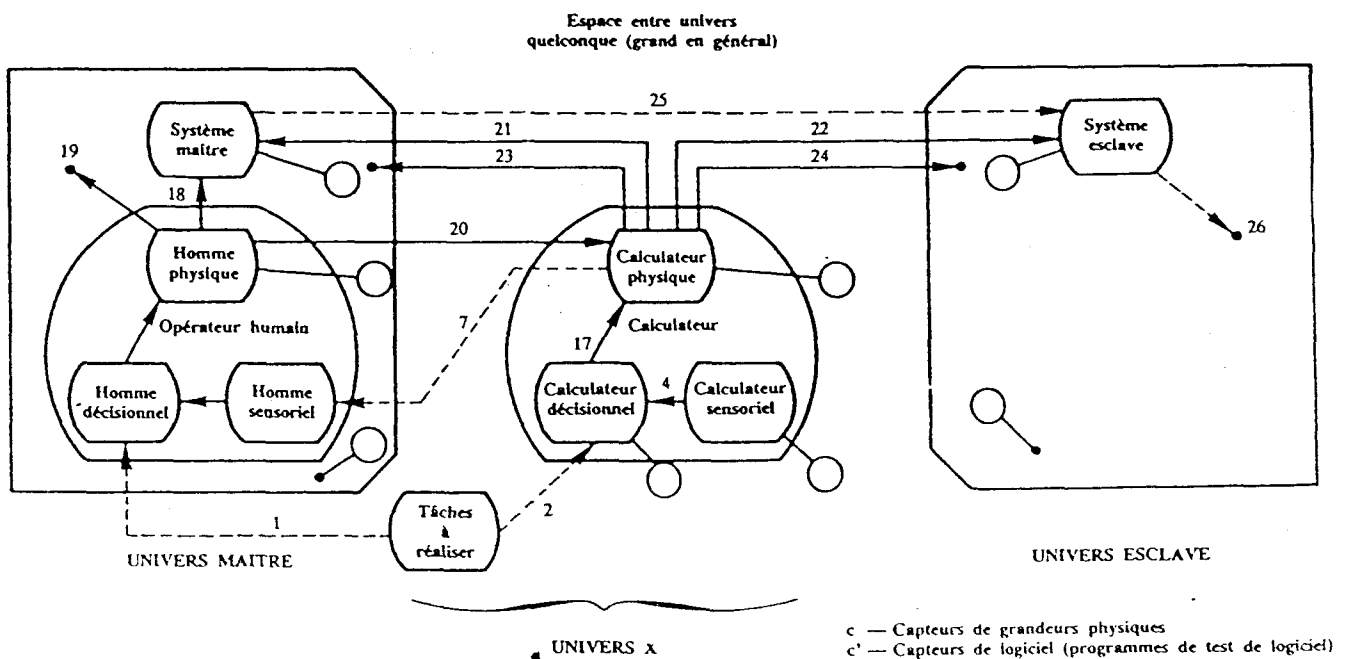
N.B. nous retrouverons donc ainsi une proposition d'utilisation de méthodes des deux types avec selon le cas utilisation d'un langage procédural permettant cet emboîtement (forth) et une simulation suggérant la stratégie mixte évoquée précédemment .

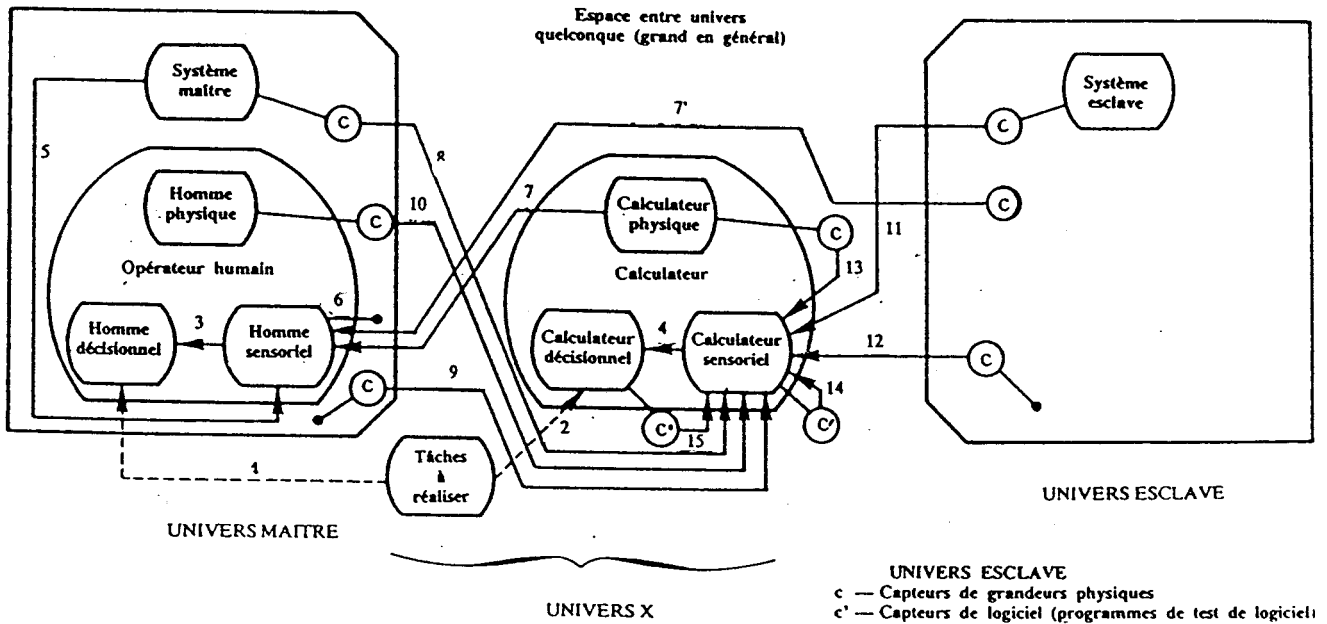
## II-2- Modèle de TAO de Coiffet.

Celui-ci met plus particulièrement en évidence:

- les blocs fonctionnels intervenant dans un système de TAO
- les relations entre sous-modèles symétrisés opérateur/machine.

Le but est de souligner qualitativement les relations entre l'univers maître et l'univers esclave en TAO (figures II-3 et II-4), en faisant apparaître explicitement les relations de médiatisation introduites par le calculateur. Ce modèle élaboré essentiellement au cours des projets Spartacus et ARA permet de représenter dans diverses situations de TAO (i.e. en fonction de l'éloignement temporel ou spatial entre ces univers comment certaines relations structurelles vont se trouver privilégiées.





*figure II-3 et II-4: Modèle de T.A.O de Coiffet.*

Si, d'un point de vue général, nous définissons la notion de mode comme caractérisant un état des liaisons structurales, le problème est donc d'établir le réseau de communication le mieux adapté à une situation en tenant compte de contraintes sur les possibilités et l'état des canaux entre sous-systèmes physiques/décisionnel et sensoriel.

Nous pouvons également voir sur ce schéma que la complexité des chemins de circulation de l'information n'est que très peu prise en compte dans les modèles de type Saridis ou équivalent. Ceci nous a conduit à rechercher des modèles permettant une prise en compte globale de ces liaisons: ceux-ci sont exposés au paragraphe suivant.



### II-3 Modèles qualitatifs .

Les modèles qualitatifs visent à englober les modèles "partiels" en s'appuyant sur une représentation de la démarche de résolution de problème utilisé par l'opérateur.

Le modèle de base de cette approche est du à Rasmussen; celui-ci a eu l'idée de décomposer l'activité de résolution de problèmes en quatre strates de traitement de l'information .

On retrouve ainsi les trois types de comportement (implicitement contenu dans les boucles de sécurité exposées au chapitre I):

- **TACTIQUE** (ou skill-based) :ce comportement réflexe ou quasi-réflexe concerne les étages bas et sera bien décrit par des modèles de type automatique .

- **PROCEDURAL** (ou rule-based) :ce comportement sera bien décrit par l'activation de procédures pré-définies mémorisées dans la mémoire à long terme de l'opérateur et que celui-ci "évoque".

- **STRATEGIQUE** (ou knowledge-based):appliquées dans des situations inconnues ou des comportement de type heuristique pourront être observés.

Ce modèle, que nous allons maintenant développer, est plus connu sous le nom d'arche de Rasmussen .

#### II-3-1 Arche de Rasmussen .[RAS 81]

Un processus de décision est représenté selon une décomposition séquentielle multiétapes,éventuellement court-circuitables,:

-d'**ACTIVATION** :détection d'alarmes, ou d'événement anormal

-d'**OBSERVATION** des données.

-d'**IDENTIFICATION** de l'état du système .

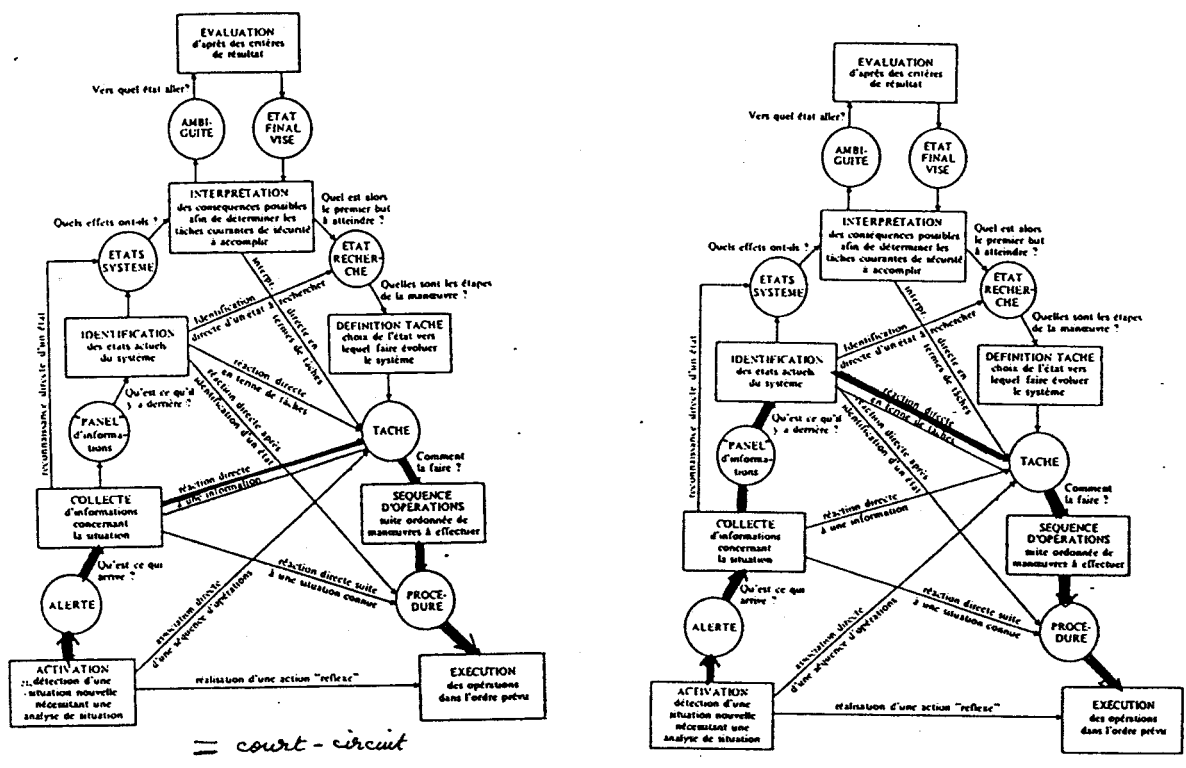
-d'**INTERPRETATION**:prédictions, évaluation des alternatives

Celles-ci constituent les branches de l'arche ,qui se lit en remontant de l'alarme vers le "cerveau" pour le traitement de l'information ;l'autre branche redescend l'arche en traduisant une stratégie globale en exécution de tâches élémentaires .

Les échelles de temps se resserrent du haut vers le bas tandis que les niveaux de détails eux croissent .(figII-5)



L'étude de la sécurité homme/machine se basant sur ce schéma, s'intéressera essentiellement aux possibilités de court-circuits, ceux-ci correspondent à des messages entre entités de décomposition d'action / de perception à des niveaux différents de la hiérarchie



Une classification des erreurs humaines basée sur ce modèle sera présentée au paragraphe III-1.

N.B.: Le nombre de niveaux considéré correspond au nombre minimal permettant d'analyser le comportement de l'opérateur.

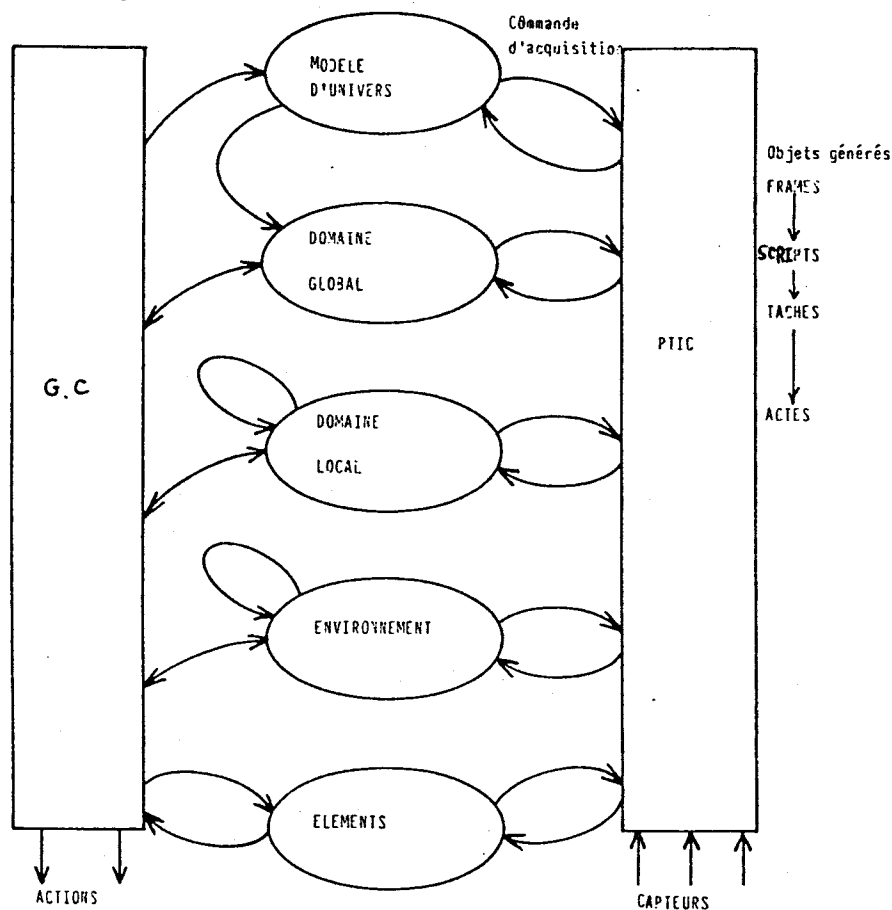
II-3-2 Modèle qualitatif de Hess.

Parmi les multiples variantes du modèle de Rasmussen proposées dans la littérature, nous avons été amenés dans la suite de nos travaux à proposer un modèle proche de celui de l'«école de Hess [HES 87]»; celui-ci introduit une description sous forme de hiérarchie implicite qui permet de mieux articuler les différents modèles utilisés en TAO.

De façon plus précise, le modèle de Hess met en évidence les passages d'information entre les deux branches de l'arche de Rasmussen. Pour cela sont introduites les notions de:

- générateur de comportement (G.C) qui correspondrait à la branche gauche de l'arche.
- processus de traitement de l'information capteur (PTIC)
- modèle interne (ou modèle "d'univers"): celui-ci permet d'explicitier les comportements d'anticipation de l'opérateur; il ne figure pas explicitement dans le modèle de Rasmussen.

Ces 3 blocs constitutifs sont reliés entre-eux par des procédures de décomposition qui, à chaque niveau, en utilisant l'information agrégée provenant du niveau précédent, effectuent la décomposition de la tâche de niveau n en sous-tâches de niveau n + 1. (figure II-8).



N.B.: une représentation géométrique de l'évolution de l'état du système sur chacun de ces niveaux consiste à considérer que celui-ci suit une trajectoire qui vue à l'instant t appartient à un cône ( la prédiction faite par l'opérateur est de plus en plus imprécise à mesure que l'on s'éloigne de l'instant d'observation . )

Les erreurs ,suivant ce modèle proviendront donc:

- d'une mauvaise décomposition (par exemple due à une fausse anticipation)
- de l'activation d'un acte, d'une tâche, d'un script ou d'un scénario suivant le niveau mal adapté à cause d'une imprécision trop importante des données .

Ce modèle, très général n'a pas été associé pour le moment à une méthode de représentation informatique adaptée.

N.B.: Cette présentation présentera de plus l'avantage d'une extension aisée pour des utilisations futures à base de connaissance (à partir de méthodes comme KOD proposée par Vögel [VOG 88]).

### III- CLASSIFICATION DES "ERREURS HUMAINES"

Les paragraphes précédents nous ont permis de situer des modèles de systèmes Homme/Machine intégrant, à différents niveaux, la notion de sûreté de fonctionnement.

Parallèlement à cette formalisation, il est nécessaire de disposer d'outils d'analyse a posteriori des accidents, permettant d'effectuer le recalage entre ces représentations et la réalité observée.

Les systèmes de classification que nous allons présenter dans ce paragraphe fournissent ces outils sous forme de grilles d'analyse permettant une approche efficace, et dans certains cas quantifiée des erreurs humaines.

#### III-1 Systèmes de classification à but descriptif

Parmi les nombreux types de classification proposés par les chercheurs ou les organismes de normalisation s'occupant de sécurité industrielle, celle de Rasmussen et [RAS 81] permet de tenir compte de l'évolution rapide du niveau d'automatisation et se fixe un but d'aide à la conception. Elle résulte d'un consensus multinational (France/Danemark/Italie) et a été motivée par les réflexions ayant succédé à la catastrophe nucléaire de Three Miles Island. Elle vise à identifier les catégories de problèmes à résoudre en priorité.

Remarque préliminaire de Rasmussen :

Il est nécessaire de proposer une classification séparant nettement :

- les erreurs spontanées de l'opérateur dues à sa variabilité propre
- les comportements "normaux" de celui-ci, confronté à une situation extérieure anormale ou à un changement de la situation de travail.

Cette remarque élimine, a priori, les méthodes basées essentiellement sur l'analyse des erreurs temporelles, des omissions sans référence explicite aux causes extérieures ayant pu les entraîner.

Elle doit être rapprochée des remarques que nous avons faites sur la nécessité d'une analyse contextuelle des conditions de travail. Elle sera approfondie au chapitre 3.

Il est donc nécessaire de déterminer une procédure décrivant ce qui a précédé et succédé la "faute" : pour cela Rasmussen propose une approche non hiérarchisée, à plusieurs facettes, suivant la figure III-1. (Si le contenu explicite des "faces" dépend, évidemment, de la situation de travail évoquée, la structure et la non indépendance des faces demeure néanmoins constante).

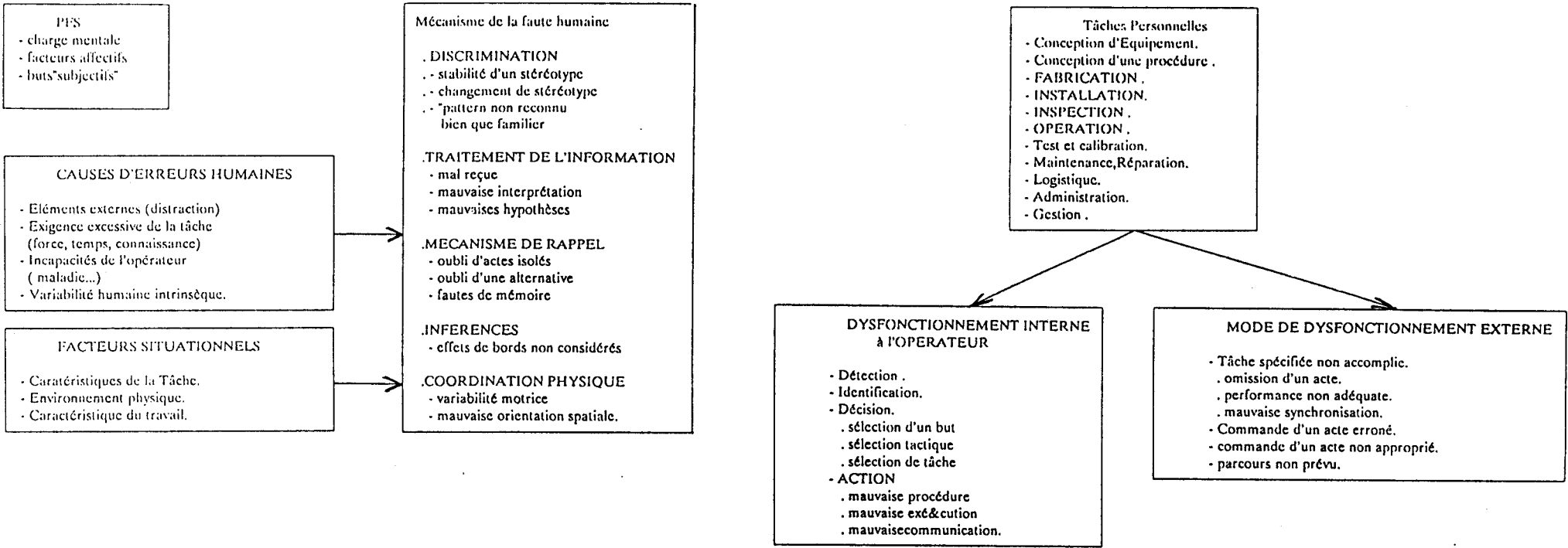
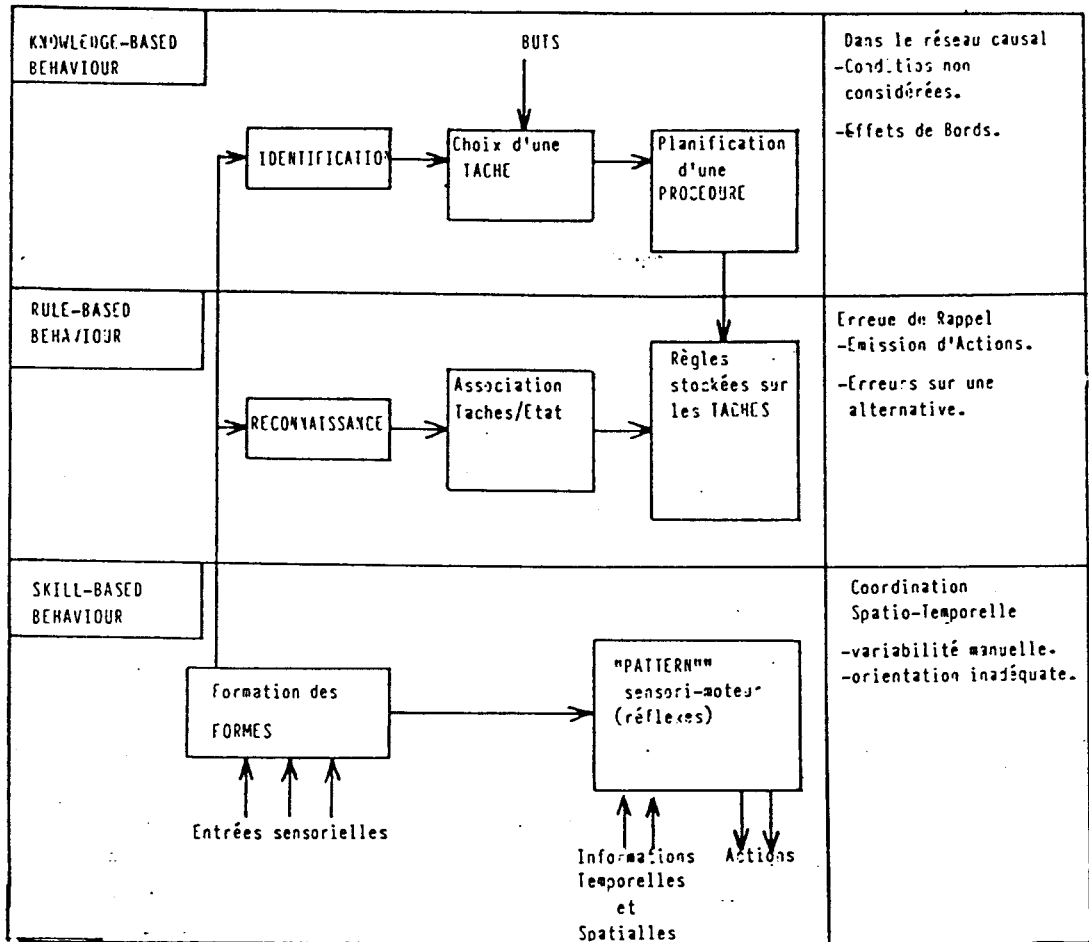


TABLEAU III-1 : TAXONOMIE MULTIFACETTES POUR LA DESCRIPTION ET L'ANALYSE DE SITUATIONS OU SE PRODUIT D'ERREUR HUMAINE ( (RAS 80)).

Celle-ci se relie à son modèle général suivant la figure III-2



III-2 Classification de ROUSE

S'appuyant sur la démarche précédente Rouse [ROU 83] propose de scinder le schéma de classification en 2 catégories:

- l'une ORIENTEE COMPORTEMENT : qui distingue les procédures à caractère général au sein desquelles l'erreur se produit.

- l'autre ORIENTEE TACHE : qui prend en compte les caractéristiques locales associées aux décisions ou actions erronées.

La figure III-3 résume le modèle conceptuel sous jacent et présente l'articulation des 2 classifications.

CATEGORIES GENERALES	CATEGORIES LOCALES	DEFINITIONS COMPLEMENTAIRES
<p>OBSERVATION DE L'ETAT DU SYSTEME</p> <pre> graph TD     A{PROBLEME EVIDENT?} -- oui --&gt; G[CHOIX D'UNE PROCEDURE]     A -- non --&gt; B[CHOIX DES HYPOTHESES]     B --&gt; C[TEST DES HYPOTHESES]     C --&gt; D[CHOIX D'UN BUT]     D --&gt; G     D --&gt; E[CHOIX D'UNE PROCEDURE]     E --&gt; F[EXECUTION DE LA PROCEDURE]   </pre>	<p>1a) excessive  1b) mal interprétée  1c) incorrecte  1d) incomplète    1e) inappropriée    1f) inexistante    2a) inconsistant  2b) consistant mais improbable  2c) consistant mais coûteux  2d) fonctionnellement inadapté    3a) incomplet  3b) acceptation de fausses hypothèses  3c) rejet de bonnes hypothèses  3d) manque d'hypothèses    4a) incomplet  4b) Incorrect  4c) non nécessaire  4d) manque    5a) incomplète  5b) incorrecte  5c) non nécessaire  5d) manque    6a) oubli d'un pas  6b) répétition d'un pas  6d) pas hors séquence  6e) mauvais séquençement  6f) position incorrecte  6g) incomplet  6h) niveau incorrect  6i) action inappropriée.</p>	<p>revérification abusive de variables correctement lues  mauvais traitement  mauvaise lecture  nombre de variables insuffisant  variables observées inadéquates  pas d'observations    n'interprète aucune variable    non relié aux variables observées.    conclusions non atteintes    hypothèses non testées    spécification incomplète</p>



Le but d'une telle classification est de mettre en évidence à la fois le comportement type d'un opérateur pilotant le système dans différentes situations (Normales, d'urgence, de crise) ceci permet par exemple de constater une évolution d'un comportement de type PATTERN MATCHING à un comportement avec application de règles ; mais aussi ceci permet une analyse fine des conditions d'arrivée de la faute permettant en retour d'agir :

- soit sur la conception du poste lui-même (en totalisant par exemple les fautes d'une catégorie générale donnée correspondant à un aménagement de poste donné

- soit de suggérer des améliorations des conditions d'apprentissage des pilotes destiné à remédier à des fautes locales fréquentes.

Cette approche suggère également l'intérêt de déterminer fonctionnellement les exigences de l'action par rapport aux caractéristiques de l'erreur c'est ce que nous proposons le paragraphe suivant.

### III-3 Approche basée sur la structure de l'action

Parmi les nombreuses approches visant à une taxonomie de l'erreur humaine celle proposée par Dubrovsky [DUB 85] se rapproche de la façon suivante dont sera considéré dans la suite de ce mémoire le problème de la sécurité Homme/Machine.

D'abord celle-ci écarte, car trop simpliste, la dichotomie classique :

- d'un côté le respect de la norme : correspondant à un "bon comportement" ("normal" au sens propre)

- de l'autre l'erreur : correspondant à une déviation par rapport à cette norme.

Celle-ci, si elle semble au premier abord naturelle, est en fait très liée à des standards culturels (erreur = sanction) et conduit "naturellement" au problème de recueil de données lors d'un accident (ou le problème majeur est donc la recherche de la responsabilité)

Cette approche vise donc dans un premier temps à mettre en évidence une structure externe normative de l'action humaine, indissociable de son contexte socio-culturel et une structure interne, beaucoup plus complexe où l'analyse de l'erreur est considérée comme une partie de l'analyse de la performance du système Hommes/Machines.

La réduction de l'analyse de performance à une mesure artificiellement simple conduit à des processus d'erreurs, conséquences logiques à mon avis du système d'automatismes auquel l'opérateur est confronté. En particulier le fait d'accepter une mesure simple (c'est ce qui est fait par le taux d'erreur, la vitesse de réponse...) conduit à ne prendre en compte qu'une vision réduite du système Homme/Machine.

Une représentation de type fonctionnel est donc proposée (par opposition à l'approche "opérationnelle" des méthodes type MTV pour la structure interne de l'action. La taxonomie est celle de l'action et non simplement celle de l'erreur.

Cette approche générale est quantifiée en fonction du contexte .

Exemple : Dubrovsky propose ainsi:

- 4 niveaux externes

\* Normal

\* Régulier (aucune action de compensation nécessaire mais répond à des "tolérances" plus large

\* Toléré (les tolérances régulières étant dépassées, une action est engagée pour ramener le système dans des tolérances régulières ou normales)

\* Viol des tolérances ("erreur" au sens usuel)

- 11 niveaux internes (pour une tâche de manipulation)

\* Décision

\* Intention d'action

\* Ajustement de paramètres

\* Manoeuvres d'approches

\* Contact

\* Mise en route

\* Vérification interne

\* Arrêt

\* Vérification externe (bon déroulement de l'action engendrée)

\* Déconnexion

\* Eloignement

C'est donc à 44 catégories d'actions auxquelles nous sommes confrontés : un sous ensemble non forcément connexe d'entre elles dans une représentation plane étant considérée déviantes.

## Conclusion :

Les différents modèles évoqués dans ce chapitre nous ont permis de percevoir l'intérêt d'associer de façon pragmatique ,les modèles partiels issus des techniques classiques de l'ingénieur (automatique, informatique, réseaux..) avec les modèles, par essence plus flous, issus des sciences humaines (ergonomie ,psychologie, sciences cognitives..)

Une première approche, intéressante pour un modèle de représentation, est constituée par les modèles multiniveaux :ceux-ci permettent d'envisager une réduction de la précision d'expression (emploi de variables qualitatives,recours aux sous-ensembles flous) à mesure que l'on remonte la hiérarchie.

Nous leur avons préféré pour la représentation de la structure opérationnelle une structure de type réseau généralisé, permettant de mettre en évidence des liens multiniveaux dont l'importance est critique dans une situation donnée :ceci rejoint les possibilités de court-circuit dans l'arche de Rasmussen (introduits par celui-ci pour expliquer certaines situations accidentelles).

On garde ainsi les deux représentations:

- l'une hiérarchisée correspondant à cette arche.
- l'autre "à plat "représentant mieux la structure des modes coopératifs que nous abordons aux chapitres III et IV.

La première peut être vue comme une organisation des objets du modèle en réseau, suivant différentes "couches" entre lesquelles on contraint les échanges d'informations.On retrouve ainsi en situation "normale" des structures bien décrites par des grammaires transformationnelles, associables à des niveaux de langages,et en situation "pathologique" la possibilité de corrélation entre différents niveaux de langages.

## ANNEXE 1: GRANDEURS INFORMATIONNELLES CLASSIQUES

$x(t)$  représentant la grandeur physique elle-même et  $y(t)$  le signal effectivement reçu, avec  $y(t) = x(t) + b(t)$   $x(t)$  et  $y(t)$  sont des processus aléatoires

$b(t)$ : bruit additif de "transmission"

On définit alors :

-l'entropie  $H(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_x(x) \log_2 p_x(x) dx$  (idem pour  $y$ )

-l'entropie conditionnelle  $H_{X|Y} = - \iint p(x,y) \log_2 p_{Y|X}(y|x) dx dy$

$p_{Y|X}$  : densité de probabilité conditionnelle de  $Y$  connaissant  $X$

$P(x,y) = P_Y(x) P_X(y)$  si  $x$  et  $y$  indépendants

-l'information mutuelle  $I(X,Y) = \iint p(x,y) \log_2 \frac{P(x,y)}{P_X(x) P_Y(y)} dx dy$

N.B. :  $x,y$  indépendants implique  $I(X,Y) = 0$

$x,y$  totalement dépendants implique  $I(X,Y) = H(X) = H(Y)$

en général :  $I(X,Y) = H(X) - H_{X|Y}$

-la capacité du canal qui exprime 2 propriétés :

\* sa bande passante limitée  $[-F, +F]$

$$C_0 = \max_{P(x)} I(X,Y)$$

\* le bruit de fond auquel il est soumis

le théorème de Shannon donne alors le débit maximal d'information

N.B. : Sous les hypothèses suivantes :  $C_{bits} = 2F C_0$  (transformation)

$x$  et  $b$  sont deux processus stationnaires centrés de carrés sommables et ergodiques (ce qui permet de remplacer les moyennes d'espace par des moyennes temporelles), le bruit  $b$  est supposé indépendant du signal, gaussien et centré.

La formule de Hartley -Shannon permet de calculer  $C$  :

$$C = \int_0^F \log_2 \left( 1 + \frac{\phi_{xx}(f)}{\phi_{bb}(f)} \right) df = \int_0^F \log_2 \frac{\phi_{yy}(f)}{\phi_{yy}(f) - \frac{|\phi_{xy}(f)|^2}{\phi_{xx}(f)}} df$$

Ce débit n'est maximal que si  $x$  est gaussien et centré

Si le canal peut être considéré comme un système linéaire, le rendement :

$$\rho = \frac{C \text{ (bits/s)}}{H(x) \text{ bits/s}}$$

Dans le cas d'une variable  $x$  ne pouvant prendre qu'un nombre fini ( $N$ ) de valeurs RAULT a démontré la formule suivante :

$$H(x) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \frac{1}{2} \log_2 2\pi e + \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{N-1} \log_2 \left( \frac{2i\pi}{N} \right) - \log_2 \Delta z \right] \text{ en bits/s.}$$

avec  $\Delta z$  pas d'échantillonnage de l'appareil de mesure

et  $\frac{2\pi}{N}$  seuil fréquentiel.

## ANNEXE 2- DUPLICATION DES PROCESSEURS ET SECURITE

Nous décrivons dans cette annexe quelques unes des méthodes de tolérance par duplication de calculateurs utilisées dans les systèmes temps-réel. Cette présentation sommaire est destinée essentiellement à rappeler certaines contraintes (de synchronisme en particulier), que nous retrouverons au chapitre 3. Nous l'avons établi essentiellement à partir de [LEC 77] et [LAP 89].

### I Méthodes de Duplication entre 2 "calculateurs" A et B

#### I-1 Le DUPLEX

En situation normale A effectue l'ensemble des traitements B fait d'autres tâches dont le test régulier de A. Lorsque A tombe en panne B provoque le basculement.

#### I-2 Le Synchronisme

A et B font le même travail et contrôlent leurs résultats grâce à un organe de contrôle externe C.

Si un désaccord est détecté par C des programmes de test sont lancés sur A ou B pour déterminer qui est en faute et le retirer. A un instant déterminé l'un seulement des 2 est "actif".

Cette méthode est utilisée sur la quasi totalité des commutateurs électroniques mais aussi a été utilisé pour les programmes MERCURY, GEMINI et APOLLO.

#### I-3 Le partage de trafic

On équilibre la charge de A ou de B, les 2 calculateurs se testent régulièrement et travaillent de façon quasi-indépendantes (en "Macro" - synchronisme). Des méthodes de partage adaptatives sont décrites au Chapitre 3 (II-3)

#### I-4 Le partage de fonctions.

Les 2 calculateurs sont nécessaires pour traiter une activité complète.

ex : A effectue les relations avec l'environnement

B effectue les analyses et traitements

A et B travaillent en Multi-traitement et plus en Multiprogrammation sur des mémoires communes.

Ce partage peut être statique ou dynamique.

La seconde solution permet d'accroître la sécurité grâce à la supervision dynamique allouant les ressources : ceci conduit à des structures polymorphes adaptatives.

### II COMPARAISONS

Bien qu'aucune structure ne puisse être considérée comme "la meilleure" étant donnée la nature multicritère du problème posé (sécurité - maintenance - performance - coût) on peut néanmoins remarquer que :

II-1) La sécurité à la détection des fautes est obtenue par partage de trafic ou par partage de fonctions avec allocation dynamique : ceci explique l'importance donnée dans la suite de la thèse à ce type de méthodes. Celles-ci correspondent à des solutions "économiques".

II-2) La reconfiguration est obtenue par partage de fonction avec allocation dynamique, au prix d'une complexité de programmation accrue. De plus celle-ci permet aisément de développer une approche modulaire.

II-3) Par contre l'approche par synchronisme, plus simple permet une rapidité de réponse qui la font préférer lorsque les contraintes temps réel sont élevées.

**CHAPITRE III : METHODOLOGIES MULTICRITERES ET PARTAGE DES  
TACHES HOMME/MACHINE**



## I- POSITION DU PROBLEME : SEGMENTATION DE L'ACTIVITE ET PARTAGE DES TACHES.

I-1. Analyse du travail : tâches et activité.....	p3
I-1.1. Définitions.....	p3
I-1.2. Conditions d'obtention.....	p4
I-2. Méthodes d'analyse de la tâche en téléopération.....	p5
I-3. Classification des actes et téléaction.....	p6
I-4. Aptitudes comparées Homme/ Machine.....	p8
I-5. Modèle d'allocation de fonctions de Price et Rijnsdorp.....	p9
I-6. Complexité de la tâche et sécurité.....	p10

## II-APPROCHES CLASSIQUES DE L'ALLOCATION DE TACHES HOMMES/MACHINES.

Remarque préliminaire.....	p12
II-1. Coopération horizontale ou verticale.....	p13
III-2. Répartitions dynamiques implicites ou explicites.....	p15
II-3. Allocation de charges dans le réseau de communications Hommes/Machines ...	p16
II-4. Modes mixtes et allocation des tâches dans les systèmes "à dilemme".	p17

## III- SECURITE HOMME/MACHINE ET METHODOLOGIES MULTICRITERES.

III-1. Aides à la décision: Attitudes opérationnelles.....	p18
III-2. Problématiques d'aide à la décision.....	p22
III-3. Apport des méthodes d'agrégation de préférence.....	p23

## IV- METHODOLOGIE PROPOSEE.

IV-1. Choix et évaluation des critères.....	p25
IV-2. Construction de la méthode.....	p26
IV-3. Comparaison des méthodes.....	p31
IV-4. Construction d'observateurs du système hommes/machines.....	
IV-4.1. Modules espions "machines".....	p32
IV-4.2. Modules espions hommes.....	p34
IV-4.3. Les modules espions d'interaction.....	p35

<u>CONCLUSION.</u> .....	p38
--------------------------	-----

<u>ANNEXE:</u> Théorie des catastrophes et dysfonctionnement du système Homme/Machine.....	p39
--	-----

L'étude de la sécurité de l'interaction homme/machine se situe à la frontière de plusieurs disciplines scientifiques (psychologie, ergonomie, différentes sciences de l'ingénieur dont l'automatique etc..) entre lesquelles il est indispensable qu'elle établisse des liens.

Il est, par exemple, important pour l'automaticien de tenir compte des études ergonomiques "de terrain" lorsqu'il établit l'organisation de la commande d'un système pour nuancer les résultats qu'il établit sur la base d'une modélisation nécessairement simplifiée.

Pour cela, il lui est nécessaire de formaliser dans un langage adéquat les concepts de base utilisés en ergonomie (notions de tâche, d'action, d'activité etc..). L'idéal serait en fait qu'il puisse intégrer dans sa démarche d'analyse et de conception, certaines méthodes développées en ergonomie.

Il nous a paru approprié, pour s'attaquer à ce problème difficile de proposer une approche très pragmatique, utilisant le langage de la théorie des actes, étendu pour tenir compte des aspects spécifiques de l'analyse de la tâche en robotique et en téléopération.

Le problème d'allocation des tâches hommes/machines peut dans ce cadre être résolu en se basant sur les méthodes de décision multicritère utilisant une agrégation des préférences. Nous indiquerons ce qu'elles apportent, en particulier pour l'analyse de la sécurité du système, et nous les comparerons à des approches plus "classiques".

Nous détaillerons notre approche dans le cadre de la téléopération, en la situant par rapport aux principales méthodes d'allocation de tâches, statiques ou dynamiques, proposées dans la littérature.

Nous nous attacherons ensuite à souligner les problèmes concrets de construction et d'implantation temps réel des algorithmes associés. Ceci nous conduira à proposer des variantes utilisables dans certains domaines particuliers de la TAO.

## I-POSITION DU PROBLEME : SEGMENTATION DE L'ACTIVITE ET PARTAGE DES TACHES.

### I-1 Analyse du travail:tâches et activité.

#### I-1.1 Définitions

J.M. HOC [HOC 87] désigne par tâche, un but associé à des conditions d'obtention (ou contraintes).

De façon assez proche, nous définirons une tâche comme un segment de l'interaction entre un contrôleur et son environnement, à l'issue de laquelle il est possible de prononcer ou non un verdict de bonne exécution.

*Remarques importantes.:le contrôleur généralise la notion d'opérateur humain. Il modélise un ou plusieurs opérateurs physiques (le cas échéant, de façon récursive, d'autres contrôleurs), liés entre-eux par un réseau de communications. Ceci permet de mettre en évidence plusieurs niveaux d'interaction hommes/machines chacun d'entre eux se ramenant à l'étude de l'interaction d'un contrôleur et d'une machine virtuelle (à un niveau donné d'abstraction, fixant implicitement celui où l'étude de sécurité hommes/machines nous intéresse). Par abus de langage nous appellerons homme ce contrôleur, et machine cette machine virtuelle; nous parlerons ainsi, lorsqu'aucune ambiguïté ne sera à craindre, de sécurité homme/machine).*

*A chaque niveau correspond un niveau de description des tâches et donc des contraintes qui sont, pour partie, fixées par les niveaux supérieurs. Un opérateur humain, comme une machine physique, peut le cas échéant intervenir à plusieurs niveaux distincts.*

*N.B.: les opérateurs physiques, capteurs et décisionnels de Ph. Coiffet et J. Vertut évoqués au chapitre II, correspondent à une telle "décomposition" de l'opérateur. Nous proposons simplement dans ce cas de faire correspondre l'opérateur à un arrangement quelconque de ces trois opérateurs virtuels, ce qui permet d'éviter certaines ambiguïtés dans l'interprétation des études résultant de ce choix.*

La spécification d'une tâche comprend celle :

- des paramètres fondamentaux de l'implantation.
- des conditions initiales.
- d'une période d'interaction.
- d'un niveau de performance au delà duquel la tâche sera considérée exécutée.

Une activité (ou conduite) sera la réalisation effective d'une tâche (une instance de celle-ci).

Ceci nous permet de distinguer 2 notions indispensables dans la description des expérimentations sur des systèmes homme-machine:

- *le comportement* : partie observable de l'activité; son étude fait l'objet des modèles proposés au chapitre précédent.

- *les régulations* : partie inobservable de l'activité dont l'existence est inférée pour rendre compte de singularité du comportement. Ce terme étant employé en psychologie dans un sens différent de celui usuel aux automaticiens, nous éviterons son usage dans la suite lorsque cela pourrait entretenir une ambiguïté.

### I-1.2 Conditions d'obtention.

Nous en distinguerons de 3 types:

- 1- Sur l'*état initial* et éventuellement certains états intermédiaires.
- 2- Sur les opérations élémentaires admissibles qui formeront le *dispositif* associé à la Tâche.
- 3- Sur la *procédure* utilisée pour mener à bien la tâche.

Il faut d'autre part distinguer entre:

- tâche prescrite (ce qui est assigné à l'opérateur).
- tâche effective (ou réelle ou opérationnelle).

Cette distinction, que l'ergonomie a révélée, justifie l'introduction de méthodes d'analyse spécifiques, permettant d'établir des correspondances contextuelles entre ces deux types de tâches.

## I-2 Méthodes d'analyse de la tâche en téléopération.

Peu de méthodes d'analyse de tâche ont débouché sur des applications concrètes en robotique et téléopération. En effet, les méthodes classiques (analyse taylorienne, interrogatoires, analyse des micromouvements de GILBRETH, systèmes QSK, MTM ou ASME), ont été essentiellement développées et sont utiles pour une analyse ergonomique de postes de travail existants (i.e. en ergonomie de correction). Celles-ci s'avèrent limitées pour la conception de nouveaux dispositifs impliquant des changements radicaux dans les méthodes de travail utilisées.

Une analyse plus précise du processus d'élaboration de la tâche s'avère donc nécessaire.

En s'inspirant des notations introduites dans [LIE 76] nous considérerons le couple  $P = \langle E, F \rangle$  avec:

$E =$  ensemble  $\{e_i\}$  des états successifs de l'environnement sur lequel on agit .

$F =$  fonctions caractéristiques des opérations ,i.e. des transitions d'états  $e_n \rightarrow e_{n+1}$ .

La tâche est modélisée par la séquence finie  $(f_i)_{i=1 \text{ à } n}$

L'étape de spécification du système robotisé peut ainsi conduire à la mise en évidence de nouvelles fonctions opératoires associées à un ensemble (matériel + logiciel + méthodes de mise en oeuvre). Les méthodes d'analyse fonctionnelle évoquées au chapitre I (type SADT) permettent dans un premier temps de déterminer, lors d'une étude préalable ces nouvelles fonctionnalités.

*Exemple : l'étude globale du système effectuée suivant la procédure du chapitre I montre l'importance critique de la communication homme/machine. Lors d'une phase de découplage /recouplage d'un mode manuel vers un mode automatique celle-ci détermine la sécurité associée et doit donc être détaillée plus finement.*

*Cette phase peut être soit envisagée globalement, soit décomposée de la façon précédente, en s'appuyant si cela est possible sur une étude ergonomique préalable des interactions pendant celle-ci. L'étude de cette phase ne peut donc se ramener à l'application d'une méthode générale "de découplage", indépendante du contexte où elle serait mise en oeuvre (ce qui serait par exemple le cas si nous recherchions une équation de découplage permettant le passage d'un mode à l'autre).*

*En effet, si l'analogie avec d'autres branches de l'automatique (ex: changement de mode de commande de deux mobiles après établissement entre eux d'un lien fixe) pourrait conduire à ce type d'approche théorique, l'absence de modèle précis de l'opérateur humain réduirait la portée des résultats obtenus.*

*Prenons le cas d'une opération "à deux mains" de type suivi de surface automatique avec recouplage sur échec de contournement d'obstacle. Nous supposons que l'analyse fait apparaître les phases suivantes (associant commande et communication):*

*- recalage automatique du bras esclave sur le bras maître (RAEM), avec supervision et interaction de l'opérateur par boîte à boutons pendant l'exécution (BB).*

*- pilotage en mode manuel (maître esclave généralisé dans le sens explicité plus loin au chapitre 4 : CMEG) avec commande des dispositifs annexes (caméras, réglages d'affichages..) par commande vocale (CV) ou boîte à boutons.*

- supervision en mode automatique de suivi (MAS) avec possibilité pour l'opérateur d'utiliser la commande vocale pour les dispositifs annexes et l'arrêt d'urgence situé sur la boîte à boutons .

Nous modélisons la situation précédente en associant modes de commande et modes de dialogue et en déterminant les fonctions opératoires à réaliser.

Le but est ensuite de pouvoir contrôler l'enchaînement des modes obtenus suivant les phases successives de la tâche à accomplir, ce qui revient à déterminer les séquences du type:

*RAEM-CMEGCV-RAEM-CMEGCV-CMEGBB-MAS-RAEM.*

Cet exemple fait apparaître plusieurs besoins nouveaux spécifiques à la téléopération :

- le couplage entre modes de communication et modes de commande doit être fort (ceci revient à reconnaître un problème spécifique de sécurité de l'interaction homme/machine indissociable de celui de la commande ).

- l'enchaînement de ces associations doit respecter des contraintes et être cohérent et sûr (vis à vis de critères globaux propres à la tâche ).

Le premier point sera abordé plus particulièrement au chapitre IV.

Nous allons donner au deuxième point un sens plus précis en introduisant les notions d'actes et en proposant une classification de ceux-ci.

### I-3 Classification des actes et téléaction.

Une action (ou acte) sera définie comme un déplacement dans l'espace modifiant l'environnement extérieur du système hommes/calculateurs.

Celle-ci ne sera pas forcément élémentaire (actome) et il convient donc le cas échéant de préciser le degré de finesse dans la décomposition à effectuer (granularité).

*N.B.:La théorie des actions de Moles [MOL 77] a également mis en évidence deux oppositions fondamentales entre:*

(a) *Actions collectives ou isolées*

(b) *Actions proches ou lointaines*

Les actes sont classés suivant leur plus ou moins grande automaticité en trois catégories que nous associons de la façon suivante aux boucles de sécurité examinées au chapitre I:

1) Les actes réflexes (boucles de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> espèces, des efforts et de sécurité immédiate ) où:

- aucune décision n'intervient à un haut niveau.

- la perception associée est réduite (situations pouvant conduire à l'hypoattention pour lesquelles il s'agira de maintenir la vigilance).

2) Les actes quasi-déterminés (intervention essentielle des boucles de 3ème espèce ou tactiques) où:

*Le bilan des avantages à court terme est favorable (ceci supposant une utilité statique optimisée pendant leur réalisation).*

*N.B.: Il faut une décision pour ne pas les exécuter, celle-ci visant à tenir compte d'un intérêt stratégique à moyen ou à long terme dans l'exécution de la tâche globale.*

3) Les actes équilibrés (intervention simultanée des boucles des 4 espèces )

La différence entre utilités et coûts généralisés est inférieure à un seuil d'incertitude, ce qui peut conduire à des discontinuités du comportement observable sous l'effet de perturbations faibles.

*N.B.: Une interprétation du dysfonctionnement du système homme/machine par une singularité due à l'existence d'une "tension de décision" est proposée en annexe.*

Une modélisation plus précise de la structure fonctionnelle du système homme/machine est nécessaire : elle correspond à ce que nous appellerons dans la suite mode coopératif.

L'utilisation d'actes d'un de ces 3 types en téléaction nécessite l'utilisation de canaux de communication de débits très différents. Il est donc d'un intérêt pratique évident de déterminer a priori le types d'actes qui seront mis en oeuvre sur un dispositif donné, pour dimensionner correctement le système de communication de celui-ci. Réciproquement une fois ce système déterminé, les possibilités de celui-ci déterminent les types de mode de commande utilisables.

Si ceci peut paraître évident pour la téléopération spatiale, où l'on pense immédiatement aux canaux de communication limités utilisables, il est par contre moins évident d'en tenir compte lorsque la mesure de la capacité du canal est moins directement accessible. Ce sera par exemple le cas lorsqu'on utilise un retour par camera, et que celui-ci puisse être sujet de perturbations diverses (réduction de débit, diminution de netteté...) comme en téléopération sous-marine ou lors d'opération sous microscope.

*N.B.: "sécurité" dans une chaîne d'actions*

*La sécurité d'un acte A sera définie comme l'ensemble  $\{SA_i\}$  des actes pouvant remplacer A dans la réalisation de la phase en cours. On supposera implicitement que l'acte A choisi à l'instant t est celui correspondant à un "coût généralisé" minimum qui sépare le graphe des actes potentiels en un noyau d'"actes optimum" et en un ensemble d'actes que nous dénommerons "de sécurité".*

*Nous verrons que cette dichotomie est conservée dans l'analyse multicritère que nous proposons au II après remplacement de la notion d'optimum par celle de surclassement .*

Si nous définissons le taux de variété d'un acte comme le nombre d'actes substituables à A à l'instant t, nous pouvons évaluer avec celui-ci le risque global associé à un acte. Néanmoins, si nous considérons la décomposition de cet acte en une suite de sous-actes, nous voyons qu'il sera possible de définir la variété à un niveau de décomposition donné en tenant compte de la combinatoire associée aux différentes substitutions de sous-actes de la décomposition.

La mesure du risque par le taux de variété est donc essentiellement relative au degré de décomposition que l'on s'autorise. De façon concrète ce niveau sera choisi sur

la base d'une attribution possible d'un sous acte à un mode de fonctionnement et dépendra donc des modes disponibles.

On peut, de façon immédiate, énoncer trois principes à la fois triviaux et fondamentaux de sécurité dans une chaîne d'actions:

1) Tout acte doit être explicité dans chacun de ses constituants.

(Ceci constituera l'étape dite de préparation de la tâche).

2) Tout sous acte doit être contrôlé dans son exécution avant le passage au sous acte suivant.

Ce contrôle pourra ou non être automatique: l'automatisme d'une tâche peut être évaluée en déterminant à quel niveau de la décomposition s'effectue le contrôle automatique.

*N.B.: Le mode mixte que nous détaillons au paragraphe II-5 rend ce contrôle automatique dans le cas restreint où les sous actes se séparent en deux catégories (manuels et automatiques).*

3) Certains actes élémentaires doivent être verrouillés, i.e. ne doivent être réalisés qu'après avoir vérifié la fin d'une séquence d'autres actes .(Condition de synchronisation "classique "d'activités parallèles).

La vérification de la cohérence des chaînes vis à vis de la sécurité repose sur ces trois axiomes. En particulier, l'utilisation sûre de langages facilitant les extensions par chaînage (comme les "threaded interpreted languages "de type FORTH) exige de les considérer comme règles de base. Chacun d'entre-eux pourra faire l'objet de traitements spécifiques.

*Exemple: le troisième fait appel à une validation du programme parallèle qui, dans le cas général est impossible. Des techniques appropriées peuvent néanmoins être appliquées permettant de valider certains points considérés comme critiques . On ne cherchera pas à valider l'ensemble de la programmation d'une opération de démantèlement mais on voudra simplement vérifier que dans aucun cas la pince, après saisi d'un objet ne puisse s'ouvrir . Ce problème difficile a reçu une solution élégante dont nous parlerons au chapitre V (par utilisation des langages synchrones et de logiciels de validation associés ).*

#### I-4 Aptitudes comparées Homme/Machine

Fitts en 1951 a eu l'idée d'établir une liste des activités où l'homme est supérieur à la machine ou vice versa [FIT51] et de s'en servir pour décider du rôle assignable à l'opérateur dans une tâche partiellement automatisée.

On peut aisément en déduire, selon le même schéma une liste analogue [LEP 82] utile du point de vue de la sécurité.

Il semble néanmoins intéressant, pour baser une allocation des fonctions Homme/Machine, de faire appel à des niveaux intermédiaires. C'est ce qui a été réalisé par Price et al [PRI85] et complété récemment par Rijnsdorp [RIJ 88] par une analyse plus fine des fonctions allouées.

Homme / Opérateur	Machine / Robot
Peut adapter sa stratégie à des situations imprévues ou très faiblement probables à priori.	Laisse la situation se dégrader jusqu'à l'accident
Comportement très sensible à son état physique et mental	Fonctionnement possible en mode dégradé
Performances : - médiocres pour des tâches répétitives - à force limitée	- très bonne pour les tâches répétitives - large gamme de force
Taux de pannes importants (oublis, erreurs, fausses manoeuvres)	
Interprète, filtre, trie des informations ambiguës ou contradictoires, noyées dans le bruit	Traite avec précision un grand nombre d'informations avec rapidité
Corrige ses pannes	Correction de pannes délicates
Extrait aisément la signification d'une information	"Intelligence" comparativement faible
Tolérant aux informations erronées	Très intolérant
Détecte intuitivement ses erreurs	Méthodes systématiques de détection
Mémoire faible et variable	Mémoire faible et importante
Organise facilement l'information de façon intuitive et informelle	Organisation formelle et détaillée

Tableau 1: Complémentarité Homme/Machine et Sécurité.

I-5 Modèle d'allocation de fonctions de Price et Rijnsdorp

En suivant l'idée de Price, on peut ainsi classer les activités en 6 types différents suivant le rôle accordé à l'homme (H) et au calculateur-machine (M):

T1 : Homme et Calculateur sont équivalents.

T2 : H a l'avantage sur M.

T3 : M a l'avantage sur H.

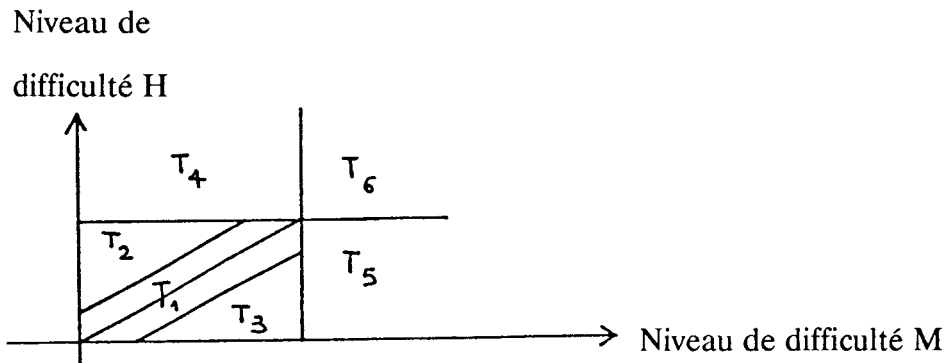
T4 : H ne peut réaliser la tâche.

T5 : M ne peut réaliser la demande

T6 : ni H, ni M ne peuvent réaliser la tâche.



On peut proposer "pour visualiser" les zones correspondantes une représentation suivant "le niveau de difficulté" pour l'homme ou la machine.



A ce modèle simple, où "il suffit" de déterminer dans quelle zone se situe la fonction à réaliser pour accomplir la tâche, Rijnsdorp adjoint les possibilités de parallélisme dans la réalisation des fonctions .

4 degrés d'automatisation peuvent ainsi être définis, que nous associerons pour notre part à :

DA1) la détection par la machine des valeurs anormales et au déclenchement d'alarmes.

DA2) l'extraction d'une information plus complète

- soit à des fins de filtrage des données avant présentation (systèmes multiseuils, détection de corrélations pour supprimer les avalanches d'alarmes, analyse multiségnal )

- soit pour mettre à jour un modèle du processus que l'homme peut consulter à sa demande (constituant ainsi une aide à la décision réduite).

DA3) l'aide à la décision étendue.

Le calculateur conseille l'opérateur, ce qui lui suppose des possibilités d'interprétation des données plus puissantes que précédemment. Les méthodes correspondantes feront le plus souvent appel à des techniques d'intelligence artificielle.

DA4) l'action automatique.

Nous nous intéressons particulièrement dans la suite à l'aide à la décision étendue.

I-6 Complexité de la tâche et sécurité.

Remarque initiale: La définition de la complexité présuppose une interaction entre un objet et un être humain [KLIR 84], elle mesure la difficulté éprouvée par celui-ci pour comprendre ou maîtriser cet objet.

Cette définition de la complexité pose des problèmes liés à la subjectivité et nous ramène directement aux problèmes d'évaluation évoqués au chapitre I. On distinguera en cela la complication de la tâche, liée au nombre d'interactions à l'intérieur du système et la complexité de celle-ci qui sera elle corrélée au nombre de sous-tâches et d'arrangements s'en déduisant pouvant conduire à l'exécution de la tâche.

globale.

La raison essentielle pour laquelle une structure de type hiérarchique est "naturellement" rencontrée dans l'organisation de leur commande tient en fait à une économie des systèmes complexes, plus précisément pour la téléopération au coût de leur fonctionnement interactif. Ce coût pourra être mesuré en puissance consommée ou dissipée dans certains systèmes ; il est plus commode pour les systèmes à forte composante décisionnelle de considérer le coût de leur organisation.

Pour un système non hiérarchisé le nombre d'interactions potentielles entre deux sous systèmes, si le nombre de sous-système est  $N$ , sera de  $N^2$ . Pour un système hiérarchisé homothétique (i.e. à chaque niveau un même nombre  $N_1$  d'éléments) ce nombre est de l'ordre de  $N_1 * N * \log N$ .

L'avantage d'une organisation hiérarchisée au niveau de la commande semble alors apparaître. Mais cette caractéristique n'est pas forcément pertinente, les interactions se propageant de niveau en niveau en faisant intervenir toute une chaîne d'éléments intermédiaires.

Une approche intéressante permettant de résoudre le problème de complexité est constituée par l'étude du réseau d'interaction que l'on recherchera pour des raisons de sécurité sans blocage.

Ce problème a été étudié depuis longtemps par les ingénieurs téléphonistes [PIP 78][MAR 77]. Une économie de ces réseaux conduit à considérer que la structure hiérarchique n'est qu'une expression commode des périodes stables du réseau. Les procédures de déroutement en cas de panne s'expriment dans la structure réticulée globale et conduisent à un nouvel équilibre avec changement des niveaux et de leurs interactions: c'est dans ce sens que nous avons voulu orienter la structure de modes telle qu'explicitée dans cette thèse.

Au sein d'un système complexe de ce type une fluctuation très faible interne ou dans l'environnement peut déclencher un mécanisme d'amplification par rétroaction en chaîne qui structure le système globalement. Il se crée ainsi des formes intermédiaires stables caractérisées par le comportement coopératif et cohérent de certains éléments du système. Un mode local sera un mode d'un sous-système parfaitement caractérisé, un mode global une forme intermédiaire stable du type précédent. L'ouverture sur l'environnement, supposé inconnu et fortement variable en téléopération oblige à une structure de commande ouverte de ce type que l'on pourrait nommer de dissipative.

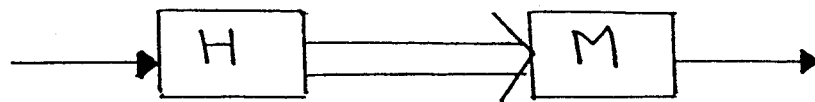
## II. APPROCHES CLASSIQUES DE L'ALLOCATION DE TACHES HOMMES/MACHINES

### Remarque préliminaire

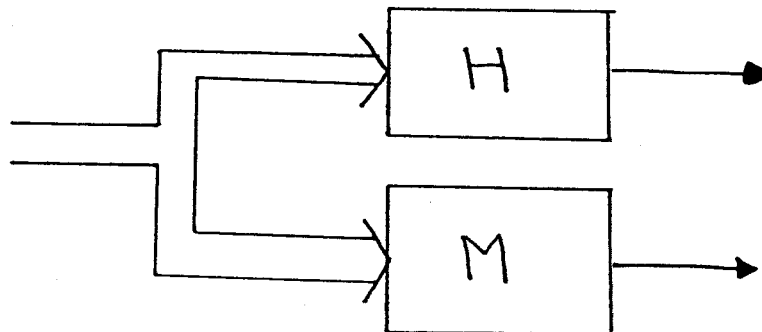
Divers modes de couplages peuvent être utilisés pour modéliser la constitution du système homme/machine. On supposera, de façon classique que les 2 sous systèmes Homme et Machine sont quasi isolés (interaction externe au problème supposée dans un premier temps négligeable), que leurs entrées-sorties sont compatibles et ce qui est plus restrictif, que ce couplage ne modifie pas, tout au moins structurellement les lois de fonctionnement de chacun d'eux.

On distingue alors 2 principaux types de couplage:

a1) le couplage en série.



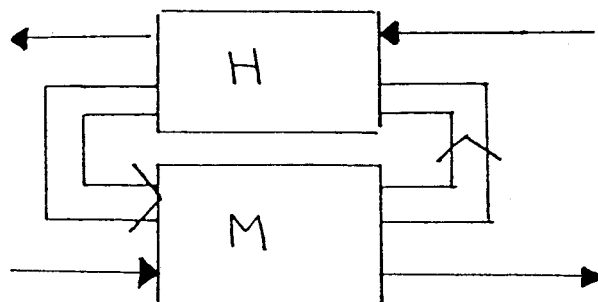
a2) le couplage en parallèle.



Par superposition de ces 2 cas on peut obtenir 2 nouveaux types de couplages

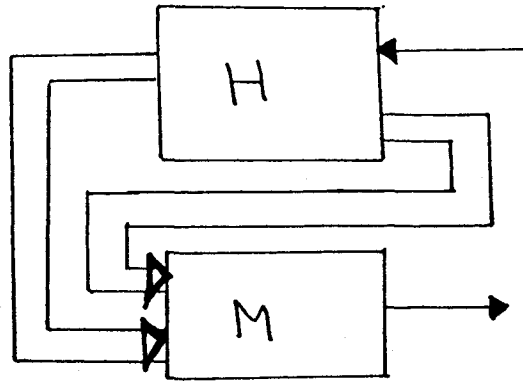
b1) le couplage par RETROACTION

(2 couplages en série)



## b2) le couplage par INTERACTION

(1 couplage en série, 1 couplage en parallèle)



Nous nous plaçons dans la suite dans le cas b2 en remarquant que b1 et b2 correspondent à 2 types différents de CAUSALITE:

La "causalité circulaire" pour b1: l'effet résulte d'une ou plusieurs causes et agit en retour sur cette cause, cause et effet finissant par jouer un rôle symétrique (avec décalage temporel)

La "causalité multiple" pour b2: l'effet résulte de causes multiples, certaines causes pouvant être conditionnées par d'autres (ce que nous retrouverons dans la non indépendance des critères): le problème essentiel est d'étudier la complémentarité des causes.

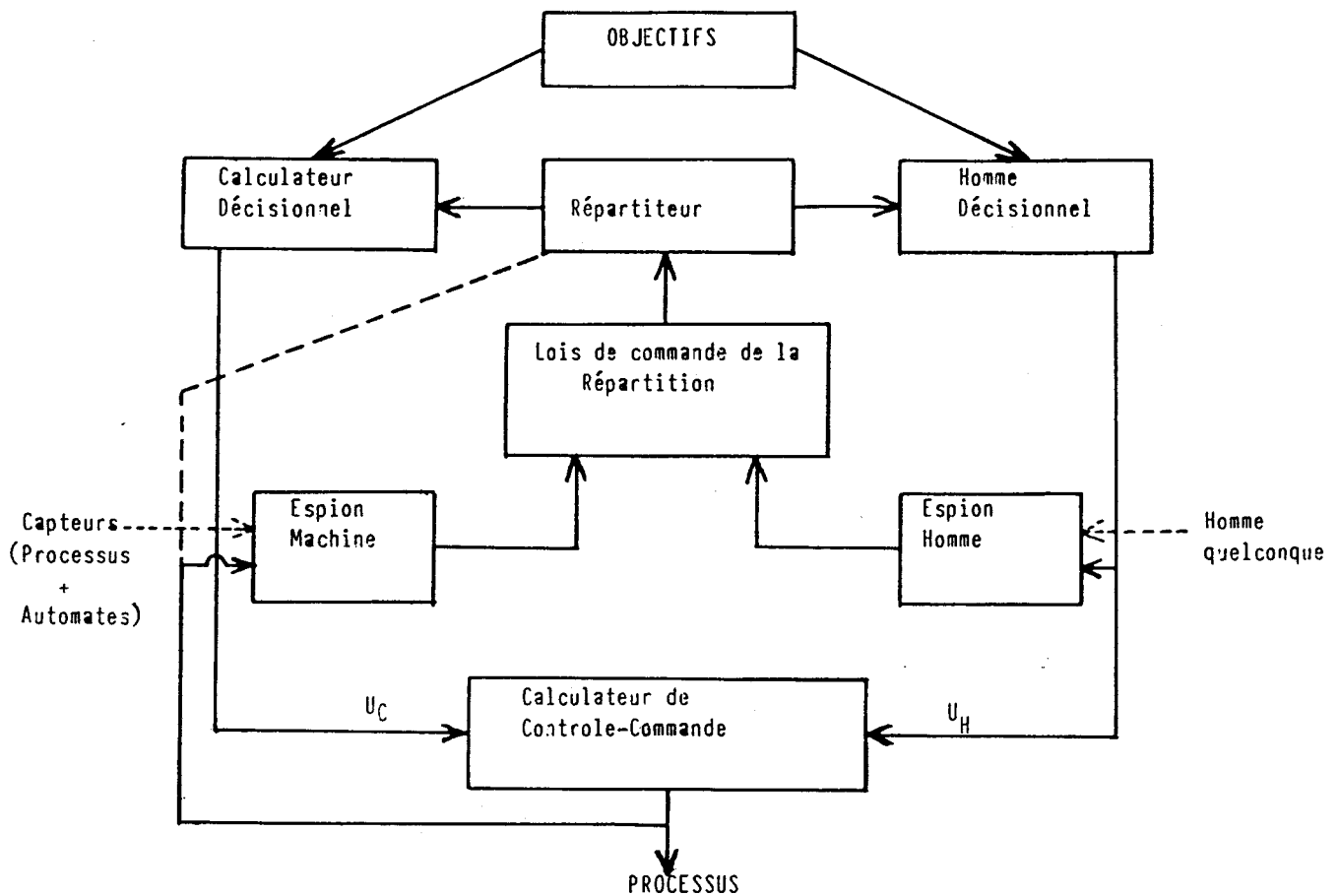
Le concept de coopération envisagé dans la suite fait donc implicitement référence au schéma b2.

### II-1 Coopération horizontale ou verticale.

Selon une classification proposée initialement par Millot [MIL 87], on peut distinguer 2 types principaux de coopération Homme/Machine:

- la coopération VERTICALE où l'opérateur est aidé tout au long du processus de décision (i.e. du niveau planification à l'implantation effective du plan)

- la coopération HORIZONTALE où l'on répartit dynamiquement les tâches entre l'opérateur et le calculateur (i.e. le système automatique). L'opérateur ne fait plus porter ses aptitudes décisionnelles que sur une partie seulement des variables caractéristiques de la tâche. La répartition peut se faire sur la base, par exemple, d'une recherche de charge de travail minimale.



Coopération horizontale ou verticale.

La méthodologie exposée dans la suite de ce mémoire ressort d'une approche hybride à la fois horizontale et verticale : d'algorithmes de répartition multicritère et de techniques d'aides interactives à l'opérateur. Cette "décomposition suivant 2 axes" permet de mieux saisir les positionnements respectifs des différentes méthodes "coopératives" et de situer leurs domaines respectifs d'application.

La fonction des modules espions dépend du type d'algorithme de répartition choisie :

*EX : en supervision de processus industriel on pourra chercher à obtenir les fonctions suivantes :*

- . Espion Homme : estimation de la charge de travail  $Wl$  de l'opérateur.
- . Espion Machine : estimation des performances du procédé, résumées par un indice

Ce schéma, symétrique, est à la base de la notion de coopération. Il masque une difficulté: la nature fondamentalement "répartie" (verticalement) de la fonction décisionnelle chez l'opérateur humain qui rend inefficace l'application directe exclusive des méthodes précédentes.

Nous verrons que le "répartiteur" y fait place à la notion de superviseur, de nature moins hiérarchisé. Les algorithmes de commande correspondant auront également cette nature répartie.

*N.B.: Cette difficulté, semble de moindre importance dans le cas d'une répartition dynamique de tâches en supervision de procédé pure où de bons résultats ont ainsi été obtenus (cf l'analyse critique de Millot dans [MIL 87] en particulier dans le domaine du contrôle-commande).*

## II-2 Répartitions dynamiques implicites ou explicites

On peut distinguer 2 catégories de répartitions dynamiques:

- explicites : la répartition des tâches incombant à l'opérateur (avec les risques de surcharge correspondants) l'effort de conception portera sur l'interface Homme/Machine .

- implicite : la répartition est automatiquement effectuée par le calculateur sur la base de modèles de répartition "optimale"

Exemple : *allocation dynamique par la théorie des serveurs.*

*Celle-ci est basée sur la théorie des files d'attente .*

*L'opérateur et le copilote automatique jouent des rôles symétriques. On met en place une politique optimale basée sur la minimisation du coût d'attente*

*La mise en action de l'un des 2 serveurs est gérée de façon dynamique.*

*On pose:*

\*  $C_i$ : coût d'attente de la tâche  $i$  (avec prise en compte de sa priorité relative).

\*  $n_i = 1$  ou  $0$  suivant que la tâche est présente ou absente.

$$* \text{sigma} = \sum_{i=1} C_i n_i$$

*Chu et Rouse [CHU 79] ont proposé l'algorithme suivant :*

$\text{sigma} > S$  -> le calculateur est mis en service

$\text{sigma} < s$  -> le calculateur est mis hors service.

*s et S sont identifiés sur la base d'une simulation de files d'attente correspondant à une loi d'arrivée poissonnienne, une distribution des temps de service générale, K places en attente et K tâches (attente dite de type (M/G/2):(GD/K/K) [ROU 80].*

Problèmes posés par cette méthode

- comment choisir effectivement les seuils  $s$  et  $S$  ?

- la politique déterminée n'est pas stationnaire

. Les situations conflictuelles sont résolues lors d'une phase de dialogue précédant

*les opérations de couplage/découplage (Manuel/automatique).*

Deux méthodes sont envisageables, à priori, pour étendre ce principe :

- l'une prend appui et prolonge le mode mixte déterminé par Habchi [HAB 81]: nous lui accordons l'essentiel des développements qui vont suivre. Ceux-ci nous mèneront à la notion de gestion dynamique de modes coopératifs.

- l'autre est une extension consistant à gérer un réseau multiserveurs.

Nous avons utilisé ces travaux dans le cadre de l'établissement du mini réseau de liaison hétérogène du système TAO ARA [AGR 85]. Son intérêt est de permettre une extension aisée aux cas multiopérateurs / multibras, de rester très réaliste par rapport à l'implantation choisie pour les modes et de bien cadrer avec l'approche objet abordée aux chapitres IV et V.

### II-3 Allocation de charges dans le réseau de communication Hommes/Machines

Le principe de la méthode exposée ici, est issu des travaux en téléphonie adaptative ([HEN 78],[LEC 77],[HEB 85]) et vise à obtenir une répartition équilibrée du trafic dans le réseau de liaison Hommes/Machines.

N.B: Une simulation effective de répartitions de ce type a servi de base à l'établissement du mini réseau de TAO ARA. Les difficultés de décomposition du réseau général déjà évoquées au chapitre II limitent néanmoins son application aux tâches simples où un reroutage peut être trouvé aisément. Le faible degré de redondance sur la manipulation évoquée (au contraire de celui rencontré dans les réseaux téléphoniques) ne permet pas de prévoir une extension triviale de ce principe.

Le partage de charges consiste, étant donné un noeud de communication donné, à diriger une proportion  $d$  du trafic sur une route donnée 1, le reste  $(1-d)$  étant dirigé sur une route 2. On distingue alors des utilisations :

. en boucle ouverte

$d$  est fixé ou modifié manuellement

EX :  $d = 1$  : procédure classique de débordement, on commute sur l'autre route en cas de blocage

. en boucle fermée

on effectue des mesures d'efficacité en aval, en fonction desquelles, on réagit sur la valeur de  $d$

Pendant  $N$  "demandes" si

$D1$  sont aiguillés vers 1 si, avec  $N1$  efficaces ("perçus" ou effectués)

$D2$  sont aiguillés vers 2 si, avec  $N2$  efficaces

On asservit  $d_{n+1} - d_n$  à la différence d'efficacité entre les voies:

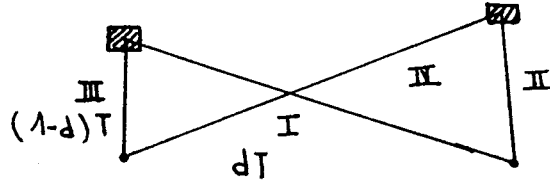
$$d_{n+1} = d_n - k * (N1/D1 - N2/D2)$$

( $k$  : gain de contre réaction peut être fixe )

(il est déterminé par simulation)

N.B.: Traitement des pannes : le paradoxe du va et vient

soit le réseau simple suivant :



Variation de  $d$  suivant la position de la panne (cas non adaptatif)

Pannes	I	II	III	IV
Variation de $d$	↗	↘	↘	↗

On obtient donc une situation paradoxale pour I et IV ce qui montre la difficulté d'une approche de régulation par des méthodes simples analytiques.

La commande asservie définie précédemment par contre se comporte normalement. En fait plus le comportement du réseau en aval est incertain plus ce résultat sera renforcé. Notons que cette approche, qui conduit à la supervision active décentralisée du réseau, est d'implantation simple dès qu'une mesure d'efficacité en aval est possible.

#### II-4. Modes mixtes et allocation des tâches dans les systèmes "à dilemme"

Les problèmes liés aux systèmes à dilemme ne sont pas spécifiques de la téléopération assistée par ordinateur, et trouvent leur pendant en automatisation intégrée où sont également étudiés divers modes de commande semi automatiques en fonction des phases opératoires engagées (démarrage, configuration, reprise après panne,...). Les modes semi-automatiques rencontrés seront le plus souvent un enchaînement déterministe de phases manuelles à guide opérateur et de phases automatiques supervisées.

Dans ce cadre une allocation statique des tâches, basée sur des tableaux de compétences relatives Homme calculateur (voir par exemple [LIC 60] : l'opérateur planifie l'action, le calculateur traite les informations et suit le plan) ne peut toujours être considérée optimale.

Ce problème devient essentiel en téléopération où le besoin d'une dynamique de commande élevée (nécessaire à la "transparence" opérateur) peut s'opposer à une utilisation optimale des possibilités de micro couplages créant autant de modes potentiellement sélectionnables.

Pour résoudre ces problèmes dans un cadre restreint, (avec 3 situations potentielles : à vision opérateur nulle, à commande automatique impossible et à dilemme), Habchi a proposé une solution originale prenant en compte de façon dynamique l'évolution des états de l'opérateur et de la Machine de téléopération.



Cette approche se distingue de celles qui l'ont précédée par:

- une méthode à 2 niveaux: global/local
- une utilisation de méthodologies de type Electre permettant la prise en compte de critères de natures variées.

Le détail de la méthode est étudié au paragraphe suivant où nous insistons sur les variantes que nous avons été amenées à introduire pour:

- simplifier la méthode (variante1)
- la rendre plus applicable (variante 2)

Le partage dynamique en résultant est basé sur une décision à chaque instant, sur la base de l'évaluation des critères, d'un couplage/découplage Manuel/Automatique. Elle reste très proche de l'approche de Rouse. Les généralisations qui seront exposées visent essentiellement à répondre aux questions suivantes :

- comment tenir compte d'une structure de mode de commande ne conduisant pas à une situation dichotomique (manuel, automatique) ?

- comment prendre en compte les incertitudes et le flou dans la détermination de ces critères et améliorer la robustesse des méthodes (sensibilité aux pondérations, au choix des seuils) ?

- quelle structure de commande choisir pour faciliter l'implantation de ces méthodes ?

- comment les rendre réellement dynamiques, i.e. tenir compte du processus de décision multicritère sous-jacent ?

- quel parallèle en tirer avec les méthodes plus classiques de l'automatique (optimisation à partir de la programmation dynamique) ?

- quel place y tient la communication homme/machine (rôle positif ou négatif de l'interactivité)?

### III-SECURITE HOMME/MACHINE ET METHODOLOGIES MULTICRITERES

Nous nous placerons, dans un premier temps, dans le cadre d'une coopération Homme/Machine VERTICALE.

#### III-1 Aides à la décision : Attitudes opérationnelles.

Pour aborder ce problème, nous nous baserons sur l'analyse approfondie qui a été faite par B. Roy et "l'école francophone de recherche opérationnelle". Celle ci conduit à une remise en cause de concepts fondamentaux à la base de la recherche opérationnelle et marque les limites de celle-ci.

Définition : [ROY85] : "l'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourants à éclairer la décision et normalement à prescrire un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquelles cet intervenant se trouve placé d'autre part".

Nous remarquerons les points suivants:

- l'aide a un rôle "actif" dans le processus de décision: on ne peut donc dissocier l'algorithme de l'aide.

- on n'optimise plus mais on tente d'accroître la cohérence du processus.

Ceci peut conduire à 3 attitudes opérationnelles de base permettant de classer les méthodes et d'éviter les écueils suivants:

- exclusion du chiffrage des aspects des conséquences mal appréhendés par le système de représentation.

- recourir à des références "homogènes" (temps, puissance etc..) pour des données de nature hétérogène.

- aboutir à une formule complexe, impropre à l'explication.

Les problèmes de sécurité Homme/Machine, par l'hétérogénéité des conséquences associées, conduisent à adopter une attitude multicritère spécifique.

Aux différents niveaux de la hiérarchie définie au chapitre I (planification - objet - manipulation - actionneur), la famille de critères isolée n'appréhendera qu'une partie homogène de conséquences.

Nous nous concentrerons dans la suite sur le niveau décisionnel, en retenant que l'attitude choisie peut varier en fonction du niveau impliqué pour une même situation étudiée.

Exemple: se ramener à un problème monocritère à temps minimum peut être considéré comme un choix réaliste pour une tâche de manipulation lorsqu'on s'intéresse à la sécurité au niveau actionneur, et ne plus l'être à un niveau supérieur où des contraintes externes de la tâche peuvent être exprimées.

#### Attitude 1 : passer à la moulinette les critères

Sous cette appellation, due à Schärliig [SCH 85], on peut regrouper les méthodes basées sur la théorie de l'utilité. On se ramène implicitement à un problème monocritère.

On explicite une fonctionnelle  $V(g_1, \dots, g_n)$  telle que  $V$  soit une nouvelle fonction critère. Pour 2 actions  $a$  et  $b$  entre lesquelles il faut choisir :

$$V(G(A)) > V(G(b)) \iff a R b \text{ avec } G = (g_1, \dots, g_n)$$

$R$  est une relation établissant un préordre sur l'ensemble des actions.

La théorie de l'utilité multiattribut, permet de bâtir des modèles compensatoires intercritères, en étudiant les variations du vecteur des taux de substitution :

$$S_{ir}(g) = (dU/dg_i) / (dU/dg_r).$$

Exemple usuel: l'utilité additive.

les critères sont agrégés après le choix d'une pondération  $p_i$  (taux de substitutions constants).

Cette approche est également très utilisée en automatique, où le recours à un

préordre se justifie par un ordonnancement complet habituel de l'espace des critères (en général  $R$ ). Le recours à des fonctions de ce type en commande optimale (erreur intégrale et représentation en variables d'état) permet l'étude de systèmes complexes pour lesquels les recherches de compromis des méthodes classiques (stabilité / précision...) ne permettait qu'une définition vague de la notion de "bonne performance", comme en témoigne le choix arbitraire des marges de gain et de phase en automatique linéaire.

C'est également l'une des premières méthodes qui ait été proposée pour la répartition dynamique des fonctions entre homme et automate par Gaase-Rapoport qui suggéra dans [OCH 71] de recourir pour cette répartition à des appréciations partielles du type:

- I1: efficacité de la commande
- I2: fiabilité de la commande
- I3: coût de la commande
- I4: fatigue de l'opérateur
- I5: degré de satisfaction etc...

et de bâtir ainsi une évaluation générale :

$$I = f(I_1, I_2, \dots, I_n) \text{ approximé par une fonction linéaire}$$
$$= \sum_i a_i I_i$$

le passage à la moulinette" prend ici tout son sens

N.B.: Aussi paradoxale soit elle cette méthode est quasi générale, sous différentes formes, la plus connue consistant à ramener les différentes évaluations des critères à des temps qu'il est ensuite aisé d'additionner.

On suppose donc implicitement :

- les différents critères *commensurables* .
- les conflits entre critères résolus par une méthode ad hoc

Cette attitude ,parfois dénommée d'agrégation complète transitive, englobe les méthodes de "goal programming" et de calcul de régression.

#### Attitude 2 : l'agrégation locale et itérative

Baptisée aussi approche interactif ou de "point de mire", elle consiste, à partir d'une solution de départ choisie arbitrairement, à rechercher de façon plus ou moins heuristique des directions améliorantes. Les méthodes associées sont bien adaptées lorsqu'un grand nombre (éventuellement continu) d'actions coexistent.

#### Attitude 3 : comparer les actions 2 à 2.

Enfin, pour respecter l'incomparabilité et l'intransitivité, souvent sous-jacente à la nature des problèmes concrètement rencontrés, il est possible d'adopter une attitude d'agrégation partielle en établissant entre chaque couple d'actions des relations de surclassement.

On considère les critères concordants avec cette relation soit :

Ceux-ci forment une COALITION (au sens de la théorie des jeux) en faveur de ce surclassement. On évalue la puissance relative de cette coalition.

Exemple : dans Electre 1 on vérifie que  $C(a,b)$  vérifie une relation de concordance (A chaque critère on affecte un poids et l'on vérifie que la somme normalisée des poids des critères en faveur dépasse un seuil qu'aucune discordance n'apparaît trop importante sur un critère c'est à dire seuil de VETO permettant le rejet du surclassement .C'est cette méthode qui a été suggérée par HABCHI [HAB 81] et que nous simplifions sous la forme suivante, que nous dénommerons dans la suite Mode Mixte variante 1 (MMV1).

#### Principe de l'algorithme Mode Mixte variante1:

Nous supposons choisie une famille de critères indexées par  $J: \{C_j\}$ , chacun d'entre eux évaluant l'aptitude de l'opérateur (H) à réaliser la tâche suivante relativement à une réalisation automatique (A).

*Exemple: à vision opérateur nulle, le critère visibilité de la scène (en l'absence de vision simulée) donne  $c_j(H) = 0$ ; on peut cependant admettre que la machine possède une représentation de l'environnement lui permettant d'avoir, en l'absence d'information directe, un score de 0.3 sur ce critère. Cette évaluation peut être arbitraire, ou résider, comme nous le verrons sur des mesures informationnelles (méthodes d'évaluation de qualité d'image).*

La famille  $\{C_j\}$  est associée à un jeu de pondération  $\{p_j\}$  associé à une famille de tâches; seuls les poids relatifs ont en fait une importance.

*Exemple: le poids associé au critère visibilité pour des tâches de pilotage en environnement faiblement encombré est faible par rapport au critère temps d'exécution.*

On forme  $P^*(H,M) = \sum_j C_j^* P_j$  avec  $*$  = +, -, =  
suivant que  $c_j(H)$  est  $>$ ,  $<$ , = à  $c_j(M)$

La vérification de concordance se ramène à :

$$[P^+ / P^- > 1] \text{ et } [(P^+ + P^-) / P^* > C_{TH}] ; C_{TH}: \text{seuil de concordance}$$

La vérification de non-discordance à:

$$\text{pour tout } j \text{ de } J^- \text{ avec } d_j = |C_j(H) - C_j(M)| \text{ on a } d_j < d_{TH}$$

$d_j$  est appelé degré de discordance relatif à  $j$

L'application aux problèmes de couplage/découplage manuel/automatique laisse plusieurs questions en suspens :

1) Comment résoudre pratiquement les situations de dilemmes auxquelles cette méthode conduit ?

Il apparaît, en effet, 4 situations fondamentales :

- systèmes à dilemmes complémentaires (SDC) i.e. sans équivoque
- systèmes avec équivoque de décision pour défaut de concordance (SDEDC)  
i.e. taux d'équivoque variable avec les  $p_j$ .

- systèmes à dilemme avec équivoque de décision pour discordance (SDEDD) i.e. équivoque fonction de choix de vi .

- systèmes à dilemme avec équivoque de décision pour discordance et défaut de concordance (SDEDDC) les 2 équivoques sont réunies .

2)- Comment choisir les paramètres  $p_i$  et  $d_i$  ?

3)- Comment choisir et quantifier les critères? (degrés d'incertitude et de flou à prendre en compte )

4)- Peut-on supposer réellement l'indépendance entre les critères ?

La variante que nous proposons ci-après (Mode Mixte variante 2) essaie de répondre à ces questions, au prix d'une complexification du problème.

Nous verrons, en particulier qu la complexité de la méthode empêche son implantation en temps réel lorsque le nombre d'actions croit. Ceci nous amènera à proposer une méthodologie, s'inspirant des mêmes principes de base, et qui ,bien que moins générale permet de résoudre la plupart des cas pratiques que nous avons pu rencontrer en TAO. Nous comparerons ensuite les différentes méthodes suivant différents critères entre lesquels, face à un cas pratique, il s'agira de trouver un compromis.

Revenons tout d'abord sur quelques points de la théorie des surclassements qui nous seront utiles pour exposer les principes des méthodes proposées.

### III-2 Problématiques d'aide à la décision

Elles sont diverses selon l'objet de la décision et le type de résultat attendu. Suivant l'objectif assigné à la méthode d'aide à la décision mise en oeuvre il est classique d'associer une problématique de type alpha, beta, gamma ou delta telle qu'indiquée dans le tableau ci-dessous tiré de [ROY 85]:

Problématique	Objectif	Résultat
$\alpha$	Eclairer la décision par le choix d'un sous-ensemble aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule action, ce sous-ensemble contenant des « meilleures » actions (optimums) ou, à défaut, des actions « satisfaisantes » (satisfecums).	Un choix ou une procédure de sélection
$\beta$	Eclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie ; les catégories étant définies <i>a priori</i> en fonction de normes ayant trait à la suite à donner aux actions qu'elles sont destinées à recevoir.	Un tri ou une procédure d'affectation
$\gamma$	Eclairer la décision par un rangement obtenu en regroupant tout ou partie (les « plus satisfaisantes ») des actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées, de façon complète ou partielle, conformément aux préférences.	Un rangement ou une procédure de classement
$\delta$	Eclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences.	Une description ou une procédure cognitive

Dans le cas d'une aide à la décision en téléopération, le choix final de l'opérateur sera de nature différente suivant la problématique sous-jacente.

L'adoption de l'une de ces problématiques dépendra également de la façon dont seront traitées les incertitudes sur les informations traitées.

Pour aborder cette question nous nous référerons essentiellement à la notion de crédibilité de l'information que la théorie des sous-ensembles flous a permis de formaliser correctement.

Dans le cas des méthodes de surclassement, ceci avait conduit Roy à introduire les variantes de type Electre III dans lesquelles la décision de surclassement d'une action par une autre peut avoir, comme nous l'avons vu une importance plus ou moins forte (on parlera alors de surclassement faible ou fort).

La variante 2 du mode mixte que nous proposons, s'appuie sur la notion de force relative du surclassement introduite dans ces méthodes et que nous interpréterons comme un degré de crédibilité relatif des surclassements obtenus.

On parlera alors d'indices de concordance et de discordance. La notion de critère devra de ce fait être généralisée.

On se place toujours dans le cas d'une action réalisable par l'opérateur (Mode Manuel) ou par ordinateur (Mode automatique), les actions associées sont dénommées H ou M par abus de langage (H="l'opérateur effectue la tâche", M="l'opération est effectuée automatiquement").

On fixe des fonctions seuils q et s dont l'utilisation permet d'exprimer un refus du choix de H ou M sur un seul critère lorsque l'écart mesuré est insuffisant; ces seuils sont introduits pour tenir compte de l'incertitude des mesures ou du flou éventuel de définition du critère (cas par exemple de la charge de travail ou du stress, interprété en terme de charge pour le ordinateur selon une échelle somme toute arbitraire).

On obtient ainsi les notions de préférences strictes (ou fortes) et faibles:

$g(H) > g(M) + s(g(M)) \Leftrightarrow H P M$  : préférence stricte.

$g(H) + q(g(H)) < g(M) < g(H) + s(g(H)) \Leftrightarrow H Q M$  : préférence faible.

$g(H) < g(M) < g(H) + q(g(H)) \Leftrightarrow H I M$  : indifférence.

N.B.: on associera à ces notions l'interprétation suivante: la préférence stricte conduit à une situation de découplage automatique, l'indifférence à un maintien du mode en cours, une préférence faible à une demande de confirmation opérateur: le système se comporte en guide opérateur.

### III-3. Apport des méthodes d'agrégation de préférences: Mode Mixte variante2.

La complexité de la méthode précédente la rend inexploitable dans une situation réelle de téléopération: elle nous servira néanmoins d'introduction à la méthodologie exposée au IV. Nous avons dénommé Mode Mixte variante 2: elle est en effet, comme nous l'avons vu, la conséquence logique de la variante 1 lorsqu'on veut y intégrer la prise en compte des incertitudes.

## Principe de l'algorithme

- 1) Construction d'une relation de surclassement floue sans contrainte de transitivité (celle-ci est effectuée hors ligne).
- 2) Construction de 2 préordres complets en conformité avec la relation de surclassement précédente mais basée sur des considérations opposées.
- 3) Comparaison des 2 préordres obtenus et élaboration d'un rangement final.

On définit :  $g_j(H) - g_j(M) = u > 0$

$d_j$  étant le degré de crédibilité bâti de la façon suivante:

$$d_j(H,M) = 0 \text{ si } u \geq 0 \text{ et } u < q_j(g_j(H))$$

$$d_j(H,M) = u \text{ si } q_j(g_j(H)) < u < s_j(g_j(H))$$

$$d_j(H,M) = 1 \text{ si } u > s_j(g_j(H))$$

Ceci revient donc à considérer le degré de crédibilité comme une fonction linéaire par morceau, nulle ou égale à 1 à partir de seuils déterminés.

On fixe un seuil de VETO pour  $u$  au delà duquel on considère trop risqué le classement de  $H$  et de  $M$ .

Ces trois seuils sont fixés initialement et modifient de façon fondamentale la signification des critères initiaux: ils intègrent la confiance que le concepteur de la commande place dans ce critère dans la conduite du processus de décision. On peut également remarquer que leur détermination ne tient pas compte de l'existence des autres critères et donc, que ceci suppose une "indépendance" des restrictions des critères dans la modélisation choisie par le concepteur. La notion de discordance globale essaye de pallier partiellement à ce défaut.

On définit l'indice de discordance global par :

$$D(H,M) = C(H,M) \prod_j (1 - d_j(H,M)) / (1 - C(H,M))$$

Interprété de la façon suivante: on module l'indice de concordance globale  $C(H,M)$  par la non-crédibilité relative de  $H$  et de  $M$ . On s'impose une formule vraie au passage à la limite (un seul critère  $C = 1 - d = 1 - D$ )

Dans le cas d'un indice de discordance  $d_j$  pour lesquels  $q_j = s_j$ , cette interprétation est simple et correspond à un indice global valant 0 ou  $C/(1-C)$ ; d'autres choix d'expression de  $D$  sont évidemment possibles (en particulier suivant l'acceptation ou non de cette notion de non-crédibilité relative). On pourrait par exemple essayer d'affiner l'études des dépendances possibles entre critères.

N.B.: le produit des non crédibilités peut s'interpréter en terme probabiliste, en supposant un grand nombre d'expériences confrontant  $H$  et  $M$ ; l'indépendance entre critères s'interprète alors en terme d'indépendance des variables statistiques représentant l'évaluation de  $H$  et de  $M$ , dans chacune de ces expériences selon chaque critère: celle-ci étant supposée on peut supposer les événements "non-discordance suivant  $C_j$ " et "non-discordance suivant  $C_k$ " indépendants et évaluer leur probabilité conjointe par le produit des probabilités correspondantes. La formule précédente exprime donc la probabilité de l'événement "  $M$  est préféré à  $H$ , alors qu'il y avait concordance, à cause de la discordance d'un des  $C_j$ " conditionnelle à l'événement "  $M$  n'est pas préféré à  $H$ " en utilisation pratique de l'indice ainsi construit : les  $d_j$  et  $p_j$  sont

fixés, caractéristiques du "style opératoire"

Les méthodes introduites précédemment permettent une large amplitude de choix dans la personnalisation des critères utilisés. L'étape initiale pour poser le problème spécifique s'en trouve également rendue plus délicate.

Il est intéressant, pour éclairer l'évolution des différentes méthodes envisageables, de présenter celles-ci à partir de la notion de test de surclassement: on appellera ainsi, dans le cas de deux possibilités H et M entre lesquelles on doit choisir, la règle à appliquer sur les vecteurs critères  $g(H)$  et  $g(M)$  impliquant ou non le surclassement de H par M.

Le test  $T[g(H),g(M)]$  représentera le résultat des calculs effectués.

Dans le cas du mode mixte le test de surclassement est basé sur une logique non compensatoire (entre les critères) avec veto de discordance.

On peut classer les autres méthodes en examinant comment elle permettent prendre en compte une mesure de l'incertitude.

En effet plusieurs relations de surclassement vont pouvoir être bâties suivant la place laissée à l'incomparabilité entre les actions, ou ce qui revient au même aux niveaux d'acceptabilité du surclassement. Ceci revient à indexer chacune de ces relations par un indice de crédibilité  $d$  prenant ses valeurs  $[0,1]$  et définir ainsi une famille de relations binaires emboîtées:  $S^d$ .

Exemple 1: on peut par exemple faire varier un ou plusieurs paramètres intervenant dans la définition de  $T$  (on retrouve par exemple ainsi la variante II de' ELECTRE avec 2 niveaux de surclassement, faible ou fort)

Exemple 2: on peut directement à partir des valeurs des indices de concordance et de discordance, chercher la valeur la plus élevée du degré de crédibilité  $d$ , pour laquelle on ait  $H S^d M$ . (c'est ce que fait Electre III .. et le mode mixte variant 2)

Exemple 3: on peut faire varier structurellement le test en étant de moins en moins exigeant; c'est ce qu'on fait les variantes suivantes d'Electre

Nous proposons au paragraphe suivant une méthodologie plus générale, permettant de retrouver comme cas particuliers les méthodes MMV1 et MMV2. La notion de critères fait place à celle d'indices d'évaluation.

#### IV METHODOLOGIE PROPOSEE

##### IV-1 Choix et évaluation des critères - Espace des poids

Dans la pratique, des problèmes se posent pour le choix d'une famille cohérente de critères. Pour justifier l'utilisation de la méthode proposée (Méthode de Décision Coopérative à Indices Multiples: MEDCIM), voyons sur un exemple type le problème posé par la sensibilité quant au choix des pondérations dans le mode mixte (variante 1 et 2)

EX : Soit 5 actions estimées selon 3 critères  $C_1, C_2, C_3$

et  $P_1, P_2, P_3$  les poids associés à  $C_1, C_2, C_3$ :



	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	10	1	2
A <sub>2</sub>	1	10	3
A <sub>3</sub>	2	4	1
A <sub>4</sub>	3	5	1
A <sub>5</sub>	4	6	2

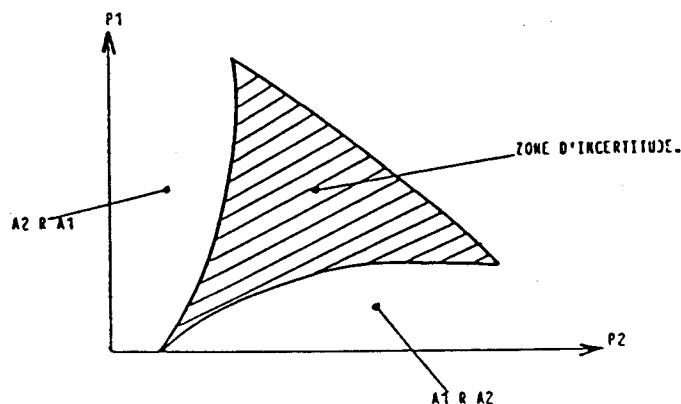
Selon Electre 1 (et donc le Mode Mixte variante 1)

si  $P_1 \gg P_2/P_3$  le classement sera A1, A5, A4, A3, A2

si  $P_2 \gg P_1/P_3$  le classement sera A2, A5, A4, A3, A1

**Problème** : Que se passe t-il dans l'"espace intermédiaire" où P1 et P2 sont du même ordre? Etant donnée la sensibilité du résultat aux erreurs d'évaluations de P1 et P2, quelle attitude pouvons-nous adopter ?

Nous proposons ci-dessous une visualisation des situations ainsi rencontrées en pratique:



Représentées dans le plan (P1,P2), nous obtenons des "courbes d'échanges des classements". On peut également en déduire un classement des méthodes selon un indicateur d'instabilité du classement (écart type évalué avec une loi sur la pondération reflétant l'incertitude d'évaluation floue ou probabiliste, ou écart entre le meilleur et le plus mauvais classement).

#### IV-2 Construction de la méthode

Nous avons vu précédemment que trois attitudes étaient envisageables face à un problème de décision multicritère que nous résumerons comme suit:

Attitude1: approche du critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité.

Attitude2: approche du jugement local interactif avec itération essai-erreur.

Attitude3: approche du surclassement de synthèse acceptant l'incomparabilité.

Nous avons explicité l'aspect réducteur dans notre cas de l'attitude 1. Par contre

il semblait intéressant de pouvoir combiner les avantages des attitudes 2 et 3 .

Si l'on examine plus précisément l'attitude 2, on s'aperçoit que celle-ci repose sur deux options fondamentales:

- importance accordée aux jugements locaux ( ne mettant en jeu qu'un petit nombre d'options, en dehors de toute règle explicite apportant une réponse globale au problème d'évaluation de performance et donc de sécurité).

- exploitation d'un protocole organisant l'interaction entre les différents acteurs coopérant au processus de décision et aboutissant à l'élaboration de celle-ci.

La méthode proposée essaie de tempérer la première de ces deux options tout en maintenant la deuxième.

Pour cela, il est nécessaire de déterminer une méthode simple, i.e. comportant la détermination d'un nombre réduit de paramètres dans la lignée des méthodes de surclassement, et de la compléter par un protocole d'interaction terminal explicité suivant deux phases:

- une phase d'explication : qui précise la façon dont à chaque étape sera établi le dialogue, quel sera son contenu pour que l'état soit précisé à l'opérateur-décideur.

- une phase d'interrogation: qui, sur la base du noyau d'actions isolé par le test de surclassement interrogera l'opérateur sur la façon de poursuivre la tâche.

*N.B.: La méthode proposée, utilise la classification des critères due à JP. BRANS [BRA 82] . Nous introduisons la notion de fonction de PREFERENCE prenant ses valeurs entre 0 et 1 (également interprétable comme indicateur flou de préférence) et exprimant la force de la préférence entre 2 actions (ou modes élémentaires) dans une situation donnée.*

Nous symétrisons d'abord la fonction de préférence:

Sur l'axe des préférences:

- à gauche de 0, on exprime B préférée à A
- à droite de 0, A préférée à B.

Soit donc un critère c, l'indice de préférence de A à l'égard de B est donc une fonction  $p(A,B)$  du type :

$$p(A,B) = 0 \text{ si } p(A) = < p(B)$$

$$p(A,B) = g[p(A),p(B)] \text{ si } p(A) > p(B)$$

on posera  $g(p(A),p(B)) = u(p(A)-p(B))$  pour les cas usuels: ceci permet de retrouver les cas du vrai critère, du quasi-critère du pré-critère (croissance progressive dans le demi intervalle de préférence faible) et d'introduire des fonctions plus générales permettant de prendre en compte des lois de variation de l'incertitude si celles-ci peuvent être estimées. Les différents cas sont résumés sur le tableau suivant:

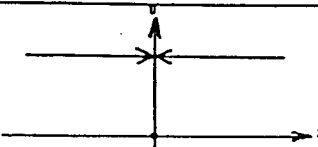
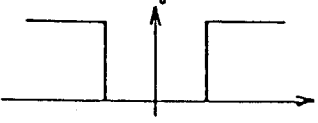
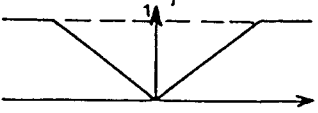
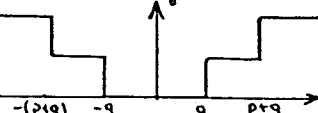

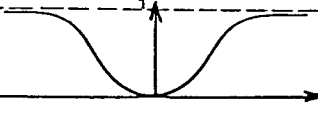
APPELLATION	FONCTION U	EXPRESSION
vrai-critère		$u(z)=0 \quad z < 0$ $=1 \quad z \geq 0$
quasi-critère		$u(z)=0 \quad 0 \leq z \leq m$ $u(z)=1 \quad z > m$ • symétrique
préférence linéaire		$u(z)=z/l \quad 0 \leq z \leq l$ $u(z)=1 \quad z > l$ • symétrique
pseudo-critère		$u(z)=0 \quad 0 \leq z \leq q$ $u(z)=0.5 \quad 0.5 \leq z \leq p+q$ $u(z)=1 \quad p+q < z$ • symétrique
préférence linéaire avec seuil		$u(z)=0 \quad 0 \leq z \leq p+q$ $u(z)=z-p/q \quad p \leq z \leq p+q$ $u(z)=1 \quad z > p+q$ • symétrique
critère gaussien		$u(z)=1 - \exp(-z^2/2\sigma^2) \quad z \geq 0$ • symétrique

Tableau des indices de préférences.

Exemple : Un passage gaussien selon notre terminologie conduira à un résultat intermédiaire entre un précritère et un pseudo-critère.

### Principe de l'algorithme (MEDCIM)

1<sup>er</sup> temps : calcul de concordance

L'indice de concordance est obtenu par moyennage des indices de préférence :

$C \sim (a R b) = 1/N \sum \pi_i(a,b)$  donc  $0 < C \sim < 1$  ; ( $C \sim$  est donc identifiable à un nombre flou mesurant le degré de crédibilité du surclassement de a par b).

2<sup>eme</sup> temps : vérification de non-discordance

L'indice de discordance  $v(a R b)$  vaut 1 si sur un critère au moins on dépasse un seuil préfixé de VETO  $V_i$ .

3<sup>eme</sup> temps : classification

La classification consiste à se ramener à un nombre ordinaire en seuillant  $C \sim$  suivant le schéma suivant:

$$a P b \iff C(a R b) (\bar{v}(a R b))$$

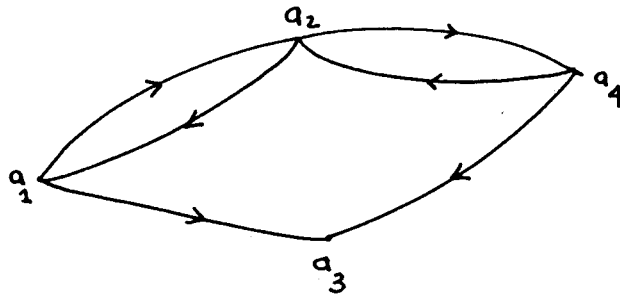
*N.B.1.: On isole ainsi le groupe d'actions que les indices de concordance 2 à 2 permettent de classer comme "les meilleures". Nous sommes donc dans une problématique gamma.*

*N.B.2.: La méthode précédente revient à considérer un graphe valué par la fonction*

de préférence, et d'appliquer sur celui-ci un principe de majorité.

En effet l'existence d'une fonction d'utilité induit celle d'un préordre total (complet et transitif) sur les actions. Les méthodes de surclassement visent à enrichir la relation de dominance, pauvre dans le cas multicritère, en n'allant pas jusqu'à un préordre total non justifié.

Soit par exemple le graphe suivant représentant une relation de surclassement (celui-ci correspond à un cas rencontré pour le mode mixte variante I):



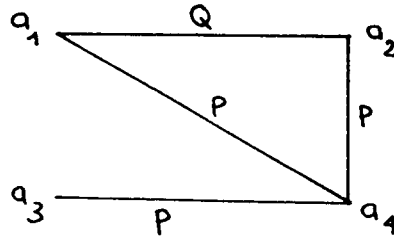
L'introduction des seuils sur les critères conduit à induire un marquage sur ce graphe correspondant aux situations:

*P* de préférence forte

*Q* de préférence faible

*I* d'indifférence.

si l'on choisit de se ramener à un pseudo-critère, donc à un graphe du type:



La notion d'intensité de préférence est introduite pour éviter des phénomènes de sauts brusques : celle-ci value le graphe, auquel on applique ensuite un principe de majorité

Pour  $a$  et  $b$ , on pose  $d = 1$  ou  $0$  suivant qu'à cause d'un critère,  $a$  peut ou non être classé avant  $b$

Le graphe valué de surclassement est alors défini par :

l'arc  $ab$  existe ssi  $d = 0$ : il lui est alors affecté la valeur  $1/N \sum P_i(a,b)$

on pourrait adapter l'utilisation de ce graphe aux différentes problématiques.

EX : pour le rangement on calcule le flux sortant de chaque action:

on obtient ainsi un préordre fiable

On peut noter que, par rapport aux méthodes de type mode mixte, le type de procédure que nous introduisons réduit sensiblement le nombre d'opérations élémentaires à effectuer.

En effet les méthodes dites de surclassement sont basées sur des comparaisons 2 à 2, donc non globales (comme cela est le cas pour une fonction d'utilité).

On doit en fait effectuer a priori  $N(N-1)/2$  comparaisons (donc en  $N^2$ ) pour le mode mixte contre  $N-1$  dans Medcim.

N.B.: En fait, l'ensemble des modes  $N$  est structurable de différentes façons: si un mode est formé de la concaténation de sous-modes:  $N=N_1*N_2$  (avec  $N_1$  et  $N_2$  différents de 1), on effectue  $N_1(N_1-1)/2 + N_2(N_2-1)/2$  comparaisons contre  $N_1+N_2-2$  dans Medcim.

Pour  $N$  premier ( par exemple si  $N=2$ , cas initialement choisi pour le mode mixte) aucune décomposition de ce type n'existe ; ceci explique pourquoi le problème n'est apparu qu'avec le développement de modes plus complexes.

### IV-3 Comparaison des méthodes

Celles-ci sont résumées sur le tableau ci-dessous suivant bien sûr plusieurs critères dont l'importance varie en fonction du contexte.

METHODE D'ORIGINE	AGREGATION PAR FONCTION D'UTILITE	MODE MIXTE VARIANTE1 (Electre1S)	MODE MIXTE VARIANTE2 (Electre3)	MODE COOPERATI (MEDCIM)
Complexité de l'implantation	Faible	Faible	Forte	Moyenne
Temps de Calcul	Faible	Faible	Importante	Moyenne
Prise en compte de l'incertitude	NON	NON	OUI	OUI
Sensibilité aux poids	très Importante	Importante	Moyenne	Moyenne

### IV-4 Construction d'observateurs du système hommes/machines( modules espions)

Nous ne donnons ici que quelques indications sur la construction de ces modules, ce qui nous permettra de donner un aspect plus concret aux fonctions de préférence introduites précédemment

ceux-ci sont constitués en 3 groupes principaux:

- les modules-espions "machine".
- les modules-espions "opérateur".
- les modules-espions d'interaction.(observant le bon fonctionnement du réseau de communication constitutif du système hommes/machines).

Ces différents modules seront introduits à partir d'exemple pris en téléopération.

#### IV-4-1 Modules espions "machines" [BER 82].

Le test de manipulateurs se pose dans les mêmes termes que celui de systèmes continus en général. Les différents outils disponibles peuvent être résumés par le tableau suivant :

Catégories	Eléments testés	Modèle de référence	Test envisagé	Point de Test	Défauts les mieux appréhendés	Techniques
Méthodes analytiques	circuits linéaires (électroniques)	état du circuit	localisation et diagnostic	sorties principales	dégradants	Analyse algébrique Analyse numérique Analyse statistique
Méthodes topologiques	circuits linéaires (électroniques)	chemins sensibles	détection et/ou localisation et/ou diagnostic	sorties principales	catastrophiques	Analyse algébrique Théorie des graphes Probabilités
Méthodes fonctionnelles	systèmes linéaires	fonction de transfert	détection et/ou diagnostic	sorties principales	dégradants	Analyse symbolique Analyse algébrique Analyse graphique
Méthodes taxonomiques	systèmes linéaires et/ou non-linéaires	dictionnaire de pannes	diagnostic	sorties principales et sorties intermédiaires	catastrophiques et/ou dégradants	Reconnaissance des formes

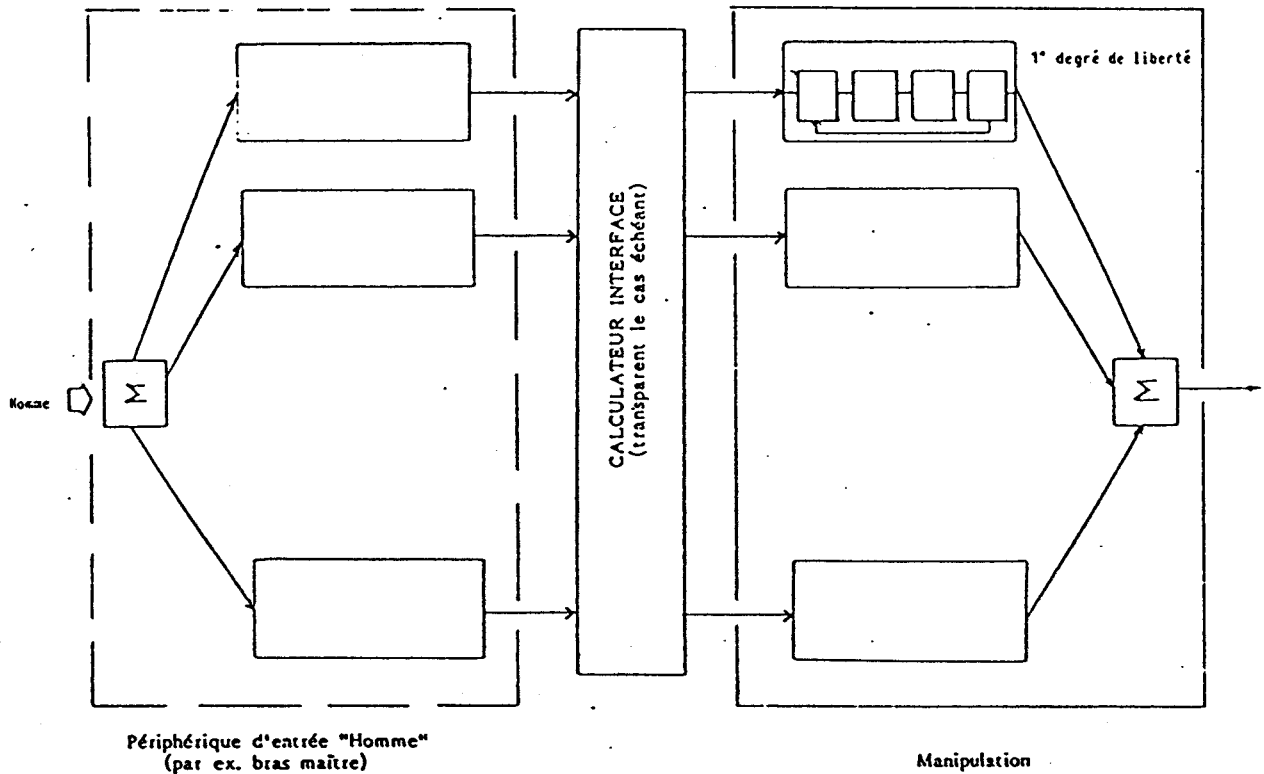
Dans le cas d'un télémanipulateur, on déterminera au préalable la testabilité de celui-ci ; pour cela Bertrand propose :

- d'examiner sa décomposition en sous-ensembles fonctionnels : celle-ci est constituée de blocs unidirectionnels (i.e. la relation d'entrée / sortie des blocs amont/aval n'est pas modifiée lors d'une panne de l'un d'entre eux).

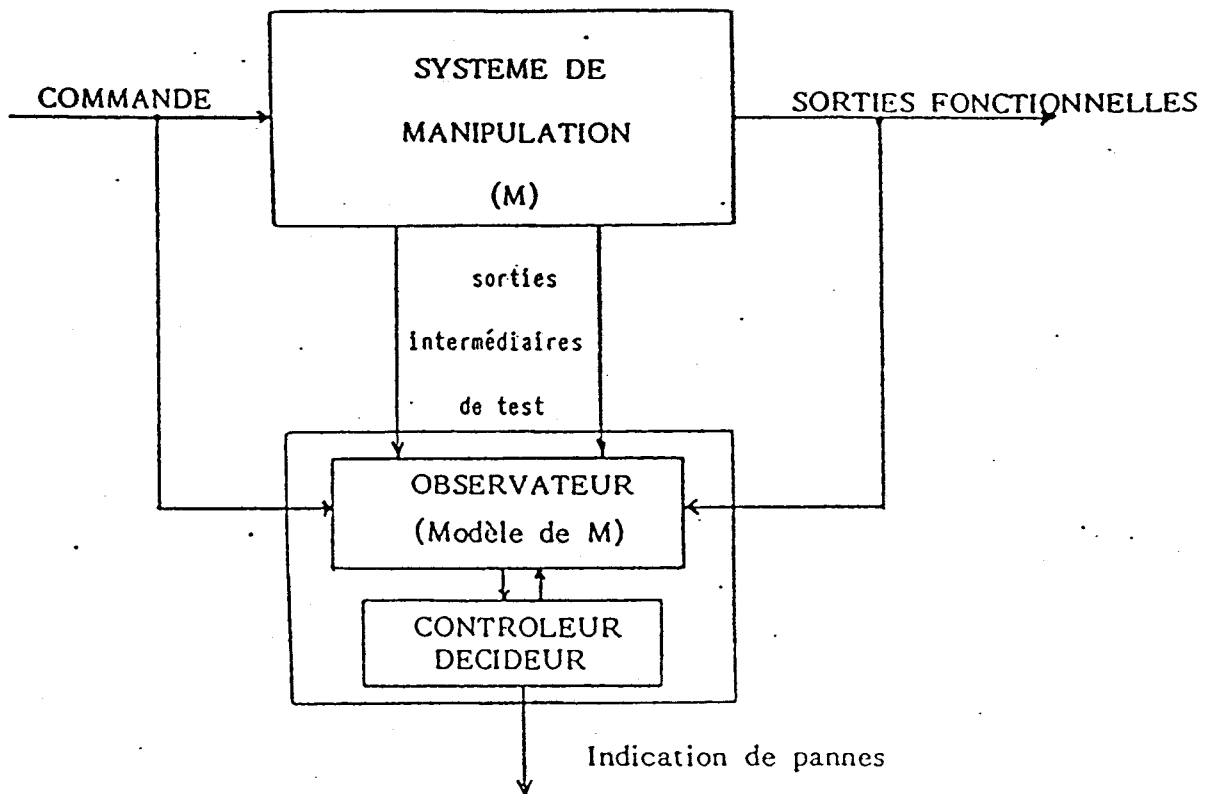
Ceci implique :

- \* si une entrée est correcte et une sortie erronée il y a défaut .
- \* on peut propager les pannes consécutives au défaut d'un bloc à travers les blocs sains.

- de rechercher un modèle simple de test de panne catastrophique, par exemple le modèle topologique suivant:



Le processeur espion mis en place pour le projet de robotique ARA permettait ainsi la détection de pannes au niveau des principaux blocs fonctionnels selon l'organisation de la figure suivante:



Structure de détection en ligne



#### IV-4-2 Modules espions hommes

De façon symétrique, le module "espion opérateur" est chargé de fournir des informations sur l'état estimé de l'opérateur.

Dans le cas de tâches en environnement connu, une information assez riche peut être extraite de l'analyse du comportement corrélée au traitement de signaux physiologiques prélevés sur l'opérateur: de nombreuses expériences ont pu être menées, souvent en laboratoire, bien souvent destinées à une évaluation de performances pour baser l'entraînement de différents types de pilotes.

La transposition de ces méthodes dans des contextes moins bien structurés, comme c'est le cas par exemple en téléopération, vise des objectifs plus modestes du type prévision de tendance d'évolution de l'état opérateur.

Dans le cadre de l'étude de robotique chirurgicale, Diaz a ainsi pu mettre en évidence que l'état de l'opérateur reposait essentiellement sur 3 facteurs essentiels:

-la charge de travail: de nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature ([MIL 87]), elle est liée à la complexité de la tâche.

-la fatigue: agrégation de nombreux facteurs, elle se traduit par un relâchement sur le respect de certaines contraintes de la tâche, un nombre d'erreurs plus important et des temps de réaction allongés.

- le stress: le plus souvent du à une hyper-focalisation de l'opérateur sur un point précis de la tâche.

La mise en oeuvre d'une mesure d'état sur un opérateur en téléopération s'est effectuée en deux temps :

-identification d'un modèle de corrélation intersignaux avec mesures simultanées:

\*de paramètres physiologiques

\*de paramètres liés à la tâche (temps d'exécution de sous-phases, nombre d'erreurs, écarts quadratiques des trajectoires)

Ces différentes mesures sont effectuées sur des tâches types caractérisant la télémanipulation en cours, et sont complétées de questionnaires pour évaluer les effets de charge, de stress etc.. ressentis par l'opérateur selon une échelle subjective d'évaluation.

Cette première phase, très contextuelle, permet de situer les mesures "on-line" intéressantes (en particulier celle ne présentant pas un degré de discordance trop fort, tout en correspondant à une implantation réaliste: un capteur de pression sur la poignée l'est, pas un EEG).

On en déduit un profil de comportements normaux et déviants par phase, le module espion délivre une indication sur l'appartenance à une classe d'état assorti d'un degré de crédibilité déduit des indicateurs de discordance.

Cette façon de procéder, mise en oeuvre par Diaz [DIAZ 85] a permis de disposer d'une méthodologie d'estimation très proche de celle effectuée pour la commande et donc facilement intégrable à celle-ci.

#### IV-4-3 Les modules espions d'interaction.

Nous entendrons par espions d'interaction l'ensemble des dispositifs permettant d'obtenir des indices concernant la qualité des échanges d'information entre l'opérateur et le système automatisé. Comme nous l'avons vu précédemment (au chapitre 1) la prise en compte par l'opérateur du contexte général oblige à inclure dans le système automatisé à l'environnement de celui-ci, accessible à l'opérateur par le biais des capteurs télétransportés (caméras, capteurs de proximité..), même si l'information ainsi disponible n'est pas directement utilisée dans la commande.

Parmi les capteurs présentant de l'intérêt en téléopération, le capteur visuel, même si l'arrivée de capteurs proximétriques permet partiellement de le remplacer, occupe une place privilégiée.

C'est pourquoi nous nous concentrerons essentiellement dans ce paragraphe sur un exemple, que nous avons pu mettre en oeuvre en collaboration avec l'équipe de traitement d'images du centre d'automatique de Lille.

Il s'agit en fait d'exploiter une méthode d'évaluation de la qualité globale de l'information image.

Il n'existe pas de méthode générale pour cette mesure, les résultats présentés ici se veulent illustratifs du type de méthodes applicables : on cherche à exploiter un capteur déjà utilisé en chirurgie sous microscope. Différents défauts optiques (bruits, défocalisation etc...) peuvent être constatés dans ce type d'opération, le problème est de dégager un indice simple, implantable en temps réel de façon peu coûteuse et permettant de donner une évaluation globale des défauts. Cette évaluation, par opposition à ce que l'on pourrait trouver dans des méthodes plus classiques de mesure de qualité subjective d'image (en vidéocommunication...) est essentiellement destinée à fournir un indice utilisable pour l'évaluation de l'aptitude de l'opérateur à piloter le système à partir du seul capteur caméra.

Trois types d'algorithmes ont ainsi été testés (dans le cadre d'une étude de focalisation automatique voir [BON 84]):

algorithme 1: calcul de la masse optique :

\*principe: on cherche le max de  $MO = (OD - \text{seuil})$  pour  $OD > \text{seuil}$  avec OD mesure de densité optique .

Sur l'histogramme ceci maximise la "surface" du signal vidéo au dessus d'un seuil fixe: le seuil a peu d'influence sur la position du max, mais la forme de la surface varie avec celui-ci.

ALGORITHME: calcul de la surface totale des objets :

Principe: on évalue le nombre de points de l'image au dessus d'un seuil fixe: la position de l'extremum dépend du seuil choisi.

algorithme 3: calcul du taux de convexité:

En appelant  $g(i,j)$  le niveau de gris du pixel courant de l'image, on évalue la densité des changements de courbure discrète:

$$T_c^2 = | (g'(u,v) - M_g)^2 / (N^2 - 1) |$$

$$\text{avec } M_g = \sum_{i,j=1} g(i,j) / (N^2 - 1)$$

$$\text{et } g'(i+1,j+1) = |g(i,j) + g(i+1,j) + g(i,j+1) - 3g(i+1,j+1)|$$

N: largeur de la fenêtre de calcul .

Ce troisième algorithme s'est avéré plus robuste que les deux autres, en particulier vis à vis des bougés dans l'image (importants en TAO) et semble assez bien caractériser l'information globale disponible dans l'image. Nous donnons sur les figures suivantes, les courbes expérimentales que l'on peut ainsi obtenir:

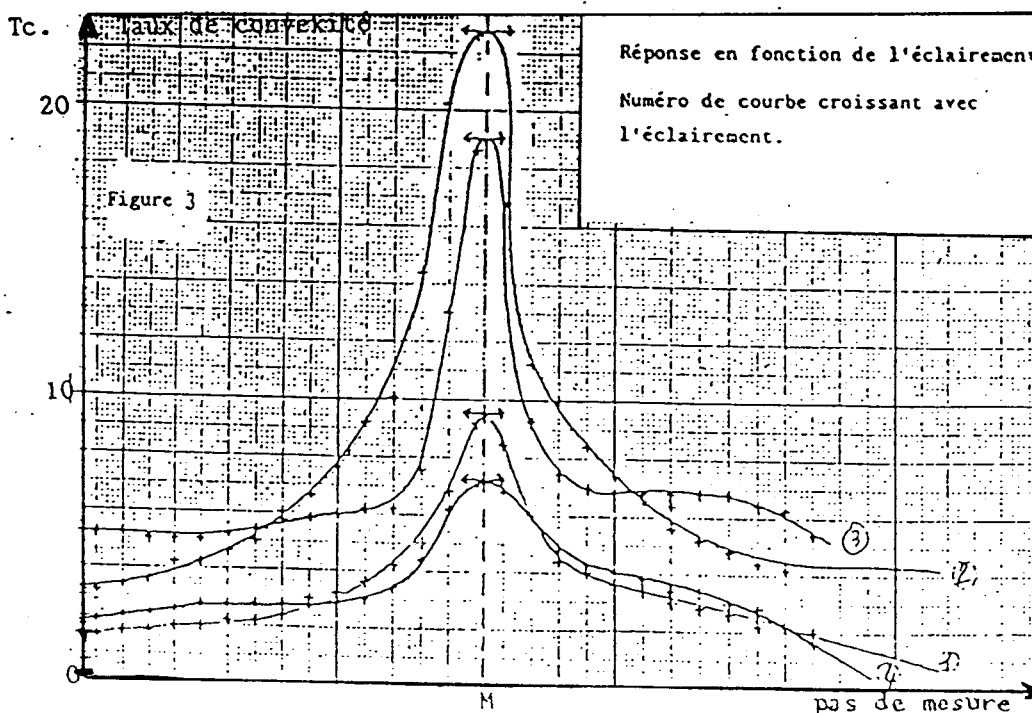
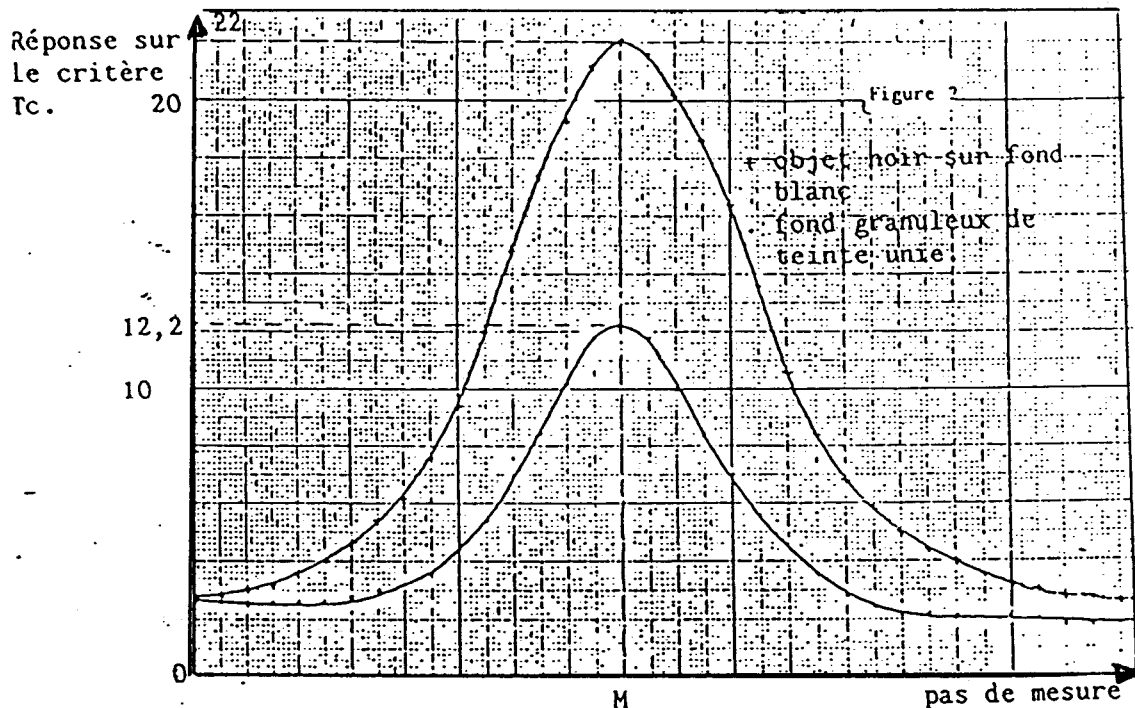


figure III-4 critère taux de convexité (d'après [BON 84])

N.B.: Le principe de calculer un résidu sur un système de prétraitement est souvent utilisable pour quantifier ainsi le risque pris, si une reconnaissance des formes (humaine ou informatisée) est ensuite appliquée: nous avons par exemple pu utiliser le delta-score (écart

à la forme reconnue) lors d'utilisation d'"une commande vocale" pour caractériser la confiance à accorder à cette reconnaissance.

L'idée est en fait d'extraire une information supplémentaire du "bruit", i.e. de l'information a priori filtrée par le système de reconnaissance pour évaluer la crédibilité de l'information fournie par cette reconnaissance. Pour un système de reconnaissance unique, on se ramène en fait à un système de commande extrêmement simple.

Les méthodologies exposées dans ce mémoire permettent de prendre en compte simultanément plusieurs systèmes de reconnaissance de formes, certains d'entre eux étant internes à l'opérateur humain en proposant une façon de combiner les indices de crédibilité associés.

Exemple: si le système de commande vocale reconnaît un ordre d'avancée en direction d'un objet, alors que le système de reconnaissance d'image indique la présence d'un obstacle non évitable intermédiaire, il est nécessaire de résoudre le conflit latent en empêchant une action qui serait due à une mauvaise reconnaissance; les indices permettant d'induire ce résultat vont être de deux natures:

- soit directement reliés au système de reconnaissance (quelle est l'information "utile" et dans quelle mesure est-elle entachée d'un bruit considéré trop important pour que l'information utile soit crédible?).

- soit issus d'informations complémentaires disponibles (en provenance des espions "homme" ou "machine").

La diversité des systèmes de reconnaissance de formes ainsi utilisés, empêche une agrégation directe de ces indices et conduit à une discussion qui est identique à celle détaillée précédemment.

## CONCLUSION

Les méthodes proposées dans ce chapitre ont, pour l'instant, considéré le problème de la répartition statique (à un instant déterminé) des tâches à accomplir en tenant compte d'informations sur l'état de l'Homme et de la Machine.

Ces différents espions nous fournissent donc des indices qui permettent de quantifier la confiance que l'on peut, dans une situation donnée, accorder à l'opérateur ou à la commande automatique. Etant donnée l'extrême hétérogénéité de ces indices, les méthodes d'agrégation des classements semblent les plus réalistes.

En fait une approche dynamique du problème consiste non pas seulement à bâtir une décision semi-optimale à l'instant  $t$  mais à trouver une séquence de décisions permettant d'accomplir au mieux la tâche globale demandée.

L'utilisation de méthodes d'agrégation multicritère de type Electre nous a fait sortir du cadre classique où les résultats généraux de l'automatique sont applicables (programmation dynamique en particulier). Nous allons examiner au chapitre IV comment s'y ramener, en généralisant la notion d'optimisation.

L'implantation effective nous conduira à une nouvelle organisation de la commande et à prendre en compte dans celle-ci le poste opérateur.

ANNEXE : Théorie des catastrophes et Dysfonctionnements  
du système Homme/Machine

La théorie des catastrophes (ou des bifurcations) a pu être appliquée récemment à l'étude des discontinuités dans un processus de décision. Bien que les résultats obtenus soient (pour le moment ou par nature?) essentiellement qualitatifs, une visualisation intéressante de l'espace de représentation des facteurs d'actions en résulte. Celle-ci peut servir le dialogue automaticien-psychologue en permettant d'exprimer certains phénomènes où des facteurs de nature heuristique entraînent une instabilité du système Homme/Machine.

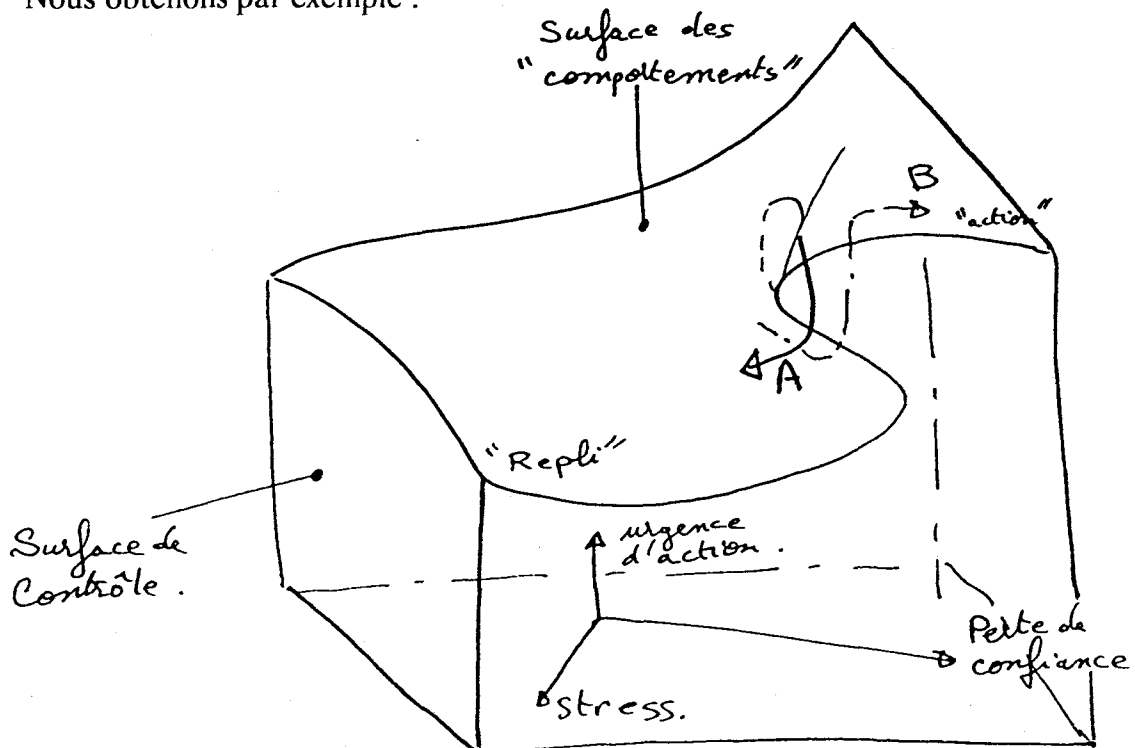
Exemple : on veut représenter le comportement d'un opérateur en situation dégradée. Pour cela, les psychologues nous disent d'isoler des vecteurs d'influence fondamentaux comme :

le vecteur de "stress"

le vecteur de confiance (ou de perte de confiance)

En fonction de ces 2 vecteurs pour lesquels seront établies des échelles continues on peut tracer la surface correspondant au comportement (ici mesuré par une variable urgence d'action)

Nous obtenons par exemple :



Si l'on suit une chaîne d'action dans le temps, on peut donc se retrouver face à une bifurcation de la courbe dans le plan de contrôle (i.e. plan stress/confiance).

On constate que les 2 attitudes finales de "repli" et d'"action" ne s'annulent pas mais croissent suivant l'axe d'urgence d'action et créent en fait une "Tension de Décision" (la "catastrophe" ), de dilemme pour laquelle aucune réponse adaptée n'est trouvée.

Une interprétation psychologique de ce phénomène (évidemment très simplifiée) est qu'un tel modèle apparaît dès que les bilans correspondant à un "coût généralisé" de l'action sont remis en question (voir par exemple[MOL 77]). En fonction de la grandeur des stimuli-externe (en particulier la "nouveau" de la situation), seule une probabilité de comportement peut être donnée : le comportement de l'opérateur est métastable.

Cette méthode, implicitement basée sur le calcul de fonctions d'utilité (coût, stress, confiance ou charge de travail) conduit à un raisonnement qualitatif global.

Les méthodes que nous avons développées au chapitre III, proposent une attitude de désagrégation/agrégation qui peut être utilisée pour analyser plus finement le comportement de l'opérateur en situation de dilemme et déterminer la résolution (le "solutionnement") adapté.

Nous n'avons pas poursuivi cette voie ,qui paraît peu susceptible d'application directe à court terme .Dans le cas des systèmes pilotés, la théorie rapidement décrite ici sur un exemple, a pu être appliquée à la modélisation du comportement du pilote automobile sur une route (repli = freiner, action = dépasser). Son intérêt essentiel est de proposer une classification des "situations à problème " basée sur celle des cassures d'un nombre réduit de paramètres caractéristiques du système.

En ce sens, nous pensons que ceci permettrait une première approche structurale du système homme/machine en situation difficile. En isolant certains paramètres de la tâche on pourrait ainsi prédire les points de cassure ou déduire une syntaxe des situations normales et critiques . Ceci reste néanmoins, pour le moment une conjecture à développer pour la rendre réellement applicable.

CHAPITRE IV : DYNAMIQUE DES MODES COOPERATIFS ET  
INTERACTIVITE

*APPLICATION EN TELEOPERATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR.*



## I-OPTIMISATION ET AIDE A LA DECISION MULTICRITERE.

I-1.Optimisations multicritères "classiques" .....	p3
I-2.Dilemme optimisation-aide à la décision .....	p4

## II-PROCESSUS DYNAMIQUE D'AIDE A LA DECISION.

II-1.Programmation dynamique multicritère basée sur des relations de préférence. ....	p5
II-1.1. Principe de Bellman et généralisation de Mitten.....	p6
II-1.2. Généralisation proposée .....	p8
II-1.3. Recherche d'un "Indice de fiabilité" .....	p9
II-2.Organisation de la commande.....	p10
II-2.1. Commande Maître-Esclave généralisée (C M E G).....	p10
II-2.2. Retour d'information généralisée.....	p12
II-3.Décentralisation en TAO.....	p15
II-3.1. Principales options.....	p15
II-3.2. Formulation du problème.....	p17

## III- APPLICATIONS EN TAO ET INTERACTIVITE.

III-1. L'interactivité en TAO.....	p20
III-1.1. Différentes formes de dialogue.....	p20
III-1.2. Supports de dialogue.....	p21
III-1.3. Types d'ouverture du dialogue.....	p21
III-2. La fonction de supervision du dialogue.....	p22
III-2.1. Approches basées sur les stéréotypes.....	p21
III-2.2. Approche basée sur un système expert.....	p22
III-2.3. Le dialogue comme objet.....	p22
III-3. Langage en TAO et station de travail intégrée.....	p24
III-3.1. SUPERMAN.....	p24
III-3.2. Evolution de l'interface de dialogue en TAO.....	p24
III-3.3. La notion de station de travail en TAO.....	p25
III-4 Approches objets et modes coopératifs.....	p31

## IV- GENERALISATION: LIEN AVEC LES TECHNIQUES D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

IV-1. Générateurs de plan et scénarios interactifs.....	p34
IV-1.1. Le système copilote.....	p34
IV-1.2. Conception de scénarios interactifs en TAO.....	p35
IV-2. Méthodologie multicritère et système expert.....	p36
Conclusion .....	p38

## Préliminaire :

Nous abordons dans ce chapitre les problèmes relatifs aux stratégies de coopération homme/machine en téléopération .

Partant de l'analyse des modes coopératifs effectuée au chapitre III, nous allons montrer quel type d'organisation de la commande peut s'en déduire, et comment relier celle-ci à l'implantation effective.

Nous aborderons donc les trois questions suivantes :

- Peut-on retrouver des résultats analogues à ceux de la commande optimale "classique" - Comment implanter effectivement les différents niveaux de commande et quel est l'intérêt d'une approche décentralisée dans celle-ci?

- Quels problèmes de communication homme/machine apparaissent lors de cette implantation ? En particulier ,comment intégrer les différents langages utilisés pour cette communication.

D'un point de vue pratique ,les réalisations effectuées dans le cadre du projet ARA/TAO serviront de base à notre discussion.

## I-OPTIMISATION ET AIDE A LA DECISION MULTICRITERE

### I-1 Optimisations multicritères "classiques"

Une présentation unifiée possible de celles-ci consiste à ramener le problème d'optimisation considéré à un jeu à N joueurs: on suppose le système formé de N agents, chacun d'entre eux ayant son propre critère d'optimalité à minimiser.

Le point d'équilibre entre les actions de ces N agents peut a priori être de l'un des types suivants:

- chaque agent optimise son critère sans considérer les autres: l'équilibre est NON COOPERATIF (Nash, min max, Stackelberg)

- il s'établit une "négociation" entre les agents conduisant à un équilibre COOPERATIF avec recherche de COMPROMIS (point de Pareto) et développement d'une stratégie d'équipes.

*Exemple 1 : Daellenbach et De Kluyver [DAE 80] ont montré qu'il était possible de développer des méthodes efficaces de programmation dynamique multicritère, permettant de générer à la fois les optima individuels et les solutions MINMAX. Le classement correspond à une structure de pondération qu'il n'est besoin de préciser qu'en fin d'optimisation.*

*Exemple 2: Dans le cadre des méthodes multi-objectifs (sélection d'une alternative dans un ensemble infini implicitement défini: par les contraintes structurales du système), Baptistella [BAP 80] a proposé une méthodologie originale permettant de faire le lien entre l'approche monocritère classique, l'optimisation dynamique et les problèmes d'articulation progressive des informations sur les préférences.*

*Le système décisionnel est décomposé en deux niveaux:*

*- un niveau inférieur où le problème est ramené au cas monocritère, avec recherche d'une commande optimale en boucle ouverte selon ce critère.*

*- un niveau supérieur utilisant des approches interactives linguistiques permettant la prise en compte des imprécisions et/ou incertitudes.*

Ces deux exemples semblent bien mettre en évidence l'un des progrès important de l'optimisation multicritère "classique", à savoir ne plus nécessiter une articulation a priori des préférences, comme ce serait le cas par exemple avec les méthodes de hiérarchisation [WAL 67]. Ceci semble important dans le cadre de notre étude où, de par l'imprécision de certains des critères à considérer (en particulier ceux visant à quantifier un état de l'opérateur), une souplesse dans la modification de la structure des informations intercritères (poids relatifs, hiérarchisation etc..) est indispensable.

### I-2- Dilemme optimisation-aide à la décision .

Nous nous sommes également posé une question plus fondamentale quant à la classification des méthodes envisageables :

Quelles sont les bases conceptuelles présupposées par la notion d'optimalité sous-jacente à ces méthodes? Les hypothèses qu'elles supposent peuvent-elles être considérées comme réalistes dans tous les cas? Le cas échéant comment pouvons nous généraliser cette notion ,en gardant celle-ci comme un cas limite et en conservant un espace de travail intéressant pour l'automaticien?( essentiellement:comment permettre de retrouver suivant les cas l'analogie d'une programmation dynamique multiétape?; ou pourrait-on bâtir une "automatique" basée sur des méthodes de type agrégation des préférences?).

Nous répondrons à ces questions en deux temps:

- en examinant les limites de la notion d'optimalité classique .

- en la généralisant, de manière à définir des procédures multiétapes "satisfaisantes".

Toute optimisation est basée sur le postulat qu'il existe une décision qui, à moyen et horizon infini, peut objectivement être démontrée comme meilleure que toutes les autres.

3 hypothèses sont alors implicites [ROY77]:

H1 De globalité de l'ensemble des actions: 2 actions potentielles sont supposées mutuellement exclusives.
---

Mathématiquement, il est facile de montrer que cela est toujours possible par extension du nombre d'actions en effectuant un partitionnement adéquat.

On exclut ce faisant implicitement des actions qui seraient formées par recollement d'actions élémentaires pour lesquelles seraient prises des "décisions partielles".

*Exemple1: Si pour chacun des  $n$  degrés de liberté d'un bras manipulateur, on envisage un mode de commande soit manuel, soit automatique, l'espace des modes globaux correspondants, produit cartésien de ces modes élémentaires, a un cardinal qui croit en  $2^n$ .*

*Exemple2: De même l'adjonction de modes de dialogue, considérés comme mode de commande de l'interface homme-machine vient multiplier le nombre de modes élémentaires correspondants.*

H2 : Les actions potentielles forment un ensemble trivial ayant un caractère exhaustif

Une action est possible ou impossible (hors de toutes nuances) et l'on suppose que leur ensemble est stable de façon interne et externe.

Ceci implique toute modification en ligne de cet ensemble (qui correspondrait par exemple à la création de modes de commande ou au téléchargement d'une classe non prise en compte dans la classification initiale)

H3 : La complète globalité transitive: seules la préférence stricte et l'indifférence entre 2 actions sont admises.

Ces 3 hypothèses sont nécessaires pour justifier le postulat d'existence d'un optimum, mais s'avèrent extrêmement contraignantes pratiquement; leur levée est à l'origine des méthodes développées au chapitre III.

*N.B.: En fournissant des outils commodes permettant d'aborder les aspects mal quantifiables, voire subjectifs, intervenant dans les processus de décision, elles permettent de ne pas écarter a priori certains éléments importants, mais pour lesquels il n'existe pas d'instruments de mesure adéquats. Elles autorisent également une hétérogénéité dans le choix des références de mesure contrairement aux méthodes basées sur les fonctions d'utilité qui nécessitent de donner un sens à la notion d'échange intercritère.*

## II-PROCESSUS DYNAMIQUE D'AIDE A LA DECISION

### II-1 Programmation dynamique multicritère basée sur des relations de préférence.

#### Objet du paragraphe:

Généraliser partiellement aux relations de surclassement certains résultats classiques de commande optimale. Nous avons choisi de présenter les généralisations qui permettent de passer du principe d'optimalité de Bellman aux relations de préférence sous certaines hypothèses sur les indices de préférence utilisés. Celle-ci est relativement classique: nous nous attacherons donc essentiellement à dégager les hypothèses sous-jacentes et son application aux méthodes exposées au chapitre III (relations vraies, floues, pseudo et quasi-critères).

Après avoir présenté une première adaptation que nous proposons, suffisante dans la majorité de nos cas d'application en téléopération (approche interactive avec ou sans contraintes), nous généraliserons celle-ci en utilisant une présentation encore peu utilisée actuellement (approche catégorique): celle-ci permet dans le cas général d'obtenir une visualisation géométrique de la méthode et d'étendre son domaine d'application. En particulier ceci permet d'utiliser d'autres types d'indices de fiabilité locaux ou globaux: nous en donnerons quelques exemples en conclusion de ce point.

## II-1.1 Principe de Bellman et généralisations de Mitten.

Le principe de Bellman s'inspire de concepts analogues à ceux des principes de temps minimum (Fermat), de moindre action (Maupertuis) ou du maximum (Pontryagin). Il permet de réduire l'optimisation d'une fonction de  $n$  variables à la résolution d'un nombre limité de problèmes d'optimisation plus simples (par exemple ne comportant plus qu'une variable).

L'idée est qu'en considérant un point  $M$  sur un chemin  $AB$  supposé optimal, les chemins  $AM$  et  $MB$  doivent également être optimaux.

De façon plus précise, si l'on considère un système changeant d'état,  $E_{k-1} \rightarrow E_k$ , à chaque phase  $k$  par une décision  $X_k$  (processus de décision à  $N$  étapes), les états possibles étant supposés dénombrables, alors toute politique optimale ne peut être formée que de sous politiques également optimales.

N.B.: Il est supposé implicitement que la fonction de transition ne dépend que de l'état  $E_{k-1}$  et de  $X_k$ ; à chaque phase (ou étape), on évalue la transition par une fonction de retour  $r_k(E_k, X_k)$ , on cherche à optimiser une fonction globale  $R(r_1, r_2, \dots, r_n)$  par rapport à  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Rappel:

Politique = succession de décisions de  $k=0$  à  $N$ .

Sous politique = suite jointive de décisions faisant partie d'une politique.

En effet, en considérant une sous-politique extraite d'une politique optimale, si cette politique n'était pas optimale, il en existerait une autre meilleure, qui, complétée par la partie restante de la politique considérée, permettrait d'améliorer celle-ci, ce qui serait contraire à l'hypothèse d'optimalité.

Généralisation 1: cas des fonctions décomposables.

$R$  est dite décomposable si elle est à la fois séparable ( $f(u, v, w) = g(u, h(v, w))$ ) et si de plus elle est monotone non décroissante par rapport à  $h$ .

Mitten a démontré [MIT64] le théorème d'optimalité suivant:

Pour une fonction  $f$  séparable, on a l'équation fonctionnelle :

$OPT_{u,v,w} f(u,v,w) = OPT_u g(u, OPT_{v,w} h(v,w))$  avec  $OPT = \text{MIN}$  ou  $\text{MAX}$

Ce théorème permet de généraliser le principe de Bellman au cas de fonctions séparables.

N.B.: Il n'y a équivalence entre le principe d'optimalité de Bellman et l'équation fonctionnelle de la programmation dynamique que dans le cas d'une décomposition avec une fonction  $h$  strictement monotone

Exemples dans R:

- sommes: fonctions de coûts (ou d'utilité) additives; la monotonie est stricte.

- produits: fonctions d'utilité multiplicatives ;la monotonie est stricte si l'on exclut les utilités nulles.

- fonctions MIN ou MINMAX, non monotones au sens strict.

-plus généralement  $f(u_1, u_2, \dots, u_n) = f_1(u_1) \# f_2(u_2) \# \dots \# f_n(u_n)$  où l'on doit vérifier la propriété de monotonie pour l'opération # .

Le principe peut être appliqué en sens direct ou en régression ,avec mémorisation des politiques successives (c'est un de ses principaux inconvénients),en réduisant la complexité initialement exponentielle à  $O(n^2)$ .

### Généralisation 2: cas des relations de préférence

L'idée de généraliser à des relations de préférence les concepts de programmation dynamique est due également à Mitten qui a proposé de l'utiliser de façon tout à fait générale pour des relations binaires vérifiant les propriétés suivantes :

- réflexives,transitives et complètes

- il existe au moins à chaque étape de l'évolution une décision pouvant être déterminée comme optimale .

- si une sous-politique P2 peut être considérée comme au moins aussi bonne qu'une politique P1 jusqu'à l'étape k,l'ajout d'une même décision (ou de décisions équivalentes ) ne modifie pas l'ordre de la relation entre les sous-politiques correspondantes (propriété de "monotonie").

Sous ces conditions très générales,il est possible d'appliquer un algorithme de programmation dynamique interactif:à chaque étape, on présente au "décideur", i.e. au module qui modélise ses préférences, la situation (l'état ,les décisions potentielles et leurs conséquences prévisibles).

Ce type d'approche est surtout intéressant lorsque le nombre de situations potentielles est limité et fait référence essentiellement à des préférences locales: on peut dire qu'elles généralisent à une attitude de type 2 la programmation dynamique établie initialement pour des problèmes selon une attitude de type 1.

Elle est basée sur deux principes qui nous permettent néanmoins une généralisation immédiate, modulo quelques adaptations de terminologie:

-le recours à des relations binaires entre décisions.

-une implantation de type interactif .

*N.B.:les énoncés précédents ont été faits sans restrictions particulières sur l'espace d'états à l'étape k.*

Nous allons, pour expliciter la façon dont s'introduit la notion de discordance, voir comment se modifient les algorithmes de programmation dynamique sous contraintes externes (i.e. non implicitement contenues dans la définition de l'espace d'état correspondant à cette étape).

Nous introduisons la notion de semi-optimisation que nous définissons comme la procédure sélectionnant ou conseillant un ensemble d'actions, selon une méthode d'agrégation de préférences à partir de relations de surclassement (que celle-ci soit de type MÉDCIM ou de l'une quelconque des méthodes d'agrégation à base de surclassement dérivées d'ELECTRE).

La procédure multi-étapes, interactive que nous proposons peut alors s'énoncer de la façon suivante:

1) On présente à l'opérateur (décideur)

- l'historique :i.e. le résultat de la politique partielle obtenue jusqu'à l'étape n-1 supposée semi-optimale au sens définie précédemment.
- l'ensemble des actions potentielles à l'étape n
- les conséquences selon les critères choisis (prévision pour l'étape suivante: ceci constitue une extension de la fonction "de retour" en programmation dynamique classique).

*Par définition, nous appellerons scénario le couple formé d'un historique et d'une prévision .*

2) L'opérateur effectue son choix (sélectionne une évolution du scénario)

3) La décision est ajoutée à la politique partielle.

( leur concaténation constitue le scénario correspondant à l'étape n).

*N.B 1 : Dans le cas où la procédure ne sélectionne qu'une action ou un groupe restreint, une procédure de recherche "en inverse" est envisageable.*

*N.B 2 : On pourrait améliorer la procédure dans certains cas particuliers par recherche heuristique de sous-politiques quasi-optimales minimisant des indices de discordance globaux.*

### II-1.2.Généralisation.

Bien que ,par la procédure précédente nous établissions une notion de semi-commande optimale suffisante dans notre cas , celle-ci peut apparaître comme une solution ad hoc ,destinée à légitimer a posteriori les options choisies dans MEDCIM. Nous pensons que tel n'est pas le cas et, pour réussir à mieux situer notre approche par rapport à celle de la commande dynamique ("classique" i.e. en l'absence d'interaction d'un opérateur ,nous allons faire appel à une présentation un peu plus récente de cette théorie.

#### Principe :

Le problème est de trouver les conditions "minimales" permettant d'appliquer le principe d'optimalité de Bellman. Dans le cas général, Clément [CLE75] a proposé pour cela, de construire un schéma d'automatisation, en "projetant" l'espace des actions dans un espace où s'effectuera l'évaluation et dans lequel ce principe est applicable.

Construire une procédure à N étapes consiste à "composer" d'une certaine façon les N transformations .

Plus précisément en terme d'automatisation : il s'agit de trouver la commande f, qui permette de passer "de façon satisfaisante" (au moindre coût,ou selon toute autre procédure pour laquelle cette expression a un sens) d'un état initial  $X_n$  à un état final  $X_0$ , par une suite de n "commandes"  $f_i$

f est factorisée sous la forme:

$$f = f_1 * f_2 .. * f_N (= \&f_N = \text{concaténation des N commandes}).$$

$$X_{N-1} = f_N * X_N \text{ et } \&f_{N-1} * f = \&f_N$$

On lui associe une valuation qui permet de plonger le problème dans une catégorie ordonnée; celle-ci peut être par exemple un ordre de classement, ou un indice de fiabilité. Le fait de calculer les "retours" dans un ensemble possédant une structure mathématique plus intéressante permet une extension aisée des méthodes de programmation dynamique

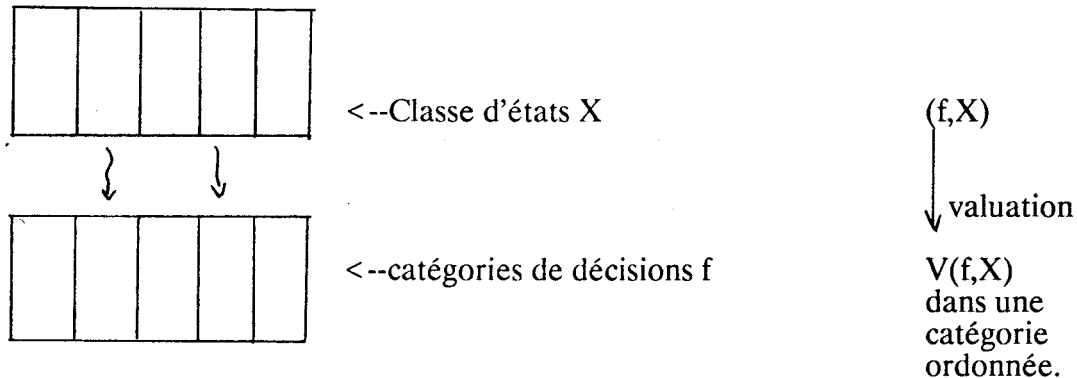


figure II-1 Processus de décision (automate généralisé)

Ceci permet avec un minimum d'hypothèses de proposer une unification des différentes approches de la programmation dynamique multicritère, le choix proposé au paragraphe précédent correspond à un exemple particulier d'une telle valuation calculée dans le cas de MEDCIM sur la base d'une fonction globale de préférence.

### II-1.3 Recherche d'un "Indice de fiabilité" (local ou global)

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que l'existence d'un indice global permettait de bâtir une valuation par laquelle on pouvait retrouver l'équivalent des processus de programmation dynamique "classique". Différentes techniques ont ainsi été proposées se rapprochant des diverses attitudes opérationnelles évoquées au chapitre III:

- l'indice de fiabilité local est considéré comme le "recollement" des indices obtenus à chaque étape par une procédure d'agrégation locale. Cette attitude, justifiée théoriquement, rend délicate une approche de type programmation dynamique, par nature plus globale.

- l'indice est obtenu par une fonction d'utilité multiattributs simple ou floue, stochastique ou non.

Des exemples représentatifs d'indice de ce type sont ceux obtenus à partir de la probabilité ou de la possibilité d'erreur (i.e. en tenant compte des PSF voir II chap.II)

Les procédures précédentes d'agrégation de préférences trouvent une interprétation naturelle dans la théorie des sous-ensembles flous. Ceci apparaît nettement dans le cas de variantes de type Prométhée où il serait facile de remplacer l'appellation par celle de "nombres flous".

La synthèse récemment effectuée par ROY et BOUYSSOU [ROY 87] permet d'envisager des développements intéressants utilisant les procédures d'agrégation multicritère conduisant à un critère unique de synthèse.



## II-2 Organisation de la commande.

Nous n'essaierons pas, dans ce paragraphe, d'unifier les différents sens qui ont été donnés au concept de mode de commande en téléopération (pour une synthèse récente voir [COI 85]).

Notre but sera de montrer :

- comment l'évolution des fonctionnalités d'un système de téléopération apportée par l'assistance de l'ordinateur conduit à une complexification de la commande remettant en cause l'organisation classique.

- l'apport dans ce cadre des méthodes exposées au chapitre II.

Ceci nous amènera à une structure de modes dits coopératifs, que nous généraliserons au paragraphe III par l'adjonction de fonctions de dialogue intégrées. Une nouvelle structure de commande en sera déduite qui servira de cadre aux exemples d'applications traités au chapitre V.

### II-2.1 Commande maître esclave généralisée (C.M.E.G.)

Celle-ci a été introduite par R.Fournier [FOU 83] pour l'étude de systèmes de commande maître-esclave en télémanipulation nucléaire.

Si l'on considère un système de téléopération classique, on sera amené à considérer 3 éléments, le plus souvent physiquement séparés, voire distants :

\* Le Poste Maître, où se trouvent le ou les opérateurs humains.

Ceux-ci ont à leur disposition, suivant la complexité de la tâche à accomplir, divers organes de commande. En téléopération classique, ils ont par exemple:

- une boîte à boutons avec ou sans manettes de commande d'axes.

- un syntaxeur ou mini bras capable de piloter dans des coordonnées autres que ceux du poste esclave.

- un bras-maître (avec ou sans retour d'effort).

Ceux-ci vont pouvoir être complétés par différents moyens de restitution de l'information en provenance de l'"univers esclave" :

- le retour d'effort déjà évoqué

- des moniteurs de retour visuel/caméra, celle-ci pouvant être ou non asservie aux déplacements...

\* Le Poste Esclave où s'"effectue" physiquement la tâche.

La géométrie du bras esclave sera, en général pour la téléopération classique, symétrique de celle du bras maître

\* Un Système de Traitement et de Transport de l'Information: celui-ci permet de casser la symétrie et donc de créer des modes de commande bilatéraux de bras maître et esclave géométriquement non parallèles.

Dans le cas des expériences effectuées dans le cadre de téléopération avancée du projet ARA, les fonctions suivantes ont ainsi pu être utilisées:

- changement d'échelle des mouvements de l'esclave par rapport au maître ( diminution de l'amplitude pour effectuer un travail de précision, augmentation pour un travail rapide ).

- décalage de position entre les deux bras. Ceci permet à l'opérateur de travailler dans un volume restreint ("de confort") habituellement central.

- bien que ceci puisse poser des problèmes ergonomiques de repérage non entièrement résolu, des opérations plus complexes ont été réalisées:

**Exemple :** changement de référentiel pour assurer la correspondance entre les mouvements de l'esclave "vus au travers du référentiel d'une caméra" et les mouvements effectués par l'opérateur dans son repère.

Un retour d'effort généralisé a également été implanté, c'est à dire redonnant parmi les différents efforts ressentis par le bras maître un retour:

- inertiel i.e. relatif à l'objet transporté par l'esclave
- d'interaction avec l'environnement (choc, frottements)
- parasite (frottements internes, trainage dans la commande)

On peut, par ailleurs filtrer l'effort inertiel et le restituer par une estimation du poids de l'objet transporté et l'élimination dans le retour de l'effort correspondant.

L'assistance calculateur permet, enfin, d'introduire des contraintes artificielles permettant de générer :

- des trajectoires parallèles à un plan  
(l'opérateur garde le contrôle de 4 degrés de liberté)
- idem avec contrainte sur l'organe terminal (3 degrés pour l'opérateur)
- sur une droite à orientation constante

Ceci permet de réaliser une certaine "adaptativité" vis à vis des contraintes de la tâche.

On conçoit tout l'intérêt de ce type de modes dans les opérations classiques de vissage/dévissage, d'ébavurage etc...

Ceux-ci ont contribué à faire apparaître un langage de communication gestuelle avec partage des degrés d'actions entre l'opérateur et le système automatique.

Notons l'intérêt que représente l'intégration de ce type de langage en robotique classique comme généralisation des programmations "par l'exemple". Cette idée qui a été défendue dès le début par Jean Vertut qui en fut l'initiateur [COI 84] nous a conduit à bâtir un système de programmation, qui soit compatible avec l'intégration de ce langage gestuel dans l'ensemble du système de programmation du manipulateur. Celle ci comporte en fait plusieurs volets :

- la réalisation du système superviseur permettant l'écriture et la gestion

[GRA86]. Le résultat en a été la définition du système SARAH dont nous donnerons une brève description dans la suite.

*N.B. : l'idée initiale était de réaliser le "système d'exploitation" du système Hommes/Télemanipulateurs en rendant celui-ci configurable : les méthodes d'allocation dynamique évoquées précédemment fournissant les algorithmes d'allocation optimale des ressources Homme/Robot. Cette conception qui a été à la base de certains des choix effectués initialement (langage FORTH, à la fois langage et système d'exploitation, très "extensible" qui plus est) se place dans l'analogie informatique évoquée au chapitre II.*

## II-2-2 Retour d'information généralisée.(R.I.G.)

Les possibilités d'utilisation d'une commande référencée capteur évoluée, puis d'utilisation d'information simulée à partir d'une base modélisant l'environnement 3D d'évolution du manipulateur ont permis, dans le cadre du projet ARA de reboucler sur l'opérateur nombre d'informations sous une forme non classique.

C'est ainsi que les efforts artificiels générables à partir de champs artificiels placés autour des obstacles ont permis de rendre une information de proximité "naturelle", directement traitable à l'aide des traitements kinesthésiques de l'opérateur.

Sans approfondir la commande référencée capteur développée à ce propos par l'équipe de l'IRISA de Rennes [AND83 et 86], nous rappellerons simplement ici deux exemples des possibilités de celle-ci, importants dans la recherche d'une sécurité hommes/machines accrue en téléopération.

*Exemple 1: Retour d'effort artificiel.*

*Celui-ci correspond au schéma de commande suivant :*

*en posant  $\xi_{E/M}$  = écart de position Maître/Esclave*

*$\xi_{M/E}$  = erreur de commande Maître/Esclave*

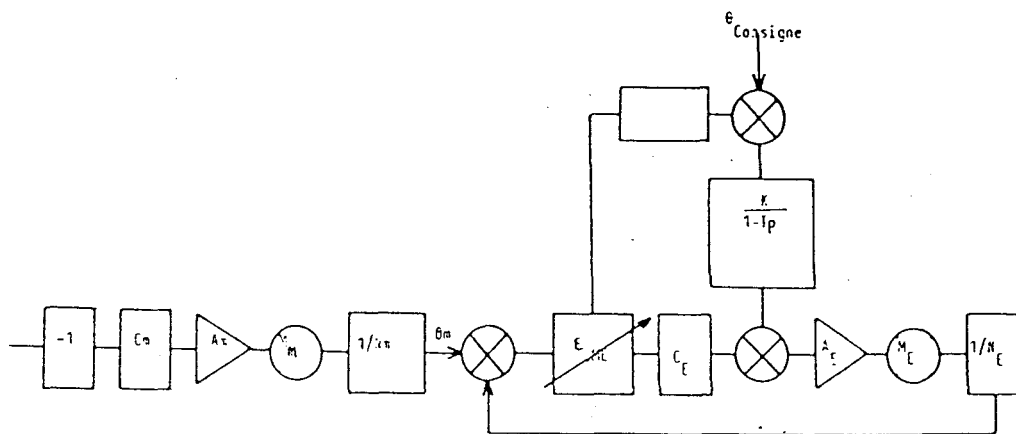


Figure II-2 Retour d'information généralisé.

*La position de l'esclave ne dépend pas seulement de celle du Maître, mais également de l'erreur de centrage: Il y a ainsi création d'une erreur de position artificielle générant une sensation d'effort sur la poignée du maître.*

*Au niveau Maître, les équations dynamiques sont:*

$$Q_M + T_M = kM (\theta_M - \theta_E) = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M$$

Au niveau de l'Esclave, elles sont:

$$T_E = k E (\theta_M - \theta_E) + Q_C \text{ avec } Q_C = k_C (\theta_C - \theta_E)$$

$$T_E = J_E \ddot{\theta}_E + f_E \dot{\theta}_E$$

$$\text{donc: } Q_M = (-kM/DE) Q_C - C \text{ dem}$$

Le retour d'effort est induit par la correction automatique de position de l'Esclave, transmise par retour d'effort standard.

2 types de fonctionnement peuvent ainsi être mis en évidence :

- le Maître se laisse conduire par le retour d'effort, l'erreur de centrage est prépondérante:

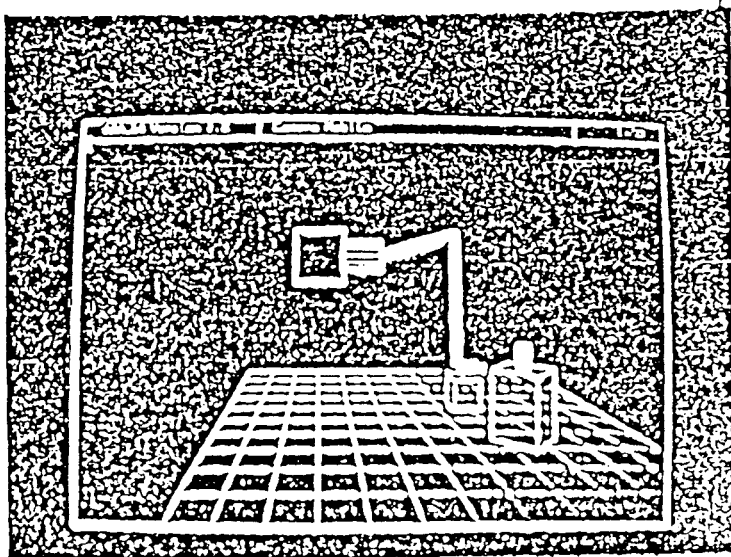
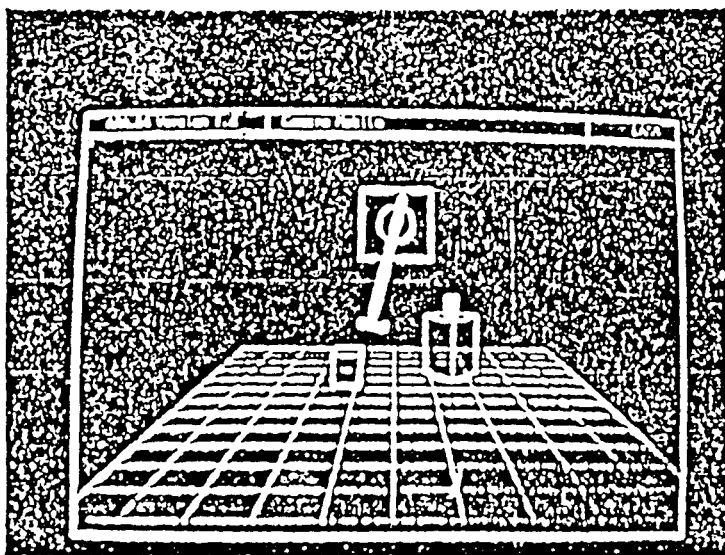
$$\theta_C \rightarrow \theta_E \rightarrow \theta_M$$

- la position initiale correspond à la position d'équilibre ( $\theta_M = \theta_E = \theta_C$ ), un  $\theta_M$  impose un nouvel équilibre avec  $kM = kC$  avec un retour d'effort  $Q_M = kC/kM \theta_C$  : la raideur dépend de  $kC$  et peut être utilisée pour corriger adaptivement l'erreur  $\theta_M/E$ .

Des retours de ce type créent un "univers local", de type newtonien par exemple, que l'opérateur sait interpréter. Les objets de l'environnement créent des potentiels attractifs ou répulsifs suivant que la tâche est de saisie ou d'évitement par exemple.

Exemple 2: Retour graphique simulé (vision synthétique)

Celui-ci est généré par une modélisation de l'environnement sur une base de donnée de CAO. Elle permet d'effectuer une tâche en vision cachée en visualisant une représentation simplifiée des éléments cachés permettant une analyse globale de la scène. Les défauts de modélisation sont compensés par l'utilisation simultanée, éventuelle, d'informations proximétriques locales. (figure II-3)



*Figure II-3: Retour graphique simulé.*

De façon générale, ces bouclages permettent de créer des structures de boucles commande/perception, chacune d'entre elles correspondant à un mode distinct (figure II-4).

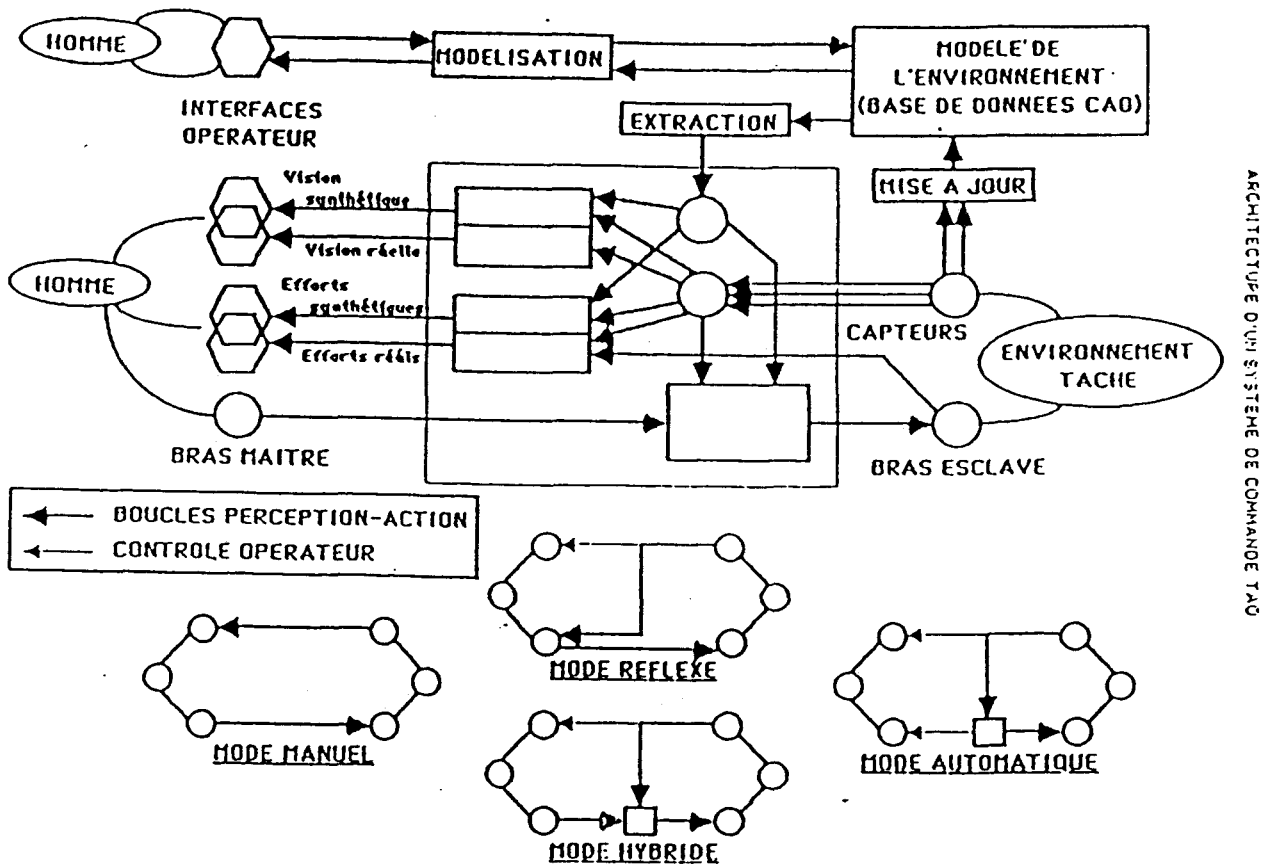


figure II-4: Boucles perception-action fondamentales en TAO [AND 86]

### II-3 Décentralisation en TAO.

#### II-3-1 Principales options.

La théorie de la commande automatique a tout d'abord été appliquée à l'étude des systèmes mécaniques et électriques. Depuis une vingtaine d'année, celle-ci a pu être étendue efficacement à l'étude de systèmes plus complexes (sociaux, politiques, économiques, médicaux, voire de management).

Ces nouveaux systèmes ont fait apparaître des contraintes spécifiques liées à :

- leur complexité
- leur imprécision (structurelle ou incertitudes liées à la mesure de leurs paramètres et performances)

Les problèmes de décision peuvent être abordés par 3 chemins différents :

- la théorie de la commande classique (i.e. avec un niveau unique et 1 seul but):

Nous avons vu sous quelles conditions celle-ci peut être généralisée.

- la théorie des jeux et des coalitions:

s'occupe de systèmes à 1 niveau mais à buts multiples : l'approche du chapitre III se plaçait implicitement dans cette optique.

- la théorie systèmes hiérarchiques à niveaux multiples :

s'occupe de systèmes à buts et niveaux multiples, caractérisés par une relation hiérarchique entre sous systèmes et une unité de niveau supérieur.

Celle-ci permet en particulier de résoudre un problème de la commande optimale par variables d'états: l'absence de distinction entre systèmes multidimensionnels et systèmes multivariables. On sait de plus que le calcul nécessaire croît comme le carré de l'ordre du système.

Parmi ceux fréquemment rencontrés dans l'étude des systèmes complexes : nous reprendrons sa classification dans ce paragraphe.

Il a étudié le problème de changement dans les structures conduisant à l'établissement des canaux de communications dans les systèmes auto-organisés.

EX : dans un problème de commande en temps minimal le résultat peut montrer que la solution est améliorée si aucune information n'est échangée entre sous-processus.

Dans le cas, que nous avons étudié en TAO c'est essentiellement le problème de COORDINATION qui nous semble pouvoir profiter de cette approche.

Trois types principaux de coordination ont été mis en évidence par Mesarovic basés sur :

- la prédiction des interactions
- l'équilibrage des interactions
- le principe de découplage des interactions

N.B. : Notons une tentative intéressante pour appliquer les résultats des théories précédentes aux systèmes biologiques: Guelfand [GUE65]) a montré qu'il était possible d'interpréter par la théorie des jeux le problème de la coordination d'un bras naturel: il énonce un "principe du minimum" dans les systèmes physiologique ou de moindre action analogue aux principes de Hamilton en mécanique classique.

Ce type d'approche par analogie a contribué au succès des approches hiérarchisées dans la modélisation des mouvements humains et par extension en téléopération.

On peut considérer que les expérimentations qui ont résulté de cette réalisation ont mis en évidence :

- l'adéquation d'un modèle de type "réseau général" dans la conception de l'organisation de la commande

- la nécessité de disposer d'outils permettant d'assurer la cohérence du fonctionnement du réseau.

Il est à noter que celles-ci sont restées implicites dans les cas du prototype ARA, pour lequel un partage statique des modes a été effectué avec une gestion dynamique restreinte en temps réel (exécutif Sarah)

L'implantation d'un partage dynamique dans une structure réticulée impose néanmoins des contraintes spécifiques difficiles à représenter selon un modèle uniquement hiérarchique.

En particulier, les comportements stables (Modes) de ce réseau sont descriptibles en terme de structure hiérarchisée, les transitions entre modes présentent des structures intermédiaires plus complexes, dont il importe de savoir contraindre les comportements et les évolutions indésirables.

### II-3-2 Formulation du problème.

Suivant le type de décomposition du système de commande, l'interprétation des algorithmes de partage Homme/machine, considérés comme méthodes de coordination entre sous systèmes, varie. Ceci conduit à des structures d'implémentation différentes.

Classiquement, une décomposition de système est considérée comme une répartition des fonctions entre unités interconnectées, non indépendantes, agissant en COOPERATION pour la réalisation d'une tâche (i.e. d'un BUT avec des conditions d'obtentions spécifiées).

Un NIVEAU de cette décomposition est constitué de toutes les unités effectuant une même fonction; on parlera des niveaux de commande, de coordination ou d'organisation.

Pour lever des ambiguïtés de langage et classer les systèmes hiérarchiques, Mesarovics a proposé de considérer 3 notions de Niveaux:

le STRATE: niveau de description ou d'abstraction.
--

Celui-ci est constitué de toutes les unités physiques connectées au même sous-système physique.

EX1 : le niveau de commande est en fait constitué de 3 strates correspondants aux 3 degrés de libertés x,y,z du manipulateur.

EX2 : Un système de synthèse de texte est constitué de 4 strates correspondant à la composition, à la génération de phrases, puis de mots, enfin de sons.

EX3 : Un système commandant un processus industriel peut être considéré à 3 strates (physique, traitement de l'information, économique)

la COUCHE: niveau de complexité de la décision.
---

Celle-ci est formée de toutes les unités interconnectées participant à la même étape temporelle du processus de décision à un certain niveau.

EX1 : Résolution de problèmes logiques à l'aide de transformations élémentaires constituant des "couches" successives (méthode de Newell)



EX2 : Hiérarchie fonctionnelle dans une décision ou une commande à 3 couches:

\*de CHOIX: recherche d'une action préférable ou acceptable selon certaines conditions(régulation + optimisation)

\*d'ADAPTATIVITE ou d'APPRENTISSAGE: réduction ou élimination des incertitudes

\*d'AUTO-ORGANISATION: choix des stratégies à utiliser pour la recherche de solutions

l'ECHELON: se référant aux niveaux d'organisation.
--

Le système est décomposé en sous systèmes en interaction explicite et contient des sous-systèmes décideurs organisés hiérarchiquement.

Ces trois notions ne sont pas, bien sûr, exclusives entre-elles . Nous aurons donc à considérer en TAO

- des niveaux de commande, bien décrits par une approche multi-strates.

- une structure des langages emboîtés faisant plutôt référence à une structure multi-échelons.

- des méthodes décisionnelles mieux décrites suivant une approche multi-couches.

La structure de commande que nous proposons doit être vue selon ces différentes représentations suivant le type de problème évoqué (étude de la dynamique physique des éléments, prise en compte des évolutions temporelles ou échange des informations).

Ces représentations, réciproquement, orientent l'implantation, les langages associés et la structure du réseau d'échange entre parties du système de téléopération.

### III-APPLICATIONS EN TAO ET INTERACTIVITE

La mise en oeuvre des méthodes évoquées précédemment en TAO nécessite d'étudier de façon beaucoup plus précise le langage de communication lui servant de support.

Les expérimentations menées ont conduit à l'élaboration de plusieurs types de dialogue. Nous avons pu constater l'inefficacité relative de certains d'entre-eux :celle-ci étant très contextuelle,il est difficile de proposer une approche générale dans la sélection adéquate du mode de dialogue.

On constate, une nouvelle fois la nécessité de réaliser des compromis entre plusieurs critères de choix pouvant éventuellement mener à des contradictions.Le choix d'un moyen de dialogue fiable pourra, par exemple, s'opposer à l'utilisation d'un dialogue en langage naturel et nécessiter l'utilisation d'un langage opératif frotement codé "éliminant le bruit (on retrouve là une nécessité bien connue en aviation).

De façon générale on doit concilier réactivité du système ( i.e. promptitude ) et convivialité. Cette conciliation ne peut être absolue et devra en particulier pouvoir être

De façon générale on doit concilier réactivité du système ( i.e. promptitude ) et convivialité. Cette conciliation ne peut être absolue et devra en particulier pouvoir être modifiée en situation critique.

Ce problème, qui est en fait celui de la fiabilité de toute interface "adapative" utilisée dans un environnement "temps réel" peut actuellement être abordée de différentes façons. Nous essayons dans ce paragraphe de construire une interface Homme/Machine en TAO en étudiant le dialogue suivant son double aspect:

- MATERIEL : i.e. les moyens du dialogue(en TAO : gestuel, textuel, graphique, vocal...)
- LOGICIEL : sur la nature (le style) du dialogue imposé en particulier par le ou les types de langages utilisateurs .

Nous situerons notre approche par rapport à celles ,plus classiques apparues dans les systèmes de TAO: ceci nous permettra de dégager la notion de station de travail en TAO, et d'examiner comment les notions voisines apparues en bureautique et en CAO peuvent être transposée, aainsi que leurs limites d'utilisation dans notre cas.

Nous verrons en fait que l'activité de l'opérateur en TAO peut s'apparenter, suivant la phase considérée (planification ,exécution) à celle d'un concepteur ayant à travailler dans un contexte temps réel en respectant des ordonnacements temporels stricts (exemple de la composition musicale).

Nous terminerons ce paragraphe en examinant comment certaines techniques d'intelligence artificielle pourraient aider la tâche de planification en y intégrant le dialogue à travers la notion de conception de scénarios interactifs.

### III-1 L'interactivité en TAO.

L'existence de retours d'informations généralisés, étroitement liés à la commande Maître-Esclave généralisée, donne à la fonction de dialogue Homme/Machine un rôle déterminant en TAO.

Comme cela est en général le cas pour un système utilisant la supervision dynamique, les méthodes de partage de tâche Homme/Machine renforcent ce rôle .

L'établissement d'un système d'interactions Homme/Machine équilibrées suppose donc:

- que le calculateur puisse mettre à jour en temps réel son modèle d'environnement : c'est le rôle des modules espions, "homme" et "machine". Il faut également pouvoir gérer de façon adéquate le retour vers l'opérateur.

- que, de façon symétrique, l'opérateur puisse accéder aisément aux informations (d'état et d'évolution) pertinentes dans l'exécution de sa tâche et transmettre ses ordres au calculateur.

Les cas de conflits, en particulier ceux engendrés par un modèle d'environnement inadéquat ou incomplet, doivent également être pris en compte.

#### III-1-1 Différentes formes de dialogue.

La classification que nous proposons est en fait relativement indépendante de l'aspect du dialogue; elle se rapproche de celle proposée par Greenstein

Les "modes de dialogue" sont classés dans l'un des types suivants :

##### a) de Type formulaire

*Caractéristique : très structuré, les informations sont "cadrées" dans des champs possédant des valeurs par défaut.*

##### b) avec "Invitation"

*Caractéristique : de type Formulaire dirigé par programme*

##### c) Sélection dans un menu

*Problèmes :*

*.choix du codage*

*.de la présentation*

*.hiérarchisation des menus*

*.séquencement du dialogue*

##### d) Langages de commande:

*Accès de l'utilisateur à une programmation fonctionnelle*

##### e) Langages d'interrogation

*Développés pour l'accès à des informations aux bases de données, ils peuvent être considérés comme des cas particuliers de langage de commande .*

*caractéristiques : flexibles, vocabulaires limités dans un contexte déterminé bien adapté au dialogue vocal.*

### III-1-2 Supports du dialogue.

En dehors des actions mécaniques (gestes, claviers, souris...), de nombreux supports physiologiques ont été envisagés en téléopération avancée. Le projet SPARTACUS d'aide aux handicapés physiques [GUI 87] a permis plus particulièrement de mettre en évidence les avantages relatifs de ces différents supports .

On distinguera dans les signaux biologiques utilisables [AND 80]:

- les signaux bio-acoustiques (parole naturelle, langages sifflés, mélodiques)
- les signaux myoélectriques: recueillis à l'aide d'électrodes et nécessitant un traitement de signal assez complexe;
- les mouvements (de tête, de pieds, d'épaules...)

Sans entrer dans le détail de ces moyens, il faut souligner la nécessité de les associer de façon suffisamment souple pour tenir compte des caractéristiques de l'opérateur et de la tâche.

L'intégration des moyens de dialogue vise à établir une certaine indépendance entre le logiciel de commande "vu du calculateur" (dialogue virtuel) et "vu de l'utilisateur", au travers de l'interface Homme/Machine. Ceci pour permettre :

- la reconfiguration statique aisée lors du changement d'un support (textuel clavier à la parole...)
- la reconfiguration dynamique permettant de sélectionner suivant le contexte de la tâche, et donc le "Mode de commande adapté le "mode de dialogue" adéquat.

N.B.: Pour éviter des confusions ou des abus de langage cet aspect "complément au mode de commande" est parfois exprimé en utilisant le terme de fonctions de dialogue à la place de mode [GRA88]

### III-1-3 Types d'ouverture de dialogues.

L'ouverture d'un dialogue est une notion introduite par Eason [EAS 80] et vise à exprimer le rôle que doit avoir l'opérateur (conducteur du dialogue ou non) suivant les caractéristiques de la tâche.

Nous dirons qu'une tâche est fermée si:

- ses objectifs ne varient pas à chacune de ses réalisations
- l'opérateur y a un comportement algorithmique
- les paramètres caractéristiques de la tâche sont prédictibles et peu variables: ils ne peuvent en modifier la nature.

Ceci implique en particulier que les contraintes propres à une tâche fermée soient aisément prises en compte par le logiciel d'interface.

Une tâche fermée sera le plus souvent aisément "automatisable", le dialogue évoqué correspondra aux phases d'initialisation, et de supervision du système: il pourra être relativement "figé". (menu, formulaire, invitation)..

L'ouverture du dialogue sera lié à des environnements changeants où le calculateur et l'opérateur sont confrontés à des incertitudes importantes empêchant l'automatisation et obligera d'utiliser des types de langage différents .

En effet, le "partage" d'informations Homme/Calculateur conduit:

- à utiliser les capacités de l'opérateur à manipuler une information "globale" ou synthétique

- à charger le calculateur des informations nécessitant un traitement algorithmique sur un flux de données important .

Ces deux tendances contradictoires posent en fait le problème d'une "interface de communication" adéquate". Celle-ci est très dépendante du contexte et nécessite une gestion dynamique des configurations.

### III-2 La fonction de supervision du dialogue.

La nécessité de gérer de façon rationnelle le dialogue, considéré comme une ACTIVITE, a conduit dans les années 70, à imaginer des systèmes de représentation calquée sur celles de scénarios de comportements usuels de dialogue homme/machine.

On distinguera [VIL 85] les systèmes inspirés de la notion de scénarios interactifs ("scripts") qui conduisent à la notion de stéréotype, de ceux basés sur des systèmes experts.

Nous aborderons plus particulièrement le premier type de systèmes et ne feront qu'aborder l'utilité pratique, quoiqu'encore naissante, du deuxième type pour la réalisation de modèles auto-explicatifs.

#### III-2-1 Approches basées sur les stéréotypes [GOL 79] [BOB 77].

Lorsque les actions à effectuer sont bien figées et en nombre restreint, il est possible de maîtriser le dialogue en établissant des structures figées.

Ceci n'implique pas forcément un dialogue très dirigiste mais le calculateur n'extrait que les informations nécessaires pour compléter les "slots" laissés ouverts dans les scénarios types.

Le dialogue bâti est contextuel et peu adaptatif, ceci, malgré une interface externe souvent en langage naturel restreint.

#### III-2-2 Approche basée sur un système expert.

L'interface utilisateur vise alors essentiellement à exploiter les capacités auto-explicatives de l'environnement associé (niveau de traces, visualisation multiforme).

Sa principale qualité est la souplesse, puisque la configuration de l'interface peut se baser sur des métarègles d'assemblage. L'absence de norme reconnue (en particulier sur l'imagerie à utiliser) demande néanmoins une démarche pragmatique.

S'il paraît intéressant de pouvoir disposer ainsi d'un guide pour une conception ergonomique de l'interface, il faut néanmoins limiter cet usage à une première approche, le processus récursif de construction de l'interface n'étant pas réductible à l'application d'un ensemble de règle universel.

#### III-2-3 Le dialogue comme objet.

Avant d'aborder les règles pratiques de construction du dialogue, il est important de rappeler les conclusions d'études, dont l'objet était le dialogue lui-même, et qui peuvent servir de base critique pour une méthodologie de conception de scénarios interactifs.

Dans un premier temps, celles-ci mettent en évidence l'importance de l'implicite dans le dialogue ainsi que des niveaux d'interprétations différents des décalages, entre la situation réelle et le stéréotype évoqué. Des règles sont nécessaires pour la compréhension du dialogue.

Grice [GRI 75] a ainsi énoncé un principe de coopération impliquant la cohérence entre une intervention dans le dialogue et l'état de la conversation: cela implique, dans une situation complexe, que l'on donne à l'opérateur la possibilité de "visualiser" un état et éventuellement un historique de ce dialogue.

Nous verrons au chapitre V (III-1) comment ceci intervient au niveau de l'activité de "planification" de la tâche en TAO, qui s'apparente plus à celle de conception de scénarios interactifs pour laquelle :

- le modèle hiérarchique est une bonne représentation de l'activité planifiée. (suite de décomposition en buts et sous buts).

- la production du scénario, elle, doit pouvoir se référer à plusieurs niveaux simultanément avec des possibilités de "manipulation" plus complexe du scénario (modèle opportuniste).

L'interface Homme/Machine doit, en TAO, tenir compte de cette activité "hors ligne" qui pourra intégrer l'utilisation du système réel (programmation par l'exemple généralisée).

De manière à proposer une méthodologie de conception de ce type d'interface, qui soit adaptée à l'approche basée sur les modes coopératifs, nous détaillons dans les paragraphes suivants :

- la nouvelle notion de poste opérateur à laquelle nous sommes arrivés et son outil de dialogue associé.

- la représentation que nous nous proposons d'adopter qui permet d'unifier celle des modes et des fonctions de dialogue: celle-ci présentera l'avantage de pouvoir servir de base à une implantation effective d'un système d'aide à la programmation.

### III-3 Langage en TAO et station de travail intégrée:

Nous avons défendu dans ce qui précède, la thèse selon laquelle on pouvait améliorer la sécurité du système hommes/machines par une organisation appropriée de la commande du système. Nous avons pour cela introduit la notion de modes coopératifs. Cette introduction implique certaines modifications sur l'interface hommes/machines.

En nous appuyant sur des principes généraux de conception de cette interface, nous allons plus particulièrement étudier les conséquences sur:

- l'organisation du dialogue.
- le choix du langage utilisateur.

#### III-3-1 Langage et TAO: l'exemple de SUPERMAN.

Le problème d'établissement d'un langage approprié à la commande supervisée a été abordé par Shéridan, qui fut l'initiateur de ce type de commande en TAO, à travers le système superman (SUPERvisory control of MANipulators).

Le système est bâti autour d'un langage de commande classique permettant la création puis l'exécution de fichiers de commande "Tâches" mais également la mise en oeuvre effective de modes de téléopération correspondant à des états de la Machine.

Exemples: [BRO79]

- . Etat STANDBY: correspondant à une conduite en mode manuel.
- . Etat DEFINE: modes de programmation par l'exemple.
- . Etat EXECUTE: mode automatique.
- . Etat TAKEOVER: reprise en mode manuel.

Chacun de ces états correspondra à plusieurs modes de commande mis en oeuvre par l'exécution des fichiers correspondants.

Exemple : pour l'état STANDBY, on retrouvera des fichiers de commande correspondant à la commande en vitesse, à la commande hybride position/vitesse, au mode Maître/Esclave avec ou sans retour d'effort etc...

L'interface Homme/Machine est constituée :

- de touches de fonctions rotatiométriques permettant l'exécution rapide des instructions du langage de commande (interface DASI)
- du manipulateur maître
- d'un clavier ASCII et d'un écran alphanumérique et graphique. Chacun des fichiers en cours de création est visualisé ainsi que le mode engagé et les instructions accessibles.

#### III-3-2 Evolution de l'interface de dialogue en TAO

2 approches complémentaires ont été développées, faisant suite aux travaux de Sheridan:

### \*L'approche opérationnelle:

Celle-ci est bien représentée par la mise au point du poste opérateur du manipulateur TAO 1 au CEA, suite au projet Spartacus.

Cette approche, qui vise à déduire un produit industriel simple d'usage, donne accès via un langage de commande simple aux fonctionnalités nouvelles introduites par l'assistance ordinateur.

L'interface de type symbolique correspond, du point de vue logiciel à un automate séquentiel géré par une logique de type Grafcet et physiquement d'une boîte à boutons, d'un potentiomètre, d'un écran tactile et du bras maître.

Celle-ci est bien adaptée (par ses qualités ergonomiques) à une commande maître/esclave généralisée à nombre de modes fixe et limité.

### \*L'approche "apprentissage généralisé":

C'est celle du langage LARTS. Elle comprend actuellement plusieurs niveaux de programmation:

- LARTS/T: correspondant à la programmation par recopie ("par l'exemple")
- LARTS/W: avec gestion "intelligente" d'une base de données d'objets de l'environnement.

### III-3-3 La notion de station de travail en TAO.

Nous avons été amenés à introduire cette notion pour trouver un cadre commun aux différents travaux effectués autour du poste opérateur dans le cadre de ARA.

Les différents cas d'utilisation de la console généralisée ainsi constituée (pilotage mais aussi configuration du site, programmation, apprentissage etc) qui, par souci d'assurer un cycle de vie cohérent aux applications qui devront y être traitées montre que cette généralisation était nécessaire mais non suffisante. Nous verrons comment nous envisageons de la compléter.

#### III-3-3-1 Motivations.

L'augmentation du nombre d'informations disponibles sous formes brutes ou prétraitées permet de reboucler sur l'opérateur une quantité importante d'informations de natures diverses.

Un compromis est donc à rechercher entre complétude et pertinence pour optimiser le poste de travail en TAO.

Le filtrage des informations disponibles, leur intégration au sein d'une interface usagée pose un certain nombre de problèmes à caractères généraux. La création d'interfaces pour des systèmes interactifs, destinées à des usagers non professionnels de l'informatique s'est en effet matérialisée d'une part par l'apparition d'interfaces usagers spécifiques à chaque application (x calc, éditeurs), d'autre part par l'arrivée de boîtes à outils à usage plus général (gestionnaire de fenêtres, de menus déroulants, de logiciels graphiques (GKS) et de système de désignation plus direct (souris, commande vocale, lightpen...)

Parallèlement, les techniques de dialogues (menus, formulaires, icônes) ont évolué avec séparation système logique/système physique permettant de rendre en partie transparente les modifications matérielles. Celles-ci sont associées, le plus



souvent, avec des techniques de programmation orientées objets et une approche métaphorique. Bien que, dans de nombreux cas (en bureautique notamment), l'ergonomie des postes de travail s'en est trouvée améliorée, on peut néanmoins noter:

-qu'elles limitent le système informatique aux possibilités incluses dans les métaphores

-qu'elles modifient les modes opératoires de l'utilisateur et parfois les objectifs de la tâche à accomplir.

C'est pourquoi dans ce domaine, il est important d'étudier avec le concours d'ergonomes, les modifications sur le travail, introduites par ces nouveaux médias. Une voie très importante est fournie actuellement par les stations permettant le prototypage (ou maquettage des interfaces usagées).

Nous allons décrire sur un cas concret (présentation des informations visuelles) l'apport de l'ergonomie: ceci nous conduira à la station de travail en TAO définie pour ARA. Nous discuterons ensuite les options prises de manière à vérifier leur adéquation avec nos objectifs initiaux (assurer la sécurité lors d'un partage dynamique de fonctions Homme/Machine).

### III-3-3-2 Organisation des informations visuelles en TAO.

A la commande proprement dite du manipulateur, vient se superposer différentes commandes annexes destinées à régler les dispositifs auxiliaires à la disposition de l'opérateur de TAO.

Dans l'exemple de la manipulation canonique ARA effectuée au CEA Saclay, on pouvait a priori dénombrer:

- la commande des deux caméras.
- la commande du dispositif de changement de mode (boutons).
- la commande d'arrêt d'urgence.
- la programmation des paramètres (gain de retour d'effort et facteur d'homothétie).
- la commande du porteur.

De façon générale, il est possible de déterminer deux grandes classes d'informations auxquelles seront associés des dispositifs annexes :

1) Les informations de commande du manipulateur (fermeture de l'une des boucles évoquées au chapitre I) soit :

- visualisation de la scène
- vision synthétique
- visualisation des efforts

2) Les informations de surveillance ou système

- fonctions programmées
- modes et changements de modes

-espions

L'intervention ergonomique initiale permet de définir, de façon cohérente, l'interface entre l'opérateur et le système de télémanipulation, ce qui nécessite la connaissance:

-de la description fonctionnelle des composants élémentaires.

-du cadre d'utilisation et de la population d'utilisateurs concernés et permet de définir précisément:

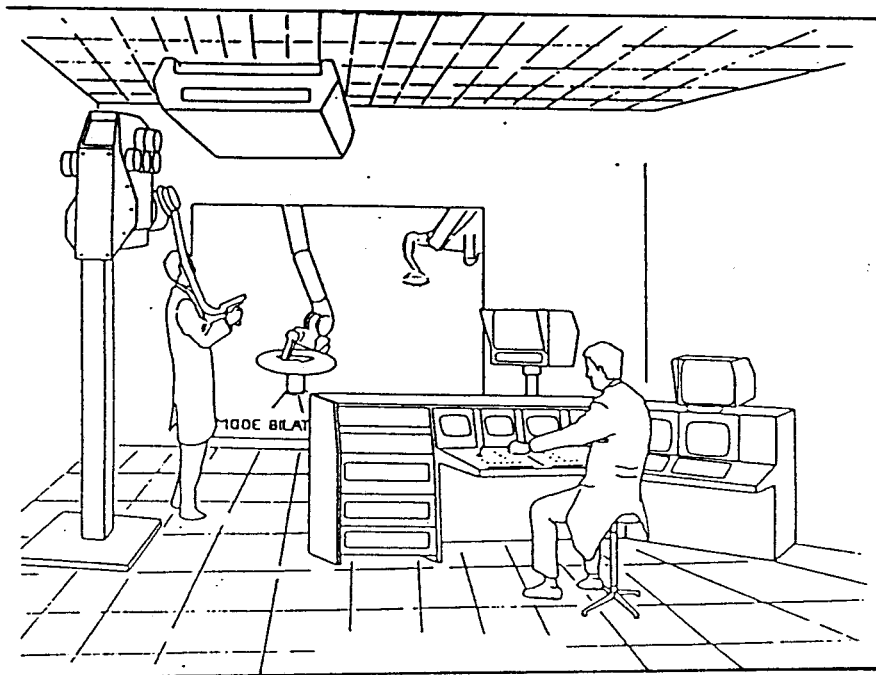
-le contenu des tâches (auquel seront associées une complexité, une estimation du nombre d'opérateurs nécessaires etc...)

-la présentation adéquate des informations dans les différentes phases: à ce niveau, un choix de modes de présentation pourra être laissé à la disposition du superviseur selon le degré de finesse de description des tâches; Il en résultera la définition de modes (ou fonctions) de dialogue associés à une certaine classe de phase.

-l'environnement physique du poste (siège, éclairage ..)

-l'aménagement du matériel dans l'espace de travail.

Exemple: l'étude menée par le laboratoire de robotique d'Evry, dans le cadre d'ARA a ainsi permis de définir une organisation composée de deux postes de travail (voir figure III-5):



-le premier adapté à un opérateur debout est destiné aux tâches de télémanipulations et aux activités directement associées; Il lui correspondra plutôt des informations de commande.

-le second, adapté à un opérateur assis, est destiné aux tâches de contrôle et de surveillance :

- commande des caméras.
- configuration en ligne du système (réglage des paramètres).
- gestion des informations video à destination de l'opérateur debout.
- retour des informations des espions

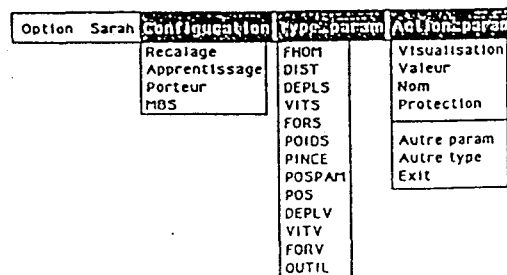
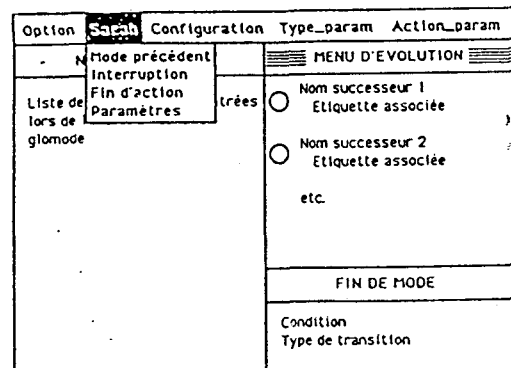
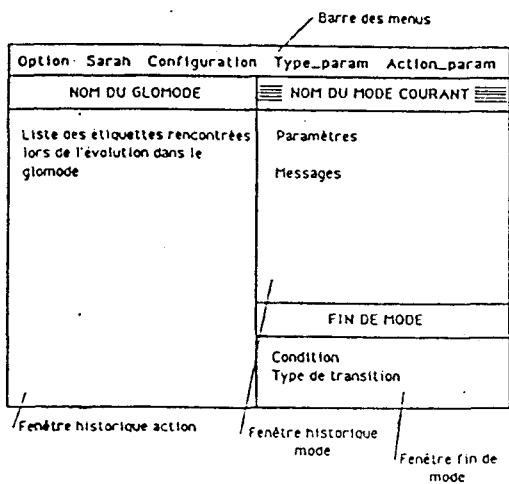
Pratiquement, le premier poste était constitué d'un écran géant et d'un moniteur vidéo normal permettant le retour d'une caméra placée perpendiculairement au manipulateur. Le second poste comprenait:

- une régie video de multiplexage et de truquage.
- une micro-station de travail (macintosh).
- deux écrans de contrôle.

L'aménagement du poste consistait dans le choix des dimensions de l'ensemble (en particulier pour respecter des contraintes de précision, de force et de perception visuelle des opérateurs), l'éclairage, l'ambiance sonore (pour faciliter le dialogue inter-opérateurs et l'utilisation de la commande vocale) et l'ambiance thermique.

Ecran opérateur en phase de transition

Ecran opérateur dans le suivi d'exécution d'un mode de commande



Exemples d'écrans opérateurs: type de dialogues

### III-3-3-3 Présentation des informations de commande.

L'interface opérateur est destinée, en particulier, à un suivi adéquat de l'exécution d'un mode de commande coopératif. Il est essentiel pour permettre d'inclure l'opérateur dans la boucle de décision interactive impliquée par les méthodes de partage de fonctions que celle-ci soit d'une convivialité adaptée.

Exemple: Dans le cas ARA, la micro station de travail était utilisée pour permettre l'utilisation d'une gestion dynamique multifenêtre contrôlée. (Le choix du MACINTOSH a été guidé par des contraintes de coût à la date de début de cette manipulation-1983, celui du langage a été basé sur une compatibilité avec celui de l'implantation des modes de commande -FORTH-et de l'interfaçage immédiat à la boîte à outils; ces choix seraient probablement différents aujourd'hui).

Les informations présentées seront considérées comme un langage de retour symbolique permettant de renseigner les opérateurs sur les comportements de la machine de TAO.

Exemple: Dans le cas de ARA, ces informations concernaient essentiellement des retours sur l'évolution dans le graphe des modes de commande :

- informations sur le mode courant.
- messages émis en cours de modes, sans progression entre modes.
- conditions de fin de mode.
- type de transitions effectuées.

Des menus successifs présentaient :

- le but du mode en cours
- l'évolution de la tâche
- les paramètres de la tâche.

En retour, l'opérateur disposait d'un certain nombre de degrés d'action concernant:

- le lancement d'un mode global.
- la sélection dans un menu de l'évolution dans l'arbre des modes (la fenêtre menu d'évolution se substituant pendant la phase de transition à celle du menu courant).
- la sélection dans le menu de configuration (recalage-apprentissage de trajectoire).
- le choix de l'affectation des paramètres au mode.

Ces différentes entrées pouvaient s'effectuer à l'aide d'une souris ou, le cas échéant, par commande vocale.

#### Remarque concernant la commande vocale:

Que ce soit pour l'opérateur de commande en TAO industrielle ou pour un chirurgien effectuant une tâche de télémanipulation, la commande vocale s'avère un

intermédiaire précieux pour les commandes à caractère logique (sélection, arrêt d'urgence, commande de réglage de microscope automatique).

Peut-on envisager une utilisation efficace pour d'autres fonctions, en particulier agissant sur des paramètres analogiques?

Sans essayer de répondre de façon générale à cette question, j'essaierai de donner quelques indications qualitatives concernant la fiabilité associable raisonnablement à cette commande, en m'appuyant à la fois sur les essais que j'ai pu effectuer et les conclusions d'expérimentations menées au LIMSI.

La fiabilité de la commande vocale ne doit pas être considérée de façon intrinsèque, mais doit être étudiée dans le contexte d'une organisation donnée de la commande qui l'inclut à un niveau adéquat. Le choix de ce niveau est pour le moment effectué selon des principes de bon sens (le nombre de paramètres à prendre en jeu pour dégager des principes universels serait important et enlèverait tout intérêt à ceux-ci dans un cas réel).

Pour le type d'application envisagée, la commande vocale sera considérée comme un moyen de communication complémentaire permettant une interaction directe dans un univers restreint.

De par la limitation des moyens actuellement, et dans un moyen terme, disponibles, il s'agit de choisir:

-le vocabulaire et sa segmentation pour les différentes phases de commande: pour cela, on dispose en général (cas, par exemple, des systèmes VÉCSIS, VOTERM et de la carte MAClab que j'ai pu utiliser) de moyens de correction à partir d'une évaluation de scores, de bonne reconnaissance. Cette détermination peut être faite pratiquement, a priori, à partir d'une description globale des commandes à utiliser.

-la syntaxe associée: celle-ci devra viser à être facilement assimilable par un opérateur, permettant un premier niveau de correction sommaire (l'emploi d'un langage opératif restreint est évidemment intéressant [FAL89] et constitue un axe de réflexion privilégié d'améliorations potentielles, en particulier, pour un contexte figé).

L'analyse de la tâche est un élément de qualité déterminant pour situer les séquences d'interaction homme/machine réellement aidées par l'interface vocale.

L'interface elle-même ne doit pas être totalement transparente à l'intégration: Il est en effet nécessaire de lier celle-ci à la commande.

Devant ces difficultés, un certain nombre d'expériences ont été poursuivies de manière à tirer des informations plus globales sur les flux d'informations à échanger et la fiabilité du canal vocal dans chaque phase. Celles-ci font l'objet d'études actuellement au Centre d'Automatique de Lille.

La complexité de la commande, très liée à la perception qu'en a l'opérateur devrait s'en trouver d'autant réduite. Les différents concepts introduits permettraient alors de bâtir réellement une station de travail adaptée à la TAO, conception que, pour distinguer de celle de Sheridan, nous avons baptisée SUPERWOMAN (supervisory workstation for telemanipulation).

### III-4 Approche objet et modes coopératifs.

Une analogie nous sera utile pour la description de la relation entre modes coopératifs et approche objet: celle de la composition musicale (ou de façon plus générale des compositions à fortes contraintes temps réel et impliquant une interactivité importante).

Cette analogie, qui s'appuie sur des besoins initiaux assez identiques, justifie d'une certaine manière le choix du langage objet choisi pour la simulation (celui-ci s'appuie sur le langage FORMES développé par P.Cointe pour la composition musicale). Nous donnerons dans ce paragraphe les fonctionnalités et les raisons des choix, la simulation sera décrite au chapitre V.II.

#### III-4-1 Besoins en composition musicale et langage de TAO.

Si l'on se réfère à Cointe [COI84], les propriétés souhaitées pour un langage (de composition musicale) sont celles favorisant la manipulation et l'intégration de modèles de connaissance au sein d'une construction cohérente. On demandera donc à celles-ci de caractériser de façon correcte le comportement temporel (des "objets musicaux"), tout en permettant la transparence vis à vis des détails d'implantation de ces objets.

Les propriétés désirées seront donc :

- 1) La généralité:  
la formalisation du processus sous-jacent ("le style de conduite") est indépendante de l'objet auquel elle s'applique.
- 2) L'universalité :  
vis à vis des détails d'implantation.
- 3) La compatibilité :  
quel que soit le contexte, les modèles doivent coopérer efficacement à la représentation du compositeur/opérateur
- 4) La lisibilité et la facilité d'emploi:  
l'utilisateur n'étant pas forcément "informaticien" et même dans ce cas, des valeurs par défauts, par exemple, cohérentes avec le contexte permettent d'éviter des erreurs ou des oublis.
- 5) La modularité et la hiérarchie :  
En particulier, pour faciliter l'insertion de nouveaux modèles en s'aidant de ceux déjà définis, modifiant ainsi de façon très localisée le comportement d'ensemble (adaptation du langage à l'utilisateur).

Le parallèle avec les contraintes TAO est, dès l'énoncé, évident. Pour répondre à ces différentes exigences un courant de pensée (et de langages) s'est développé, d'abord pour améliorer les techniques de simulation puis essentiellement dans une optique de construction d'interfaces Hommes/Machines plus conviviales.

#### III-4-2 Concepts clés des langages objets utilisés.

- Notion d'OBJETS:

Tout élément du système est un OBJET c'est à dire un état et un ensemble d'actions potentielles. (un OBJET unifie procédures et données)

#### - Notion de CLASSES:

La notion de CLASSES définit l'ensemble des objets susceptibles d'effectuer les mêmes actions. Celles-ci sont organisées de façon hiérarchique avec héritage d'une classe à une sous classe. Cette notion a été introduite avec le langage SIMULA qui comportait également la notion d'évènements nécessaire à la gestion du parallélisme.

#### - Transmission sélective de MESSAGES:

La transmission sélective de MESSAGES est la structure de contrôle de base: Elle consiste en l'envoi et en la réception avec filtrage de messages par des Acteurs (objet avec filtrage). Ces messages activent de façon sélective les objets qui peuvent à leur tour émettre d'autres messages.

N.B.: la gestion de la composante temps oblige à la gestion d'autres structures de contrôle (co-routines par exemple) établissant des "liens collatéraux" entre les acteurs.

#### - L'environnement INTERACTIF:

En particulier graphique, introduit par Smalltalk et bien représenté par les utilisations du type "Machintosh".

Indépendamment de la composante temps, les langages objets assurent donc l'extensibilité et l'interactivité du système. La notion d'héritage favorise la programmation descendante et la modularité. Enfin, on obtient une "personnalisation" de l'univers de l'utilisateur, favorisant la compréhension et donc la confiance dans le système (ceci grâce à sa convivialité mais aussi aux possibilités de "représentations multiples" que nous n'avons pas développées dans notre simulation mais qu'il sera indispensable d'étudier avec le concours d'ergonomes pour l'application dans un contexte réaliste).

### III-4-3 Gestion de la composante temporelle.

Les caractéristiques précédentes qui montrent l'intérêt de ce type de langage en TAO (comme en général dans tout système Homme/Machine) sont néanmoins insuffisantes pour permettre les applications temps réel: les fonctionnalités nouvelles introduites par Coïnte (relations temporelles explicites entre les objets (tout objet est en fait un Processus) et réalisation d'un objet ordonnanceur) visent à résoudre ce problème.

#### Définition de l'ordonnanceur:

Lorsqu'un utilisateur lance l'exécution d'un objet, un objet racine est exécuté.

Cet objet racine est au niveau le plus élevé d'un arbre dont il connaît ses descendants directs. L'objet racine, par envoi de messages, met à jour l'arbre (en lançant une boucle). Une fois la mise à jour exécutée (ce qui va être équivalent à la constitution de la liste des primitives d'actions directes se trouvant tout en bas de l'arbre, l'évaluation est lancée.

Pratiquement, cet ordonnanceur est constitué d'une file d'attente gérant tous les objets actifs à un instant donné.

Une horloge globale, qui est un objet, envoie à chaque "top", un message demandant si le processus est exécuté.

Le transfert des données a lieu par pipe-line (variables globales): A un instant, l'objet racine calcule plusieurs signaux qui deviennent les messages d'entrée des objets fils etc... en descendant l'arbre (au dernier étage les signaux correspondent à l'activité "d'objets externes" correspondant aux actions physiques sur la machine ou l'interface utilisateur.

Nous verrons (chap V paragraphe II) comment peuvent s'implanter explicitement ces types de mécanisme.

#### III-4-4 Langages objets et dialogue fiable.

Les possibilités de généricité associées aux langages objets permettent de bâtir de façon très modulaire un réseau de relation entre objets élémentaires. La constitution d'une boîte à outils de modes, telle qu'elle avait été envisagée initialement sur ARA revenait à se placer dans la situation du dessin humoristique de la figure III-2 Ceci est le principal danger du système de programmation Forth utilisé dont la sécurité d'accès n'est pas garantie (pour conserver des propriétés de souplesse et d'extension).

Différentes voies sont envisageables pour améliorer cette situation:

- limiter artificiellement les possibilités d'assemblage de modes suivant la compétence présumée des opérateurs: cette solution a été effectivement utilisée pour ARA; les gestes admissibles avec le micromanipulateur sont également contraints de la même manière. L'ouverture est totale pour "l'ingénieur système", limitée et fixe pour l'utilisateur type.

- contrôler l'assemblage pour y détecter des incohérences; on pourra aider celui-ci à l'aide d'un guide-opérateur pour le moment partiellement auto-explicatif.

- au niveau de la programmation système, fournir un langage présentant des caractéristiques plus adaptées à cette construction. De ce point de vue, il est apparu intéressant d'utiliser des langages objets partiellement associés à des "guides intelligents, lors d'une programmation "hors ligne des modes" (Une telle simulation sera présentée sur l'exemple du micromanipulateur au chapitre V).

- des langages de type synchrone pour la programmation des parties fortement temps réelles (interface homme/machine, coopération multi-bras). L'intérêt de ceux-ci dans un contexte de sécurité est qu'ils peuvent être associés à des systèmes de validation partielle, permettant de s'assurer de certains points critiques: c'est le cas par exemple du langage Esterel [BER 86] associé au logiciel AUTOS. Nous en verrons également une illustration au chapitre V, essentiellement destinée à souligner l'intérêt de cette nouvelle approche.

Nous pensons que ces deux approches doivent être utilisées conjointement selon un schéma qui pourrait être:

- 1) l'utilisation d'un langage de type Esterel en conception et codage de l'ordonnanceur de modes.

- 2) l'utilisation d'un langage objet comme langage utilisateur.

- 3) le système Forth conserve ses qualités pour l'implantation effective des modes et peut d'ailleurs aisément être cross-compilé à partir d'Esterel.



## IV-GENERALISATION :LIEN AVEC LES TECHNIQUES D4INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

Le problème que nous nous posons dans ce paragraphe est essentiellement de nature pratique: Nous avons vu qu'il était nécessaire pour mettre en oeuvre les techniques précédentes, de décomposer chaque acte global en une succession de gestes opératoires bien définis, auxquels pourra être associée, de façon semi-automatique, une séquence de modes.

Pratiquement, ceci est effectué actuellement "à la main", à partir de règles empiriques de décomposition, éventuellement guidées par l'analyse ergonomique préalable (ceci a par exemple été le cas dans le cadre du projet ARA).

Nous essaierons d'ébaucher dans ce paragraphe la façon dont peut être aidée cette phase d'analyse en utilisant la technologie des systèmes experts, réduisant les temps nécessaires actuellement à celle-ci .

Nous avons effectué cette analyse en utilisant un moteur d'inférence assez largement disponible, en essayant essentiellement de dégager les difficultés de mise en oeuvre, les limites des apports de cette technologie et son apport réel dans les problèmes de sécurité hommes/machines tels que nous les concevons.

La proposition faite est de procéder, pour cela, en deux temps:

- génération d'un scénario interactif de commande (hors-ligne)
- utilisation d'un système auto-explicatif.(en-ligne).

### IV-1 Générateurs de plans et scenarios interactifs.

Dans le cadre d'une approche hiérarchisée, il est naturel de chercher à décomposer le problème global en une succession d'étapes pour lesquelles doivent être déterminées les ressources à utiliser et le sous-problème résolu.

Des approches efficaces ont pu être développées en robotique (STRIPS [NIL80], ARGOSII [FAR80]). Le système COPILOT [FOU87], [MAN87] développé par l'UGRA/CEN applique à la téléopération les concepts généraux dégagés lors de ces projets. Après avoir rappelé brièvement les principes de celui-ci au paragraphe suivant, nous étudierons dans quelle direction celui-ci pourrait être modifié pour s'adapter aux méthodes évoquées aux chapitres III et IV.

#### IV-1-1 Le système COPILOT.

Le système COPILOT (COntfiguration et Planification Intégrées en Langage Objet pour la Téléopération), est destiné à aider hors-ligne, l'opérateur à établir, pour chaque nouvelle opération, l'enchaînement des modes de commande, les paramètres associés et l'affectation des ressources: Il permet donc l'intégration locale de décisions multicritères en agissant sur cette affectation effectuée de façon statique.

Pour rester cohérent vis à vis de l'implantation du superviseur, la notion de mode constitue un élément unificateur de la représentation des connaissances associées.

Il est donc nécessaire de modéliser ici, en utilisant une approche objet, les éléments de l'environnement et les actions que le téléopérateur peut y effectuer.

La base de connaissance est structurée de la façon suivante:

- les faits sont constitués :

- \* des systèmes d'exécution: manipulateurs, porteurs, caméras
- \* des objets manipulables :outils, trous ..

- les règles sont représentées par la classe Règle-Action ayant les attributs suivants:

- \* le contexte
- \* les préconditions

qui constituent la partie "condition" de la règle

- \* ajout, conséquence, retrait, commande

qui constituent la partie "action".

La génération du plan s'effectue en deux passes:

- construction du plan en mode de chaînage mixte (avant pour le filtrage)
- analyse du plan pour extraire les paramètres à acquérir, les transitions et leur mode de validation (automatique, semi-automatique ou manuel).

Le problème du recouvrement d'échecs est reporté sur le superviseur "en-ligne"; on laisse donc à l'opérateur :

- le choix du chemin au sein du réseau de modes.
- la sélection des modes globaux.
- l'apprentissage des paramètres.

Il est à noter que le type de raisonnement ainsi implanté est totalement indépendant du type d'opérateur et ne reflète en rien son expertise (celle-ci est entièrement "contenue" dans la base de connaissance).

On peut considérer le système COPILOT comme un système d'aide à la programmation, utilisant de façon intéressante une représentation centrée objet.

Le séquençage des modes n'y est pas représenté (la composante temps en étant absente).

Le problème reste de construire le dialogue au cours duquel se résoud en fait en ligne le problème de téléopération. Pour rester cohérent par rapport aux modes coopératifs, nous allons développer pour cela les principes d'une méthode basée sur les scénarios interactifs.

#### IV-1-2 Conception de scénarios interactifs en TAO.

A partir de l'analyse de l'activité de création de scénarios, Sebillotte [SEB87] a dégagé des règles de conception permettant un développement intéressant en téléopération. Un scénario interactif permet d'utiliser différents cheminements dans le déroulement d'une histoire.

différents niveaux d'un arbre de conception.

Le cheminement dans cet arbre s'accompagne:

- de retours en arrière
- de représentations globales de parties du plan (séquences).

Un plan d'une opération de téléopération nécessite une représentation précise des modifications admises en ligne. Ceci nécessite de pouvoir mettre en oeuvre trois types de connaissances relatives à:

- la description fonctionnelle du système.
- la description des plans réalisant la tâche.

Dans le cadre de la manipulation ARA, une activation permanente du système d'aide (menus et historique de modes) a été choisie. Les méthodes d'agrégation de préférence utilisent une représentation de connaissances supplémentaires liées à l'utilisateur, constituée des systèmes de pondération et des seuils nécessaires à leur mise en oeuvre. Comme nous l'avons vu, un changement des préférences conduit à une sélection des commandes présentées, différente.

Réciproquement, une demande d'extension du champ des commandes par l'opérateur permet de détecter une variation de son système de préférence intercritères.

Le système de poids constitue donc un profil dynamique de l'opérateur.

#### IV-2 Méthodologie multicritère et système expert.

Dans une approche répartie du niveau décisionnel telle que celle évoquée précédemment, chaque critère pris en compte est associé à un acteur délivrant un accord ou un désaccord quant au changement de modes à effectuer. La force relative de l'acteur dans la décision finale est représentée par sa fonction de préférence. Les méthodes proposées résolvent donc un problème de conflit par agrégation de préférence. Le but de ce paragraphe est de relier celui-ci aux méthodes classiques de résolution de conflits utilisées dans les systèmes experts.

Si les règles employées dans un système expert reflètent bien l'expertise et donc les relations de préférence d'un décideur, celles-ci ne donnent pas toute la connaissance déductive utilisée par le système expert. En particulier, on sait que dans un système réaliste, le contexte permet l'activation simultanée d'un paquet de règles ("conflict set"). La solution pour résoudre le conflit entre ces règles est en fait d'utiliser des métarègles.

Ces métarègles expriment des heuristiques n'ayant qu'un rapport lointain avec les préférences de l'expert. Elles se baseront habituellement sur des critères supplémentaires du type "minimiser le coût de mise en oeuvre", et permettront de choisir la règle appliquée à l'étape suivante.

Le choix, essentiellement monocritère, effectué ne constitue plus une représentation efficace de l'expertise. La méthode choisie par White est d'introduire des fonctions d'utilité multiattributs correspondant à des jeux de poids différents associés aux critères de choix inter-règles. Un premier choix de règles non dominés, pour l'ensemble de ces fonctions d'utilité, est effectué. L'opérateur résout les conflits résiduels.

Appliqués à ce problème de conflits, l'algorithme MEDCIM que nous avons proposé permet une approche plus réaliste en permettant de détailler de façon plus fine la structure des préférences de l'opérateur. Les indices de discordance permettent de localiser la métarègle en désaccord. Le choix des facteurs de pondération est reporté sur celui des fonctions de préférence.

On peut aller plus loin et suggérer l'utilisation d'un système expert, en ne déterminant plus de facteurs ou d'indices de préférence a priori. Cette approche intéressante prolonge celle que nous avons adoptée. Elle est actuellement approfondie dans un cadre général au Lamsade et à l'école polytechnique fédérale de Lausanne (travaux de Rommel [ROM 88] et Pasche [PAS 87]).

## CONCLUSION DU CHAPITRE IV

Nous avons complété dans ce quatrième chapitre la présentation de la méthode MEDCIM en précisant son originalité (utilisation combinée d'une méthodologie d'agrégation basée sur des surclassements et d'une interaction locale). Nous avons, ce faisant, approfondi et justifié son utilisation dans un cadre "automatique" en introduisant la notion de semi-optimisation et présenté une généralisation de la programmation dynamique qui y soit adapté.

La sécurité s'intègre dans ce cadre à l'aide d'une généralisation de la notion d'indice de fiabilité et grâce aux contraintes imposés sur les scénarios admissibles.

Les deux derniers chapitres nous ont donc permis globalement de proposer une nouvelle méthodologie dynamique de répartition des tâches Homme/Machine et d'en analyser les conséquences fondamentales (passage de l'optimisation à l'aide à la décision, interactivité, implantation des modes).

Les exemples donnés sont restés très génériques (ce sont ceux d'une manipulation "canonique") et correspondent donc à des situations un peu artificielles dans lesquelles toutes les possibilités étendues de la téléopéraion actuelle sont supposées exister. Ceux-ci correspondent encore pour le moment à des exemples d'école. Ils ont l'avantage de bien situer les apports actuels de la commande informatisée, et l'usage actuelle de la commande décentralisée, à propos de laquelle nous avons vu qu'une certaine confusion régnait en téléopération .

Ils nous ont permis également de souligner un point ,qui n'est que d'une apparente évidence: l'interactivité y introduit des notions tout à fait spécifiques, à vrai dire mal cernée aujourd'hui. L'usage de méthode de type agrégation d'indice ou système expert n'est peut être destinée qu'à masquer l'ignorance actuelle de ces domaines qui ne sont qu'au début d'une approche autonome réellement scientifique. Si l'étude des systèmes hommes-machines a pu profiter des transposition d'autres domaines ( théorie des asservissement,commande automatique,optimale,informatique théorique..) elle ne s'est pas encore affirmée comme discipline propre, à cause peut-être des illusions réductionnistes qui en obscurcissent l'objet. Tenir compte, sans la réduire de la complexité des relations hommes -machines, ou aider à la décision dans un univers socio-technique complexe ressort de la même problématique: il est donc naturel que le cadre théorique de l'école française de recherche opérationnelle permettent ainsi de raisonner de façon plus juste.

Il nous reste maintenant à passer du cas d'école à la réalité: à partir d'un cas particulier d'application (micromanipulateur chirurgical) nous allons essayer d'appliquer, en nous aidant des notions introduites dans ces chapitres une organisation réaliste de la commande. Nous généraliserons celle-ci en TAO dans le cadre de la commande évolutive, montrant ainsi le lien que l'on peut établir avec certaines techniques de l'intelligence artificielle.

CHAPITRE V: APPLICATION DE LA COMMANDE COOPERATIVE EN  
CHIRURGIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR

## I-CHIRURGIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR ET TAO.

I-1- Le projet de CHAO.....	p 3
I-2- Aide à la manipulation en chirurgie. ....	p 5
I-3- L'aide robotisée à la chirurgie :l'exemple du MSVO.....	p 7
I-4- Sécurité Hommes/machines en CHAO.....	p12

## II-CONCEPTION D'UN MANIPULATEUR COOPERATIF.

II-1 De la synthèse d'un mouvement à celle de geste opératoire.....	p13
II-1.1 Représentation des gestes et des mouvements.....	p13
II-1.2 Position du problème. ....	p14
II-1.3 Décomposition de la tâche.....	p15
II-2. Modes coopératifs et actions. ....	p17
II-2.1. Choix du langage et du type d'implantation.....	p17
II-2.2 Classes et mécanismes d'héritage. ....	p18
II-2.3 Parallélisme et gestion de liens collatéraux.....	p19
II-3. Conception d'un système robotisé chirurgical et commande coopérative. ....	p20
II-3.1 Analyse du problème de sécurité hommes/machines en CHAO.p21	
II-3.2 Mise en oeuvre d'une commande coopérative.p22	

## III-EXEMPLE D'UTILISATION DE MODES COOPERATIFS POUR LA SYNTHESE D'UNE OPERATION DE MICROCHIRURGIE.

III-1 Description de la manipulation réalisée.....	p24
III-2 Décomposition du système hommes/machines. ....	p26
III-3 Analyse des gestes opératoires.....	p28
III-4 Simulation des modes et moniteur d'enchaînement.....	p28
<u>CONCLUSION.</u> ....	p30

Nous avons développé, dans les chapitres précédents un certain nombre d'outils (analyse fonctionnelle, construction de modes coopératifs, station de travail intégrée) dans le but d'améliorer la sécurité du système Hommes/Machines.

Dans ce chapitre, nous abordons, sur un cas particulier (la chirurgie assistée par ordinateur) comment nous concevons l'application pratique des méthodes sous-jacentes.

Ce cas, qui a servi de fil rouge et de référence concrète à nos travaux sur les problèmes de sécurité hommes/machines en téléopération, nous paraît être une bonne illustration de l'ensemble des problèmes invoqués par un scénario nécessitant une démarche de semi-automatisation.

En effet, la chirurgie exige du praticien une collaboration équilibrée entre ses capacités décisionnelles et manuelles. L'automaticien qui veut aider à cette pratique doit s'efforcer de maintenir, voire améliorer cet équilibre en fournissant des aides automatisées à la conduite et à la décision "coopératives".

Après avoir décrit plus précisément le contexte de cette étude pratique, nous verrons sur deux exemples comment nous avons appliqué les concepts introduits précédemment.

La pratique nous a montré certaines insuffisances que nous essaierons de souligner, puis à partir de l'exposé du résultat d'une simulation nous montrerons comment nous envisageons les extensions qui permettraient de remédier à celles-ci.

## I-CHIRURGIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR ET TAO.

L'évolution naturelle des techniques issues des sciences de l'ingénieur en milieu médical s'est faite de façon progressive continue mais prudente.

Longtemps assemblage de recettes, fruit d'observations longues et pénibles, parfois obscurcie par les théories, toujours perspicace dans ces progrès, la chirurgie fut jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle ignorée des médecins. Ceci fut radicalement changé par l'apparition de trois découvertes essentielles [BLO72]

- l'anesthésie générale (1846)
- l'antiseptie (en particulier de Lister vers 1866)
- les antibiotiques

Durant le vingtième siècle, le perfectionnement des techniques chirurgicales, bien souvent associé à celui d'une instrumentation spécialisée mais simple, celui de l'anesthésie et des techniques de réanimation, enfin l'apparition du monitoring opératoire multiségnaux (ECG, EEG, surveillance pulmonaire...) acheva de consacrer sa généralisation.

Dégagé de la solennité qui le recouvrait, l'acte chirurgical est devenu ensemble de décisions réfléchies et de gestes rigoureusement contrôlés.

### I-1 Le projet de C.H.A.O.

La mise en oeuvre de moyens informatiques en chirurgie s'est limitée pendant très longtemps aux systèmes de gestion des dossiers médicaux, pour s'étendre peu à peu aux appareillages d'investigation et d'imagerie automatisés, puis de façon plus générale



aux systèmes d'aide au diagnostic .

L'action directe sur le malade ne fut, elle, que rarement suppléée par un automate hors d'expériences localisées de laboratoire. Les concepts technologiques nouveaux introduits par la robotique et la téléopération restaient en tous cas éloignés de ce domaine.

C'est l'endoscopie qui, pour des opérations simples (récupération d'objets dans le tube digestif, opérations d'urologie ou de gynécologie, déplacement d'un faisceau laser CO2 permettant des nécroses internes localisées...) révéla ce que Vertut appelait "la téléchirurgie de Monsieur Jourdain".

L'idée du projet de chirurgie assistée par ordinateur (C.H.A.O.) conduit au laboratoire de Lille partait de l'idée qu'on pouvait aller plus loin et :

- augmenter la dextérité et la sécurité de certaines opérations de chirurgie fine par introduction dans la boucle de commande d'un manipulateur dédié, des possibilités de calcul et de décision locale.

- de façon analogue aux projets de téléopération (le projet naquit entre la fin du projet et Spartacus, d'aide aux handicapés moteurs, et le départ du projet ARA) intégrer ce manipulateur au sein d'une structure COHERENTE incluant l'ensemble des moyens de monitoring et d'appréhension de l'environnement (caméra, microscope...)

Les principaux avantages attendus d'une telle intégration étant:

- d'ETENDRE les capacités du chirurgien:

en manipulation : par réduction des mouvements, suppression d'éventuels gestes incontrôlés (possibles lors des changements de "vrac", lors de la pénétration dans le champ opératoire).

en vision: permettre une opération "en vision Nulle" par utilisation en temps réel de données de topographie connues a priori (chirurgie intracranienne ou corrections localisées comme dans l'opération de Fiodorov ), avec utilisation d'endoscopes éventuels pour travailler en vue arrière.

en "sensation" : guider à l'aide de capteurs d'efforts ,de contacts (piézoélectrique, à fibre de carbone) ou de proximétrie la commande de façon sûre .Situer l'embout de l'instrument hors d'une zone prédéfinie "de danger", restituer des efforts artificiels ou un retour sonore correspondant à cette proximité.

- de CONSTITUER un bloc opératoire cohérent et adaptable suivant différentes procédures chirurgicales. La communication entre les différents sous-ensembles fonctionnels intervenant dans le bloc opératoire permet d'établir des stratégies sûres intégrant des matériels hétérogènes en restant compatible avec une technique chirurgicale donnée. Il devient possible de présenter un état "agrégé" au chirurgien, de modifier les paramètres jugés essentiels et la façon dont sont réalisés les retours d'information : sécurité sonore, présentation visuelle selon un plan privilégié, indication de profondeur du sommeil, commande symbolique ou Kinesthésique, vocale...

Ces différentes possibilités ont fait l'objet d'expérimentations au cours du projet. Nous n'en reprendrons ici que la part utile à la problématique de base concernant la sécurité Homme/Machine.

- d'AIDER à l'apprentissage de la chirurgie

En effet, si l'enseignement de la chirurgie par ordinateur semble pour l'instant

balbutiant , il est possible, par enregistrements et simulation de suivre de façon beaucoup plus précise des cas typiques d'intervention, de détailler les étapes importantes que seule une longue expérience permet d'acquérir.

De manière à effectuer une présentation concrète du projet mené, nous allons maintenant décrire :

- le domaine où il s'est effectué (la microchirurgie),
- l'évolution des techniques de téléopération dans ce domaine,
- les problèmes posés en microchirurgie par l'implantation d'un système robotisé.

Après avoir réduit le champ d'application et décrit le manipulateur conçu et réalisé pour y intervenir, nous poserons le problème d'intégration de la sécurité dans la commande, d'abord de façon élémentaire, puis au paragraphe suivant en essayant d'appliquer les techniques que la téléopération nous a permis de faire avancer.

### I-2 Aide à la manipulation en chirurgie.

La microchirurgie est considérée comme l'ensemble des techniques permettant de réparer des structures tissulaires de moins de 1 mm de diamètre. Elles sont appliquées, essentiellement, à la réparation des nerfs et des vaisseaux et, si elles ont surtout profité au début à la chirurgie de la main et à la chirurgie plastique reconstructive, elles sont actuellement très utilisées en neuro-chirurgie, en chirurgie infantile, en gynécologie...

Ensemble de techniques, impliquant le plus souvent une intervention sous loupe binoculaire ou microscope, la micromanipulation recouvre, en fait des domaines d'applications très divers parmi lesquels on peut citer :

- la manipulation cellulaire, l'étude et l'isolement des bactéries en génie génétique (greffes de noyaux)
- la fabrication des circuits électroniques
- la soudure des fils sur circuits intégrés spéciaux
- la réalisation de lignes "microstrips" en hyperfréquence
- la chirurgie interne : réalisation d'opération, à l'aide de micropinces ou d'un laser guidé par fibres optiques, introduits directement avec l'endoscope dans le canal à biopsie .
- la microchirurgie de l'oreille interne : positionnement d'un guide d'onde laser CO2 ou mise en place d'une microsonde autorisant la mise en oeuvre de tests durant l'intervention .
- l'implantation d'électrodes intratumorales radioactives dans le cerveau (9) ;
- la manipulation stéréotaxique en chirurgie oculaire (vitrectomies en particulier).

Nous approfondissons plus particulièrement dans la suite de cet exposé les applications relatives à ce dernier secteur, pour lequel se posent nombre de problèmes actuellement étudiés en téléopération avancée (sécurité de fonctionnement intrinsèque,

retours d'informations à l'opérateur, réalisation et mise en oeuvre adéquate de séquences automatiques...)

Les contraintes de mise en oeuvre, et par là même, les technologies employées dans ces différents domaines, sont également très variées. Elles ont conduit à la mise au point de toute une gamme de mécanismes. Deux cents mécanismes ont été répertoriés par Kopac et rivalisent d'imagination technique ; parmi eux, nous rappellerons, en raison de l'évolution qu'ils ont connue, les manipulateurs dont les noms sont restés associés à ceux de leurs auteurs:

. le Barber et Schouten, qui introduisit l'utilisation de vis micrométriques pour la réalisation des mouvements fins.

. les Leitz (fig. 1), dérivés de ceux de Chambers et Peterfi de Zeiss, qui comportent d'une part un "porteur" actionné par vis micrométrique, permettant un positionnement à l'intérieur du champ opératoire, et d'autre part un mécanisme à sphère excentrée, assurant les mouvements fins.

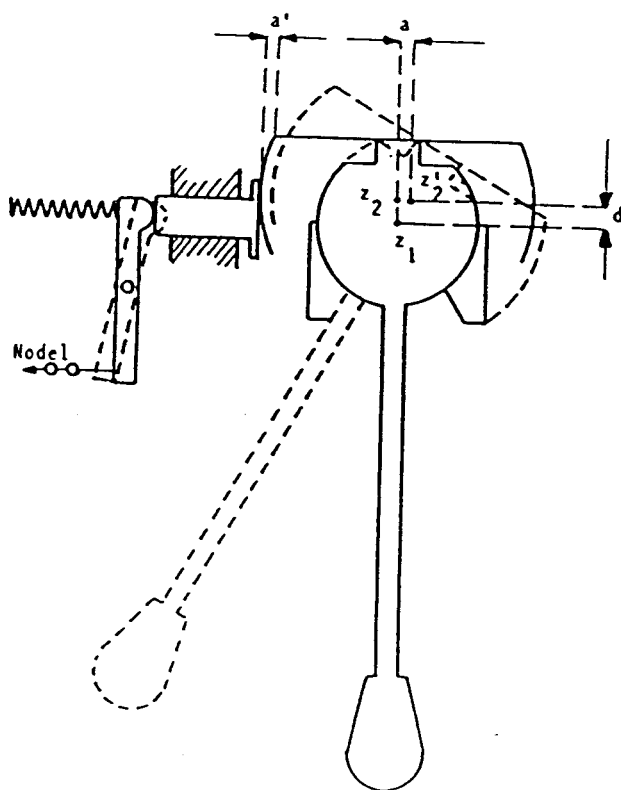


Figure 1: micromanipulateurs de LEITZ

.le De Fombrune : reconstituant la concordance de mouvements entre la main de l'opérateur et les mouvements fins de la pointe de l'instrument, supposée observée sous microscope.

Dans celui-ci le principe de décomposition porteur + micromanipulateur est repris. Les mouvements fins sont obtenus grâce à un système de capsules élastiques ("barométriques") couplées par des seringues à un manche à balai à trois degrés de liberté. Bien que supplanté actuellement par les mécanismes piézoélectriques, et malgré certains défauts (en particulier le fait que les trajectoires correspondant à un

mouvement étaient circulaires), le "de Fombrune" a été l'un des manipulateurs les plus employés en microchirurgie pendant plus de trente ans.

. Le Ellis où les mouvements fins sont assurés par des lames piézoélectriques : la précision obtenue est de l'ordre du micron. Des mouvements vibratoires sont éventuellement possibles. Intéressants pour les expérimentations cellulaires, ceux-ci commencent à être utilisés.

Deux limitations apparaissent pourtant :

- les déplacements obtenus sont faibles : les valeurs limites actuelles sont de l'ordre du millimètre ;

- la force exercée en bout de céramique est également faible.

. les manipulateurs d'Umetani. Il s'agit d'une amélioration du manipulateur d'Ellis : l'utilisation de matériaux dérivés des polymères PVDF permet la réalisation de pinces de formes variées. La principale originalité de ces manipulateurs réside dans l'utilisation simultanée des propriétés "capteurs" de l'élément pour assurer un retour tactile.

. l'Oskar Hull, de type classique (vis micrométrique, actionnée par moteur électrique) où l'adjonction d'une commande électronique permet certaines fonctions de type "robotique" (coordination de mouvements en particulier).

Ces différents manipulateurs ont influencé fortement la conception des manipulateurs apparaissant actuellement dans les laboratoires de recherche: nous retrouverons certains des principes précédents dans la conception du MSVO que nous avons conçu à Lille.

### I-3 L'aide robotisée à la chirurgie: l'exemple du MSVO.

#### La chirurgie assistée par ordinateur

Parallèlement au développement des manipulateurs décrits brièvement au paragraphe précédent, les exigences en instrumentation nouvelle ont provoqué l'apparition d'une classe de manipulateurs "spécialisés", dont le micromanipulateur stéréotaxique est un exemple typique.

La vitrectomie, chirurgie interne de l'oeil, vise à pouvoir sectionner et en même temps aspirer, soit du corps vitré présentant des modifications pathologiques, soit des corps étrangers.

La fonction du manipulateur est donc de permettre un positionnement précis du vitréotome pour atteindre les différentes orientations nécessaires à l'intérieur de l'oeil.

Des manipulateurs de ce type ont été développés par Peyman et Leitz d'une part, Spitznas et Zeiss d'autre part.

#### Fonctions accomplies par le manipulateur réalisé:

##### \*Interventions à l'intérieur de l'oeil

Soit P la porte d'entrée de l'oeil, l'extrémité de l'outil (ici : du vitréotome) doit atteindre n'importe quel point à l'intérieur d'une certaine zone de l'oeil, tout en conservant le point de pénétration en P.(fig.2)

Remarque : La porte d'entrée doit rester fixe dans l'espace pendant toute la durée de l'intervention, ce qui suppose une fixation de l'oeil par rapport à la tête et de la tête par rapport à la table d'opération.

\*Intervention sur l'oeil et sur toute surface en général

. Avec un bistouri

Des types très variés de découpe peuvent être exécutés par variation continue de l'orientation "du bistouri" (fig 3).

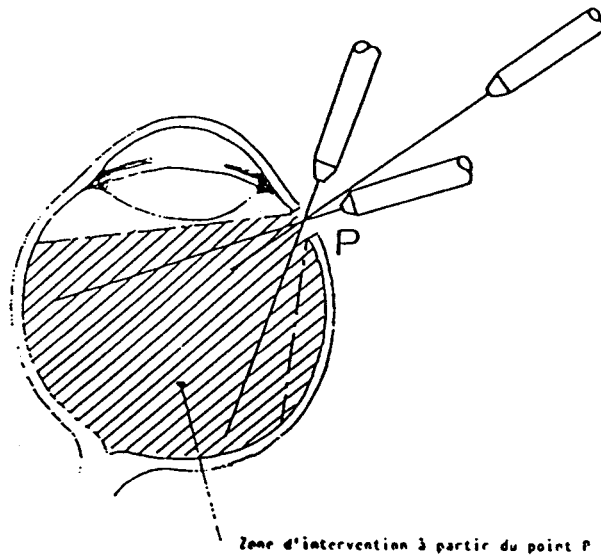


Figure 2.

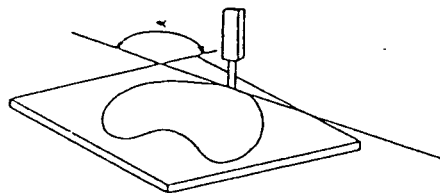


Figure 3.

La profondeur de pénétration de celui-ci à l'intérieur de la matière est réglable, ainsi que l'angle de coupe 3 (fig 4).

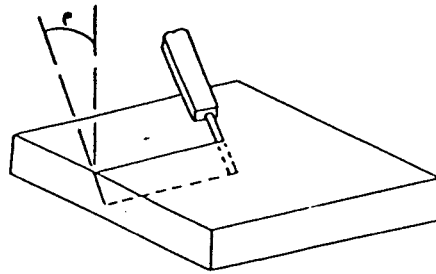


Figure 4.

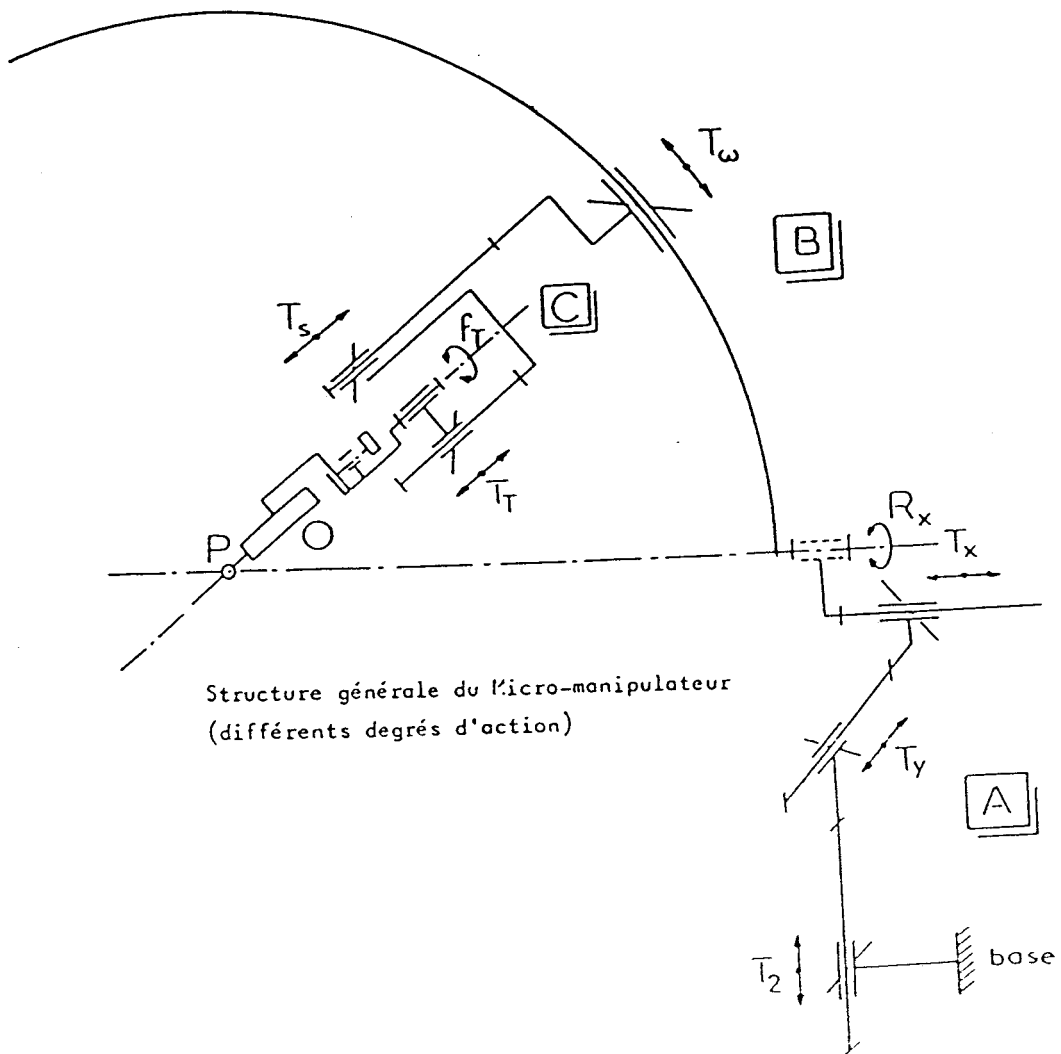
. Avec un trépan: le mouvement de travail est alors une rotation du trépan sur lui-même, le mouvement d'avance étant donné par une pénétration d'axe parallèle à la rotation.

\*Autres fonctions

Le manipulateur peut tenir un guide d'ondes laser ou tout autre instrument d'un poids raisonnable.

Ensemble manipulateur stéréotaxique-description

Le manipulateur se compose de quatre parties (fig.5):



\* Le système de positionnement du point P dans l'espace (A): il est constitué de trois degrés de liberté de translation perpendiculaires Tx, Ty, Tz.

\* Le système d'orientation de l'outil de travail (B):il permet de faire passer l'outil par un point fixe dans l'espace (P), tout en lui permettant d'avoir des orientations différentes :

- la rotation Rx du rail engendre une sphère virtuelle;
- la translation circulaire T sur le rail permet de garder le point P immobile.

\* Le bloc de travail (C):il se compose de:

- Tx : retrait rapide de l'outil en cas de réveil du patient (sécurité).Il s'agit d'un vérin à air comprimé simple effet qui retire l'outil de l'oeil dès que l'air comprimé est coupé (entropie maximale). La position de l'outil à l'intérieur de l'oeil est alors une position anormale, qui n'existe que parce que le manipulateur est alimenté en énergie.

- Tt : plongée-remontée de l'outil;
- Rt : rotation de l'outil (orientation propre).

\* L'outil et porte-outil (O)

Le remplacement d'un ensemble par un autre est effectué en quelques secondes à l'aide d'une vis moletée (fig 6 et 7).



Figure 6.

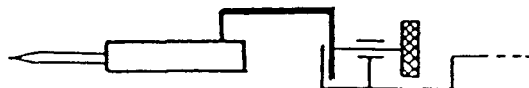


Figure 7.

Les degrés de liberté Tw,Ts,Tt et Rt sont motorisés avec des moteurs électriques à courant continu asservis en position. Les autres ont été réalisés avec des moteurs pas à pas et des translateurs micro-contrôle (voir [ADI 84])

### Utilisations

\* En vitrectomie: Tx, Ty, Tz permettent de positionner la porte d'entrée P dans l'espace, en début d'opération. Ils sont ensuite bloqués.Les mouvements de travail sont alors Rx,Tx, Tt et Rt.

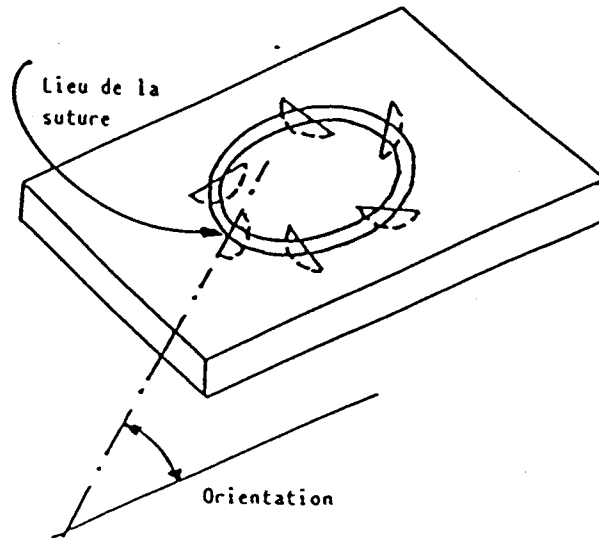
\* En découpe: Le vitréotome du bistouri est donnée par Rt et Rx, l'angle de découpe par T , la profondeur par Tt (profondeur suivant le plan de coupe) ou Tx (profondeur suivant la perpendiculaire à la surface), la découpe étant effectuée par Ty et Tz.

\* Tenue d'un guide d'ondes laser

Le point d'impact est donné par Tx, Ty et Tz, et l'orientation du faisceau par Rx et Tw.

\* pour la contention de tissus (travail à deux manipulateurs). Le vitréotome est remplacé par une pince.

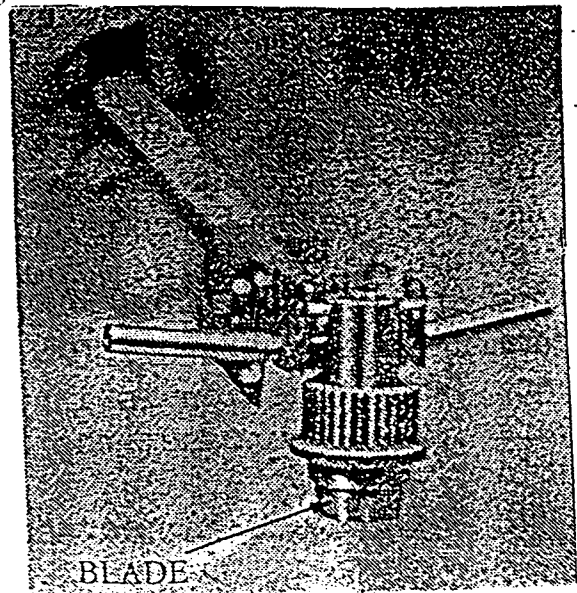
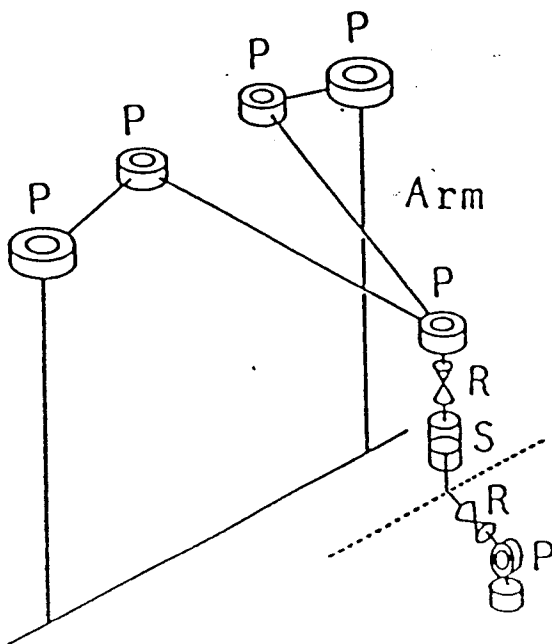
\* suture (fig 8): la tenue de l'aiguille est effectuée par une autre pince.



Le lieu de la suture est donné par  $T_x$ ,  $T_y$  et  $T_z$ , et l'orientation par  $R_x$ .

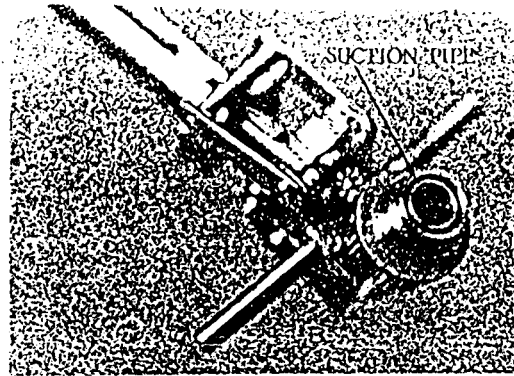
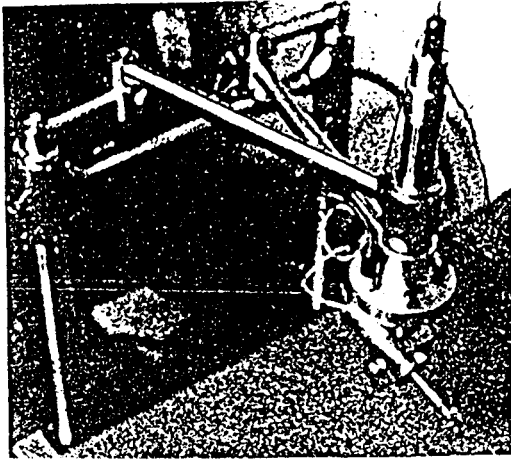
Le mouvement circulaire de suture est donné par  $T_w$ .

N.B.: d'autres approches ont été menées depuis la conception du MSVO pour la conception d'un manipulateur de vitrectomie. La plus innovante me semble être celle du professeur Funakubo dont nous donnons ci-dessous un premier prototype.





Son approche de la sécurité est différente de celle qui est envisagée précédemment: en particulier, par utilisation d'une structure partiellement parallèle il assure la stabilité mécanique du porteur. Plus particulièrement destiné aux opérations de trépanation, il sacrifie ainsi un peu la versatilité à la sécurité intrinsèque.



Une structure mixte avait été envisagée en collaboration avec celui-ci mais n'a pu aboutir pour des raisons matérielles extérieures. Il est cependant probable que la solution industrielle utilisera utilement un compromis entre nos deux approches.

#### I-4 Sécurité hommes/machines en CHAO.

La sécurité actuelle des opérations de microchirurgie est obtenue grâce à la maîtrise qu'ont les chirurgiens des techniques opératoires. Celle-ci est obtenue à la suite d'entraînements longs, analogues aux gammes d'un pianiste, lui assurant l'agilité et la précision du geste. Il s'agit là d'une sécurité au premier niveau.

La connaissance approfondie de l'anatomie, de la clinique et de la biologie permettent d'asseoir les choix à effectuer lors d'une opération. Il s'agit là d'une sécurité au second niveau.

Ces deux niveaux devront trouver leur pendant en CHAO sous peine de manquer l'essentiel du problème de la chirurgie: à la fois ensemble de techniques manuelles et intellectuelles indissolublement liées. En d'autres termes, il faut donner un sens précis à l'"intelligence du geste" caractéristique d'un style opératoire donné. Nous allons voir comment les théories exposées aux chapitres précédents permettent d'ouvrir une voie dans cette direction: celle des manipulateurs coopératifs. De manière à rester très pragmatique, nous allons insister essentiellement sur les apports et les différences existant entre la téléopération et la robotique classique dans la solution de ce problème.

Le problème peut se situer aux deux niveaux évoqués précédemment:

- le geste : dans lequel nous retrouverons la génération de mouvement classique en robotique et la notion de style opératoire.

- l'accès au contexte opératoire : qui impliquera une étude précise de l'interface opérateur (nous n'en aborderons que les grandes lignes en rappelant celle choisie et développée dans le cadre du projet ARA) des travaux restent nécessaires pour rendre celle-ci pleinement recevable dans un contexte réel microchirurgical.

## II- CONCEPTION D'UN MANIPULATEUR COOPERATIF.

Nous nous placerons du point de vue du concepteur d'un système d'aide robotisé à la chirurgie. De façon pratique, la faible dimension du marché chirurgical de haute technicité, oblige de concevoir dès l'abord une gamme de produits si possible à la charnière de disciplines médicales connexes et d'assurer la versatilité du manipulateur conçu, au travers de sa commande.

EX : dans notre cas, le domaine de la stéréotaxie est connexe entre:

- la chirurgie ophtalmologique.
- la neurochirurgie (implantation d'électrodes irradiées dans le cerveau).

### II-1 De la synthèse du mouvement de celle de geste opératoire.

La sûreté de fonctionnement d'un manipulateur peut être considérée selon deux points de vue complémentaires selon le degré d'intervention possible sur la définition du système [LEP 82].

- Partant d'éléments séparément mis au point constituant le poste de travail, intégrer le tout de manière à assurer la sécurité "de l'extérieur". Nous aborderons ce point dans ce paragraphe ; il s'agit de constituer en particulier un ensemble de "gestes sûrs de fonctionnement".

- Partant d'une définition a priori du type de tâche à réaliser, intégrer la sûreté de fonctionnement

- Partant d'une définition a priori du type de tâche à réaliser, intégrer les impératifs de sécurité dès l'analyse fonctionnelle: ce point qui est facilité par l'utilisation d'outils de description spécifiques du système pose quelques problèmes mais est un passage obligé pour déboucher sur un produit industrialisable. Nous aborderons ce problème au paragraphe II-3.

Nous partirons de l'analyse générale faite par André [AND 80], non spécifique à la téléopération, des relations entre mouvements du manipulateur et gestes engendrés. Nous particulariserons celle-ci au cas de la TAO en situant dans ce cadre le problème des modes de commande coopératifs. Nous tenterons enfin une généralisation introduisant la notion de "style opératoire".

#### II-1.1.Représentation des gestes et des mouvements.

Soit  $m$  le nombre d'actionneurs indépendants que possède le système ( $m=7$  dans le cas du MSVO)

On appelle variable d'action  $a_i$  la grandeur physique de sortie de l'"actionneur"  $i$ .

EX: Position angulaire pour le rail

Position linéaire pour le porteur( mais également puissance optique focalisée si une fibre optique est utilisée dans ce cas  $m=8$ , une variable d'action étant ajoutée)

on suppose:

$a_i$  appartenant à  $[a_i \text{ min}, a_i \text{ max}] = I_m$

la SITUATION du manipulateur est le vecteur formé à partir de ces variables d'actions de "l'univers des actions"

Dans cet univers parcouru une trajectoire appelée EVOLUTION  $s(t)$ , suite continue des situations occupées successivement pour  $t$  appartenant à  $[t_0, t_1]$

On distinguera également:

.le VECTEUR : assurant le déplacement et l'orientation de l'organe terminal. Il lui correspond une posture  $s_1$

.l'EFFECTEUR : exécutant un certain nombre d'actions sur l'environnement. Il lui correspond un emploi  $s_2$  (préhension, laser...)

en fait  $s = (s_1, s_2)$

La trajectoire sera composée d'un geste  $s_1(t)$  et d'un travail  $s_2(t)$ .

Si l'on considère maintenant la position généralisée de l'organe terminal ; celle-ci est décrite par un vecteur de TR6:  $X = (X_1, X_2)$

$X$  est appelé disposition de l'effecteur

L'architecture du manipulateur relie la disposition de l'effecteur à la posture du vecteur  $x = f(s_1(t))$

A un geste  $s_1(t)$  correspond un mouvement  $x(t)$  (déplacement  $x_1(t)$  et pointage  $x_2(t)$ ).

De la même façon, le fonctionnement de l'effecteur décrit un rôle  $y$  et une opération  $y(t)$

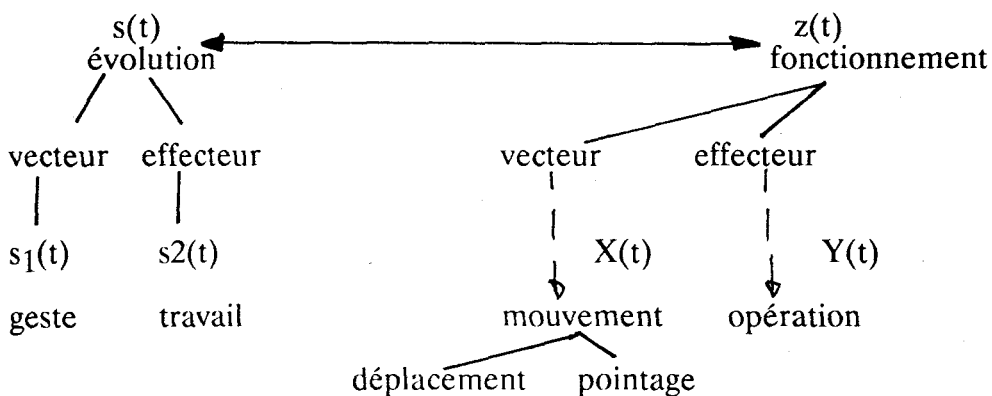
$z = (x,y)$  est une fonction que nous qualifierons d'opérateur pour éviter les ambiguïtés : à une évolution  $s(t)$  correspond un fonctionnement opératoire  $z(t)$ .

Un fonctionnement sera donc décrit par une trajectoire spatiale associée à une loi temporelle de parcours de cette trajectoire.

$z = M(t)$  sera dite une mission.

$r = P(t)$  sera appelée conduite

D'un point de vue dynamique nous avons donc :



## II-1.2 Position du problème

Problème : doit-on spécifier une tâche effectuée par un opérateur à partir d'une loi de variation de  $z$  en fonction du temps ?

Si cela est vrai pour un robot ordinaire dans le cas d'un téléopérateur (comme d'ailleurs pour un robot de coopération en général) cela pose deux questions:

. comment coordonner les actions de l'opérateur et du manipulateur: on s'aperçoit en fait que l'aspect temporel est moins essentiel que le "rendez-vous" partial, l'opérateur adaptant naturellement sa dynamique.

. comment imposer une loi temporelle non triviale (et qui plus est multiaxes) à un opérateur : même dans le cas de tâches simples, cela est quasiment impossible.

Une tâche complexe sera en fait décomposée en une succession de missions :  $T = (M_0, \dots, M_n)$  dont les lois individuelles et les temps d'arrêts ne sont pas spécifiés.

L'exécution correcte de la tâche peut impliquer la répétition d'un  $M_i$ , sa génération peut parfois être demandée en temps réel.

La prescription effectuée par l'opérateur d'une mission et d'une conduite et ceci indépendamment l'un de l'autre simplifie la tâche de décomposition.

D'autre part il convient de tenir compte également des contraintes de sécurité liées :

- aux butées mécaniques des différents actionneurs
- aux obstacles

Celles-ci sont assumées par l'opérateur humain, éventuellement aidé d'un dispositif de représentation.

N.B.: des contraintes de "liaisons" peuvent également être établies lorsque l'on effectue un assemblage ou lorsqu'on déplace un objet "lié" à son environnement, ces contraintes posent des problèmes plus spécifiques en TAO : on associera à la liaison un degré de liberté piloté de façon automatique respectant cette contrainte.

### II-1.3 Décomposition de la tâche.

Différentes techniques ont été proposées, influencées par le type d'organe maître à disposition :

- si seule une commande simplifiée est disponible ( du type joystick comme dans le cas du M.S.V.O. actuel), on effectue une décomposition analytique ou "Axe par Axe": chaque mission correspond à une seule variable d'action (ou pour des missions simples éventuellement 2). Ceci impose un travail "mathématique" à l'opérateur peu compatible avec les contraintes d'abaissement de la charge de travail.

En fait il paraît plus intéressant de donner une formulation mathématique précise à la notion d'actes telle qu'abordée au chapitre III.

Pour cela, on détermine en fait une FAMILLE GÉNÉRATRICE  $A_1, A_2, \dots, A_q, \dots, A_m$  de missions particulières ayant une signification simple par rapport à une analyse de la tâche effectuée auparavant.

EX : A1 peut être le déplacement de l'organe terminal suivant x dans l'espace opérationnel, A2 la combinaison de mouvements de rotation du rail donnant une trajectoire suivant un cercle centré sur un axe pointée auparavant.

Ces actes pourront être instanciés en tenant compte de paramètres caractéristiques de la tâche effectuée (position de l'axe pour A2).

Chacun de ceux-ci pourra être composé de primitives d'actions élémentaires piloté suivant les possibilités du système de commande :

- par une commande opérateur (joystick, variation en copie d'un degré de liberté du maître, commande vocale...)

- par une référence "capteur" : commande proximétrique asservie sur une valeur d'un capteur d'extrémité.

- par une référence "modèle de CAO"

Il est important en effet de sélectionner des actes possédant une représentation simple et naturelle pour l'opérateur, qu'il puisse aisément apprendre en tant qu'élément de base (qui constitueront donc ainsi les mots du vocabulaire du système de TAO).

Ceux-ci doivent pouvoir aisément être changés lors de l'adaptation à de nouvelles tâches en utilisant des possibilités de généralité du langage.

Enfin il doit être possible de réaliser aisément des exécutions parallèles d'actes, ceci assurant la possibilité d'un partage de tâche Homme/Automate à un "niveau plus élevé" (missions qualifiées de composites).

Nous avons en fait abordé ce problème au chapitre précédent où nous avons vu l'intérêt d'une approche orienté objet . Nous allons décrire les éléments de base d'une simulation effectuée à partir du langage Le-cool visant à montrer les possibilités principales d'une telle approche.

Evoquons pour terminer ce point un problème posé lors de l'évaluation ergonomique de la manipulation canonique ARA : en paraphrasant le titre de l'un des articles publiés à ce propos "une tâche de télémanipulation est elle décomposable en éléments indépendants?". [AQU84].

Une conclusion majeure de leurs expériences est qu'il faut se méfier de l'apparente simplicité d'une description externe d'un geste, la réduction d'information que nous effectuons naturellement lors de son observation ne mettant pas en évidence sa complexité interne nécessaire aux régulations en assurant la stabilité.

Une conséquence de ce fait est que la médiatisation engendrée par l'usage d'un téléopérateur oblige à disposer d'un nombre d'informations plus important que pour un travail à main nue, la comparaison des deux quantités d'information étant basée sur une description externe du geste.

N.B: Il y a en particulier indépendance entre les durées des phases constitutives de la tâche et non indépendance sur le plan physiologique. Une restitution réelle d'un geste opératoire demandera encore de nombreux travaux impliquant ergonomes et automaticien : elle montre l'illusion à court terme la difficulté de parler d'une réelle télésymbiose ou téléprésence pour des situations où, d'un point de vue kinesthésique, quantité d'informations sont manquantes.

*N.B.: Plus généralement il s'agirait de donner un sens précis à la notion de "style opératoire" (en fonction du type de tâche), celle-ci incluant les notions de modes*

*d'intégration de la sécurité dans la commande.*

## II-2 Modes coopératifs et actions

Nous avons précisé l'intérêt que présente pour nous une approche orientée objet dans la simulation et l'implantation de modes coopératifs. Le but de ce paragraphe est de montrer concrètement comment implanter dans l'un de ces langages une commande sous forme de modes.

L'unicité des "objets" manipulés permet d'étendre cette simulation aux actions qui peuvent ainsi réutiliser les mêmes mécanismes de généralité, de gestion du parallélisme dont l'intérêt a été donné au paragraphe II-1. Nous verrons également au paragraphe suivant comment cela permettrait d'intégrer explicitement fonctions de dialogue et Modes de commande à partir de la notion de hiérarchie multiple. Les principaux problèmes et certaines voies de recherche pour les résoudre seront évoqués, en particulier pour une implantation effective en temps réel.

### II-2.1 Choix du langage et du type d'implantation.

Le choix de ce langage a été fixé par plusieurs éléments :

- possession des fonctionnalités de base évoquées au chapitre IV
- \*notion de classe et d'héritage
- \*transmission sélective de messages
- \*gestion de la composante temps (par biens collatéraux)
- \*structures de contrôle avancées (transfert de données par pipes)
- ouverture du langage pour des développements hors simulation (cette possibilité n'a pas été exploitée pour cette thèse mais est indispensable pour les caractérisations futures)
- portabilité sur des calculateurs d'autres constructeurs : nécessité classique, renforcé par le fait que le choix du Macintosh comme ordinateur support risquait d'être remis en cause dans une implantation effective avec l'évolution des stations de travail YAK de faible coût.

Notre choix s'est fixé sur le langage Le Cool, réalisé par Christian Jullien à partir des idées de base de Pierre Cointe sur le langage Forme.

Celui-ci se présente comme un sur-ensemble du Le Lisp, écrit en Le-Lisp (ce qui assure en grande partie sa portabilité). Cette possibilité permet également de développer en Le Cool un environnement utilisable directement pour des applications plus orientées YAK : nous avons ainsi pu tester son interfaçage avec le système expert "experkit" de J. Ferber sur des cas d'application simple : ceci permet de disposer rapidement d'un environnement de travail possédant les facultés de base. Il est bien évident qu'il s'agit ensuite d'optimiser l'implantation effectuée : c'est ce qui a été effectuée implicitement par C. Mangeot dans le système COPILOTE dont les grandes lignes sont données au chapitre IV (IV-1.1.).

Dans ce langage, un objet est un symbole Lisp connaissant un certain nombre de comportements (ou méthodes) qu'il active lorsqu'on lui passe le nom de ce comportement en argument.

Si l'objet pince connaît la méthode "rotation", on active la rotation en évaluant :

```
?(pince rotation)
```

```
Réponse du système : rota angle
```

Ce message "rotation" peut être passé avec les paramètres opérationnels nécessaires; ceux-ci seront évalués dans le contexte de la méthode. On retrouve ce mécanisme dans de nombreux langages objets comme Smalltalk.

Syntaxe de la transmission: (<objet> <transmission> ([<e1>...<en>])

Seuls les <ei> sont évalués. Rot\_angle peut être attaché à une procédure d'activation du moteur du micromanipulateur correspondant, auquel cas, la décomposition et l'évaluation effectue l'activation d'objets externes. Les "objets" externes peuvent donc être représentés comme des "objets d'entrée-sortie", les paramètres correspondant sont mis à jour par des opérations effectives d'entrée-sortie activé avec l'objet ou de façon plus sûre lors d'une période fondamentale de découpage de l'action.

N.B.:Dans notre cas d'implantation ceci est envisageable à l'aide du microcalculateur frontal d'entrée-sortie MACLAB II effectuant l'interfaçage souple entre le système d'exploitation du MAC et l'extérieur : la fermeture du Macintosh est néanmoins un frein au développement d'applications hors simulation.

### II-2.2 Classes et mécanismes d'Héritage.

Un objet est créé par envoi d'un message "new" à sa classe (l'objet est "modèle" de sa classe)

La classe elle-même, comme nous l'avons vu est un objet comportant un certain nombre de méthodes et dans laquelle on range un objet en fonction de ses caractéristiques. L'objet est donc en fait un ACTEUR capable de réagir à son environnement à l'aide des comportements hérités de sa classe.

Contrairement à LOOPS ou SMALLTALK, les classes ne sont pas créées de la même manière que les autres objets (i.e. par envoi du message "new" à une Métaclasse) mais par un mécanisme spécial assurant la consistance du système.

La syntaxe utilisée, analogue à celle du langage C permet une meilleure lisibilité, compensant partiellement l'absence d'environnement de programmation graphique. Nous aurons par exemple pour la définition d'une classe de mode référencé-captur:

```
(dc mode-ref-capt(Field,primitive,capteur)
 val activer( )
 (lier primitive capteur)
 envoyer)
```

```
réponse du système_ : = Mode_Ref_capt
```

le mode référencé-captur définit une classe du système de programmation dont on peut créer des instances; un objet de type mode-référencé-captur sera obtenu de la façon suivante :

```
(desc_cont new Mode_Ref_capt 'descente'fopt1)
```

réponse = des\_cont le système connaît l'objet des cont pénétration référencée capteur à fibre optique 1

Si on envoie maintenant le message activer à ce nouvel objet

(des\_cont activer)

le système répond en liant la primitive et le capteur et en envoyant l'activation effective. Ces 2 opérations correspondent à 2 opérations d'entrée sortie :

- l'une correspondant à l'activation au niveau du calculateur de commande de la procédure permettant de lancer le Mode actionne descente avec contrôle par le capteur à fibre optique 1

- l'autre à l'ordre de mise en route effective de ce mode de commande.

Ceci permet de définir l'enchaînement séquentiel des modes mais ne suffit pas pour une description des activités parallèles. Dans le cadre de la mise en oeuvre des langages objets ce problème commence à être abordé actuellement: nous donnons ici la solution implantée qui suppose la résolution des problèmes de parallélisme (conflit d'accès aux ressources) résolus à l'exécution)

### II-2.3 Parallélisme et gestion des liens collatéraux.

Pour faire intervenir la chronologie des objets d'un séquençement par ordre de création il est utile de disposer d'autres mécanismes de contrôle que celui objet classe (l'objet émet un message reçu et interprété par la classe).

Par exemple, la relation classe--> objet peut être utilisée pour appliquer le même comportement à tous les objets d'une classe (répétition sans contrainte : For-All permettant d'envoyer à une variable tous les messages valides pour une instance de la classe) recherche dans une classe d'un objet possédant une propriété : Find, ceci permet par exemple la recherche de règles dans un système expert écrit en Le\_Cool).

L'une des caractéristiques du langage FORMES [COI 83] dont nous nous sommes inspirés et d'avoir impliqué une gestion plus fine des objets entre eux nécessaire pour ordonner l'enchaînement des actions. Celle-ci, dans notre cas est réalisée à partir des 4 fonctions de base suivantes:

- les méthodes first et last qui retournent le nom du premier ou du dernier objet créé

- les méthodes succ ( ) et pred ( ) qui retournent le nom du prédécesseur ou du successeur de l'objet courant.

Ceci correspond à l'implantation effective des modes de commande réalisée dans le cadre de ARA [GRA 88] sous forme d'arbre généralisé (Réseau).

Nous retiendrons particulièrement vis à vis de la sécurité Homme/Machine les possibilités de :

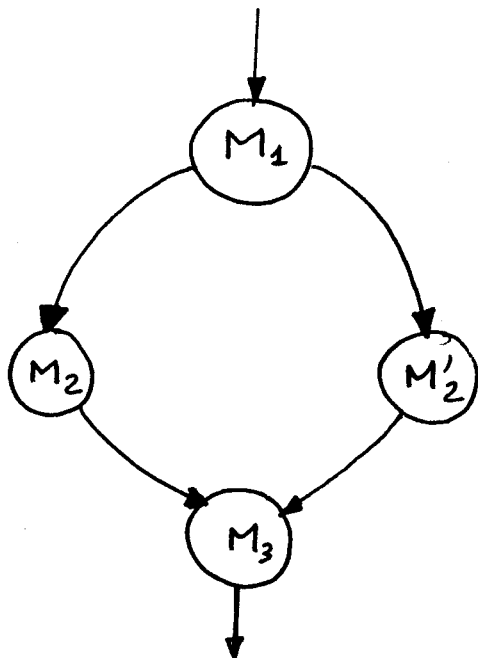
#### -reprises locales sur incident :

L'action R de reprise est lancée par l'opérateur en cas d'interruption de M1 suite à un incident.

Cette possibilité se transcrit par l'activation d'une méthode spécifique à l'objet M1 envoyant un message à l'objet R qui :



- désactivera M1 par envoi de message en retour
- activera M2 (la paramètre non du successeur est passé avec le message d'activation de R)



- la stratégie alternative

Le problème est donc de représenter les objets à successeurs multiples : dans la structure choisie M1 "ne choisit" pas la voie dans l'alternative mais envoie un message à M2 et M'2 qui filtrent et exécutent sélectivement l'action. C'est donc le mécanisme de construction de ce filtrage qui décidera du parallélisme ou de l'exclusion de M2 et M'2. Ceci rend à la fois plus souple et plus délicate la construction du système : il s'agit en effet de gérer (le problème est général) les conflits d'accès relatifs aux objets M1 et M2.

### II-3- Conception d'un système robotisé chirurgical et commande coopérative.

La conception d'un système robotisé dans un contexte chirurgical est confrontée à des exigences de natures parfois contradictoires : la sécurité "absolue" demandée pouvant s'opposer à la contrainte de déboucher sur un produit, c'est à dire sur un ensemble de matériels et de logiciels industrialisables pour lesquels existera un marché suffisant.

Face à ces contraintes pratiques, la méthodologie et les principes de commande exposés dans les chapitres précédents peuvent paraître ne résoudre qu'une faible part du problème, celle relative à la commande du système. Nous pensons que les méthodes présentées ont un caractère plus général et pourrait aider à résoudre des questions se posant à d'autres moments du cycle de vie du produit de CHAO.

Nous allons dans ce paragraphe détailler la façon dont nous envisageons actuellement la mise en oeuvre d'un système de ce type dans un environnement réel. Nous insisterons plus particulièrement sur :

- l'utilité de l'analyse fonctionnelle en préambule de la mise en oeuvre.
- la façon dont on peut dégager les niveaux de sécurité évoqués au chapitre 1.

- les contraintes de mise en oeuvre d'une commande coopérative.

### II-3.1 Analyse du problème de sécurité hommes/machines en CHAO.

Nous avons souligné au chapitre I, l'importance de l'analyse fonctionnelle initiale pour la qualité de l'étude de sécurité hommes/machines, qui ne peut s'envisager de façon réaliste qu'en plongeant les problèmes sous-jacents dans l'ensemble de la conception du système. Celle-ci permet de mettre en évidence les parties critiques et d'effectuer les choix (d'objectifs de sécurité pour chaque sous-ensemble, d'efforts à consacrer etc..) sur des bases solides.

Le "transfert" effectué de la robotique au milieu chirurgical s'accompagne nécessairement d'un dialogue multiple dans lequel un outil est vite nécessaire. Nous avons pu en particulier mettre en évidence dans le cadre de ce projet au moins trois "interlocuteurs" devant agir de façon complémentaire entre lesquels un compromis est à trouver:

- les chirurgiens qui expriment les besoins, vérifient la cohérence du système vis à vis des techniques chirurgicales dans lesquelles il s'intègre ou le cas échéant qu'il modifie; ils rechercheront a priori une *sécurité intrinsèque* la plus grande possible.

- les chercheurs dont l'intérêt a été suscité par l'aspect "avancé" du projet et qui auront donc tendance pour "optimiser" le système à rendre sa commande plus pointue, i.e. à y intégrer les derniers développements de l'automatique, voire à les étendre. Même s'ils étudient la robustesse de la commande, dans un cadre d'hypothèses forcément restreint, le risque encouru est par nature plus important.

- les industriels dont les critères seront essentiellement de nature économique (prix/marché mais aussi fiabilité du système, maintenabilité etc..).

L'intégration cohérente du système est avant tout un compromis entre leurs points de vue.

La représentation du problème sous forme de SADT, que nous avons présentée au chapitre I de façon tout à fait générale, peut être complétée dans cet exemple particulier:

L'analyse des relations homme/système permet concrètement d'aborder de façon systématique l'intégration d'un manipulateur dans un bloc chirurgical.

Elle permet en particulier de situer un problème sous-jacent important: l'effet produit par l'introduction du système automatisé sur l'organisation du travail au sein du bloc. Le système automatisé n'est en effet plus réductible, comme c'est le cas de l'utilisation du laser ou du microscope à un instrument nouveau intégrable sans modifications majeures des procédures existantes. Son utilisation modifie de façon fondamentale la nature du geste chirurgical.

Le Professeur Pouliquen avait pu parler à propos des nouvelles méthodes de monitoring de l'avènement du chirurgien-ingénieur; on pourrait dans notre cas étendre cette analogie et parler du chirurgien-pilote.

Nous insisterons, pour ne pas tomber dans un mythe analogue à celui du "pilote dans l'usine" tant décrié par les ergonomes, sur le fait que l'activité du chirurgien est modifiée mais reste spécifique. Elle ne peut se réduire à un modèle trop simple déduit du comportement d'un opérateur-pilote générique.

En donnant accès à un système à mode de commande multiple, programmable et flexible, on accroît la complexité de la tâche du chirurgien: les méthodes exposées

aux chapitres précédents et que nous proposons d'appliquer dans ce cas, n'ont pour but que de permettre une maîtrise plus sûre de celle-ci. Leur mise en oeuvre pratique fait l'objet de la suite de ce chapitre.

### II-3.2 Mise en oeuvre d'une commande coopérative.

L'analyse fonctionnelle générale est d'abord affinée en fonction du contexte particulier de l'opération à effectuer.

Celle-ci permet de dégager :

- les ressources à utiliser (type d'outils, retours d'informations adéquats..)
- l'organisation du logiciel: les modes à programmer ou à générer à partir de classes prédéfinies.

Exemple: pour une opération de vitrectomie dont nous avons au chapitre I défini les principales fonctionnalités: les ressources sont constituées:

- \* du type de vitréotome (de Klöti..)
- \* du capteur de sécurité utilisable: émetteur/récepteur à embout à fibre optique;
- \* d'un système de génération de sons à fréquences variables.
- \* d'un boîtier de commande à joystick, chaque degré de liberté de celui-ci étant associé par un codage simple à une commande du manipulateur.

*N.B.: Ces choix sont effectués sur la base d'essais effectués dans un contexte réel sur une maquette, et sont contraints par les modifications acceptables de l'opération telle qu'elle est effectuée actuellement. Ces choix sont typiquement un compromis entre le souci du chirurgien de s'appuyer sur des bases solides ( commande proche de celle du microscope opératoire actuel par exemple) et celui du chercheur (intégration simple d'un retour d'information référencé capteur par le générateur de sons couplable au capteur optique ). Bien que nous n'ayons pas eu l'occasion de poursuivre cette voie pour le manipulateur, une analyse ergonomique semblerait ici particulièrement indispensable.*

Notons que seules à ce niveau les ressources spécifiques de la tâche seront spécifiées: par classe de tâches (stéréotaxie) il est possible de dégager des classes de ressources prédéfinies (robot stéréotaxique) qui constitueront la base des produits industriels à développer.

- les modes à programmer :

- \* modes de déplacement gardés sur les butées de fin de course en maître esclave simple; retour auditif à fréquence asservie à la distance instrument-tissus.
- \* mode automatique avec balayage autour d'un point fixe avec garde sur le capteur optique (pour éviter la rétine); retour visuel et déclenchement d'alarme.
- \* mode de retrait rapide en secours.

Les modes de programmation axe par axe et cartésien "libre" restent évidemment accessibles.

Nous avons réalisé ces modes en utilisant le système de programmation Transforth (des compléments sur cette implantation sont donnés en annexe 2). Ces

modes correspondent au vocabulaire de base pour l'exécution de la tâche :l'univers dans lequel le praticien programme cette tâche est donc restreint et supposé descriptible dans leur langage.

Dans cette hypothèse, il est possible de simuler le programme (les mots) correspondant en utilisant le système Le Cool: à l'aide de ces deux outils, nous pouvons donc personnaliser le système pour un chirurgien déterminé, et guider la construction d'un vocabulaire en fonction de sa propre conduite de l'opération.

*N.B.1: Il serait en fait nécessaire de lier ces deux outils de manière à renforcer les capacités actuelles de protection du système de programmation, dont l'ouverture ne permet pas de guider et de contraindre le chirurgien dans sa procédure de construction du vocabulaire: ceci limite actuellement les possibilités de programmation directe par celui-ci.*

*N.B.2: Seul ce premier niveau a pu être testé en situation réaliste, les autres niveaux dont nous parlerons dans la suite ont été testés indépendamment par simulation.*

Au niveau supérieur, la sécurité homme/machine est améliorable par validation des passages entre modes.

Dans le cas de la vitrectomie, l'opération est effectuée sous microscope avec contrôle par caméra. Deux types d'informations sont explicitement utilisables:

- celles fournies par l'espion machine: présence ou non de l'opérateur aux commandes, vibrations anormales du joystick [DIA 85]

- celles fournies à partir de l'analyse de netteté d'images.

De manière à appliquer un algorithme de type Electre (mixte ou coopératif), nous devons fixer les coefficients de concordance et de discordance dans chaque phase de l'opération :ceux-ci sont considérés comme seuils de sécurité au niveau 2.

De manière à préciser ces concepts sur un cas concret nous allons présenter au paragraphe suivant quelques exemples de manipulations effectuées.

### III- EXEMPLE D'UTILISATION DE MODES COOPERATIFS POUR LA SYNTHÈSE D'UNE OPERATION DE MICROCHIRURGIE.

Le but de ce paragraphe est de montrer les possibilités ainsi que les limites concrètes de la méthodologie présentée dans ce mémoire. Plutôt que d'appliquer celle-ci successivement aux différents domaines de la microchirurgie évoqués au début de ce chapitre, nous avons choisi d'extraire de ceux-ci une manipulation "canonique" représentative des difficultés se rencontrant classiquement en téléopération et des problèmes de sécurité homme/machine qui en découlent.

Différents exemples nous ont plus particulièrement servi de support:

EX1: Réalisation d'une vitrectomie assistée par ordinateur.

EX2: Aide à l'implantation d'électrodes intratumorales dans le cerveau.

EX3: Test in situ d'opérabilité de la chaîne de conduction de l'oreille interne après opération.

Bien que chacun de ces exemples ait fait l'objet d'études pratiques durant cette thèse, nous ne pensons pas qu'une réelle "validation" de notre méthodologie soit réalisée par les expérimentations canoniques effectuées. Comme nous l'avons souligné au chapitre I, cette étape de validation ne pourra être considérée franchie qu'après

réalisation effective d'un prototype industriel, validation médicale et une évaluation de performance à partir d'indices ergonomiques (évaluation qui pourra être basée sur les travaux de simulation détaillés dans [DIA 85].)

Après un bref descriptif de la manipulation canonique (III-1), nous essaierons donc essentiellement de souligner:

- la décomposition du système hommes/machines et la mise en évidence des points critiques de coopération (III-2).
- l'analyse des gestes opératoires nécessaire à leur analyse (III-3).
- la simulation des modes à générer, hors ligne, pour compléter cette analyse et bâtir la structure des scénarios; nous en déduirons les modes à synthétiser. Ceux-ci, pour une question d'efficacité ont été programmés en Transforth; un moniteur d'enchaînement est nécessaire pour permettre l'exécution des scénarios: nous décrirons la structure de celui-ci au III-4.

Les implications sur le poste opérateur nous permettra en conclusion de décrire de façon pratique le modèle d'interaction et de communication sous-jacent à l'implantation réalisée, ainsi que les implications sur la sécurité homme/machine correspondantes.

### III-1 Description de la manipulation canonique réalisée.

Celle-ci est destinée principalement à mettre en évidence les particularités de notre approche, particulièrement face à deux problèmes importants:

- l'utilisation d'un réseau de communication entre poste opérateur et manipulateur ( et /ou entre postes opérateurs): celui-ci entraîné diverses réductions des informations transmises ( de commande et de retours d'information) à prendre en compte dans la construction des modes. Il entraîné l'existence de points critiques d'interaction liés en particulier à l'existence d'une limite supérieure de débit sur le réseau .

- pilotage d'une manipulation par plusieurs opérateurs; ceux-ci ayant des priorités différentes, et pouvant évoluer durant le cours d'une session.

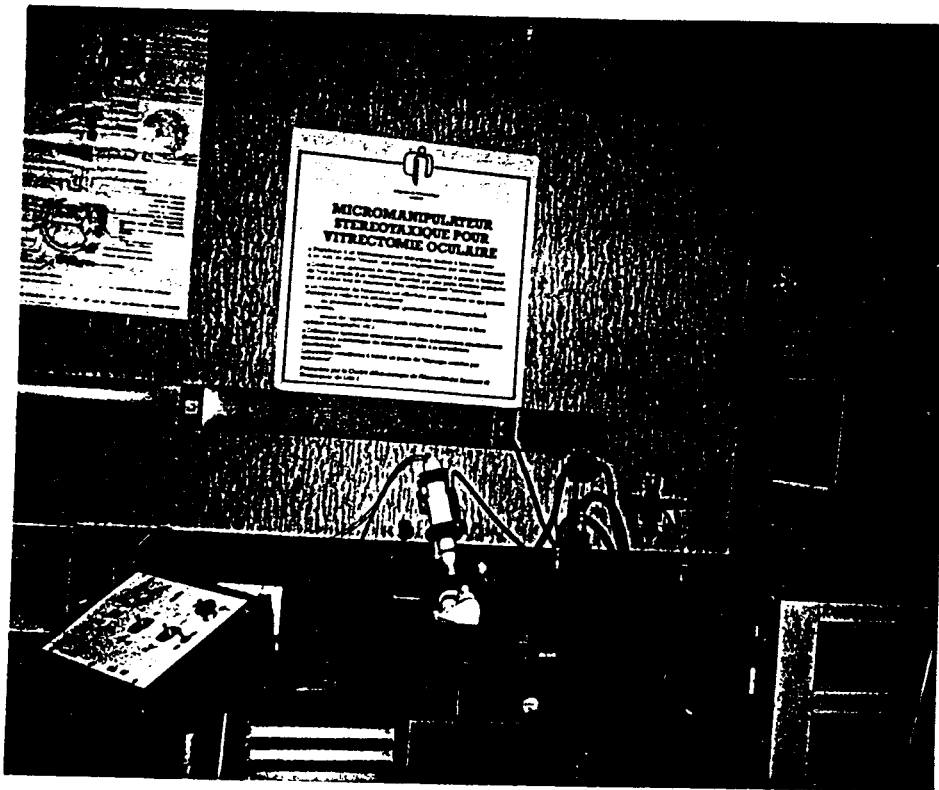
Le système ainsi constitué comprend donc le micromanipulateur auquel est adjoint:

- en tant que capteur de proximité un émetteur-récepteur à fibres optiques. Celui-ci permet de détecter la position de l'extrémité de l'instrument manipulé à partir de 10mm (distance réglée par étalonnage dans une zone de 3 à 15 mm) Un capteur de type COFO-SEAT a été réalisée à cet usage.

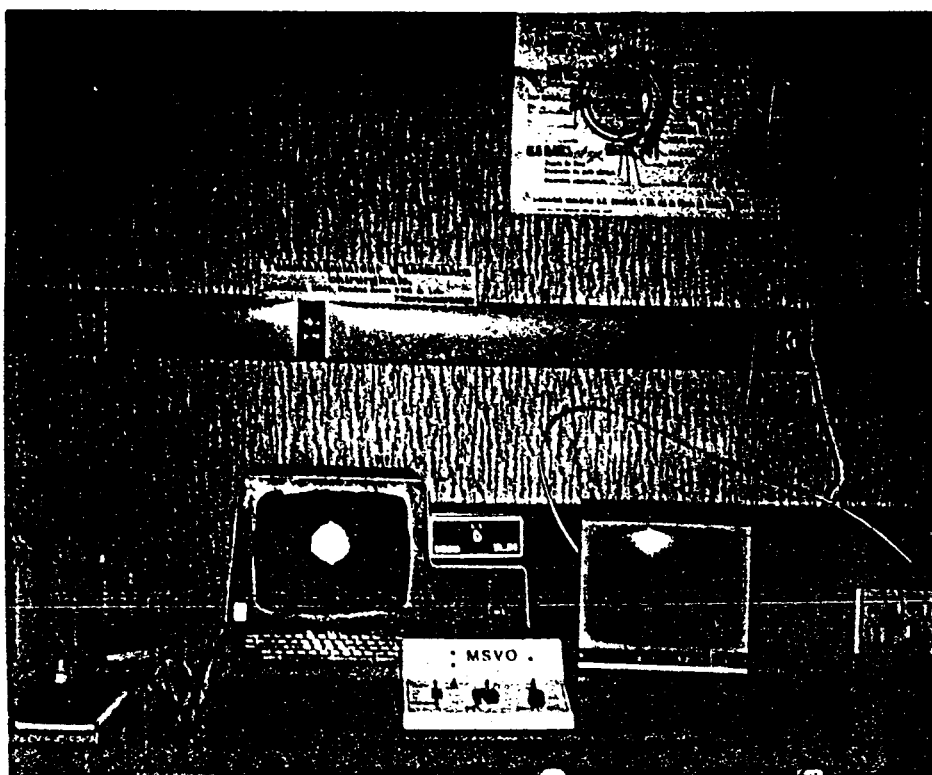
- en tant que capteur de situation, une caméra .

Ces deux capteurs sont gérés par un calculateur local (acquisition, commande du zoom, couplage au réseau), sur lequel est également réalisée la coordination des mouvements du micromanipulateur.

Sur celui-ci sont réalisés, en Transforth, les modes de commande élémentaires soit non référencés au capteurs (mouvement en espace "libre"), soit référencés à celui-ci (commandes dites gardées).



*figure 10: poste opérateur 1 et micromanipulateur.*



*figure 11: poste opérateur 2*

On dispose ainsi globalement :

- des commandes axe par axe gardées ou non .
- des associations des commandes précédentes dans l'espace opérationnel en coordonnées articulaires avec commande en vitesse.
- des commandes précédentes avec blocage de degré de liberté sur seuil déterminé soit a priori, soit en ligne (après repérage d'un objet).
- des commandes de la péri-robotique (retraits d'urgence, commandes caméras).

10). Ceux-ci sont accessibles en local à partir d'un premier poste opérateur (cf figV-10).

Le calculateur précédent ainsi que la sortie de la caméra sont reliés à un coupleur réseau, permettant une communication à partir d'un point quelconque du réseau expérimental de L'USTL.

Un deuxième poste opérateur est couplé à ce réseau (voir figV-11). Celui-ci possède les possibilités réduites de commande suivantes:

- soit pilotage axe par axe .
- soit déclenchement d'action automatique.

La communication avec le poste 1 est assuré grâce au retour caméra, à l'envoi de messages de poste à poste et le cas échéant, à des messages sonores. Une voie son peut optionnellement être établie entre les opérateurs .

Les manipulations sur ce système consistent à parcourir des trajets prédéfinis avec surveillance des erreurs de parcours.

Sont surveillés le nombre d'erreurs en ligne (Ind1 correspondant à l'"espion opérateur"), et la qualité du réseau de transmission (qualité du signal vidéo, Ind2, indiquant celle du retour à l'opérateur et taux d'erreurs sur la liaison de données, Ind3, mesurant la sécurité de la liaison). Ceux-ci fournissent donc les indices de base "mesurant l'interaction homme-machine. Etant donnée l'interprétation de ces indices, il paraît raisonnable de construire une méthode d'agrégation non directe (i.e. non d'utilité globale ou partielle). Une méthode de type MEDCIM permet par contre en effectuant une agrégation de préférence de tenir compte de l'hétérogénéité des indices.

A partir de cette surveillance, il s'agit donc d'établir une organisation des modes permettant de tenir compte d'une structure de préférences donnée. Pour cela il s'agit tout d'abord d'effectuer une première décomposition du système homme/machine.

### III-2 Décomposition du système hommes/machines.

Celle-ci correspond à une première allocation "statique" donnant les rôles de base (i.e. en situation normale) attribués à chacun des opérateurs. En particulier, nous établissons une priorité statique en situation normale: nous supposons dans cette expérience que l'opérateur "distant" effectue l'opération et est prioritaire. Une modification en ligne de cette priorité demande un dialogue entre les deux opérateurs.

Une sécurité intrinsèque est néanmoins nécessaire: l'arrêt d'urgence, accessible par un "coup de poing" sur le poste opérateur 1 est donc hors organisation des modes (directement connecté à la commande du vérin).

Cette décomposition statique évolue bien sûr en cours d'opération en fonction de l'évaluation critique ou non de la situation. Chacun des degrés de liberté peut a priori être alloué à l'un des deux opérateurs, celui-ci pouvant ou non mettre en oeuvre son contrôle automatique.

De manière à simplifier la décomposition des , nous supposons que l'opérateur distant effectue essentiellement des contrôles de la partie terminale (pour des questions de visibilité-caméra) et l'opérateur sur site des opérations sur le porteur (et de sécurité immédiate).

La dissymétrie engendrée par cette allocation statique est essentiellement liée à une évaluation a priori des possibilités des canaux de communication tant du point de vue des temps de transmission que des retours( réduction à une scène N/B 2D à distance à comparer avec une scène étendue 3D sur site...).

Etant donnée l'évolution potentielle dans le temps de la qualité, soit sous l'effet d'une panne, soit par évolution de la visibilité d'un capteur, nous pouvons donc également a priori déterminer des points critiques de coopération: ceux-ci correspondront aux phases de découplage /recouplage en téléopération semi-automatique "classique".

Nous isolerons en particulier les changements d'opérateur de contrôle pour un degré de liberté généralisé( i.e. soit un degré de liberté physique libre ou gardé, en mode télémanipulé ou automatique avec supervision directe ou l'assemblage direct de la commande de degrés de liberté généralisé). Ces changements seront toujours effectués après validation de l'opérateur prioritaire.



### III-3 Analyse des gestes opératoires.

Cette analyse correspond ici à des gestes simulés par rapport à une opération type. Nous le traitons sur l'exemple de l'opération type vitrectomie.

Le geste correspondant sera supposé décomposable de la façon suivante: la tâche globale est décomposée en objectifs élémentaires de pilotage (phases de conduite distinctes):

Obj1: Positionnement de l'instrument dans l'oeil.

Obj2: Vitrectomie proprement dite.

Obj3: Retrait de l'instrument.

Cette décomposition correspond bien sûr à un choix a priori, correspondant à une procédure fixée par le responsable de la tâche globale. En l'occurrence, en situation réelle, le chirurgien l'effectuerait.

A chacun de ces objectifs élémentaires est associée une structure de préférence, correspondant au style de conduite associé.

Nous pouvons choisir d'affecter des coefficients de pondération (de modulation au sens de MEDCIM) sur les indices-critères choisis.

Pour Obj1: la caméra a une importance majeure pendant la sous-phase de positionnement (SPP1) pour qualifier l'aptitude de l'opérateur par rapport à un positionnement automatique référencé capteur optique, puis la voie de communication numérique prend une importance accrue (positionnement dans l'oeil: SPP2).

Dans la phase intermédiaire (SPI 1-2), nous considérons ces deux critères équivalents. Le taux d'erreurs intervient de façon uniforme pendant cette première phase.

Pour Obj2: Cette phase est supposée effectuée en mode normal, en automatique avec contrôle de la position de l'embout et supervision de l'opérateur. Les critères Ind2 et 3 (pas de commande directe) par contre sont supposés faibles.

### III-4- Simulation des modes et moniteur d'enchaînement.

Nous partons de deux classes de modes: télémanipulé et automatique (attribut a/t).

De nouvelles classes de modes sont créées par héritage de l'une de ces classes et adjonction d'attributs complémentaires:

- capteur de proximité (o/n)
- capteur de vision (o/n)
- type de couplage (directOpérateur1, directOpérateur2, automatique)

En utilisant le mode d'implantation décrit au paragraphe précédent, ceci permet de bâtir le noyau en Le-cool générant les différents modes selon les phases décrites.(annexe3).

L'enchaînement de ceux-ci est effectué grâce au moniteur MEMC qui gère en fait les ressources disponibles (degrés de liberté) pour affectation soit à op1, soit à op2,

soit en automatique. Ceci permet donc de changer l'attribut "type de couplage" sur événement extérieur (message envoyé au mode en cours). La simulation consiste en une validation de la procédure choisie, effectuée par le concepteur. Il en résulte donc une phase terminale interactive pour la détermination des objets-modes effectivement nécessaires à l'opération déterminée.

L'interaction avec le "concepteur de l'opération s'effectue à deux niveaux:

-structurellement par le choix d'un nombre réduit d'objets à partir de classes générales.

- par le degré d'importance accordé à chaque critère qui détermine en ligne le passage entre modes.

Ceci caractérise le principe d'association retenu (méthode de surclassement et phase d'interaction imbriquée).

Ces phases d'interaction sont effectuées textuellement hors ligne en Le-cool, pour la première, hors ligne textuellement (choix de paramètre) ou en ligne par forçage à 0 ou à 1 de la valeur de modulation d'un critère.

Une extension de cette manipulation consisterait à effectuer, sur des manipulations type l'apprentissage de ces paramètres.

## CONCLUSION

L'application en chirurgie assistée par ordinateur, des méthodes évoquées aux chapitres précédents de cette thèse nous a permis de mettre en évidence, l'importance d'une approche globale, préalablement à l'application d'une commande coopérative.

Nous ne prétendons pas avoir pu être exhaustif dans la réponse aux besoins d'automatisation en chirurgie, mais plus humblement d'avoir essayé de répondre à la nécessité de "lier" les travaux allant dans cette direction par le biais d'une démarche d'intégration commune. Les méthodes basées sur les modes coopératifs que nous avons introduits nous semblent un terrain riche et souple pour bâtir cette intégration.

A l'heure actuelle, les différentes phases constitutives de la méthodologie (planification, programmation des modes, suivi de l'exécution) n'ont pu être intégrées au sein d'un unique système: il s'agit là d'une voie de prolongement du projet, dont nous espérons avoir montré la direction.

L'orientation "sûreté de fonctionnement" que nous avons voulu donner à leur application ne fait bien sûr que refléter la structure de préférence, qu'en tant que concepteur-décideur nous nous voulons imposer aux systèmes construits pour ce type d'application.

Cela ne va pas de soit, et la négligence de certains indices liés au système homme/machine, ne ferait à mon avis que révéler une autre structure de préférence, basée sur un compromis coût-efficacité et une acceptation du risque différents.

L'intégration du chirurgien dans les boucles de commande du système complexe constitué par le micromanipulateur, sa périrobotique associée et les systèmes de monitoring est une étape nécessaire pour une réussite du passage du chirurgien artisan en chirurgien ingénieur. L'usage de méthodes de décision de type agrégation de préférence, éventuellement complété par une approche experte permet de concevoir une "interface homme/système" préservant les qualités de l'un et de l'autre. Ceci constitue, à notre avis une approche cohérente pour une téléopération de quatrième génération.

Cela ne va pas de soi mais résulte d'un compromis accepté entre les différents acteurs que ce soient les chirurgiens, les chercheurs, les industriels ou nous, utilisateurs potentiels des nouvelles techniques de la médecine.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux résumés dans ce mémoire ont été entraînés par la nécessité de déterminer une gestion efficace des situations où des dysfonctionnements d'un système peuvent se produire du fait de couplages forts entre un opérateur et un système dynamique.

Nous avons voulu apporter une contribution méthodologique à l'élaboration de systèmes semi-automatiques en temps réel au sens suivant: l'homme y décide constamment de la transition continue manuel-automatique et recherche la survivabilité après incident. Cette définition assez largement acceptée en aéronautique, cadre parfaitement avec l'esprit dans lequel nous avons conduit nos travaux.

Comme nous l'avons montré précédemment ceci suppose une organisation adéquate de la commande permettant, le cas échéant d'intégrer des aides à la décision élaborées, un degré croissant d'automatisme impliquant un niveau de communication homme-machine plus élevé. La gestion en temps réel d'un système complexe nécessite ainsi une coopération adaptative entre les opérateurs et système automatisé.

Bien qu'exposé dans le cadre de la téléopération avancée, ce genre de considérations trouve naturellement application dans d'autres domaines parmi lesquels on peut citer:

- l'étude des interfaces véhicule/conducteur (depuis 1987 le projet européen Prometheus, d'aide à la conduite automobile intègre d'ailleurs un thème sur les "co-operative control"

- la communication homme-machine dans les systèmes technologiques complexes industriels, les réseaux de télésurveillance (de transports ou d'énergie).

L'importance de l'information visuelle, le nombre élevé de capteurs différents, la complexité des réseaux d'interactions sous-jacents nécessitent des méthodes d'analyse qui autorisent la prise en compte d'une information globale hétérogène: nous nous sommes attachés à montrer dans ce mémoire que des approches multicritères nouvelles permettent de solutionner ce problème tout en conservant une assise de résultats généraux d'automatique intéressante.

Ce n'est malgré tout qu'une première approche où nous avons parfois accepté de gagner en réalisme des méthodes ce qu'elles perdaient parfois en clarté. Des développements à base de systèmes d'aide auto-explicatifs, modulo quelques précautions, évitant de tomber dans les pièges classiques d'auto-référence, devrait permettre d'améliorer cette situation.

Nous pensons que, bien sûr des résultats réels dans ce sens doivent ressortir d'une analyse multidisciplinaire: nous avons néanmoins découvert les difficultés d'en trouver un langage commun. C'est pourquoi nous avons essayé durant le cours de ces travaux de maintenir un équilibre parfois délicat entre l'approche "ingénieur", qui se base sur la cohérence de ses modélisations et celle, plus pragmatique du praticien que nos applications en chirurgie nous a conduit à côtoyer.

Aborder le problème de l'automatisation en chirurgie par le biais des systèmes automatiques temps réel nous a permis en particulier de constater:

- la nécessité d'une approche structurée permettant de faire apparaître les fonctions que l'automatique pouvait efficacement aider. Les approches fonctionnelles de type SADT, à condition de les compléter par un cadre d'analyse classifiant les "erreurs humaines" semblent ici tout à fait adaptées. Elles nous paraissent d'autre part essentielles pour l'étape suivante d'industrialisation dont elles fixent à la fois les contraintes et les latitudes d'action introduisant ainsi une analyse de valeur conduisant à un design adapté. L'intégration dans cette analyse de modèles d'opérateur devrait

permettre de montrer que l'"human reliability engineering" doit faire partie intégrante du génie industriel.

- la complémentarité de techniques temps réel (l'enchaînement de modes impliquant une gestion efficace de leur parallélisme) et des systèmes d'aide interactifs à l'opérateur. Il est certainement intéressant d'aller plus loin dans ce sens et d'étudier les possibilités de validation partielle de séquences de l'interface homme/machine en utilisant les possibilités actuelles des langages réactifs et de leurs environnements de simulation.

En introduction d'un article récent [DEK 89], Véronique de Keyser faisait remarquer que "l'erreur humaine -loin d'être une aberration est plutôt un symptôme ... à condition de la comprendre et la gérer, elle peut -paradoxalement -devenir un élément de sécurité .Analyser ses ressorts psychologiques c'est reconnaître que l'homme est le meilleur élément de fiabilité qui soit". C'est en se recherchant de nouvelles méthodes d'organisation de la commande intégrant de façon réaliste les avancées de l'ergonomie que l'automatique peut ainsi servir à augmenter la sûreté de fonctionnement des systèmes hommes/machines et relever ainsi le défi des risques technologiques majeurs revers quasi nécessaire de l'utilisation de technologies de pointe. La coopération équilibrée entre sciences "humaines" et sciences de l'ingénieur paraît ainsi une condition sine qua none d'avènement de la chirurgie assistée par ordinateur.

**BIBLIOGRAPHIE**

[ACA 87]

Colloque international: "La maîtrise des risques technologiques"  
Décembre 87 Résumé des interventions. ACADI Londez Conseil Paris.

[ADI 84]

Rapport final contrat ADI.

[AGR 85]

C.Agricole: "Réseau local pour T.A.O" Rapport Interne L.A.370 Centre  
Automatique Lille Janvier 85.

[ALB 80]

Albus J.S. and Al.: "A measurement and a control Model for adaptative  
Robots". Proc. of 10th International Symposium on Industrial Robots. Milan  
Italy 1980.

[AND 80]

Pierre André: "Les robots de coopération" Thèse d'état Besançon 28  
Mars 1980

[AND 83]

André G.: "Conception et modélisation des systèmes de perception  
proximétriques: application à la commande en téléopération". Thèse de  
docteur-ingénieur, IRISA, Rennes 1983.

[AND 86]

André G. et Fournier A. : " The generalized information feedback  
concept in computer aided teleoperation". Proc. 6th RoManSy, Cracovie  
sept.86.

[AQU 84]

Aquaviva Lescoat et Fiori Savary N.: "Une tâche de télémanipulation  
est-elle décomposable en éléments indépendants?" Le travail Humain  
4/1984

[BAC 78]

Bacceli: "Cours de processus aléatoires : Files d'attente " Cours ENST  
78-79

[BAP 80]

Baptistella L F: "Contribution à l'optimisation multi-critères de  
systèmes dynamiques" Thèse d'Etat Toulouse 1980.

[BAR 73]

Baron S.: "Application of the optimal control model or the human  
operator to reliability assessment" IEEE trans Reliability vol R22, 1973 Aug pp  
157-164

[BEL 70]

Bellman RE, Zadeh A "Decision making in a fuzzy environnement,  
Management Science 17, P141-164.

[BEN 81]

Benveniste A. et Basseville M.: "An example of failure detection: Design  
and comparative study of some algorithms". Rapport de Recherche INRIA  
N°73.



[BER 89]

Berry G.: "Real Time Programming: Special Purpose or General Purpose Languages". IFIP 89 San Francisco.

[BER 82-83]

Bertrand J.C. et al: "Définition d'une méthodologie de test pour robots et télémanipulateurs" Journées ARA de Poitiers et Besançon.

[BER 79]

Berry G.L.: "Modeling requirements for network simulation of human machine systems" Ph. D. Dissertation Arizona State University, Tempe, AZ, 1979 Auy (cité dans [LEE 88]).

[BEY 79]

Beyaert G., Malvache N.: Traitement des informations et applications à l'aide à la décision du pilote. Rapport final Contrat DRET bis 78/1246 Décembre 1979.

[BLO 72]

Blondin: "L'acte chirurgical". Casterman 1972.

[BOB 77]

Bobrow et al "GUS a frame driven dialogue system" Artificial intelligence vol II n°3 1977

[BOE 82]

Boettcher K.L, Levis A.H.: "Modelling the interaction decision maker with bounded rationality". I.E.E.E. SMC Vol12 n°3 Mai/Juin 82.

[BON 84]

Bonnet et Delbarre: "Focalisation automatique de microscope". Contrat ADI MSVO, 1984.

[BOY 88]

C.Boy: "Assistance à l'opérateur: une approche de l'intelligence artificielle" TEKNEA 1988.

[BRA 82]

Brans J.P., Vincke PH.: "Une méthode de surclassement basée sur les intensités de préférence cahiers du CERO vol 24 n° 2-3-4

[BRO 79]

Brooks T.L.: "Superman: a system for supervisory manipulation and the study of human/computer interactions" Master Thesis MIT 79.

[CAM 83]

Cammarata S., McArthur D., Steeb R. "Strategies of cooperation in distributed problem solving" Rand corporation N-2031-ARPA 1983.

[CHA 83]

Changeux: "L'Homme Neuronal" Fayard 1983.

[CHU 79]

Y.Y.Chu et W.B.Rouse: "Adaptative Allocation of Decisionmaking Responsibility between Human and Computer in Multitask Situation" I.E.E.E Trans SMC Vol SMC 9 n°12 Décembre 1979 pages 769 à 778.

[CLE 63]

Clément M.F.: "Recherche sur les conditions d'automatisation des systèmes industriels" Thèse d'Ing Docteur Paris 1963

[CLE 75-1]

Clément M.F.: "Construction d'une structure générale pour une classe de systèmes (géométrie et calcul dans les systèmes)" in colloque de Paris 1975 Ecole Centrale "Réflexions sur de nouvelles approches dans l'étude des systèmes"

[CLE 75-2]

Clément M.F.: "Categorical Axiomatics of Dynamic Programming" Journal of Mathematical Analysis and Applications 51, pp 47-55 1975.

[COI 84]

Cointe et Rodet: "FORMES: un langage objet gérant des processus hiérarchisés". 4<sup>ème</sup> congrès RdF et I.A Janvier 1984.

[COI 84]

Coiffet P.: "Téléopération Avancée ou Assistée par Ordinateur (T.A.O.)". 4<sup>ème</sup> Congrès R.F. et I.A.. Janvier 1984.

[COI 85]

Coiffet P. et Vertut J.: Les Robots T3B: "Téléopération Assistée par Ordinateur", Hermès, 1985.

[CON 76]

Conant R.: "Laws of information which govern systems" I.E.E.E. SMC Vol6 n<sup>o</sup>4 Ap 1976.

[COS ]

Costes A., Landrault C., Laprie J.C.: "Evaluation de la sûreté de fonctionnement des processus stochastiques". monographies d'informatique de l'AFCEC.

[DAE 80]

Daellenbach et De Kluyver: "Note on Multiple Objectives Dynamic Programming" J.operational Research Soc vol 31 pp 591-594.

[DEH 80]

Dehning W., Essig H., Maass S.: The adaptation of virtual Man-Computer Interfaces to User Requirements in Dialogs, Lecture Notes in Computer Science 110, Springer Verlag 1980.

[DEK 89]

De Keyser V.: " L'erreur humaine" La recherche N°216 dec 89.

[DIA 84]

Diaz C., Lepers B.: "Micromanipulateur stéréotaxique en chirurgie oculaire" colloque de biomécanique de Toulouse ,juillet 84,

[DIA 85]

Diaz C.: "Amélioration de la performance d'intervention en micromanipulation .Application à la microchirurgie " Thèse de 3eme cycle ,Lille 1985

[DOM 81]

Dombre E.: "Analyse des performances des robots. Manipulateurs flexibles et redondants. Contribution à leur modélisation et à leur commande". Thèse 3ème cycle USTL Montpellier Juin 1981.

[DUB 85]

Dubois D et Prade H: "Théorie des possibilités" Masson- Méthode + programmes 1985.

[DUB 85]

Dubrovsky: "A Taxonomy of Human error based upon the structure of an action" IEEE conf1985:CH 2253-3/85/0000-0903 pp 903-907

[EAS 80]

Eason K.D.: "Dialogue design implications of taskallocation between man and computer": "Ergonomics 23 (9) 881-891

[FAL 89]

Exposé de Falzon aux Journées Greco Coopération Hommes/Machines. 1989.

[FAR 67]

Farmer: "Siting criteria: A new approach". Int. Atomic Energy Agency. Symposium Vienne Avril 1967.

[FAR 80]

Farreny H.: "Un système pour l'expression et la résolution de problèmes orientés vers le contrôle des robots ". Thèse d'état , université de Toulouse III, septembre 1980.

[FIT 51]

Fitts PM: "Sécurité du couplage Homme/Machine et Robotique" Le point en robotique vol 1 Lavoisier pp 158-172.

[FOU 72]

Fournier A.: "Application de la théorie de l'information à l'étude de l'opérateur humain". Thèse de Doctorat de 3ème cycle Paris VI Déc. 72

[FOU 84]

Fournier R.: "Méthode de détermination des stratégies d'évolution d'un système polyarticulé dans un environnement complexe". Thèse de 3ème cycle USTL Montpellier, 30.06.1984.

[FOU 87]

Fournier R., Gravez P. and Mangeot C.: "High level hierarchical control in Computer Aided Teleoperation", Proc. ICAR' 87. Versailles p411. Oct.1987.

[GAB 87]

Gabillard R: "Sécurité de la transmission - Application aux systèmes de transport" l'onde électrique - Mai 1987 vol 67 n°3pp 112-122.

[GAI 72]

Gaines: "Axioms for adaptive Behaviour" INT. Journal of Man Machine Studies 1972 pp 169-199.

[GAM 79]

Gamot: "Microéconomie" Cours ENST 1979.

- [GOL 79]  
Goldstein I et Roberts B: "Using frames and scheduling in AI" MIT Perspective vol2.
- [GOO 88]  
Goodstein L.P., Andersen H.B., Olsen S.E. (Eds): "Tasks, errors and mental models " Taylor and Francis, London 1988.
- [GRA 88]  
Gravez P.: "Etude d'un système de supervision pour la Téléopération Assistée par Ordinateur" Thèse Lille 28 Mars 88.
- [GRE 88]  
Greenstein: "Easy to learn or easy to use, consequences for the development of competence" 7ème conf annuelle européenne "Prise de décision et contrôle manuel" 18-20 oct 88 Paris France pp 251-255
- [GRI 75]  
Grice HP "Logic and conversation in Cole P& MORGAN JL Ed syntax and Semantics "Speech acts" Academic Press, New York 1975.
- [GUE 90]  
Guerrouad A.: "Conception d'un poste opérateur intégré en téléopération : le modèle SUPERWOMAN" thèse Lille Janv 1990.
- [GUI 87]  
Guittet: "La Robotisation Médicale". Hermès 1987.
- [HAB 81]  
A.Habchi: "Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain".Thèse Lille 1981.
- [HAR 84]  
Harel D.: "Statecharts: A visual Approach to Complex Systems". Weizmann Institute of Science Rehovot, Israël,1984.
- [HEB 85]  
HEBUTERNE: "Ecoulement du trafic dans les auto-commutateurs"Masson Coll - CNET ENST 85
- [HEN 78]  
Hennion B.: "Le partage des charges dans la téléphonie adaptative" l'écho des recherches avril 78 pp 74-77
- [HES 87]  
"A Qualitative Model of Human Interaction with Complex Dynamic Systems" I.E.E.E. Trans on SMC, Vol 17 n°1 Janvier/Février 1987.pages33 à 51.
- [HOC 87]  
Hoc JM : "Psychologie cognitive de la planification" PUF 1987
- [IEEE 86]  
IEEE software N° spécial sur les "Multiparadigm Languages" Janv 86 pp 6-77.

[JAC 83]

Jacquet Lagreze E. et Siskos J.: "Méthodes de décision multicritère", Monographies de l'AFCEP Ed Hommes et techniques.

[JOH 79a]

Johannsen G.: "Fault management and supervisory control of decentralised systems" in conf NATO Human Detection and Diagnosis of system Failures WB Rouse et Rasmussen (Eds).

[JOH 79b]

Johannsen G. et Rouse W.B.: "Mathematical concepts for modelling human behavior in complex man machine Systems". Human factors 1979 21 (6) pp733-747

[JULLIEN 85]

Jullien C.: "Le système Le Cool" Act Informatique 1985.

[KAH 82]

Kahnemen D., Slovic P., Tversky A. (Eds) : "Judgment under uncertainty: heuristics and biases." Cambridge University Press 1982.

[KAU 69]

Kaufman A : "La confiance technique: Théorie mathématique de la fiabilité" Dunod 1969.

[KAU 72]

Kaufman A.: "Méthodes et Modèles de la recherche opérationnelle" Tome 2 Ch II "la programmation dynamique".

[KAW 77]

Kawas-Kaleh : "Réception de données numériques sur un canal dispersif en présence de bruit et d'interférences intersymboles" Thèse ENST 1977.

[KIN 66]

Kinney G.C., Marsetta M., Showman D.J.: "Studies in display symbol legibility part. The legibility of alphanumeric symbols for digitalized television" Bedford Masc: The Mitre Corporation Novembre 1966 ESD-TR-66-117.

[KLIR 84]

C.J.Klir: "Les multiples visages de la complexité" Science et pratique de la complexité. 1984-IDATE-Documentation française pages 101-121.

[LAP 88]

Laprie J.C.: "Sûreté de fonctionnement et tolérance aux fautes : concepts de base " Rapport LAAS n°88287 Sept88 et TSI vol 4 n° 5 1985.

[LAP 89]

Laprie J.C.: "Tolérance aux fautes" Notes de cours DINOVI Paris Juin 89.

[LEC 77]

Le Corvec: "Commutation électronique" cours photocopié ENST 1977.

[LEC 84]

Le Cardinal G., Guyonnet J.F.: "Les mathématiques de la confiance". Pour la Science n°81. Juillet 1984. page 71.

[LEE 88]

Lee K.W., Tillman F.A., Higgins J.J.: "A literature survey of the human reliability component in a Man Machine System" IEEE trans on reliability vol 37 n°1 avril 88

[LEP 82a]

Lepers B.: "Sécurité du couplage Homme/Machine et Robotique" Le Point en Robotique vol 1 Lavoisier pp 158-172

[LEP 82b]

Lepers B. et Diaz C.: "Introducing safety in the conception and design of a surgical micromanipulator" System Engineering II Coventry Sept 82

[LEP 82c]

Lepers B. et Diaz C.: "Conception of a surgical micromanipulator" 3rd International conference on mechanics in medicine - Compiègne - France, juillet 82

[LEP 82d]

Lepers B.: "L'avènement de la robotique" Revue TELECOM Mai 82.

[LEP 83a]

Lepers B. et Diaz C.: "Sécurité du couplage homme/machine: l'apport des méthodes d'agrégation de préférence" colloque IFAC/IFIP/AFCEP de Valenciennes - juin 83.

[LEP 83b]

Lepers B. et al.: "Allocation dynamique des tâches et téléopération" Journées ARA -CNRS de Besançon Nov 83.

[LEP 83c]

Lepers B. et Diaz C.: "Micromanipulateurs stéréotaxiques dans le domaine chirurgical" Journées SEE de Rennes, Nov 83 et Revue Générale d'électricité, numéro spécial 84.

[LEP 83d]

Lepers B., Vidal P., Hache J.C.: "Présent et futur de la robotique en milieu chirurgical" Congrès de la section française de chirurgie - Lille mai 83

[LEP 84]

Lepers B. et al.: "Allocation dynamique des tâches et téléopération" Journées ARA -CNRS de Toulouse sept 84.

[LEP 85]

Lepers B.: "La Robotique" colloque de robotique du cap d'Agde, nov 85.

[LEP 86a]

Lepers B., Gravez Ph.: "Téléopération avancée : commande et supervision en TAO" Journées finales ARA-CNRS de Paris - juin 86.

[LEP 86b]

Lepers B., Gravez Ph.: "Control and supervision in computer aided teleoperation" Proc 6th RoManSy, Cracovie, sept 86.

[LEP 88]

Lepers B. et al.: "Amélioration des performances globales en sécurité du tandem homme/machine par analyse structurée de leurs relations " congrès européen "Prise de décision et contrôle manuel Paris oct88.

[LEPL 85]

Leplat J.: "Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail." A.Colin, Paris 1985.

[LER 65]

Leroi-Gourhan A.: "Le geste et la parole" Tome 2 "La Mémoire et les rythmes" Albin Michel; "science d'aujourd'hui" 1965.

[LIC 60]

Licklider J.C.R. "Man-computer symbiosis ". I.E.E.E. Trans. H.F.E. vol.1, mars 60,pp4-11.

[LIE 76]

Lievens: "Sécurité des systèmes". Cépadues Editions 1976.

[LIE 80]

Liegeois G.: "Analyse de tâche et robotique La robotique Industrielle INSA Lyon 1980

[LIE 81]

Liegeois G.: "Recherche de nouvelles fonctions opératoires adaptées à la robotique industrielle.

[MAC 87]

Macchi et Guilbert: Téléinformatique Collection CMET-ENST Dunod 1987

[MAL 81]

Malvache N.: "le point sur l'automatique humaine "Le point en automatique vol 1 Lavoisier.

[MAN 87]

Mangeot C.: "Le système COPILOT" thèse de 3<sup>eme</sup> cycle, PARIS VI.

[MAR 77]

Marcus M.J.: Proceedings of the I.E.E.E. 65 1977 pages 1263 à 1271.

[MES 70]

Mesarovic- Macho- Takahara: "Theory of Hierarchical, Multilevel systems" 1970 Academic Press

[MEY 85]

Meyer et Al: "Méthodes de programmation".Editions Eyrolles. Collection Etudes et Recherches EDF.

[MIL 83]

Millot P. et Willaëys D.: "modélisation de l'opérateur humain en vue de la coopération Homme Machine dans les tâches de surveillance de processus industriels automatisés""techniques nouvelles en ergonomie"; Colloque IFAC de Valenciennes Juin 83.

- [MIL 87]  
 Millot: "Coopération Homme-Machine dans les tâches de supervision des procédés automatisés".Thèse d'Etat Valenciennes Sept 87
- [MIL 89]  
 Millot P.: "Supervision des procédés automatisés et ergonomie". Traité des Nouvelles Technologies Série Automatique Hermès 89.
- [MIT 74]  
 Mitten L.G.: "Preference order Dynamic Programming" Management Science Vol 21 n<sup>o</sup> 1 Septembre 1974.Pages 43 à 46.
- [MOL 77]  
 Moles: "Théorie des Actes" Casterman 1977.
- [NIC 85]  
 Nicolet J.L.,Celier J.:La fiabilité humaine dans l'entreprise Masson 1985 .
- [NIL 80]  
 Nilsson N.J.: "Principles of Artificial Intelligence". Tioga Pub. Co 1980.
- [NOR 80]  
 Norman Lindsay : Traitement de l'information et comportement humain:une introduction à la psychologie Editions études vivantes Ltée Montréal 1980.
- [OCH 71]  
 Ochanine: "L'homme dans les systèmes automatisés".Dunod 1971.
- [ONI 88]  
 Onisawa T.: "Fuzzy concepts in Human Reliability".Fuzzy logic in Knowledge-Based Systems, Decision and Control. Gupta and al Eds Elsevier North Holland 1988.
- [OUA 86 ]  
 Ouadghiri A.H.: "sur les conditions d'utilisation des codes détecteurs d'erreurs dans les transmissions numériques nécessitant une sécurité quasi absolu". Thèse Lille 1-1986.
- [PAR 87]  
 Park.K.S.: "Human Reliability: Analysis, Prediction and Prevention of Human Errors" Elsevier .adv. in Human Factors/ Ergonomist 1987.
- [PAS 87]  
 Pasche C.: "Une approche de l'analyse multicritère par les systèmes experts". Cahiers du C.É.R.O. Vol 29.no 1-2. 12p. 1987.
- [PEW 82]  
 Pew R.W. et Baron S.: "Perspectives on Human Performances Modelling". 1st IFAC Congress "Analysis design and Evaluation of Man-Machine Systems". Baden-Baden. Sept.1982.
- [PIG 85]  
 Pignon D.: "La nouvelle communication homme-machine dans les systèmes technologiques complexes". Etude CPE n°53 Février 85



[PIP 78]:

Pippenger N.: "La théorie de la complexité" Pour la science 1, 1978  
pages 86 à 95.

[PRI 82]

Price "The allocation of functions in system HUMAN FACTORS (27  
(1) pp 33-45 1985.

[QUI 82]

Quinton P. : "Utilisation de contraintes syntaxiques pour la  
reconnaissance de la parole continue" TSI vol 1 n°3, 1982 pp 233-248

[RAS 81]

Rasmussen J. Mancini G - Carnino Guffa - Gaynolet : "Classification  
System for Reporting Events Involving Human Malfunctions", Riso National  
Laboratory DK 4000 Roskilde Denmark March 81)

[RAS 83]

Rasmussen J. "Skills, rules and knowledge : signals, signs, and symbols,  
and other distinctions in human performance models" IEEE Trans on SMC  
vol SMC 13 pp 257-266.

[RAS 86]

Rasmussen J.: "Information processing and human machine interaction  
" North Holland, New York 1986.

[RAS 87]

Rasmussen J., Duncan K., Leplat J. (Eds) : " New technology and human  
error" J. Wiley, Chichester 1987.

[RIJ 88]

Rijnsdorp J.E.: "Allocation Homme- Machine dans la conduite des  
procédés" Communication au Greco Coopération H/M Paris avril 88.

[ROB 82]

Robinson et al. : " Man-machine cooperation for action planning" final  
report SRI nov 82.

[ROM 88]

Rommel Y.: "An illustration of the expert-system approach for  
MCDM". Communication Colloque EURO IX TIMS, 10p. Paris. Juin 1988.

[ROS 77]

Ross D.T.: "Structured Analysis .A Language for Communicating Ideas"  
I.E.E.E. Trans on Soft. Eng. Vol SE 3 n°1 Janvier 1977.

[ROU 80]

Rouse W.B.: "Systems Engineering Models of Human - machine  
interaction" 1980 North Holland.

[ROU 83]

Rouse W.B. et Rouse S.H.: "Analysis and classification of Human  
Error" IEEE Trans on SMC vol SMC 13 n° 4 pp 539-549

[ROY 77a]

Roy B.: "Critique et dépassement de la problématique de l'optimisation  
". cahiers SEMA n°1 1977 p 65-79 et AFCET-Interfaces n°13 nov 83 p 35-42 .

[ROY 77b]

Roy B.: "Optimisation et aide à la décision" cahiers du LAMSADE n° 8  
1977 Université Paris IX Dauphine

[ROY 85]

Roy B.: "Méthodologie Multicritère d'aide à la décision" Economica  
vol1 1985 ,vol 2 à paraître .

[ROY 87]

Roy B.: "Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas A  
paraître. Chapitre 4: Procédures d'agrégation multicritère conduisant à un  
critère unique de synthèse. Doc.42 Novembre 1987. LAMSADE.

[ROY 88]

B. Roy et D. Bouyssou: "Aide à la décision" AFCET/Interfaces n° 65  
mars 88 pp 4-13

[SAR 84]

Saridis G.N. et Graham J.H.: "Linguistic Decision Schemata for  
Intelligent Robots". Automatica Vol 20 n°1 pages 121 à 126 1984.

[SCH 85]

Schärli A.: "Décider sur plusieurs critères : Panorama de l'aide à la  
décision multicritère" 1985 Presses Polytechniques Romandes

[SHE 76]

Sheridan TB: "Toward a general model of  
supervisory control" in Monitoring Behaviour and supervisory control TB  
Sheridan & G Johannsen (Eds) 271-281 Plenum Press New York (1976).

[SHE 88]

Sheridan T.B.: "Human and computer roles in supervisory control and  
telerobotics: musing about function, language and hierarchy". in [GOO 88]

[SEB 87]

Sebillotte S.: "La conception de scénarios interactifs: Analyse de  
l'activité". Le Travail Humain. Tome 50, no4/ 1987 p 319-334.

[SEL 59]

Selfridge O.: "Pandemonium a paradigm for learning" In Symposium on  
the mechanization of thought processes. London HM Stationery office 1959

[TER 83]

Terano T., Murayama Y., Kiyamo N.A.: "Human Reliability and Safety  
Evaluation of Man-Machine Systems". Automation Vol19 n°6 pages 719 à  
722 1983.

[VAL 88]

Valot: "Paradoxes de la confiance dans les systèmes". Ergo I.A.  
Biarritz.p33-47. Oct.1988.

[VER 82]

Vertut J.: "Pôle Téléopération Avancée". Journées ARA Poitiers 1982.

[VIG 87]

Vigneron J.: "Synthèse des travaux du colloque ACADI" (voir [ACA  
87]).

[VIN 89]  
Vincke Ph. : " L'aide multicritère à la décision" collection SMA editions  
Ellipses 1989.

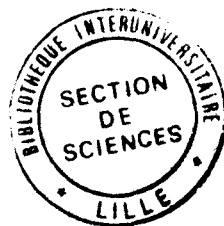
[VIL 85]  
Vilnat A.: "le dialogue dans une communication Homme-machine  
"Revue de l'ARC 1985 Intellectica.

[VIL 88]  
Villemeur A.: "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels-  
fiabilité-facteurs humains-informatisation" Edition EYROLLES 1988.

[VÖG 86]  
Vögrig: "Contribution à l'analyse de la sécurité d'un système automatisé  
par SADT" Electronique Industrielle.n°114-115.1986.

[VOG 88]  
Vogel: "Le Génie cognitif". Masson "Sciences cognitives" 1988.

[WAL 77]  
Walliser B.: "Systèmes et Modèles Introduction critique à l'analyse des  
systèmes" Ed du seuil 1977.



PPN 036116548

### Résumé:

Depuis le début des années 70, la téléopération assistée par ordinateur (T.A.O) n'a cessé d'étendre ses domaines d'application. Cette thèse se veut une contribution méthodologique et pratique à l'élaboration des systèmes semi-automatiques de ce type, où l'homme décide constamment de la transition continue manuel-automatique, tout en cherchant à assurer les conditions optimales de survivabilité en cas d'incident.

Après avoir rappelé dans le chapitre I, la façon dont est envisagée actuellement la sûreté de fonctionnement en robotique industrielle, la détermination puis la spécification des problèmes de sécurité en T.A.O est étudiée. De manière à fixer un cadre d'analyse adéquat, une modélisation du système hommes/machines sous la forme d'un réseau d'un type particulier est ensuite proposée au chapitre II; l'articulation avec les modèles classiques, en particulier multiniveaux, y est soulignée ainsi que le lien avec différentes classifications des problèmes de sécurité hommes/machines utilisées actuellement.

Le chapitre III présente une première méthode d'analyse de la tâche permettant de concevoir l'allocation statique des tâches hommes/machines. Celle-ci est ensuite étendue à une allocation dynamique multicritère des modes de commande, basée sur une méthodologie à base de relations de surclassement. Elle est ensuite comparée aux méthodes utilisées usuellement. Notre approche, baptisée "coopération dynamique", a nécessité une extension de la notion classique d'optimisation. Le chapitre IV expose la généralisation des résultats classiques que nous avons établie à ce propos, ainsi que les conséquences sur la définition des protocoles de communication entre opérateurs et système automatisé. Ceux-ci forment l'ébauche d'un "langage" de téléopération permettant d'intégrer les différents moyens d'interaction à la disposition des opérateurs.

Le chapitre V explicite, dans le contexte de la microchirurgie assistée par ordinateur, la mise en oeuvre des approches méthodologiques précédentes. Une conception orientée objet des modes de commande est proposée, ainsi qu'une simulation sur un exemple impliquant deux opérateurs coopérant sur un réseau à l'exécution d'une même tâche de micromanipulation.

### Abstract:

Since the early seventies, the Computer Aided Teleoperation (C.A.T) has continuously spread its application domain. This thesis wants to be a methodological and practical contribution to the elaboration of such semi-automatic systems, where the man constantly decides upon the continuous Manual/Automatic transition, while searching optimal conditions for survivability in the event of an accident.

After recalling in Chapter one the way of which the dependability is treated nowadays in Industrial Robotics, the determination and specification of safety problems in C.A.T. are studied.

To fix an adequate analysis frame, a network type man/machine system modelization is then given in Chapter two: the articulation with classical models, particularly multi-levels ones, is there underlined, as the link with different man/machine safety problems classifications used nowadays.

The Chapter three submits a first task analysis method for the conception of the static allocation of man/machine tasks. It is then spread to a multicriteria dynamic allocation of control modes, based on a outranking relations methodology. It is then compared to common methods. Our approach, called "Dynamic Cooperation" has demanded an extension of the classical notion of optimisation.

The Chapter four presents the generalization of the classical results established for this fact and the consequences on the communication protocols definition between operators and automatic system. They outline a teleoperation "language" to integrate the different ways of interaction at operators disposal.

The Chapter five explains, in the context of Computer Aided Teleoperation, the realization of the previous methodological approaches. An object oriented conception of the control modes is proposed, as a simulation on an example where two operators cooperate on a network to execute a same task.

