



**HAL**  
open science

## Sur l'organisation et la conduite des systèmes complexes

Zdenek Binder

► **To cite this version:**

Zdenek Binder. Sur l'organisation et la conduite des systèmes complexes. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG; Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1977. tel-00287763

**HAL Id: tel-00287763**

**<https://theses.hal.science/tel-00287763>**

Submitted on 12 Jun 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE

PRESENTEE A

L'UNIVERSITE  
SCIENTIFIQUE ET MEDICALE

L'INSTITUT  
NATIONAL POLYTECHNIQUE

DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR D'ETAT ES-SCIENCES

PAR

**Zdenek J. BINDER**

DOCTEUR - INGENIEUR

---

**SUR L'ORGANISATION ET LA CONDUITE  
DES SYSTEMES COMPLEXES**

---

Soutenu le 15 avril 1977 devant la commission d'examen

## JURY

Monsieur **P. TRAYNARD**

Président

Messieurs **P. BERTRAND  
L. BOLLIET  
C. FOULARD  
G. GRATELOUP  
R. PERRET**

} Examineurs



Monsieur Gabriel CAU : Président  
Monsieur Pierre JULLIEN : Vice Président

---

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.S.M.G.

PROFESSEURS TITULAIRES

MM. ARNAUD Paul	Chimie
AUBERT Guy	Physique
AYANT Yves	Physique approfondie
Mme BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM. BARBIER Jean-Claude	Physique Expérimentale
BARBIER Reynold	Géologie appliquée
BARJON Robert	Physique nucléaire
BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
BARRA Jean-René	Statistiques
BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
BEAUDOING André	Clinique de Pédiatrie et Puériculture
BERNARD Alain	Mathématiques Pures
Mme BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM. BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques Pures
BEZES Henri	Pathologie chirurgicale
BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
BONNET Georges	Electrotechnique
BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
BONNET-EYMARD Joseph	Clinique gastro-entérologique
Mme BONNIER Marie-Jeanne	Chimie générale
MM. BOUCHERLE André	Chimie et toxicologie
BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques appliquées
BOUTET DE MONTVEL Louis	Mathématiques pures
BRAVARD Yves	Géographie
CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologique
CALAS François	Anatomie
CARLIER Georges	Biologie végétale
CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
CAU Gabriel	Médecine légale et toxicologie
CAUQUIS Georges	Chimie organique
CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
CHARACHON Robert	Clinique Oto-rhino-laryngologique
CHATEAU Robert	Clinique de neurologie
CHIBON Pierre	Biologie animale
COEUR André	Pharmacie chimique et chimie analytique
CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
COUDERC Pierre	Anatomie pathologique
Mme DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM. DEBELMAS Jacques	Géologie générale
DEGRANGE Charles	Zoologie
DELORMAS Pierre	Pneumophtisiologie

MM. DEPORTES Charles	Chimie minérale
DESRE Pierre	Métallurgie
DESSAUX Georges	Physiologie animale
DODU Jacques	Mécanique appliquée (IUT A)
DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
DREYFUS Bernard	Thermodynamique
DUCROS Pierre	Cristallographie
DUGOIS Pierre	Clinique de dermatologie et syphiligraphie
GAGNAIRE Didier	Chimie physique
GALLISSOT François	Mathématiques Pures
GALVANI Octave	Mathématiques Pures
GASTINEL Noël	Analyse numérique
GAVEND Michel	Pharmacologie
GEINDRE Michel	Electroradiologie
GERBER Robert	Mathématiques Pures
GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
GIRAUD Pierre	Géologie
JANIN Bernard	Géographie
KAHANE André	Physique générale
KLEIN Joseph	Mathématiques pures
KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques pures
KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
KUNTZMANN Jean	Mathématiques appliquées
LACAZE Albert	Thermodynamique
LACHARME Jean	Biologie végétale
Mme LAJZEROWICZ Janine	Physique
MM. LAJZEROWICZ Joseph	Physique
LATREILLE René	Chirurgie générale
LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
LAURENT Pierre	Mathématiques appliquées
LEDRU Jean	Clinique médicale B
LLIBOUTRY Louis	Géophysique
LOISEAUX Pierre	Sciences nucléaires
LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique nucléaire
LOUP Jean	Géographie
Melle LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
MM. MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
MALINAS Yves	Clinique obstétricale
MARTIN-NOEL Pierre	Clinique cardiologique
MAZARE Yves	Clinique médicale A
MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
MICOUD Max	Clinique maladies infectieuses
MOURIQUAND Claude	Histologie
MOUSSA André	Chimie nucléaire
MULLER Jean-Michel	Thérapeutique (néphrologie)
NEEL Louis	Physique du Solide
OZENDA Paul	Botanique
PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
RASSAT André	Chimie systématique
RENARD Michel	Thermodynamique
REVOL Michel	Urologie
RINALDI Renaud	Physique
DE ROUGEMONT Jacques	Neuro-chirurgie
SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
SENGEL Philippe	Zoologie

MM. SIBILLE Robert  
 SOUTIF Michel  
 TANCHE Maurice  
 TRAYNARD Philippe  
 VAILLANT François  
 VALENTIN Jacques  
 VAUQUOIS Bernard  
 Mme VERAIN Alice  
 MM. VERAIN André  
 VEYRET Paul  
 VIGNAIS Pierre  
 YOCOZ Jean

Construction mécanique (IUT A)  
 Physique générale  
 Physiologie  
 Chimie générale  
 Zoologie  
 Physique nucléaire  
 Calcul électronique  
 Pharmacie galénique  
 Physique  
 Géographie  
 Biochimie médicale  
 Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM. CLARK Gilbert  
 CRABBE Pierre  
 ENGLMAN Robert  
 HOLTZBERG Frédéric  
 DEMBICKI Eugéniuz  
 MATSUSHIMA Yozo

Spectrométrie physique  
 CERMO  
 Spectrométrie physique  
 Basses températures  
 Mécanique  
 Mathématiques Pures

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mlle AGNIUS-DELORD Claudine  
 ALARY Josette  
 MM. AMBROISE-THOMAS Pierre  
 BELORIZKY Elie  
 BENZAKEN Claude  
 BIAREZ Jean-Pierre  
 BILLET Jean  
 BOUCHET Yves  
 BRUGEL Lucien  
 BUISSON René  
 BUTEL Jean  
 COHEN ADDAD Pierre  
 COLOMB Maurice  
 CONTE René  
 DEPASSEL Roger  
 FONTAINE Jean-Marc  
 GAUTHIER Yves  
 GAUTRON René  
 GIDON Paul  
 GLENAT René  
 GROULADE Joseph  
 HACQUES Gérard  
 HOLLARD Daniel  
 HUGONOT Robert  
 IDELMAN Simon  
 JOLY Jean-René  
 JULLIEN Pierre  
 Mme KAHANE Josette  
 MM. KRAKOWIACK Sacha  
 KUHN Gérard  
 LE ROY Philippe  
 LUU DUC Cuong

Physique pharmaceutique  
 Chimie analytique  
 Parasitologie  
 Physique  
 Mathématiques appliquées  
 Mécanique  
 Géographie  
 Anatomie  
 Energétique (IUT A)  
 Physique (IUT A)  
 Orthopédie  
 Spectrométrie physique  
 Biochimie  
 Physique (IUT A)  
 Mécanique des fluides  
 Mathématiques Pures  
 Sciences Biologiques  
 Chimie  
 Géologie et Minéralogie  
 Chimie organique  
 Biochimie médicale  
 Calcul numérique  
 Hématologie  
 Hygiène et Médecine préventive  
 Physiologie animale  
 Mathématiques Pures  
 Mathématiques appliquées  
 Physique  
 Mathématiques appliquées  
 Physique (IUT A)  
 Mécanique (IUT A)  
 Chimie organique

MM. MAYNARD Roger	Physique du solide
Mme MINIER Colette	Physique (IUT A)
MM. PELMONT Jean	Biochimie
PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et Minéralogie
PFISTER Jean-Claude	Physique du solide
Mlle PIERY Yvette	Physiologie animale
MM. RAYNAUD Hervé	M.I.A.G.
REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
RICHARD Lucien	Biologie végétale
Mme RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM. ROBERT André	Chimie papetière
SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme SOUTIF Jeanne	Physique générale
MM. STREGLITZ Paul	Anesthésiologie
VIALON Pierre	Géologie
VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques appliquées

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

MM. AMBLARD Pierre	Dermatologie
ARMAND Gilbert	Géographie
ARMAND Yves	Chimie (IUT A)
BACHELOT Yvan	Endocrinologie
BARGE Michel	Neuro chirurgie
BARJOLLE Michel	M.I.A.G.
BEGUIN Claude	Chimie organique
Mme BERIEL Hélène	Pharmacodynamie
MM. BOST Michel	Pédiatrie
BOUCHARLAT Jacques	Psychiatrie adultes
Mme BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM. BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
CHARDON Michel	Géographie
CHERADAME Hervé	Chimie papetière
CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
CONTAMIN Charles	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
CORDONNIER Daniel	Néphrologie
COULOMB Max	Radiologie
CROUZET Guy	Radiologie
CYROT Michel	Physique du solide
DELOBEL Claude	M.I.A.G.
DENIS Bernard	Cardiologie
DOUCE Roland	Physiologie végétale
DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM. FAURE Jacques	Médecine légale
FAURE Gilbert	Urologie
GAUTIER Robert	Chirurgie générale
GENSAC Pierre	Botanique
GIDON Maurice	Géologie
GROS Yves	Physiques (IUT A)

MM. GUITTON Jacques  
 HICTER Pierre

JALBERT Pierre  
 JUNIEN-LAVILLAVROY Claude  
 KOLCDIE Lucien  
 LE NOC Pierre  
 LEROY Philippe  
 MACHE Régis  
 MAGNIN Robert  
 MALLION Jean-Michel  
 MARECHAL Jean  
 MARTIN-BOUYER Michel  
 MICHOUPLIER Jean  
 NEGRE Robert  
 NEMOZ Alain  
 NOUGARET Marcel  
 PARAMELLE Bernard  
 PECCOUD François  
 PEFFEN René  
 PERRET Jean  
 PERRIER Guy  
 PHELIP Xavier  
 RACHAIL Michel  
 RACINET Claude  
 RAMBAUD André  
 RAMBAUD Pierre  
 Mme RENAUDET Jacqueline  
 MM. ROBERT Jean-Bernard  
 ROMIER Guy  
 SHOM Jean-Claude  
 STOEENNER Pierre  
 VROUSOS Constantin

Chimie  
 Chimie

Histologie  
 O.R.L.  
 Hématologie  
 Bactériologie-virologie  
 IUT A  
 Physiologie végétale  
 Hygiène et médecine préventive  
 Médecine du travail  
 Mécanique (IUT A)  
 Chimie (CUS)  
 Physique (IUT A)  
 Mécanique (IUT A)  
 Thermodynamique  
 Automatique (IUT A)  
 Pneumologie  
 Analyse (IUT B)  
 Métallurgie (IUT A)  
 Neurologie  
 Géophysique - Glaciologie  
 Rhumatologie  
 Médecine interne  
 Gynécologie et obstétrique  
 Hygiène et hydrologie  
 Pédiatrie  
 Bactériologie  
 Chimie Physique  
 Mathématiques (IUT B)  
 Chimie générale  
 Anatomie pathologique  
 Radiologie

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIES

M. COLE Antony

Sciences nucléaires

Fait à SAINT MARTIN D'HERES, AVRIL 1976.



Président : M. Philippe TRAYNARD

Vice-Présidents : M. Pierre-Jean LAURENT  
M. René FAUTHENET

PROFESSEURS TITULAIRES

MM. BENOIT Jean	Radioélectricité
BESSON Jean	Electrochimie
BLOCH Daniel	Physique du solide
BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
BONNIER Etienne	Electrochimie et Electrometallurgie
BRISSONNEAU Pierre	Physique du solide
BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
COUMES André	Radioélectricité
DURAND Francis	Métallurgie
FELICI Noël	Electrostatique
FOULARD Claude	Automatique
LESPINARD Georges	Mécanique
MOREAU René	Mécanique
PARIAUD Jean-Charles	Chimie-Physique
PAUTHENET René	Physique au solide
PERRET René	Servomécanismes
POLOUJADOFF Michel	Electrotechnique
VEILLON Gérard	Informatique fondamentale et appliquée

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM. BLIMAN Samuel	Electronique
BOUVARD Maurice	Génie Mécanique
COHEN Joseph	Electrotechnique
LACOUME Jean-Louis	Géophysique
LANCIA Roland	Electronique
ROBERT François	Analyse numérique
ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES

MM. ANCEAU François	Mathématiques Appliquées
CHARTIER Germain	Electronique
GUYOT Pierre	Chimie Minérale
IVANES Marcel	Electrotechnique
JOUBERT Jean-Claude	Physique du solide
LESIEUR Marcel	Mécanique
MORET Roger	Electrotechnique Nucléaire
PIAU Jean-Michel	Mécanique
PIERRARD Jean-Marie	Mécanique
SABONNADIÈRE Jean-Claude	Informatique Fondamentale et Appliquée
MMe. SAUCIER Gabrièle	Informatique Fondamentale et Appliquée

CHERCHEURS DU C.N.R.S. (Directeur et Maîtres de Recherche).

M. FRUCHART Robert	Directeur de Recherche
MM. ANSARA Ibrahim	Maître de Recherche
CARRE René	Maître de Recherche
DRIOLE Jean	Maître de Recherche
LANDAU Ioan Doré	Maître de Recherche
MATHIEU Jean-Claude	Maître de Recherche
MUNIER Jacques	Maître de Recherche



*A ma femme*

*A ma fille*

*A mes parents*



*Nous tenons à assurer de notre respectueuse gratitude Monsieur le Professeur P. TRAYNARD, Président de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.*

*Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur le Professeur R. PERRET, Directeur du Laboratoire d'Automatique, qui a bien voulu nous accueillir dans son Laboratoire et nous faire bénéficier de ses conseils et de son expérience dans la direction de nos travaux.*

*Nous sommes profondément reconnaissants à Monsieur le Professeur G. GRATELOUP, Directeur du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes de Toulouse d'avoir accepté d'être notre parrain au C.N.R.S. et de participer au jury de cette thèse.*

*Nous remercions très vivement Monsieur le Professeur BOLLIET, Directeur du Laboratoire de Micro-informatique du C.N.R.S. d'avoir bien voulu faire partie de ce jury.*

*Nous exprimons notre gratitude à Monsieur le Professeur C. FOULARD qui a bien voulu s'intéresser à notre travail et dont nous avons toujours apprécié les conseils judicieux.*

*Que Monsieur P. BERTRAND, Chargé de recherche au Laboratoire des Signaux et Systèmes de Gif sur Yvette, trouve ici l'expression de notre reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail et pour sa participation au jury.*

*Nous remercions tout particulièrement Monsieur le Professeur A. TITLI du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes de Toulouse qui nous a fait l'honneur d'examiner ce travail. Sa compétence et ses précieux conseils ont été d'une grande utilité pour la présentation de ce travail.*

*Que Monsieur F.DE CARFORT trouve ici l'assurance de notre gratitude pour sa compréhension et pour la disponibilité dont il a fait preuve à notre égard, et nos remerciements sincères pour l'aide qu'il a bien voulu apporter à la rédaction de cette thèse.*

*Nous remercions vivement les chercheurs de l'équipe "Systèmes Complexes" ainsi que nos collaborateurs de l'équipe technique du laboratoire pour leur aide précieuse : tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, ils ont les uns et les autres contribué de manière importante à la mise en oeuvre de nos recherches.*

*Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres du Laboratoire d'Automatique : enseignants, chercheurs, techniciens et secrétaires pour leur aide et leurs conseils amicaux.*

*Dans le travail présenté ici, on se propose d'apporter une contribution à la méthodologie de la conduite des systèmes complexes. Ce travail se développe suivant trois axes principaux :*

- méthodologie de l'automatisation intégrée caractérisée par la décentralisation, la modularité et la conception ascendante des systèmes de conduite*
- approche par poursuite des fonctions de l'automatique en vue d'une synthèse de la conduite décentralisée coordonnée des systèmes complexes*
- développement des algorithmes de poursuite généralisée, synthèse d'algorithmes particuliers concernant la commande des systèmes isolés et la conduite des systèmes complexes.*

*-:-:-:-:-:-:-:-:-:-*



TABLE DES MATIERES

	<u>PAGES</u>
100 INTRODUCTION	
110-Aperçus sur l'évolution de l'automatique.	1.1
120-Orientation de notre recherche.	1.4
200 ANALYSE DU SYSTEME INTEGRE	
210-Système intégré.	2.1
211-Exemple de système intégré.	2.1
212-Structure d'un système intégré.	2.4
220-Système passif.	2.6
221-Propriété du système passif.	2.7
222-Représentation des éléments du système passif.	2.7
230-Système de conduite.	2.12
231-Architecture du système de conduite.	2.13
232-Conduite décentralisée coordonnée.	2.15
233-Fonctionnement d'un centre de décision.	2.20
300 RELATIONS ENTRE SYSTEMES	
310-Approche par poursuite	3.1
320-Relations entre centres de décisions.	3.3
330-Proposition de formalisme de poursuite.	3.9
340-Poursuite d'un environnement.	3.14
341-Stabilisation du système (asservissement, régulation)	3.14
342-Estimation des caractéristiques du système (états, paramètres, modèles).	3.16
350-Environnement fictif.	3.18
351-Valorisation d'une partie de la distance (respect des contraintes).	3.19
352-Suppression d'une partie de la distance (correcteur poursuiveur).	3.20
360-Poursuite réciproque.	3.23

	<u>PAGES</u>
361-Décision duale (commande-identification).	3.23
362-Stabilisation décentralisée par coopération.	3.25
370-Poursuite simultanée.	3.26
371-Création d'un système intermédiaire (modèle coordonnateur).	3.27
372-Stabilisation et coordination par poursuite.	3.28
373-Sélection d'un système intermédiaire (localisation d'un modèle).	3.30
374-Correction et coordination duale par amélioration.	3.31
400 SYNTHÈSE DES ALGORITHMES TEMPS REEL	
410-Représentation.	4.2
411-Système dynamique.	4.3
412-Environnement.	4.5
413-Distance.	4.5
420-Poursuite optimale.	4.8
430-Poursuite d'un environnement par un système.	4.11
431-Stabilisation d'un système.	4.11
432-Poursuite des objectifs engendrés par modèles de références.	4.13
432.1 Entrées des modèles constantes.	4.13
432.2 Entrées générées par un système linéaire.	4.15
433-Poursuite d'un système de référence.	4.17
433.1 Application à l'estimation d'états.	4.19
433.2 Localisation d'une représentation.	4.20
440-Création d'un environnement.	4.22
441-Satisfaction des contraintes.	4.22
442-Suppression de la pondération des variables.	4.25
442.1 Application à la correction.	4.27
450-Stabilisation décentralisée d'un ensemble interconnecté.	4.28
451-Stabilisation du système indépendant.	4.29
452-Respect des interactions à l'entrée du système.	4.30
453-Coopération dans le respect des interactions.	4.30
460-Stabilisation et coordination par poursuite.	4.32

	<u>PAGES</u>
461-Stabilisation du modèle coordonnateur.	4.32
462-Stabilisation dynamique des systèmes.	4.34
470-Représentation des algorithmes.	4.36
500 APPLICATION	
510-Présentation du procédé pilote.	5.1
511-Architecture du système passif	5.1
512-Système de conduite.	5.4
520-Centre de décision local.	5.11
521-Accumulation des expériences (Modélisation-Identification).	5.11
522-Coopération-création (stabilisation).	5.14
523-Amélioration (correction).	5.16
524-Résultats expérimentaux.	5.18
530-Coopération dans un système décentralisé.	5.21
540-Centre de décision coordonnateur.	5.24
541-Accumulation des expériences (création d'un modèle coordonnateur).	5.41
542-Fonctions du centre coordonnateur.	5.42
543-Résultats expérimentaux.	5.28
600 CONCLUSION	
AOO ANNEXE	
A10-Poursuite généralisée des systèmes continus.	A.1
A11-Développement d'un algorithme fondamental.	A.1
A12-Comparaison avec des algorithmes existants.	A.6
A13-Simplification - environnement connu.	A.8
A13.1 Objectifs constants.	A.10
A13.2 Objectifs engendrés par modèles.	A.11
A14-Poursuite simultanée.	A.16
A20-Poursuite généralisée des systèmes discrets.	A.20
A21-Algorithme fondamental - version discrète.	A.20
A22-Comparaison avec des algorithmes existants.	A.25

	<u>PAGES</u>
A23-Simplification - environnement connu.	A.28
A23.1 Objectifs constants	A.29
A23.2 Objectifs engendrés par modèles.	A.30
BOO BIBLIOGRAPHIE	
B10-Ouvrages, articles de synthèse.	B.1
B20-Commande d'un procédé.	B.4
B30-Systèmes complexes.	B.6
B40-Méthodes spécifiques de commande.	B.12
B50-Divers.	B.14
LEXIQUE	L.1
PRINCIPALES NOTATIONS	L.6

## **INTRODUCTION**

INTRODUCTIONAPERCUS SUR L'EVOLUTION DE L'AUTOMATIQUE

Les lois de la nature situent l'homme comme un élément d'une chaîne complexe de la vie. Mais sa capacité intellectuelle lui a permis de prendre progressivement une place privilégiée. Ses premiers exploits consistent en une analyse de son environnement. Il essaye d'exprimer sous forme de lois les phénomènes de la nature, puis il cherche à les maîtriser.

La nécessité de satisfaire ses besoins amènera l'homme à prendre des décisions puis à les exécuter. C'est ce comportement intégré (décision - exécution) qui caractérise l'évolution de l'homme dans l'adaptation à son environnement. Plus tard il veut imposer sa volonté et adapter l'environnement à ses besoins. Son action consiste à créer des conditions telles que l'environnement géré par les lois de la nature satisfasse ses désirs.

La capacité créatrice de l'homme s'amplifie au cours de l'évolution historique et l'amène à la construction de procédés complexes pour la production de biens. C'est d'abord l'homme qui les conduit. C'est lui encore qui analyse ensuite son propre comportement, qui le formalise et qui, grâce aux progrès scientifiques et techniques, réalise les appareils capables de conduire à sa place ces procédés.

La complexité de la conduite a augmenté au fil du temps. Les éléments de télémessure et de télécommande ont permis une extension de l'espace où il pouvait manifester sa présence effective et il a pu, grâce à eux, prendre des décisions de plus en plus complexes. La conduite automatique a commencé quand l'homme a confié une part de ses responsabilités

à des automates et à des régulateurs, simples et locaux au départ, puis de plus en plus complexes et placés de plus en plus haut dans les niveaux de conduite.

Cette évolution a entraîné une séparation de la fonction productive de l'homme en deux éléments spécifiques : la décision et l'exécution.

La spécialisation dans la décision révèle à l'homme le mécanisme de la conduite. La formalisation d'une décision se traduit par la réalisation d'automatismes auxquels l'homme confie progressivement une part de sa responsabilité. L'homme prend de moins en moins les décisions courantes et répétitives mais se réserve les décisions globales et complexes telles que le déclenchement d'un ensemble d'opérations, la définition de critères de fonctionnement, la coordination d'unités et aussi la possibilité d'intervenir dans des situations imprévues au cours du fonctionnement d'un procédé. Finalement il assiste au déroulement de la production conduite par un système automatique.

La spécialisation dans l'exécution amène l'homme à se perfectionner dans les opérations qu'il réalise et dans leur répétition qui est exigée par la production. Il devient ainsi un robot spécialisé et son remplacement, s'il est techniquement possible, conduit à l'automatisation totale du procédé.

La réussite dans l'automatisation des procédés est conditionnée par la contribution coordonnée des différentes parties qui assurent les résultats finaux, en particulier le système fonctionnel de production, le système de conduite, les systèmes d'instrumentation, de communication, d'informatique, ainsi que le système humain lié à la gestion et au fonctionnement du procédé. Il est souvent difficile de dissocier les éléments fonctionnels de ceux qui assurent uniquement la conduite. Finalement, ce n'est pas une difficulté, car on s'intéresse aux éléments fonctionnels

ayant un certain comportement du fait de cette conduite. Ceci nous amène à considérer des éléments intégrés, comportant comme fonctions : la conduite, le transfert de l'information ainsi que l'exécution de la fonction. L'ensemble de ces éléments peut être appelé système intégré.

Les systèmes intégrés ne sont pas uniquement des systèmes construits artificiellement. Au contraire, dans la majorité des systèmes naturels (écologiques, biologiques et socio-économiques), la conduite forme une partie non dissociable des éléments fonctionnels. Le comportement de ces systèmes est souvent caractérisé par la conduite collective [3Te] des éléments dont ils sont composés. Il est souhaitable que cette conduite contribue au comportement désiré pour l'ensemble. Mais la définition de ces désirs est complexe et rarement évidente. De plus, les actions sont difficiles à déterminer, notamment lorsqu'elles doivent modifier le comportement d'êtres vivants, en particulier d'êtres humains.

La solution des problèmes qui se posaient à l'origine ainsi que le développement d'autres branches de la science, ont donné naissance à des méthodes et à des outils si puissants qu'ils vont au-delà des buts recherchés et qu'ils posent à l'homme le problème de leur utilité. On arrive à une nouvelle situation où la continuité du progrès technique qui n'est plus motivé par l'utilité, se trouve bouleversée par la révolution scientifique [1Ry]. On remarque que parfois la recherche fonctionne en circuit fermé : des méthodes se développent parce que l'on dispose de moyens de traitement et réciproquement ces moyens se justifient par l'emploi de ces méthodes. Si parfois leur utilité est discutable, il est difficile d'arrêter cet enchaînement de méthodes et de moyens. C'est pourquoi nous disposons en Automatique d'un éventail de méthodes et d'algorithmes qui sont parfois très semblables. Mais ces techniques ne peuvent être jugées qu'en simulation sur un ordinateur, faute de pouvoir être appliquées dans la réalité.

Ces considérations nous ont amenés à nous intéresser à l'application de la théorie moderne de la conduite automatique, au développement des algorithmes et à la méthodologie de leur utilisation. C'est en particulier l'étude de la conduite d'un procédé complexe qui nous a permis de choisir des techniques compatibles entre elles et réellement applicables.

N'oublions pas de souligner que le développement des algorithmes et surtout leur application se heurte parfois à des problèmes psychologiques, sociologiques et politiques liés à la modification du comportement de l'homme dans un système ou dans un monde automatisé. Ces problèmes ne sont pas négligeables et ont des conséquences sur l'éducation, la formation et la qualification professionnelle ainsi que sur la durée du travail, sur les loisirs etc... [1Ry][5IL]. Si des problèmes de ce type existent, ils ne permettent pas de douter de l'utilité de l'automatisation dans une société qui par son comportement, son organisation et son évolution doit considérer l'automatisation comme faisant partie de sa vie quotidienne.

#### 120 ORIENTATION DE NOTRE RECHERCHE

L'analyse de l'évolution historique a mis en évidence un déplacement du centre d'intérêt de la conduite automatique des procédés simples et isolés vers les procédés complexes. Il a donné naissance à la théorie des systèmes hiérarchisés [1MM] qui a eu pour conséquence le développement de méthodes et algorithmes destinés à l'optimisation globale par décomposition et coordination [1Wi2], [1Ti]. Ces méthodes se sont montrées intéressantes dans les calculs hors ligne, mais leur possibilité d'application en temps réel se heurte à diverses difficultés liées entre autres à la définition physique de critères globaux et à la nécessité d'une représentation fidèle de l'ensemble coordonné.

C'est certainement une des raisons qui ont suscité l'apparition d'une approche plus récente concernant la commande décentralisée [3 Ao] caractérisée par le traitement de sous-problèmes séparés avec leurs critères propres. Dans ce traitement, l'information provenant d'autres éléments de l'ensemble commandé peut être utilisée pour améliorer la commande en ligne [3IP].

L'approche que nous proposons, qui peut être dénommée "conduite décentralisée coordonnée" se situe entre ces deux voies : elle a son origine dans la commande décentralisée et elle exploite les résultats de nos travaux antérieurs sur la poursuite généralisée [4Bi]. La poursuite des objectifs facilite le respect des interactions à l'entrée du système et peut être utilisée pour une contribution appropriée des autres systèmes, méthode que nous avons proposée en 1975 [4BB2]. La contribution des systèmes voisins en vue du respect des interactions assure entre ces systèmes une forme de coopération [3Bi2] grâce à laquelle l'ensemble complexe peut satisfaire à des exigences complémentaires comme la minimisation d'un critère global, la stabilité de l'ensemble etc.....

La particularité de notre approche réside dans la prédiction en ligne des interactions (et dans celle d'autres variables des systèmes) par poursuite du modèle coordonnateur, technique qui a été développée en 1974 [4BC]. C'est cette méthode qui permet la satisfaction d'un critère global par l'ensemble complexe. La solution est sous-optimale car elle est élaborée sur un modèle simplifié. Les résultats sont réajustés par les décisions prises localement en utilisant des modèles plus détaillés et en prenant en compte des objectifs ou des critères locaux.

La méthode que nous proposons et sa mise en oeuvre présentent des avantages du fait de leur conception ascendante ainsi que de la modula-

rité et de la standardisation des fonctions du système de conduite. Ces caractéristiques sont importantes dans "l'automatisation intégrée", une méthodologie que nous avons proposée en 1974 [3BE].

Nos travaux sur la méthodologie sont destinés à combler une carence dans ce domaine : celle-ci constitue à notre avis un handicap majeur pour l'utilisation des théories modernes de l'Automatique. Et notre approche de la conduite "décentralisée coordonnée" fait partie d'une méthodologie applicable à l'automatisation "intégrée".

Remarquons que la réussite de l'automatisation et son utilisation effective nécessitent la compréhension de ceux qui sont en contact avec le système automatisé ; leur initiation doit être adaptée à leur origine, à leur niveau de connaissance et à leur position.

Compte tenu de ces remarques nous avons adopté dans ce mémoire une présentation globale du problème dans laquelle les détails apparaissent progressivement. C'est ainsi qu'on reprend dans chacun des chapitres le problème dans son ensemble, mais traité dans une optique différente et avec des détails intéressant des compétences différentes. Nous espérons que cette méthode d'exposition et les répétitions qu'elle implique ne gêneront pas le lecteur averti.

Nous abordons le problème de la méthodologie par une approche pragmatique, issue de l'évolution de l'Automatique et nous analysons des systèmes existants ce qui nous guidera dans la méthodologie de synthèse de systèmes similaires.

Comme notre expérience est liée à l'origine aux systèmes de production, nous nous intéressons en particulier aux procédés comportant un écoulement de matière continu ou semi continu. Mais dans la recherche d'un formalisme nous suivons une voie générale qui ne concerne pas seule-

ment les systèmes physiques mais qui peut être utilisée aussi bien dans d'autres domaines, socio-économiques, bio-médicaux et écologiques par exemple.

Notre démarche a été la suivante :

- A partir de l'analyse d'un système particulier nous avons dégagé une organisation interne du système intégré ainsi que les fonctions des parties qui le composent.
- Les caractéristiques de fonctionnement du système intégré nous ont conduit à un formalisme respectant les relations internes et externes de ces systèmes.
- L'analyse du fonctionnement et son formalisme ont été à la base de la synthèse des systèmes intégrés et en particulier de la partie conduite de ces systèmes.
- Pour l'application de la méthodologie de synthèse nous avons sélectionné une classe de systèmes et en nous appuyant sur leur représentation mathématique, nous avons développé des méthodes et des algorithmes assurant un comportement adéquat pour l'ensemble.
- Nous utilisons en définitive ces méthodes pour aboutir à la synthèse d'algorithmes particuliers et pour appliquer ceux-ci à un exemple de système de production.

Les difficultés que les différents spécialistes qui participent à la création du système intégré peuvent avoir pour se comprendre, nous ont amené à utiliser un vocabulaire et un formalisme descriptifs susceptibles d'être assimilés par d'autres que ceux qui s'intéressent seulement à la conduite des systèmes physiques.

# ANALYSE DU SYSTEME INTEGRE

CHAPITRE 2ANALYSE DU SYSTEME INTEGRE.

Un système intégré est constitué par un ensemble d'éléments divers. Les relations entre ces éléments caractérisent le comportement interne du système. Ce dernier se traduit par un certain comportement externe de l'ensemble vis à vis d'un environnement qui est en relation avec ce système intégré.

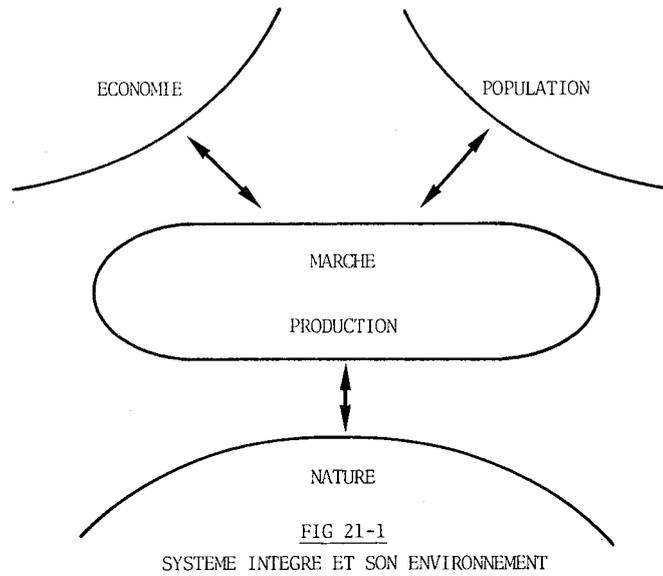
Le but de l'analyse est de comprendre le comportement du système intégré, d'identifier sa structure par les études des relations fonctionnelles et informationnelles et les lois qui les définissent. L'analyse inclut aussi la description des propriétés trouvées par un formalisme adéquat. Le choix de ce formalisme n'est pas indépendant de son utilisation future. Etant intéressés par la conduite des systèmes physiques, nous adoptons la description associée à ce domaine.

## 210 SYSTEME INTEGRE

Dans les paragraphes suivants nous examinons le système intégré, sa structure et son comportement. Nous illustrerons nos propos par l'exemple de système de production et de marché.

211 Exemple de système intégré.

Pour illustrer l'analyse d'un système intégré, nous avons choisi un exemple relativement simple, ensemble marché-production (F 21-1) qui permettra aussi une analyse approfondie de certains phénomènes. Cet ensemble de deux systèmes s'influencent mutuellement est en relation avec l'environnement. Citons l'économie, la population et la nature qui tous contribuent à la dynamique de l'ensemble marché-production et subissent aussi les conséquences de ce fonctionnement.



Un fonctionnement harmonieux (par exemple un équilibre entre toutes les parties) peut être assuré par l'adaptation mutuelle du système intégré et de l'environnement. Cette adaptation sous diverses formes consiste en une satisfaction des objectifs ou en un respect des contraintes imposées. Parfois, les conditions dans les diverses parties de l'environnement conduisent à des objectifs contradictoires et la recherche d'un compromis apparaît nécessaire.

Une observation des systèmes intégrés fournis par la nature (systèmes biologiques, bio-médicaux) montre que l'adaptation à l'environnement est une fonction essentielle dans le comportement de ces systèmes, appelés souvent systèmes cybernétiques. Par similitude, nous utiliserons quelquefois ce même mot pour les systèmes construits artificiellement.

L'analyse de notre exemple de système intégré (marché-production) mène à l'éclatement de cet ensemble en deux systèmes dont chacun formerait un environnement pour l'autre (F 21-2). L'approvisionnement en matière première et en énergie ( $V_{mp}$ ) forme la base de la transformation en produit fini ( $V_{pm}$ ) qui, vendu sur le marché fournit les moyens financiers pour l'achat de la matière première et de l'énergie nécessaires à la production.

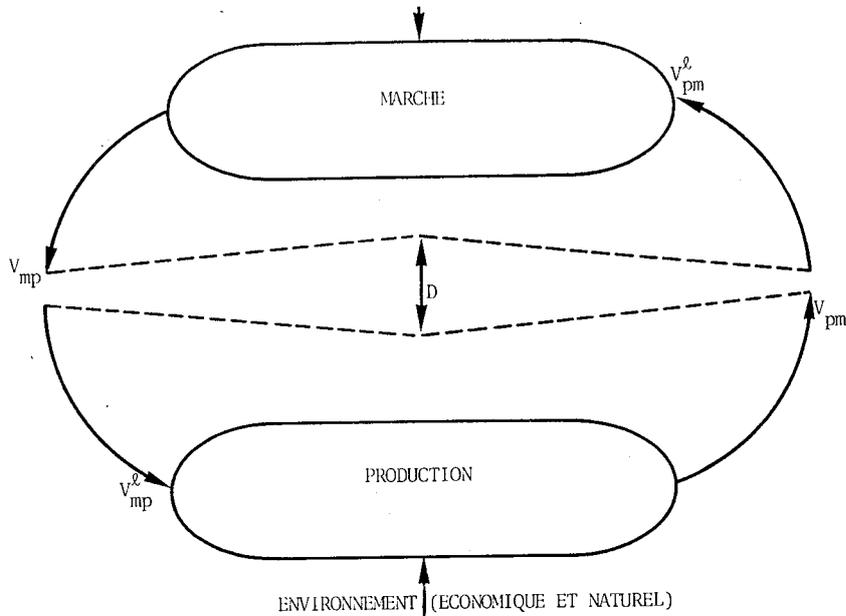


FIG 21-2

INFLUENCE MUTUELLE ENTRE LE MARCHÉ ET LA PRODUCTION

Le fonctionnement souhaité pour l'ensemble consiste en une identité entre les variables d'entrées désirées localement ( $V_{mp}^d$ ,  $V_{pm}^d$ ) et celles effectivement fournies ( $V_{mp}$ ,  $V_{pm}$ ). Les perturbations provenant de l'environnement peuvent entraîner des différences entre les variables et créer ainsi une tension entre les désirs et leur satisfaction. Considérons, par exemple, une livraison de matière première ( $V_{mp}$ ) non conforme aux besoins de la production ( $V_{mp}^d$ ) déjà engagée.

Les différences entre les quantités désirées et celles réalisées permettent la formulation d'une certaine distance ( $D$ ) entre le marché et la production qui représente aussi la tension entre les ressources et les moyens. La diminution de cette tension, c'est-à-dire la réduction de la distance ( $D$ ) peut être un objectif pour le comportement de ces deux systèmes.

Dans notre exemple, la distance ( $D$ ) peut être diminuée par la réduction de la production ou par l'animation du marché qui augmentera l'approvisionnement de la production. Les deux actions peuvent être appliquées simultanément par une contribution de chacun des systèmes

(marché, production). Dans ce cas, chaque système considère l'autre comme son environnement (contraintes, objectifs) et s'adapte à lui tout en tenant compte des situations locales. Cette adaptation mutuelle conduit à un équilibre caractérisé par la valeur minimale de la distance (D).

Remarquons que le mot de distance est utilisé dans un sens plus large qu'en distance mathématique du terme.

### 212 Structure d'un système intégré.

Supposons que le système de production ait la possibilité de modifier son fonctionnement pour s'adapter aux changements de l'environnement et appelons un tel système, système actif ou cybernétique (CAS) [3BE]. De même, l'environnement peut aussi modifier son comportement face à l'évolution du système actif. Appelons ce type d'environnement un environnement actif ou cybernétique.

L'analyse du fonctionnement interne du système intégré de production (CAS) montre qu'il est facile de distinguer deux parties : une partie de production (système passif) et une partie assurant cette production (système de conduite) (F 21-3).

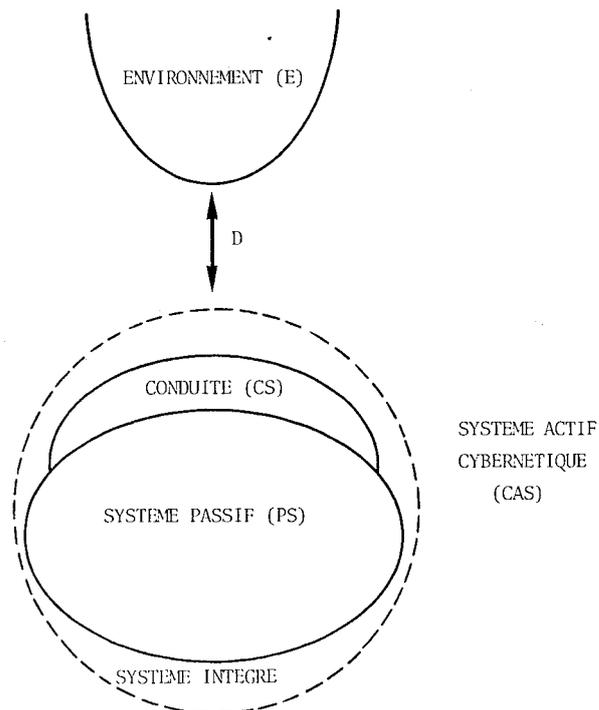


FIG 21-5

STRUCTURE ET COMPORTEMENT DU SYSTEME INTEGRE

La partie de production a pour but la transformation de la matière et de l'énergie. Les éléments qui la composent maintiennent son fonctionnement sans pouvoir le modifier. Ces éléments, qu'on appelle donc passifs peuvent être rassemblés dans un système passif (PS) qui est caractérisé par sa structure physique et par le régime (ou la situation) de son fonctionnement.

Le système de conduite (CS) assure le fonctionnement du système passif conformément à sa stratégie propre dans laquelle la situation de l'environnement (E) se traduit sous forme de contraintes ou d'objectifs à satisfaire par le système passif.

Le système de conduite (CS) forme un système intermédiaire entre l'environnement (E) et le système passif (PS). Il peut être considéré comme un environnement du système passif plus proche et mieux adapté que l'environnement d'origine. Il élabore et applique les décisions à différents endroits du système passif. Le système de conduite est généralement structuré en différents niveaux, caractérisés d'une part par leur place, leurs actions géographiques et leurs fonctions, et d'autre part, par les objectifs et méthodes utilisés. Sa structure dépend ainsi de la structure du système passif et de l'environnement qui est en relation avec le système de conduite.

La décomposition du système intégré peut être réalisée suivant la structure du système passif. A chaque élément de ce système on peut associer une partie du système de conduite et réaliser ainsi un élément intégré. L'environnement de cet élément est formé par le reste du système intégré et plus particulièrement par le voisinage de cet élément : par exemple le système de conduite du niveau supérieur et les éléments intégrés (ou passifs) en contact direct avec l'élément considéré.

La représentation du système intégré dans l'espace donne une décomposition suivant trois axes (F 21-4) : x la structure du système, y l'évolution et les régimes de fonctionnement, z le niveau de conduite.

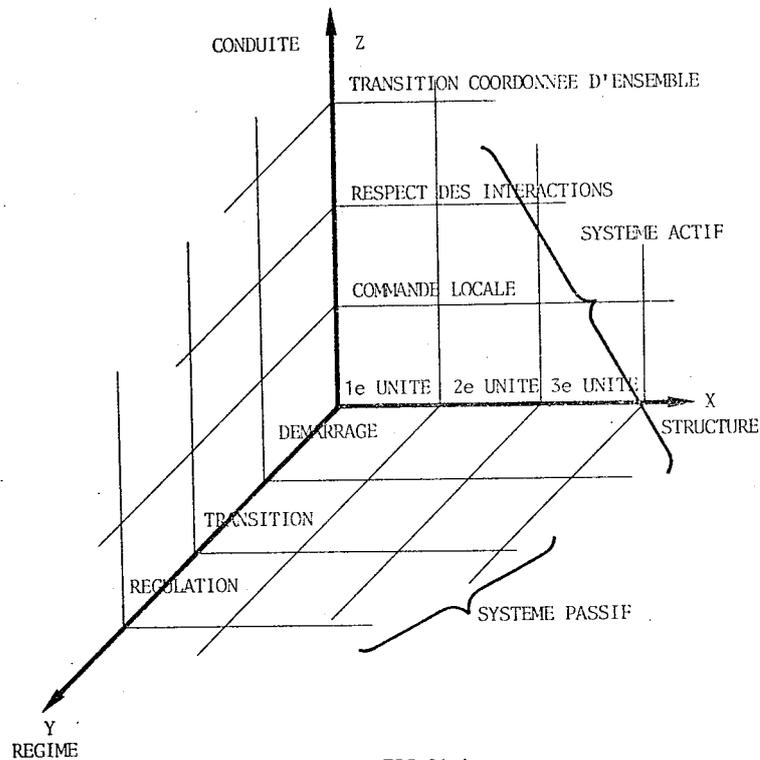


FIG 21-4  
REPRESENTATION DU SYSTEME INTEGRE

Le plan x-y représente le système passif où chaque élément peut se trouver dans différentes situations appelées régimes. Le système de conduite est construit sur la base du système passif avec une structure analogue respectant le découpage structurel (x), les régimes de fonctionnement (y) et les fonctions de conduite (z). Soulignons les avantages de l'architecture parallèle du système passif et du système de conduite. Ils facilitent la synthèse progressive du système de conduite et les modifications de la structure du système passif.

#### 220 SYSTEME PASSIF

Parmi les systèmes passifs que l'on peut observer, nous orienterons notre attention vers la classe des systèmes de production.

### 221 Propriétés du système passif.

Le but des systèmes passifs de production est de transformer la matière en produits finis à l'aide d'apports énergétiques. Ce sont ces deux courants, matière et énergie, qui déterminent les axes de la structure de ces systèmes réels. Tous deux contribuent à la qualité et à la quantité de la production. Le rôle du système de conduite est de les utiliser de manière à satisfaire des objectifs relatifs à cette production. L'observation de plusieurs types de procédés réels montre la possibilité de les représenter comme un ensemble d'éléments caractérisés par la transformation unitaire que subit la matière entrante. Les éléments d'accumulation et de transport ne réalisent, quant à eux, qu'une transformation purement quantitative.

La présence de l'homme dans le système de production est parfois nécessaire, à cause de sa capacité à réaliser des opérations complexes, par exemple dans la manutention. Mais son rôle au sein du système passif est équivalent à celui d'un robot très évolué. (Remarquons toutefois qu'il remplit souvent en même temps un rôle dans le système de conduite, ce qui le rend pratiquement irremplaçable).

L'architecture du système de production dépend du rôle du procédé, des propriétés et des caractéristiques des éléments de transformations utilisés. Cette partie est aussi un support pour le système de conduite formant l'ensemble du système intégré. La meilleure structure du système passif devra être choisie en fonction de son rôle dans l'ensemble. Remarquons que la formulation des critères objectifs pour concevoir le système est difficile et la conception est considérée souvent comme un art réservé à certains spécialistes.

### 222 Représentation des éléments du système passif.

La réalisation d'un système intégré de structure optimale se heurte aux premières difficultés de compréhension entre les divers spécialistes

dont le concours est nécessaire.

Un des premiers problèmes est la représentation des systèmes et de leurs parties exploitables par les divers spécialistes. Un tel problème peut trouver un support dans la théorie générale des systèmes [1K1] avec les deux orientations suivantes :

- description microscopique des phénomènes de base physico-chimiques ou micro-biologiques
- description topologique générale

Aucune de ces descriptions n'est entièrement satisfaisante. Dans la voie que nous avons choisie pour la conduite des procédés, il nous semble valable de représenter les éléments du système passif par leurs modèles, de préférence dans l'espace d'état, en particulier quand les états peuvent avoir une signification physique.

La définition de la structure du procédé ainsi que sa représentation peuvent être difficilement résolues de manière générale. Pour illustrer ceci, choisissons un exemple de système passif représentant une partie du procédé chimique constitué de deux colonnes à distiller.

Le rôle du procédé ou de ses éléments (F 22-1) est de transformer la matière entrante ( $w$ ). La transformation ( $T$ ) est effectuée à l'aide de la commande ( $u$ ) en vue d'obtenir le produit fini ( $y$ ) en qualité et en quantité désirées.

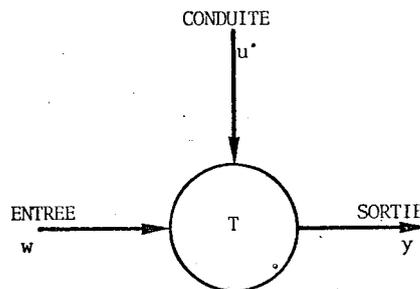


FIG 22-1  
ELEMENT DE TRANSFORMATION DU SYSTEME PASSIF

Le procédé peut être décomposé en éléments de différentes grandeurs et de fonctions diverses. Ces éléments peuvent être appelés unités, modules ou blocs fonctionnels (F 22-2).

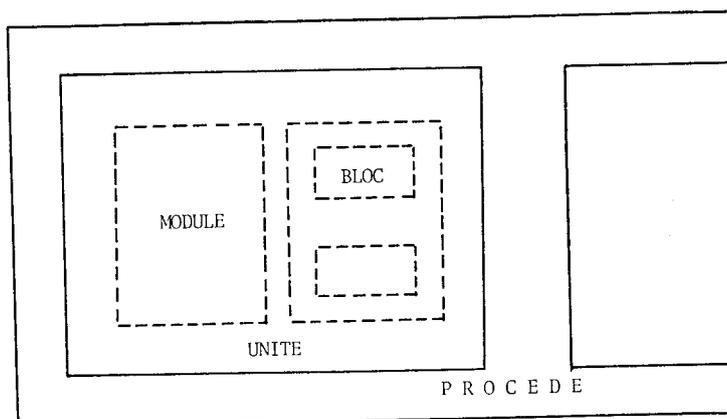


FIG 22-2  
LES ELEMENTS DU PROCEDE

Supposons les deux unités de distillation (I, II) connectées en série (F 22-3). Chaque unité comporte deux modules. Un module de conditionnement d'alimentation et une colonne à distiller proprement dite.

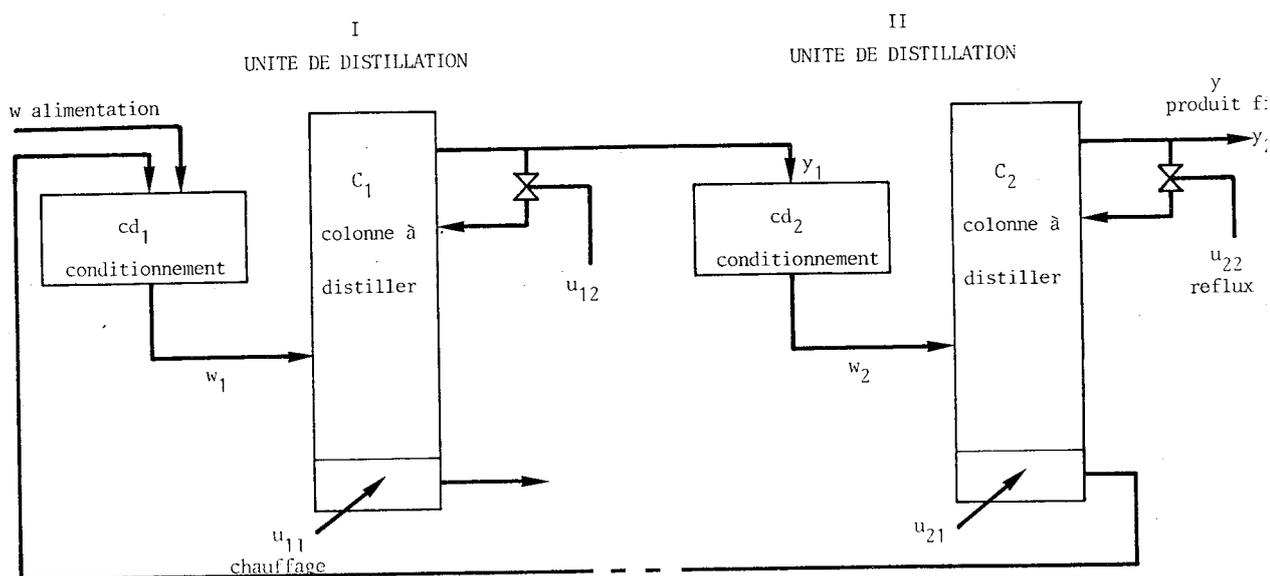


FIG 22-3  
EXEMPLE D'UN PROCEDE CHIMIQUE

Chaque colonne peut être conduite à l'aide des variables de commande qui représentent l'apport calorifique (chauffage  $u_{11}, u_{21}$ ) et le recyclage en produit de tête (reflux  $u_{12}, u_{22}$ ). Le but de la conduite est d'assurer une certaine séparation du mélange ( $w$ ) pour obtenir le produit ( $y$ ) de concentration désirée.

Le module de conditionnement d'alimentation peut comporter des blocs de stockage, d'homogénéisation, de réchauffage ainsi que de régulation du débit d'alimentation de la colonne. Il est possible d'utiliser seulement certains blocs pour modifier les caractéristiques de l'alimentation ou de supprimer tout conditionnement.

Le comportement des éléments du système passif (unités, modules, blocs) peut être représenté par un modèle de transformation conformément à la figure (F 22-1)

$$M : y = T \{w, u, x, t\} \quad (222-1)$$

avec :

- $w$  - entrée ou interaction représentant les propriétés de la matière à transformer (quantité, qualité, prix...)
- $u$  - commande (conduite) permettant la modification du comportement de l'élément passif (action, énergie, déplacement...)
- $x$  - état interne de l'élément (état physique, régime de fonctionnement, structure interne....)
- $y$  - sortie représentant les propriétés du produit transformé (de même nature que pour la variable  $w$ )
- $T$  - opérateur de transformation que subit l'entrée  $w$

Toutes les variables, sous forme de vecteurs, peuvent être des fonctions du temps ( $t$ ) ainsi que d'autres paramètres physiques.

La représentation d'un procédé peut être obtenue soit par l'identification de l'ensemble complet, soit par la description détaillée de tous les éléments qui le constituent. Dans ce cas le modèle qui peut être obtenu par l'assemblage de tous les modèles locaux, est si complexe que son utilisation dans la conduite du système global n'est pas réaliste. Il est donc intéressant de trouver une nouvelle représentation par l'agrégation [5BM] (réduction, simplification) des représentations élémentaires. L'information conservée dans cette représentation sera utilisée pour la conduite. On cherche ainsi un modèle d'ensemble qui est suffisamment simple et qui représente assez bien le procédé ou une partie de ce procédé.

Les descriptions élémentaires peuvent être relatives

- aux différents régimes du même élément passif
- aux divers éléments passifs qui composent le procédé
- aux diverses structures du même procédé

Il est donc possible d'envisager l'agrégation des modèles de régimes, d'éléments et de structures. Citons les exemples suivants :

- Régimes (F22-4)

Etats des automates séquentiels.

Au cours du démarrage du procédé, la mise en condition peut être gérée par des automates. Des états ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) de l'automate séquentiel peuvent être regroupés dans une représentation d'une étape (Tr) de démarrage .

Représentation de plusieurs modèles.

La non linéarité d'une colonne à distiller peut conduire à plusieurs représentations linéaires ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) valables autour de points de fonctionnement. Pour la représentation de l'ensemble des modèles, on choisit par exemple un modèle non linéaire simplifié (Tr).

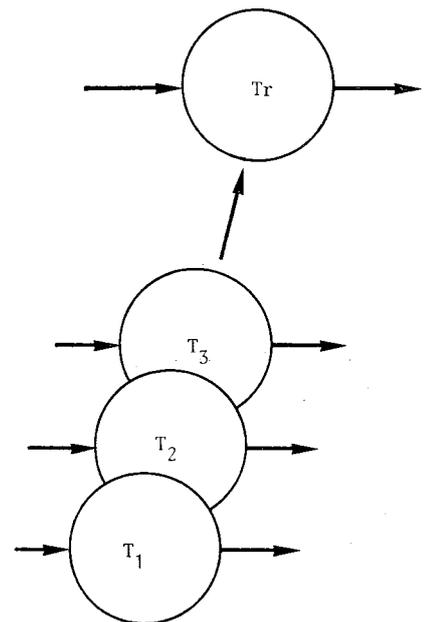


FIG 22-4  
AGREGATION DES REGIMES

- Éléments (F 22-5)

Représentation de plusieurs modules.

La représentation ( $T_m$ ) du procédé de distillation (F 22-3) peut être obtenue par la construction du modèle agrégé à partir des modèles représentant les différentes parties (les conditionnements ( $T_1, T_3$ ) et les colonnes à distiller ( $T_2, T_4$ )).

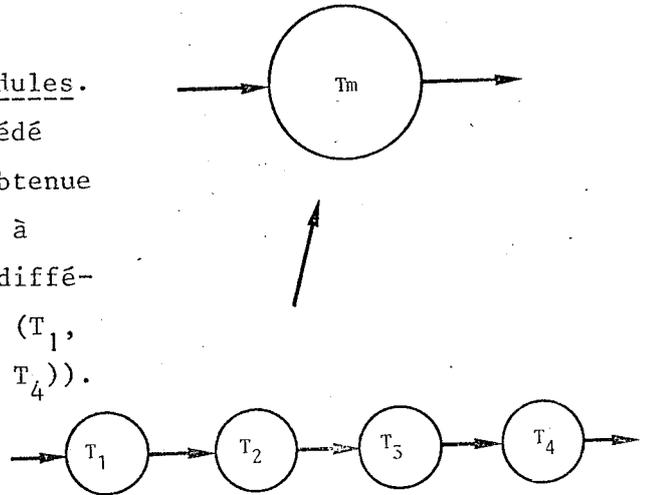


FIG 22-5  
AGREGATION DES ELEMENTS

- Structures (F 22-6)

Interconnexion des éléments passifs.

L'interconnexion entre les divers éléments peut varier. Par exemple les colonnes peuvent être connectées en série ( $T_1$ ) ou en parallèle ( $T_2$ ). La représentation ( $T_s$ ) agrégée, représente l'ensemble avec en plus un paramètre interne permettant de reconnaître la structure.

Différents points d'alimentation d'une colonne à distiller.

Si une colonne à distiller peut être alimentée au niveau de différents plateaux, elle aura autant de représentations ( $T_1, T_2$ ) que de combinaisons d'alimentation. Il est possible de trouver une seule représentation agrégée ( $T_s$ ) par l'introduction d'un paramètre "d'alimentation".

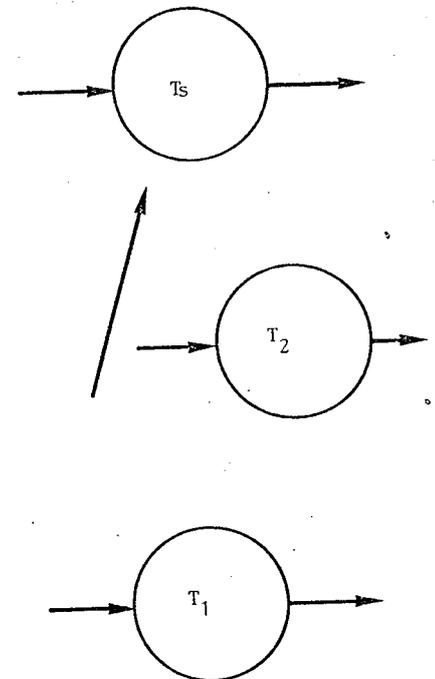


FIG 22-6  
AGREGATION DE STRUCTURE

230 SYSTEME DE CONDUITE

Dans le paragraphe 210 nous avons analysé le comportement de l'ensemble des deux systèmes marché-production. Le système de conduite inclus dans

le système intégré de production assure une bonne adaptation du système passif (procédé) aux conditions ou exigences du marché. La vision de cet exemple permet de présenter le comportement interne et la structure du système de conduite.

### 231 Architecture du système de conduite.

Compte tenu de sa position intermédiaire, le système de conduite met en communication le système passif (procédé) et son environnement (opérateur humain, système économique, autre procédé....). Il est donc nécessaire que la structure, l'organisation et le fonctionnement du système de conduite soient adaptés à ce rôle et que ce soit le système passif et l'environnement qui conditionnent la définition du système de conduite.

La réalisation et la mise en oeuvre d'un système de conduite met en jeu des techniques et des moyens divers. L'ensemble des parties de ce système détermine son comportement désiré. La figure (F 23-1) présente la composition suivante :

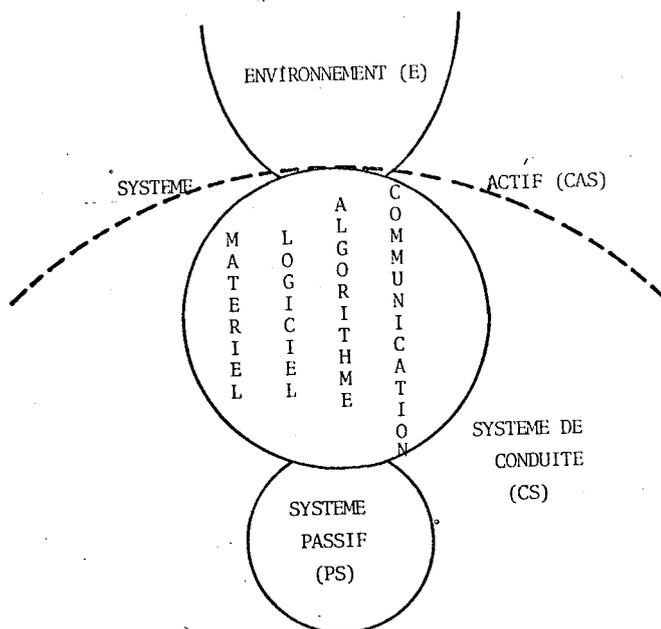


FIG 23-1  
COMPOSITION DU SYSTEME DE CONDUITE

- Les algorithmes représentent l'ensemble des méthodes permettant de conduire le système passif.
- Le logiciel est la traduction des algorithmes en fonction des moyens techniques mise en jeu.
- Le matériel assure la mise en oeuvre et l'application des algorithmes sur le système passif.
- La communication est un support technique de transfert de l'information ; il inclut les sources d'information situées dans le système passif et dans l'environnement.

La conduite élaborée, compte tenu des contraintes et objectifs apportés par l'environnement, peut être directement appliquée sur le système passif. Ce cas, avec un seul niveau de conduite (F 23-2) est courant dans les systèmes de conduite ayant une structure centralisée. Les inconvénients relatifs à la maniabilité, la variabilité et la fiabilité de ce type de structure conduisent en particulier pour les grands systèmes, à la structuration du système de conduite en plusieurs couches successives, ou niveaux [1MM] [3DB].

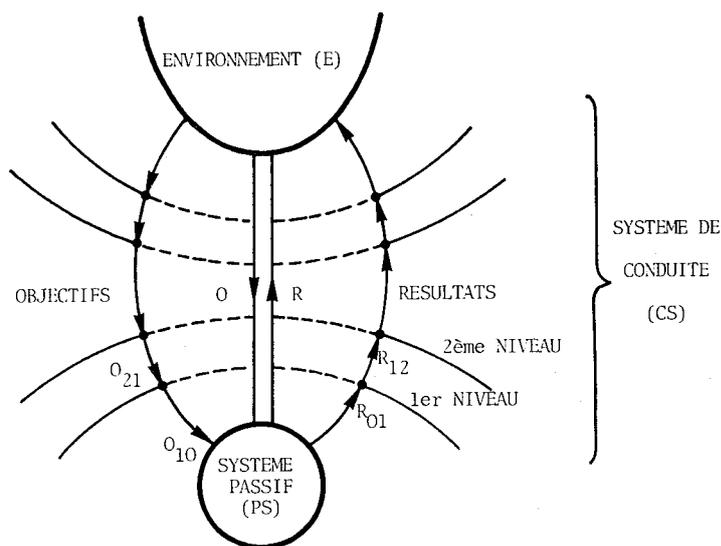


FIG 23-2  
CONDUITE DIRECTE ET REPARTIE SUR PLUSIEURS NIVEAUX

La conduite est assurée par la transformation progressive des contraintes ou objectifs (O) en vue de les communiquer au système passif PS sous la forme d'une commande ( $O_{10}$ ). Dans le sens inverse les résultats de la conduite ( $R_{01}$ ) sont progressivement traités, agrégés et communiqués à travers tous les niveaux jusqu'à l'environnement (E).

Les opérateurs globaux de transfert des objectifs (O) et des résultats (R) sont dans un système de conduite à plusieurs niveaux, formés à partir des opérateurs partiels

$$O : \{O_{n,n-1}, O_{n-1,n-2}, \dots, O_{32}, O_{21}, O_{10}\} \quad (231-1)$$

$$R : \{R_{01}, R_{12}, R_{23}, \dots, R_{n-2,n-1}, R_{n-1,n}\}$$

### 232 Conduite décentralisée coordonnée.

Les avantages de la structure décentralisée coordonnée résident dans la possibilité d'implanter le système de conduite progressivement en partant du système passif vers l'environnement. Cette démarche est couramment utilisée dans la conduite par l'homme des systèmes industriels. Les opérateurs humains qui sont responsables du fonctionnement des différentes parties du procédé sont orientés dans leurs décisions et disposent en même temps d'une certaine responsabilité et d'une certaine liberté dans la prise de décision locale. L'organisation du système de conduite est assez fortement liée à la structure du système passif qui fait l'objet de cette conduite.

Pour mieux faire ressortir les particularités de fonctionnement du système de décision humaine, nous avons choisi un exemple de conduite du système passif représenté par les deux unités de distillation (F 22-3) (paragraphe (220)).

Le système de conduite est disposé sur trois niveaux (F 23-3).

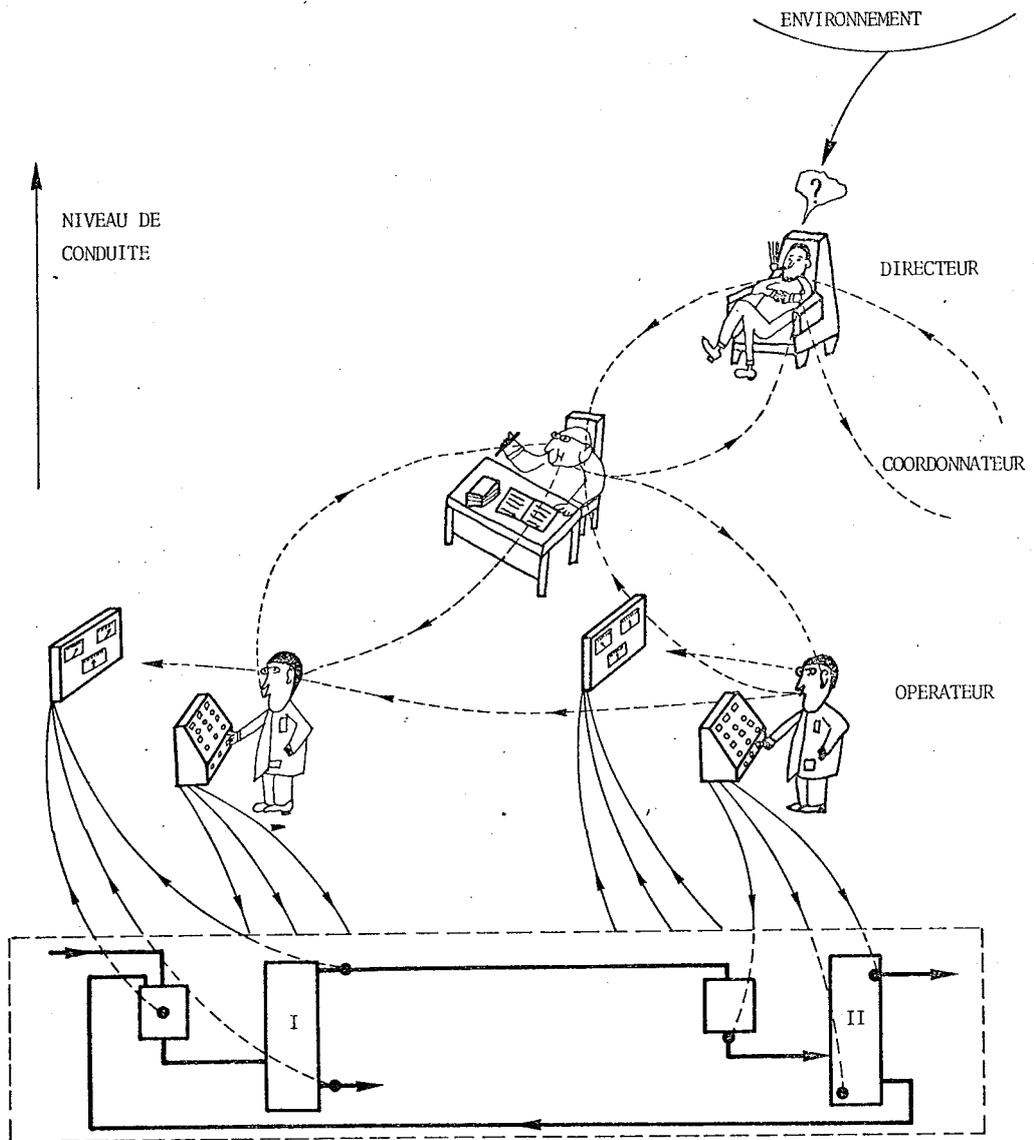


FIG 23-3

CONDUITE DU PROCEDE PAR LES HOMMES

Au premier niveau deux opérateurs assurent le fonctionnement de chaque unité de distillation. Ils ont une autonomie dans la décision mais ils doivent tenir compte des consignes ou des contraintes de l'environnement qui sont fournies par le coordonnateur du niveau supérieur et par l'opérateur voisin.

Au cours de son apprentissage, l'opérateur accumule des expériences et se construit une image ou un modèle du système qu'il va conduire. Par exemple la colonne à distiller peut se trouver dans différentes situations ou régimes : démarrage, grande transition, régulation, situations critiques ou dangereuses. Habituellement l'opérateur associe à chaque régime de fonctionnement un modèle spécifique qui représente une information a priori. Ce modèle est utilisé pour la conduite du procédé avec une stratégie adaptée au régime considéré.

La conduite assurée par l'opérateur consiste en une meilleure satisfaction des objectifs ou un meilleur respect des contraintes qui lui sont fournies par l'environnement. Les informations a priori (les modèles, la priorité des objectifs) et la capacité intellectuelle de l'opérateur sont à la base de la recherche d'une satisfaction générale des objectifs, même s'ils ne sont pas compatibles entre eux ou pas réalisables avec les moyens dont dispose l'opérateur. Une fois trouvée, la solution est appliquée par l'opérateur à la partie du procédé dont il a la responsabilité. Il observe les résultats de sa décision et corrige éventuellement ses expériences et par conséquent le modèle qu'il utilise pour la conduite du procédé.

Les liens entre des opérateurs voisins présentent certaines particularités. Par exemple l'opérateur de l'unité(II) doit accepter la qualité et la quantité de matière fournies par l'unité(I). Mais en même temps l'opérateur de l'unité(II) compare la réalité avec ses propres désirs (incluant éventuellement les objectifs du coordonnateur) et informe l'opérateur de l'unité(I) de ses difficultés, lui demandant une contribution pour les alléger. Dans ce sens il est possible d'arriver à une contribution

équilibrée de chaque opérateur pour assurer des interactions (l'entrée ( $w_2$ ) et la sortie ( $y_1$ ) (F 22-3)) cohérentes. Cette forme de coopération peut résoudre certaines situations sans une intervention directe du coordonnateur.

Le coordonnateur dispose d'une information qui lui permet de créer un modèle de l'ensemble des unités. Même si ce modèle est moins fin (agrégé) que les modèles d'opérateurs, il doit conserver les principales caractéristiques du comportement de chaque unité afin que la décision élaborée à partir de ce modèle détermine une bonne direction pour chaque unité et pour chaque opérateur.

La décision du coordonnateur consiste à assurer une certaine forme de coopération entre le directeur se situant sur le niveau de conduite supérieur et les opérateurs du niveau inférieur. Le ou les modèles du coordonnateur se situent du point de vue de la finesse et de l'étendue géographique entre les modèles de deux niveaux voisins. Le coordonnateur est capable de comprendre les exigences du directeur et de les satisfaire, puis de décomposer des tâches et de les présenter de manière compréhensible pour les opérateurs qui les perçoivent comme un environnement. Les difficultés de chaque opérateur dans l'exécution de ses tâches peuvent être mesurées et utilisées par le coordonnateur pour améliorer ses modèles en vue d'une meilleure coordination. Ceci en particulier dans les cas de difficultés inégalement réparties entre les opérateurs.

Le directeur joue le même rôle que le coordonnateur à un niveau supérieur dans une définition récursive de la conduite. Il cherche une meilleure solution (suivant son critère et ses expériences) pour respecter les objectifs et ensuite il traduit sa décision sur l'environnement des coordonnateurs.

L'exemple montre les analogies de comportement des opérateurs, des coordonnateurs et du directeur, même s'ils utilisent des méthodes et des

moyens différents. Dans leur comportement apparaissent essentiellement les étapes suivantes :

P 0 accumulation des expériences

P I coopération avec l'environnement (supérieur)

P II création de l'environnement (inférieur)

P III amélioration de l'expérience

(232-1)

Remarquons que la fonction P 0 accumulation d'expériences se déroule normalement avant que la fonction de conduite ne se réalise. Elle consiste en une accumulation de l'information a priori nécessaire à la création des modèles (ou images) qui sont exploitées dans la réalisation des fonctions P I, P II, P III.

Dans l'hypothèse où les fonctions peuvent être assurées par des moyens techniques, il est possible de remplacer le système de conduite humain par le système de conduite décentralisée coordonnée (F 23-4).

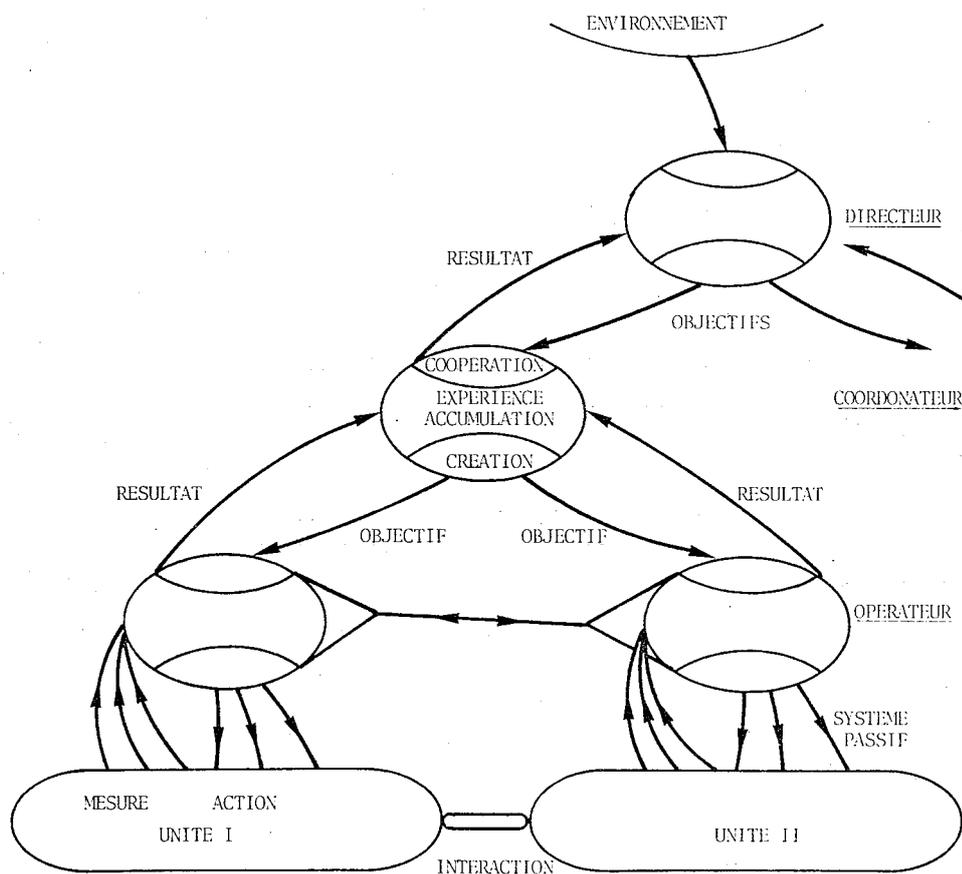


FIG 23-4

CONDUITE DECENTRALISEE COORONNEE

Chaque centre de décision de ce système qui se substitue à un élément humain doit comporter les parties matérielle, logicielle, algorithmique et de communication avec l'environnement de ce centre.

Soulignons que notre approche permet le remplacement progressif des opérateurs humains et facilite la surveillance et l'assistance liés à la conduite automatique. Dans ce cas l'opérateur observe l'évolution du procédé et formule des objectifs complémentaires pour les divers centres de décision du système de conduite. Ces objectifs sont inclus dans l'environnement des centres en question, ou ajoutés simplement aux objectifs existants. La priorité à respecter ces objectifs complémentaires est prise en compte au cours de la coopération par le centre concerné.

### 233 Fonctionnement d'un centre de décision.

Dans le paragraphe précédent (232) nous avons analysé les fonctions essentielles de la décision humaine et proposé leur réalisation dans un centre de décision. Les méthodes utilisées sont adaptées aux moyens d'intervention dans un système passif et aux stratégies à appliquer.

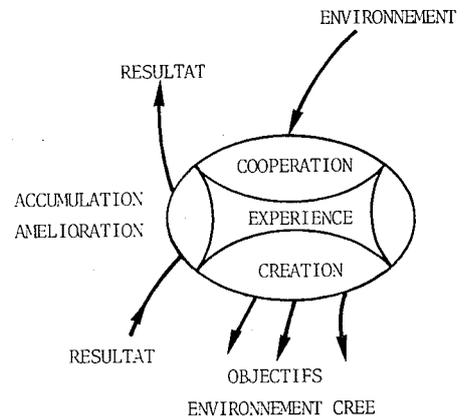
Il est facile d'imaginer le fonctionnement du centre régi par des automates combinatoires, au moyen des méthodes de commande optimale, de théorie des jeux ou de gestion. Il apparaît donc difficile de concevoir des centres de décision uniques utilisables dans tous les cas. Par contre, en se référant aux fonctions fondamentales à réaliser que nous allons examiner ci-dessous, on peut envisager des centres standards exploitant une certaine technique ou une certaine théorie.

PO L'accumulation des expériences initiales se fait par la réalisation d'un plan d'expériences ayant pour but de comprendre le comportement du système à conduire ou les éléments qui le composent. Les éléments peuvent être passifs ou intégrés (élément passif avec le centre de décision correspondant). L'expérience acquise se conserve sous une certaine forme appelée image ou modèle du système. L'expérience accumulée sert d'infor-

mation de base à la recherche d'une décision appropriée à la conduite du système. Il convient de choisir la forme du modèle en fonction de l'objectif de conduite et des méthodes susceptibles d'être utilisées.

Quelquefois différents modèles doivent être élaborés pour représenter un même élément selon la finesse, la précision demandées, les régimes de fonctionnement qui apparaissent, et aussi selon les méthodes et les techniques de conduite utilisées. Cette description multiple d'un élément en fonction des situations prévues conduit à la réalisation d'un centre de décision multiple (F 23-6) en associant à chaque modèle la technique appropriée pour réaliser les fonctions de conduite (coopération - création - amélioration).

FIG 23-5  
CENTRE DE DECISION



Remarquons que l'accumulation précède généralement toutes les autres fonctions de conduite et qu'elle est remplacée au cours de la conduite par la fonction amélioration.

PI La coopération avec l'environnement réside dans la recherche de la meilleure satisfaction des contraintes et objectifs externes (de l'environnement) en tenant compte de la situation interne du centre.

Une certaine expérience initiale concernant l'environnement et la partie du système qui est conduite par ce centre, semble indispensable pour réaliser cette fonction. Cette expérience sous forme d'un ou plusieurs modèles (PO) correspondant aux situations prévues, permet de définir l'évolution, de choisir le modèle, l'algorithme ou la structure qui

satisfait le mieux les objectifs proposés.

PII La création d'un environnement dépendant consiste dans une formulation de l'environnement ayant pour but d'interpréter des contraintes et des objectifs (issus de coopération (PI)) destinés aux systèmes dépendants (centres de décisions, systèmes actifs, éventuellement systèmes passifs) (212). Les contraintes et objectifs communiqués incitent chaque système à remplir les tâches qui assurent un comportement souhaité pour l'ensemble.

Pour réaliser cette fonction la connaissance du comportement et des particularités de chaque système dépendant sont rassemblées dans le modèle de création. Il est en général plus détaillé que le modèle de coopération et on retrouve dans sa structure les interconnexions des systèmes dépendants.

PIII L'amélioration de l'expérience est fondée sur la qualité de l'exécution des objectifs par les systèmes dépendants. Les difficultés dans la réalisation des contraintes et des objectifs de l'environnement créé peuvent être interprétées comme une insuffisance dans la création de cet environnement. La création (PII) utilise une expérience initiale accumulée (PO) avant la conduite. On peut améliorer cette expérience (représentée par la structure, par les paramètres et par les états du modèle) et améliorer la qualité de la décision ce qui permet une exécution mieux équilibrée et mieux adaptée aux situations des systèmes dépendants.

Un exemple d'organisation interne d'un centre de décision est présenté sur la figure (F23-7).

L'accumulation d'expériences (PO) consiste dans la construction de deux modèles. Le modèle de coopération conserve des connaissances sur l'environnement, sur les possibilités du centre de décision ainsi que sur les caractéristiques principales du système à conduire (passif ou actif). Le modèle de création représente le comportement des éléments de ce système en vue d'allouer des objectifs à chacun. Quelquefois les deux modèles sont intégrés dans un seul, utilisé pour la réalisation d'autres fonctions (PI, PII).

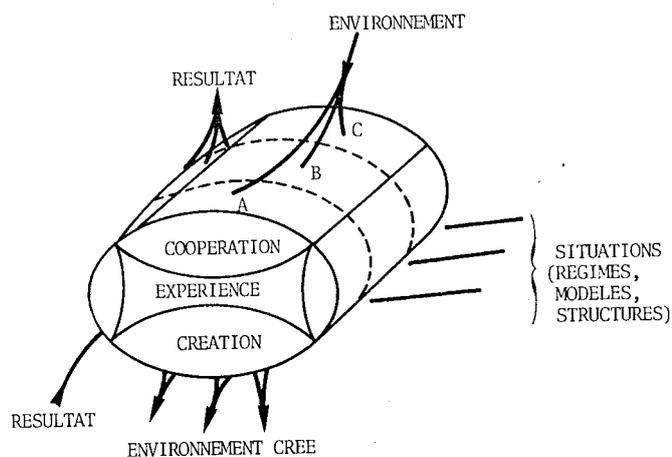


FIG 23-6  
CENTRE DE DECISION MULTIPLE

Les blocs de coopération (PI) et de création (PII) (F 23-7) permettent de réaliser la meilleure conduite du système au sens des objectifs de l'environnement. Pour ceci ils utilisent l'expérience (PO) conservée dans les deux modèles.

Les résultats de la conduite du système ou de ses éléments sont caractérisés qualitativement et quantitativement par un bloc de validation qui fournit une appréciation sur les possibilités ou les difficultés d'exécution des objectifs de l'environnement créé. Cette information est utilisée pour l'amélioration (P III) au moyen de correcteurs des modèles du centre de décision. Ces correcteurs tiennent compte des particularités des situations locales (contraintes), des critères et des objectifs locaux

et agissent en conséquence. Sur la figure on peut voir leurs doubles actions d'adaptation des modèles et de modification de l'environnement. Cette dernière consiste dans la création d'un environnement local (fictif) qui permet par exemple de respecter les contraintes ou de modifier l'attribution des objectifs aux systèmes dépendants, en vue d'améliorer ou d'équilibrer leurs comportements.

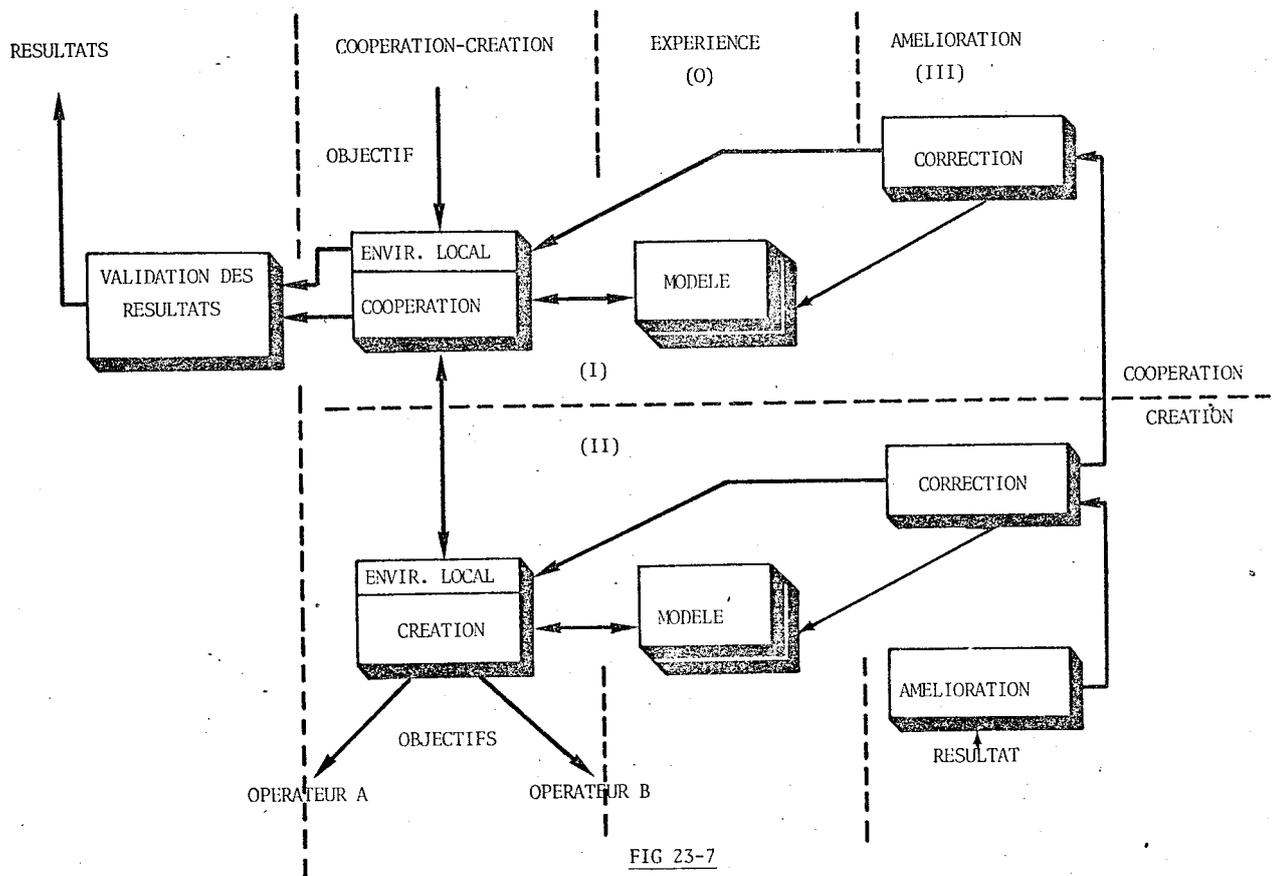


FIG 23-7  
ORGANISATION INTERNE D'UN CENTRE DE DECISION

**RELATIONS ENTRE SYSTEMES**

CHAPITRE 3RELATIONS ENTRE SYSTEMES.

Dans le chapitre précédent (200) nous avons analysé le comportement du système de conduite. Les centres de décision ou les hommes qu'ils peuvent remplacer, agissent à partir d'une expérience initiale qui est conservée et améliorée au cours du temps. Leur expérience exprimée par un modèle et les relations entre ces modèles peuvent donner une image du fonctionnement de l'ensemble.

Notre but est de rechercher une approche formelle des relations entre les centres ainsi que de leurs fonctions internes. Cette approche doit conduire au formalisme mathématique nécessaire à la description des phénomènes liés à la synthèse du système de conduite et des algorithmes correspondants. Ces raisons nous ont amenés à la représentation des relations dans un système intégré, et plus particulièrement dans un système de conduite, sous la forme de distances. Ce formalisme ouvre la voie de l'exploitation de la technique de poursuite pour l'analyse et la synthèse des systèmes de conduite.

Après un rappel historique sur la poursuite, l'analyse d'un exemple prépare la voie à la formalisation des problèmes d'automatisation sous l'angle de la poursuite.

## 310 APPROCHE PAR POURSUITE

La poursuite a une signification physique caractérisée par le déplacement volontaire d'un système (poursuiveur) en vue de réduire ou d'annuler sa distance par rapport à un autre système, souvent appelé système poursuivi, système objet, système de référence, environnement, objectif, image....

Le problème de la poursuite a été abordé dès le début de l'automatique, et les solutions issues de la théorie classique des asservissements étaient utilisées par exemple pour la commande des radars.

C'est le développement de la commande optimale [1PB] qui a apporté une dimension supplémentaire à ce problème. Le compromis dans la réalisation des objectifs fixés pour les différentes variables du système commandé, a permis d'introduire l'aspect énergétique dans la décision : la validité de cette méthode a été démontrée dans le domaine spatial.

En dehors de l'application spatiale, l'utilisation de la méthode de poursuite restait relativement limitée. Les automaticiens se préoccupaient à l'origine de la régulation des systèmes isolés. La technique d'optimisation quadratique a donné un outil qui a polarisé leur effort [1AF], et l'application de la technique de poursuite à l'automatisation est restée longtemps inexploitée. Même la poursuite d'un modèle de référence était traitée à l'aide des méthodes classiques de régulation [4As].

Parmi quelques applications de la technique de poursuite, notons en 1969 [2Bi3] la correction d'une perturbation dynamique mesurable, tout en respectant un optimum statique et en 1971 [4Pi] la stabilité d'un système économique. Depuis cette époque, l'intérêt porté à la poursuite a grandi à cause de l'importance prise par les économies d'énergie d'une part, par la coordination des systèmes complexes d'autre part.

En observant les applications, on peut remarquer que l'approche du problème étudié sous l'aspect poursuite permet non seulement d'appliquer une technique très puissante à sa résolution, mais aussi de constituer une approche méthodologique des problèmes de commande. Cette approche que sa signification physique rend particulièrement claire et compréhensible facilite l'analyse des problèmes posés, ainsi que la recherche des solutions et la synthèse des algorithmes. En outre, elle permet de traiter

par une méthode unique un certain nombre de problèmes d'automatique, étudiés séparément jusqu'à présent. Ces problèmes deviennent ainsi les cas particuliers d'une présentation générale, même si le développement des algorithmes fait appel à des théories différentes. C'est la raison qui nous amène à formaliser les problèmes de commande en termes de poursuite.

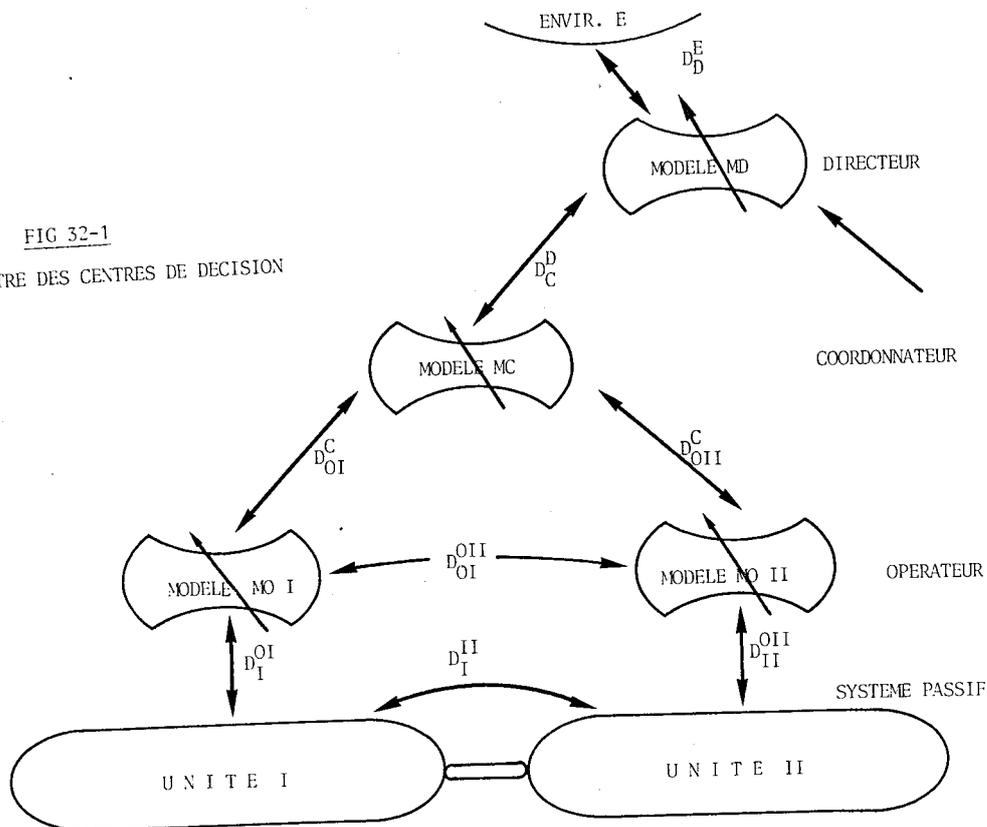
### 320 RELATIONS ENTRE CENTRES DE DECISION

L'expérience initiale de chaque participant à la conduite conditionne la validité de sa propre décision et les conséquences sur les autres parties du système de conduite. Réciproquement on peut apprécier la qualité de l'expérience en fonction de la conduite obtenue. La traduction de l'expérience sous forme d'un modèle inclu dans un centre de décision ouvre la voie au formalisme des relations entre les modèles et en conséquence entre les centres de décision. Ce formalisme utilise une distance qui est à la base de l'exploitation de l'approche par poursuite et des techniques appropriées dans l'analyse et la synthèse des systèmes de conduite.

Un exemple de conduite du procédé chimique (Par. 230) illustre ces propositions. Reprenons la figure (F 23-4) qui représente l'organisation du système de conduite sur trois niveaux et retenons dans la figure (F 32-1) les modèles qui servent à l'élaboration des décisions dans ce système de conduite. Les relations entre les modèles sont représentées par des distances. Ces distances qui sont susceptibles de prendre des formes diverses peuvent caractériser les différences entre les modèles (paramètres, structures, natures) ou les différences entre les variables de ces modèles (entrées, états, sorties) à chaque instant ou pendant une période déterminée.

Remarquons que dans notre exemple le modèle d'opérateur (MO I, MO II) assure une représentation relativement fine de l'élément passif (I,II) et en conséquence l'évolution de cet élément et du modèle sont

FIG 32-1  
RELATIONS ENTRE DES CENTRES DE DECISION



proches à chaque instant ( $D_I^{OI}$ ,  $D_{II}^{OII}$ ). Par contre, le modèle directeur (MD) ne représente que les principales caractéristiques du procédé en vue de définir une évolution à long terme conforme aux tendances de l'environnement (E).

Le modèle coordonnateur (MC) se situe à un niveau intermédiaire et il nous servira d'exemple pour présenter les différentes fonctions (233) du centre de décision qui lui est associé.

L'accumulation des expériences initiales (PO) consiste dans la création du modèle coordonnateur (MC). En supposant que les modèles des niveaux voisins (opérateurs (MO I, MO II) - directeur (MD)) soient connus, on peut exiger que ce modèle se situe entre eux du point de vue de la finesse de représentation. Cette situation médiane peut être formalisée par les distances entre les modèles de niveaux voisins et le modèle coordonnateur ( $D_C^D$ ,  $D_{OI}^C$ ,  $D_{OII}^C$ ). Ces distances caractérisent la différence

de structure et de dimension des modèles (degré d'agrégation) ou représentent une différence dans la nature ou dans les paramètres des modèles.

A l'aide des distances entre les modèles on peut créer un modèle coordonnateur (MC) répondant aux conditions suivantes :

$$\text{MC : } M = \min_{M} [f_{I \text{ IICD}}(D_{OI}^C, D_{OII}^C, D_C^D)] \quad (320-1)$$

$CO_1, CO_2$

$$CO_1 : f_I(D_{OI}^C) = f_{II}(D_{OII}^C)$$

$$CO_2 : f_{I \text{ II}}(D_{OI}^C, D_{OII}^C) = f_D(D_C^D)$$

La condition ( $CO_1$ ) traduit le fait que le modèle coordonnateur doit représenter valablement toutes les parties du système. La qualité de la représentation de chaque partie au niveau du modèle coordonnateur est donnée par la relation entre les fonctions ( $f_I$ ) et ( $f_{II}$ ). La condition ( $CO_2$ ) assure la position intermédiaire du modèle coordonnateur (MC) par rapport aux deux niveaux voisins (opérateur-directeur) en ce qui concerne la qualité et la complexité du modèle.

Remarquons que si le modèle directeur n'est pas défini et que si l'on ne connaît que les modèles opérateurs (MOI), (MOII) qui représentent valablement les éléments du système passif (I), (II) et l'environnement (E), le problème consiste à introduire entre le niveau opérateur et l'environnement deux niveaux avec leurs représentations par des modèles. Les distances entre ces niveaux définissent la qualité des modèles et des expériences conservées. Ceci ne peut pas être défini sans tenir compte du rôle que jouent ces modèles dans un système de conduite. La solution se trouve dans la création (identification) des modèles orientée en vue de leur future utilisation (forme de conduite) compte tenu des contraintes de représentation (dimensions, nature).

La coopération avec le niveau directeur (PI) peut être assurée par la poursuite du directeur par le coordonnateur, c'est-à-dire par la poursuite entre leurs modèles. La distance  $(D_C^D)$  représente les différences entre les variables correspondantes de ces deux niveaux. Cette poursuite assure la meilleure réalisation des objectifs du directeur par le déplacement du modèle coordonnateur grâce à la conduite  $(u_C)$ .

$$u_C = \min_{u_C} (D_C^D) \quad (320-2)$$

Remarquons que la conduite optimale  $(u_C)$  est liée à la différence entre les modèles directeur et coordonnateur (structure, nature, paramètre) ainsi qu'à l'évolution du modèle directeur. En conséquence, la distance optimale  $(D_C^D)$  est d'autant plus petite que ces différences sont réduites.

La création des environnements (PII) des opérateurs consiste à formuler des objectifs et des contraintes qui, étant poursuivis (ou respectés) par chaque opérateur, assurent un fonctionnement souhaité à l'ensemble. Comme le modèle coordonnateur représente l'ensemble des éléments qu'il doit conduire, son évolution, déterminée par la coopération (PI), constitue une prévision de l'évolution de l'ensemble aussi bonne que possible, compte tenu de sa qualité.

Cette qualité caractérise la représentativité du modèle du coordonnateur et elle est définie au cours de l'accumulation des expériences (PO). Ce modèle coordonnateur est en général plus simple que l'ensemble des modèles opérateurs, même s'il les représente de façon satisfaisante. Ceci entraîne une distance non nulle  $(D_{OI}^C)$ ,  $(D_{OII}^C)$  entre les variables du modèle coordonnateur et des modèles opérateurs qui poursuivent le coordonnateur. Les entrées des modèles (MOI) (MOII) obéissent aux relations suivantes :

$$u_{OI} = \min_{u_{OI}} (D_{OI}^C)$$

(320-3)

$$u_{OII} = \min_{u_{OII}} (D_{OII}^C)$$

L'amélioration des expériences (PIII) utilisées pour la coordination consiste à modifier les propriétés ou le comportement du modèle coordonnateur dans le but d'améliorer la coordination (coopération-crédation). La modification est élaborée à partir du comportement des opérateurs ou éventuellement de celui des unités conduites par eux. Les distances  $(D_{OI}^C)$   $(D_{OII}^C)$  mesurent les difficultés de la poursuite du coordonnateur par les opérateurs.

Cette amélioration du modèle consiste dans l'adaptation de ses paramètres, dans la modification de sa structure ou dans son remplacement par un autre modèle meilleur. L'amélioration du fonctionnement de l'ensemble complexe peut être atteint aussi par une modification de l'évolution (état) du modèle coordonnateur atteinte par le changement ou la correction de l'environnement de ce modèle en fonction des résultats souhaités. De cette manière on peut assurer une répartition convenable des conséquences de perturbations, de contraintes ou d'interactions entre opérateurs (OI, OII) et entre éléments passifs (I, II)  $(D_{OI}^{OII})$  ou  $(D_I^{II})$  (F 32-1).

L'amélioration du modèle et de son évolution peuvent être exprimées par (320-1).

$$\begin{bmatrix} u_C \\ M' \end{bmatrix} = \min_{\substack{M, u \\ CO_1, CO_2}} f(D_C^D, D_{OI}^C, D_{OII}^C) \quad (320-4)$$

Le comportement de base des autres centres de décision du système de conduite est analogue à celui du coordonnateur que nous venons d'analyser. Remarquons toutefois quelques particularités des centres d'opérateurs qui se présentent souvent.

La description d'un même élément passif par plusieurs modèles ajoute aux fonctions coopération-crédation la fonction de localisation du meilleur modèle et son insertion dans la conduite. La localisation consiste par exemple dans la comparaison entre les distances obtenues au cours de la poursuite d'un élément passif par l'ensemble des modèles qui le représentent.

L'estimation des informations internes et non accessibles (états, paramètres) concernant un élément passif, peut être obtenue sur le modèle qui poursuit cet élément. La qualité de poursuite, mesurée par la distance obtenue, caractérisera la validité de l'estimation.

La distance entre le modèle opérateur et le système passif peut être due à la qualité du modèle et une perturbation non mesurable. La réduction de cette distance peut être réalisée par l'adaptation des paramètres et/ou des états du modèle.

Le respect des interactions ( $D_I^{II}=0$ ) entre divers éléments passifs est souvent nécessaire. Leurs valeurs prévues par le modèle coordonnateur ne peuvent pas être atteintes à cause de la simplicité de ce modèle. Le remède consiste à créer un environnement fictif qui modifie le comportement de l'élément (II) jusqu'à ce que l'entrée de l'élément (II) s'identifie avec la sortie de l'élément (I). Ceci entraîne une augmentation de la distance ( $D_{II}^{OII}$ ) éventuellement ( $D_{OII}^C$ ). Cette augmentation représente l'effort consenti par l'élément (II) pour respecter des interactions. La contribution éventuelle de l'élément (I) (modification de sa sortie) peut être faite de manière analogue par la génération d'un environnement fictif pour cet élément.

La création de l'environnement fictif est utilisée dans la commande assistée par l'opérateur. Par cet environnement l'opérateur peut modifier le comportement de certains éléments du système de conduite ou du système passif sans mettre en question le déroulement de la conduite automatique d'une autre partie du système.

L'exemple que nous avons présenté montre la complexité et la diversité des problèmes de conduite des systèmes complexes. L'analyse et la conception globales d'un système de conduite semble difficile et souvent irréalisable. C'est la raison pour laquelle on a été amené à introduire des simplifications conduisant à la décomposition du problème global. Dans le même esprit, nous proposons la décentralisation des décisions, des moyens et des traitements. Nous utiliserons cette optique dans la synthèse des algorithmes de conduite réalisés sous l'angle de la poursuite.

### 330 PROPOSITION DE FORMALISME DE POURSUITE

Dans l'analyse d'un exemple nous avons montré l'utilité d'une approche de poursuite pour certaines fonctions de conduite. Dans la suite nous proposons un formalisme nécessaire pour étudier différentes situations dans les relations entre systèmes ou éléments.

Supposons un système (S) (220-1), (F 33-1a) décrit par la relation :

$$S : y = T \{u, x, t\} \quad (330-1)$$

avec

- u - la variable d'entrée
- y - la variable de sortie
- x - l'information interne (par exemple états)
- t - la variable temps

Dans certains cas les variables externes sont partitionnées :  
(F 33-1b).

$$u = \begin{bmatrix} w \\ u' \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} v \\ y' \end{bmatrix} \quad (330-2)$$

où  $w, v$  représentent les entrées et les sorties dépendantes (intéactions)

$u', y'$  les entrées et les sorties libres

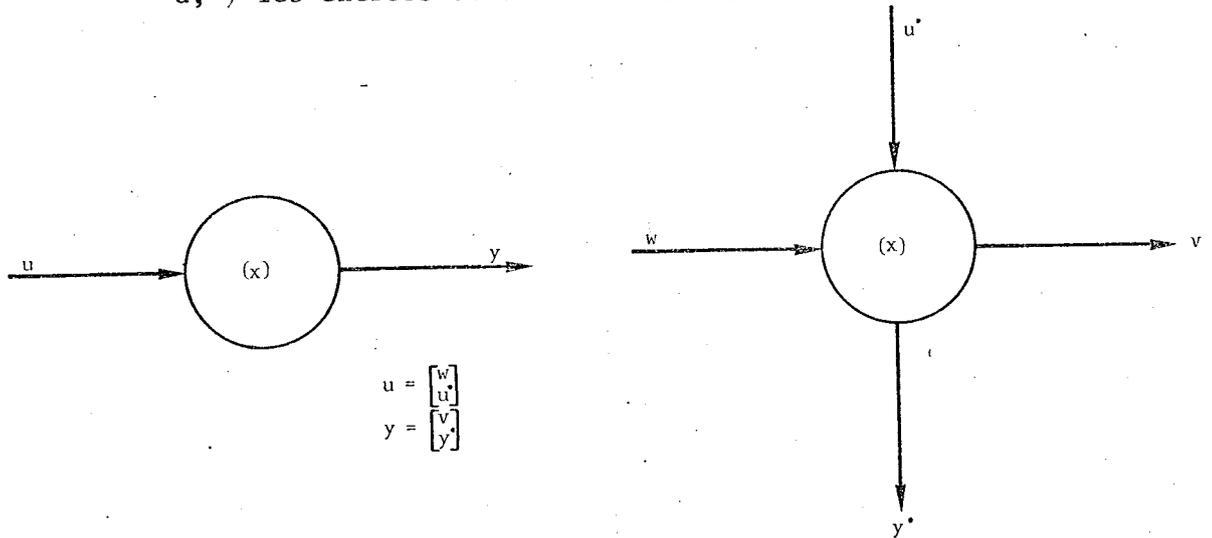


FIG 33-1

REPRESENTATION D'UN SYSTEME

Considérons un environnement (E) de ce système, caractérisé par l'existence d'objectifs pour chaque variable considérée (entrée, état, sortie).

$$E : \quad O = \{z_i, z_s, z_o\} \quad (330-3)$$

avec une partition analogue (330-2) pour les objectifs entrées ( $z_i$ ) et les objectifs sortie ( $z_o$ ).

$$z_i = \begin{bmatrix} z_w \\ z_{i'} \end{bmatrix} \quad z_o = \begin{bmatrix} z_v \\ z_{o'} \end{bmatrix} \quad (330-4)$$

Les relations entre les divers objectifs de l'environnement ne sont

pas en général spécifiées.

Formulons une distance (D) (F 33-2) entre le système (S) (représenté par ses variables) et l'environnement (E) représenté par ses objectifs).

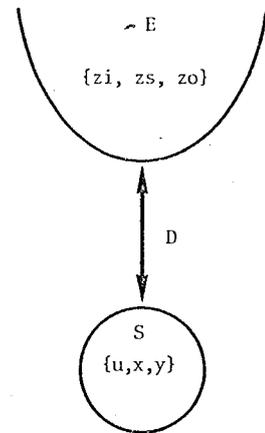


FIG 33-2

POURSUITE D'UN ENVIRONNEMENT

$$D_{S}^{E} : D_{is} = D_{u \ x \ y}^{z_i \ z_s \ z_o} = D \{z_i, u ; z_s, x ; z_o, y ; t\} \quad (330-5)$$

De manière analogue on peut formuler les distances qui tiennent compte uniquement des variables extérieures ou d'une partie de ces variables. Par exemple :

$$D_{i0} = D_{u \ y}^{z_i \ z_o} = D \{z_i, u ; z_o, y, t\} \quad (330-6)$$

$$D_o = D_y^{z_o} = D \{z_o, y ; t\} \quad (330-7)$$

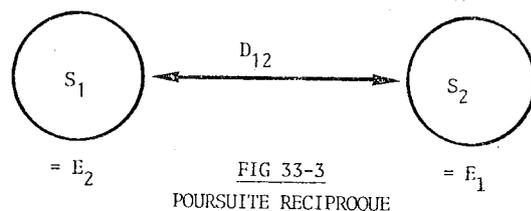
Le problème de poursuite (P) consiste à déplacer le système (S) de manière à maintenir ou à réduire sa distance (D) par rapport à l'environnement (E) qui peut évoluer dans le temps ou en fonction d'autres considérations. Le système (S) peut être déplacé grâce à ses entrées (u). On détermine alors des entrées du système (u) satisfaisant les conditions de poursuite.

La poursuite optimale (PO) est caractérisée par l'obtention de la plus petite distance (D) entre le système (S) et l'environnement (E). La solution se trouve dans le choix des entrées (u) qui appartiennent à la

classe des entrées admissibles et qui minimisent la distance (D) (F 33-2)

$$PO : \min_u (D) \quad (330-8)$$

Pour représenter la poursuite réciproque (POR) de deux systèmes ( $S_1$ ) et ( $S_2$ ) (F 33-3), on suppose que chaque système joue le rôle de l'environnement ( $E_1=S_2$ ,  $E_2=S_1$ ) pour l'autre, ceci permettant de minimiser la distance commune. La solution consiste à rechercher les entrées ( $u_1$ ) et ( $u_2$ ) qui minimisent la distance ( $D_{12}$ ).



$$POR : \min_{u_1, u_2} (D_{12}) \quad (330-9)$$

Dans le cas de poursuite simultanée (POS) de deux environnements ( $E_1, E_2$ ) (F 33-4) on peut former une distance composée ( $D_1, D_2$ ). La meilleure position du système (S) est assurée par la poursuite optimale simultanée.

$$POS : \min_u (D_1, D_2) \quad (330-10)$$

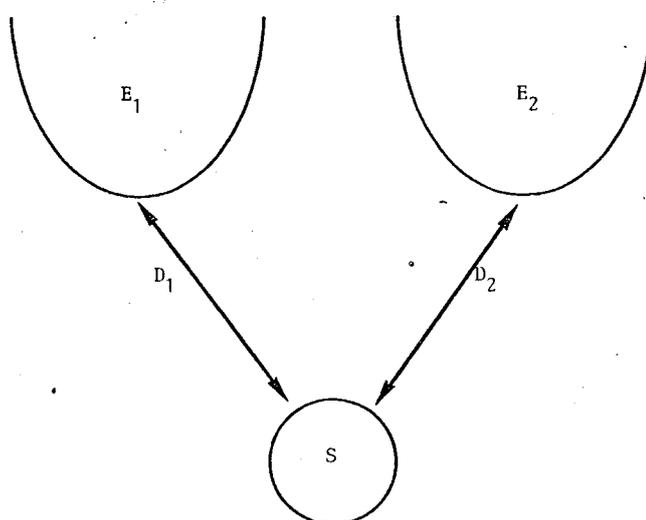


FIG 33-4  
POURSUIITE SIMULTANEE

L'extension à la poursuite de plusieurs systèmes est analogue (F 33-5). Les systèmes peuvent se poursuivre mutuellement (poursuite réciproque), en poursuivant aussi un ou plusieurs environnements indépendants de leurs actions. La formulation d'une distance composée, ramène le problème au cas précédent.

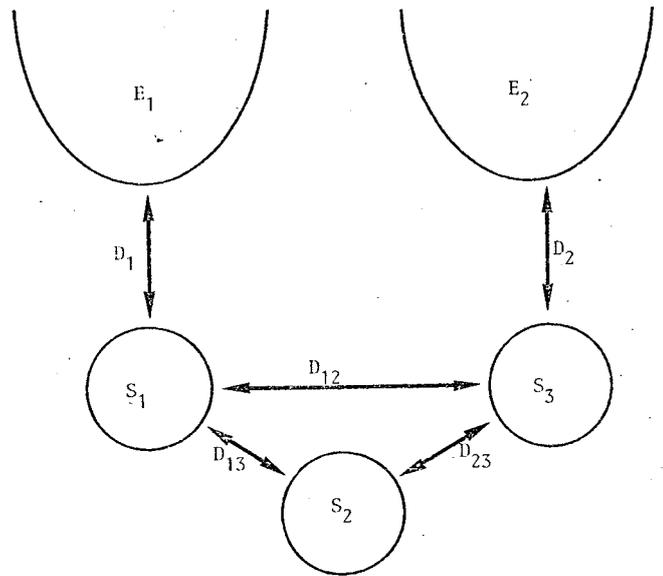


FIG 33-5  
POURSUITE DE PLUSIEURS SYSTEMES

$$\min_{u_1, u_2, u_3} (D_1, D_2, D_{12}, D_{13}, D_{23}) \quad (330-11)$$

La poursuite paramétrique (POP) utilise un autre type d'action que les entrées du système pour réduire la distance par rapport à l'environnement. Il est possible en effet d'agir sur les paramètres (p), la structure (s) ou la nature (n) du système. Le problème de poursuite optimale consiste dans la recherche d'une ou plusieurs de ces actions (p), (s), (n), qui appartiennent aux classes correspondantes et qui minimisent la distance (D).

$$\text{POP : } \min_{p, s, n} (D) \quad (330-12)$$

Après avoir représenté les relations entre les systèmes et leur environnement par des distances, nous avons montré le sens d'une poursuite

de systèmes. L'application de la technique de poursuite dans la description et dans l'analyse des situations que l'on traite couramment dans l'automatisation des procédés peut montrer son utilité. Elle conduit à la synthèse d'algorithmes utilisables au cours de ces situations, facilement réalisables et compris par les utilisateurs.

Dans les paragraphes suivants de ce chapitre, nous examinons des situations d'automatisation sous l'angle de la poursuite.

### 340 POURSUITE D'UN ENVIRONNEMENT

Ce cas, représenté par une action agissant sur un système poursuiveur pour le rapprocher d'un environnement, est à la base de la majorité des situations rencontrées au cours de la commande des systèmes isolés. Nous pourrions les répartir en deux groupes "Stabilisation" et "Estimation".

#### 341 Stabilisation du système (asservissement, régulation).

Le problème de stabilisation d'un système consiste à développer une action et à l'appliquer au système pour que sa situation soit à chaque instant la meilleure (ou la moins défavorable) par rapport à l'environnement considéré.

Sous l'angle de la poursuite on calcule les entrées ( $u$ ) du système ( $S$ ) qui minimisent une distance ( $D$ ) par rapport à l'environnement ( $E$ ) (F 34-1).

$$u = \min_u (D_S^E) \quad (341-1)$$

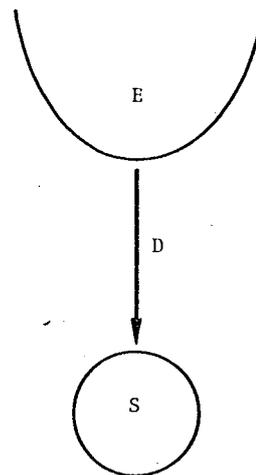


FIG 34-1  
STABILISATION

La formulation de la distance (D) permet de prendre en considération soit toutes les variables du système (Diso), soit les entrées et sorties (Dio), soit seulement la sortie (Do) (voir équations (330-5,6,7)).

Le comportement du système, ainsi que celui de l'environnement peut être indépendant du temps. Dans ce cas le problème de poursuite se ramène à un problème d'optimisation statique. La distance (D) représente le critère à minimiser. Dans le cas contraire la distance peut tenir compte de la situation actuelle (instantanée), du passé, du futur, ce qui conduit souvent à l'exprimer par la somme ou l'intégrale des distances instantanées.

La stabilisation du système par rapport à un environnement invariant, caractérise tous les cas de régulations. La régulation "tout ou rien" peut être obtenue en minimisant une distance appropriée par des actions appartenant à une classe définie.

Les correcteurs mono et multivariables peuvent être caractérisés par l'élaboration d'une action à partir d'une consigne et des états ou de la sortie du système. Le choix d'une distance, associée au critère, permet de classer ces cas d'automatisation sous l'aspect de la poursuite d'un environnement qui se présente sous la forme d'objectifs constants ou éventuellement nuls.

Les efforts poursuivis ces dernières années en vue de la résolution du problème de la commande avec modèle de référence, justifiant l'intérêt qui est porté au problème de poursuite, bien que dans ce cas-là il ne soit pas traité comme tel. L'analyse des solutions existantes montre bien que le problème qui était posé, la minimisation de l'écart de sortie (Do), conduit pratiquement à la minimisation d'une distance composée entrée-sortie (Dio). La partie de cette distance correspondant aux entrées limite leurs variations par rapport à leurs objectifs qui sont souvent considérés comme nuls. Si on associe le modèle de référence à l'environne-

ment variable, et le critère à minimiser à la distance, on inclut la majorité des cas de commande avec modèle de référence dans la stabilisation dynamique par rapport à un environnement dynamique spécifié.

342 Estimation des caractéristiques du système (états, paramètres, modèles).

L'application des méthodes de la commande moderne, nécessite en général la connaissance du système (passif). Cette connaissance est représentée par son modèle, ses paramètres et ses états. On cherche à rapprocher le plus possible ces connaissances de la réalité. La difficulté consiste à recueillir ces informations ou à les déduire soit à partir d'hypothèses faites a priori, soit à partir d'autres informations si elles ne sont pas accessibles sur le système passif : ce dernier cas se présente souvent dans l'estimation des états ou des paramètres, éventuellement dans le choix d'un meilleur modèle (nature, structure).

Dans l'aspect de la poursuite le problème consiste à modifier (F 34-2) le modèle (M) et son comportement pour assurer sa meilleure position par rapport au système passif (PS). La position étant mesurée par la distance (D), on élabore l'ensemble des actions possibles (entrée (u), paramètre (p), modèle (M)), pour la minimiser.

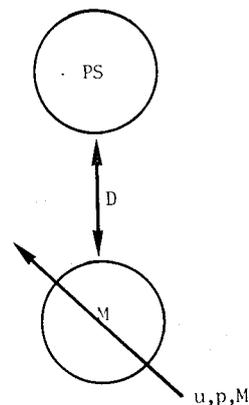


FIG 34-2  
ESTIMATION

Dans cette optique l'estimation d'état ( $x_M$ ) peut être formulée de la manière suivante :

$$x_M = f(u_M) = f(\min_{u_M} (D_M^{PS})) \quad (342-1)$$

$(u_M)$  et  $(x_M)$  sont les entrées et les états du modèle (M) dans la position qui correspond au minimum de la distance (D) par rapport au système passif (PS). Si la distance a la forme (Dio) (330-6), on tient compte des écarts des entrées et des sorties entre le système passif et le modèle dans le présent et éventuellement dans le passé. Les états mesurables sur le système peuvent être pris aussi en compte dans une forme appropriée de distance (Diso) (330-5).

Il faut remarquer que le problème d'estimation sous l'aspect poursuite, n'exige pas l'identité entre le modèle et le système. Ceci permet de prendre un modèle de nature ou de structure différente du procédé pour "interpréter" les états du procédé à travers ce modèle. Naturellement la qualité de cette forme d'estimation se dégrade avec l'augmentation de la distance (D). Si cette distance est nulle ( $D=0$ ) l'estimation est la meilleure possible.

L'estimation des paramètres (p) et la localisation du modèle parmi plusieurs qui diffèrent par leur structure (s) ou par leur nature (n) consistent à minimiser la distance (D) par rapport à ces éléments.

$$\min_{n,s,p,u} (D_M^{PS}) \quad (342-2)$$

La distance {entrée-sortie} (Dio) coïncide avec sa signification physique, car on admet dans ce cas des déviations pondérées par rapport à toutes les variables accessibles (entrée-sortie) sur le système passif.

Remarquons que la méthode d'identification, par un modèle de référence [5RR], est un cas particulier qui peut être obtenu par la minimisation paramétrique d'une distance sortie (Do) avec l'identité des entrées du modèle et du système passif ( $D_i = 0$ ).

## 350 ENVIRONNEMENT FICTIF

La situation de l'environnement influence selon des lois propres à la poursuite l'évolution du système. Ce phénomène peut être exploité pour créer un environnement qui doit conduire à la satisfaction des objectifs supplémentaires n'ayant pas été pris en compte au cours de la synthèse des algorithmes de stabilisation ou de régulation. Le respect de tels objectifs entraîne pratiquement le changement de la loi utilisée à l'origine pour la stabilisation.

L'environnement créé dans ces cas peut être appelé l'environnement fictif (Ef). il se substitue à l'environnement origine (Eo), le complète (F 35-1) ou le corrige (F 35-2). Sur le plan pratique la création d'un environnement fictif consiste en général à valoriser ou à supprimer une partie de la distance (loi de stabilisation) entre le système et son environnement origine.

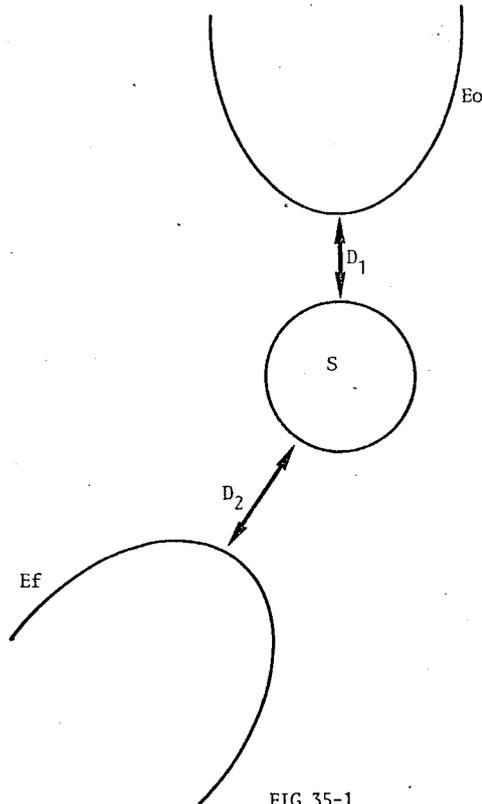


FIG 35-1  
ENVIRONNEMENT FICTIF

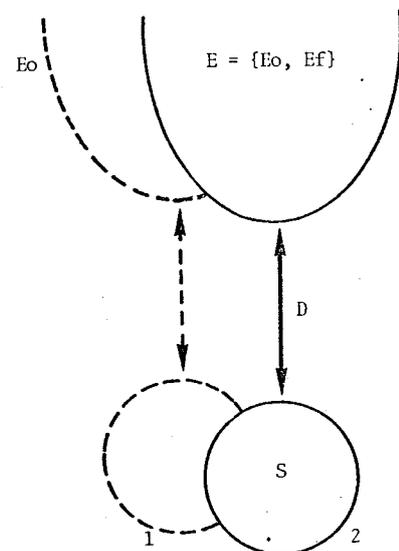


FIG 35-2  
CORRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ORIGINE

351 Valorisation d'une partie de la distance (Respect des contraintes).

La stabilisation optimale d'un système (341) détermine un compromis dans la satisfaction des objectifs de l'environnement. Supposons que certains objectifs représentent des contraintes et que celles-ci doivent être respectées rigoureusement par les variables du système (entrées, états, sorties). La satisfaction de cette exigence nécessite la contribution des autres variables non soumises aux contraintes, ce qui entraîne l'éloignement du système de l'environnement et par suite la dégradation de l'optimalité de conduite du système.

Au lieu de rechercher une solution spécifique locale pour respecter certaines contraintes, nous proposons de modifier l'environnement en cours de stabilisation chaque fois que des contraintes apparaissent. La solution réside dans les modifications des objectifs (en général ceux qui correspondent aux variables sous contraintes) jusqu'à ce que les contraintes soient respectées.

Si les lois qui définissent la stabilisation sont connues, il est possible de prédéterminer la modification de l'environnement assurant la satisfaction des objectifs prioritaires supposés connus.

Dans ces hypothèses nous proposons une conduite à deux niveaux fonctionnant de la manière suivante (F 35-2).

1er niveau : Stabilisation du système (S) par rapport à l'environnement (E) sans tenir compte d'objectifs ou de contraintes prioritaires (par exemple variables imposées). La stabilisation (sta) est décrite par l'équation (341-1).

$$\text{sta : } \quad u = \min_u (D_S^E) \quad (351-1)$$

2ème niveau : La modification de l'environnement origine (Eo) est réalisée par l'adjonction d'un environnement fictif (Ef). Sa définition dépend du degré d'insatisfaction (ins) des objectifs prioritaires (Op) (contraints) du système ainsi que de la loi de stabilisation (sta).

$$E = \{Eo, Ef\} \quad (351-2)$$

$$Ef = f_{\substack{\text{ins} \\ \text{sta}}} (S, Eo, Op)$$

Par exemple on souhaite respecter la valeur imposée ( $\bar{v}$ ) pour la variable (v) du système (parmi des variables (x), (y), (z)). Cette variable poursuit son objectif (z) défini par l'environnement. L'objectif fictif ( $z_f$ ) est calculé en fonction de la loi de stabilisation ( $f_{\text{sta}}$ ) et de la non satisfaction de la valeur imposée ( $v = \bar{v}$ ).

$$z_f = f_{\text{sta}}(\bar{v}-v) \quad (351-3)$$

$$\text{et } z = z_0 + z_f$$

Remarquons que la technique proposée peut résoudre le problème des contraintes en temps différé comme en temps réel.

### 352 Suppression d'une partie de la distance (correcteur poursuiveur).

La poursuite simultanée de plusieurs objectifs qui ne sont pas compatibles ne permet pas leur satisfaction simultanée. Si certains objectifs de l'environnement sont bien déterminés, d'autres peuvent évoluer librement dans certaines situations. Par exemple la sortie s'identifie à la consigne si les autres objectifs sont compatibles (objectifs entrées) avec cette exigence .

Nous proposons pour résoudre ce problème, la génération d'un environnement fictif ( $E_f$ ) correspondant à une partie des objectifs de l'environnement origine ( $E_o$ ). L'environnement fictif est créé par le système même et les variables du système considérées comme objectifs autonomes, se poursuivent elles-mêmes. Cette génération des objectifs identiques aux variables du système supprimera l'influence de ces variables dans la distance entre le système et l'environnement origine.

Supposons la réalisation d'un environnement autonome où tous les objectifs sont générés par les variables du système qui poursuit cet environnement autonome. La superposition de cet environnement autonome et d'un autre environnement qui dépend de la différence entre la position désirée et la position actuelle du système conduira celui-ci à annuler cette différence. Ce phénomène analogue à la sommation (intégration) des écarts peut être utilisé dans la correction à écart nul.

L'algorithme de poursuite fonctionne dans ce cas sur trois niveaux (F 35-3).

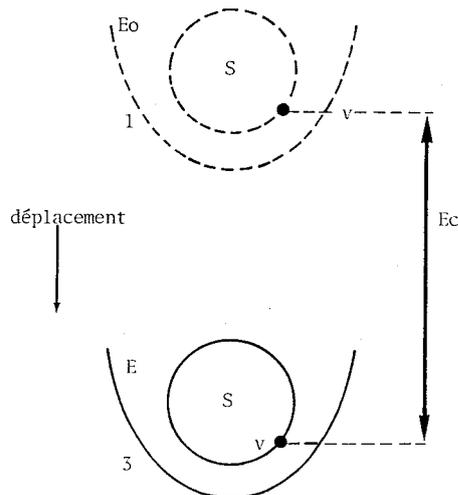


FIG 35-3

CREATION D'UN ENVIRONNEMENT AUTONOME

1er niveau : Stabilisation du système (S) (analogue au paragraphe 351) définie par :

$$\text{sta : } u = \min_u (D_S^E) \quad (352-1)$$

2ème niveau : Création de l'environnement autonome (Ea) par association du système (S) ou de ses parties à l'environnement (Ea) :

$$Ea = S \quad (352-2)$$

3ème niveau : Création de l'environnement conditionné (Ec) par la position de la variable (v) par rapport à l'objectif et sa superposition à l'environnement autonome (ou correction de celui-ci) :

$$Ec = f(z-v) \quad (352-3)$$

$$E = \{Ea, Ec\}$$

Remarquons que dans certains cas il n'est pas utile de rendre tous les objectifs autonomes. Le deuxième niveau remplace seulement une partie des objectifs et dans ce cas le troisième niveau peut être supprimé. Le comportement du système tient compte de tous les objectifs non autonomes pour trouver sa meilleure position dans ces nouvelles conditions : cela a pour conséquence la minimisation de la nouvelle forme prise par la distance, qui comporte moins de variables que la distance d'origine.

## 360 POURSUITE RECIPROQUE

Le problème de poursuite réciproque (330-9) de deux systèmes, bien connu dans la théorie des jeux [IKS], a un rôle important dans la conduite des systèmes isolés, ainsi que des systèmes complexes. La réduction d'une distance entre deux systèmes fait appel à leurs contributions mutuelles, même si les moyens utilisés par chaque système sont différents (commande, adaptation des paramètres.....). Ces propriétés facilitent la présentation des cas de commande duale et de commande décentralisée.

361 Décision duale (commande - identification).

Les résultats de la commande moderne sont conditionnés par la qualité de l'expérience initiale, représentée par un modèle. De même l'estimation de l'information interne (états ou paramètres) du système passif dépend du modèle et de l'action appliquée à ce système. Ceci se traduit par la dépendance entre l'action et l'expérience a priori, et par la possibilité de formaliser cette dépendance au moyen d'une poursuite réciproque.

Supposons deux systèmes ( $S_1$ )( $S_2$ ) dont la position relative est caractérisée par leur distance ( $D$ ) (F 36-1). La décision appliquée à chaque système a pour objectif la réduction de cette distance. Les moyens d'action de ces deux systèmes peuvent être identiques ou différents sur chacun. Sur la figure (F 36-1) on symbolise la modification des paramètres ( $p$ ) du système ( $S_1$ ) et l'entrée ( $u$ ) à appliquer sur le système ( $S_2$ ) de la façon suivante :

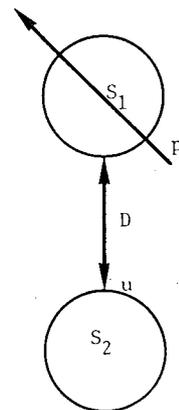


FIG 36-1  
DECISION DUALE

$$S_1 : \min_p(D) \quad (361-1)$$

$$S_2 : \min_u(D)$$

Comme exemple d'application prenons la "correction-identification". Dans ce cas le modèle ( $S_1$ ) est poursuivi par le système passif ( $S_2$ ) grâce à sa commande corrective ( $u$ ). La distance ( $D$ ) réalisée peut être réduite aussi par l'adaptation des paramètres ( $p$ ) du modèle ( $S_1$ ).

Un autre exemple de la "commande - estimation d'états" réside dans la poursuite ( $\min D$ ) du système passif ( $S_2$ ) par l'estimateur ( $S_1$ ) qui reconstitue des états, tout en agissant sur le système passif ( $S_2$ ) par sa commande ( $u$ ) afin de réduire aussi la distance ( $D$ ).

Une autre forme de la dualité dans la commande se retrouve dans la synthèse de conduite qui part du passé pour aller vers le futur (F 36-2). Elle consiste à déterminer la meilleure position du système ( $S$ ) à l'instant ( $t$ ) par rapport à l'évolution réalisée par ce système dans le passé ( $S_p$ ), et/ou l'évolution prévue dans le futur ( $S_f$ ). Les instants de référence du passé ( $\tau_1$ ) et du futur ( $\tau_2$ ) sont fixes, variables ou représentés par une série d'instantes dans la période considérée.

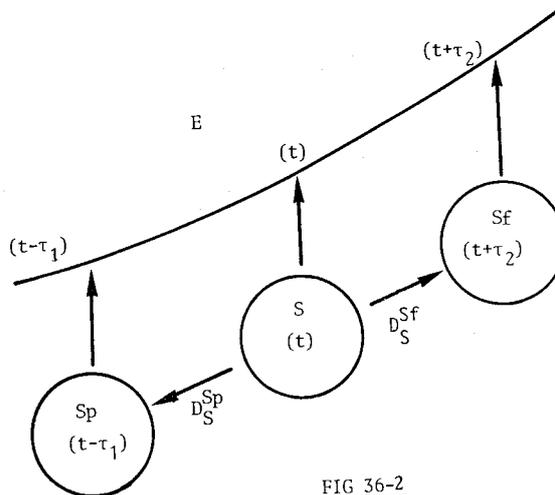


FIG 36-2  
COMMANDE DUALE

Il est évident que toutes les évolutions dépendent de l'environnement (E) à chaque instant considéré. Dans le cas d'un environnement nul, la solution du problème consiste à élaborer la décision (entrée (u), paramètre (p)....) appliquée à l'instant (t) sur le système (S), qui minimise la distance composée ( $D_S^{Sp}$ ,  $D_S^{Sf}$ ). Si la décision consiste en une action (u), on peut écrire :

$$u(t) = \min_{u(t)} (D_S^{Sp}, D_S^{Sf}) \quad (361-2)$$

Si, parallèlement on estime les paramètres (p) et les états (x) en minimisant la même distance (361-2) au cours de la commande, on assure une décision optimale caractérisée par la dualité de trois moyens d'action (p), (x), (u) dans la solution du problème traité.

### 362 Stabilisation décentralisée par coopération.

La technique de poursuite réciproque peut résoudre le problème de la conduite décentralisée où plusieurs systèmes contribuent à la réalisation d'une tâche commune. Supposons que cette tâche, représentée par l'environnement, consiste dans le respect d'un objectif prédéterminé par l'ensemble des systèmes. Certains d'entre eux sont en relation directe avec l'environnement (E) (F 36-3), d'autres uniquement avec les systèmes voisins.

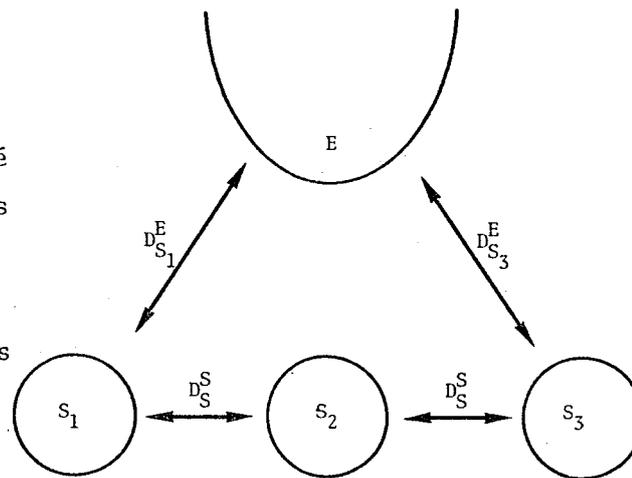


FIG 36-3

STABILISATION DECENTRALISEE PAR COOPERATION

La stabilisation d'ensemble peut être assurée de manière décentralisée lorsque chaque système détermine son entrée en fonction de l'information (distance) qui caractérise sa position vis-à-vis de son environnement proche, c'est-à-dire vis-à-vis des systèmes voisins. L'objectif de chacun est de se rapprocher (coopération) des autres. Pour l'exemple présenté sur la figure (F 36-3), on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \min_{u_1} (D_{S_1}^E, D_{S_1}^{S_2}) \\
 u_2 &= \min_{u_2} (D_{S_2}^{S_1}, D_{S_2}^{S_3}) \\
 u_3 &= \min_{u_3} (D_{S_3}^E, D_{S_3}^{S_2})
 \end{aligned}
 \tag{362-1}$$

Remarquons que la définition de la distance entre des systèmes peut porter sur la comparaison de variables de même type ou de type différent dans le cas par exemple d'interactions dans un ensemble interconnecté (sorties constituant l'entrée du système aval).

### 370 POURSUITE SIMULTANEE

La commande hiérarchisée des ensembles complexes porte sur la conduite de plusieurs systèmes ou sous-systèmes. Parmi divers problèmes susceptibles de se poser, nous nous orientons vers l'analyse des fonctions nécessaires à un système de conduite décentralisée coordonnée (230). Un tel système est formé par un réseau de centres de décision, répartis sur plusieurs niveaux. Chaque partie de ce système interprète des objectifs fournis par l'environnement en vue de leur application sur les systèmes de niveau inférieur ou sur le système passif. Supposons que les relations entre des éléments du système de conduite puissent être exprimées par des distances.

371 Création d'un système intermédiaire (modèle coordonnateur).

Le système de décision assure la liaison entre l'environnement et le système passif. Son fonctionnement est fondé sur la représentation qu'il utilise. Cette représentation intermédiaire caractérise le système passif plus sommairement mais de manière mieux adaptée à la communication entre l'environnement et le système passif. Ce système intermédiaire interprète donc l'environnement d'origine pour le système passif.

La définition de ce système intermédiaire tient compte de l'environnement (E) et des systèmes (S) du niveau inférieur (éventuellement des éléments passifs) (F 37-1). La solution consiste à choisir la représentation convenable du système intermédiaire, sa structure, sa nature, ses paramètres. Ce choix doit assurer la "représentativité" du système intermédiaire vis-à-vis de toutes les parties en jeu. Il consiste, en réalité, à trouver un modèle de représentation "orientée", utilisable pour la stabilisation, la sélection ou l'amélioration du système intermédiaire et dont l'utilisation doit contribuer au meilleur comportement de l'ensemble complexe.

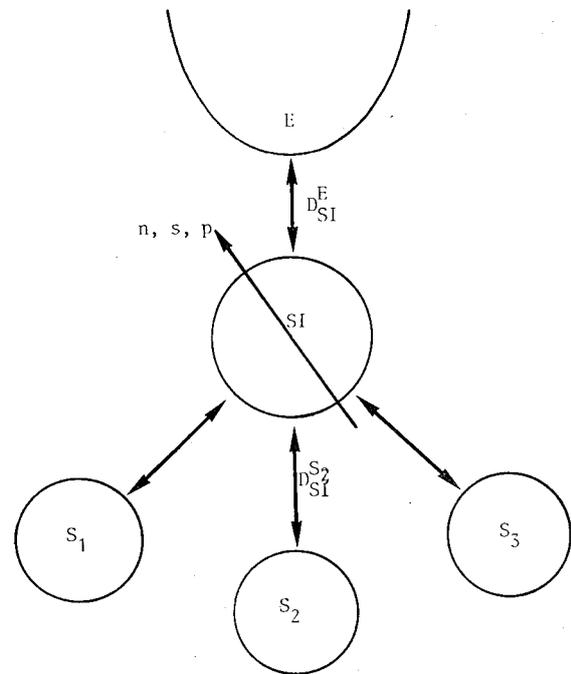


FIG 37-1  
SYSTEME INTERMEDIAIRE

La structure (s), la nature (n) et les paramètres (p) du système intermédiaire (SI) sont choisis de manière à minimiser la distance composée (environnement (E) - systèmes (S)) tout en tenant compte des entrées (u).

$$\min_{\text{nspu}} (D_{\text{SI}}^E, D_{\text{SI}}^{S_1}, D_{\text{SI}}^{S_2}, D_{\text{SI}}^{S_3}) \quad (371-1)$$

Remarquons qu'à notre proposition de modélisation "orientée" correspond une précision et une "représentativité" relative (ou variable) mesurées par la distance réalisée.

### 372 Stabilisation et coordination par poursuite.

Une fois le système intermédiaire créé, son action contribue à la stabilisation de l'ensemble des systèmes (S) par rapport à l'environnement (E) interprété par ce système intermédiaire (SI). Le fait de baser sa définition sur la minimisation de l'ensemble des distances par rapport aux parties qui sont en jeu, détermine sa représentativité (compte tenu de ses propriétés) à chaque instant considéré.

La technique de stabilisation du système intermédiaire (SI) consiste dans l'élaboration d'une entrée (u) qui minimise la distance composée (F 37-2).

$$u = \min_{\text{u}} (D_{\text{SI}}^E, D_{\text{SI}}^{S_1}, D_{\text{SI}}^{S_2}, D_{\text{SI}}^{S_3}) \quad (372-1)$$

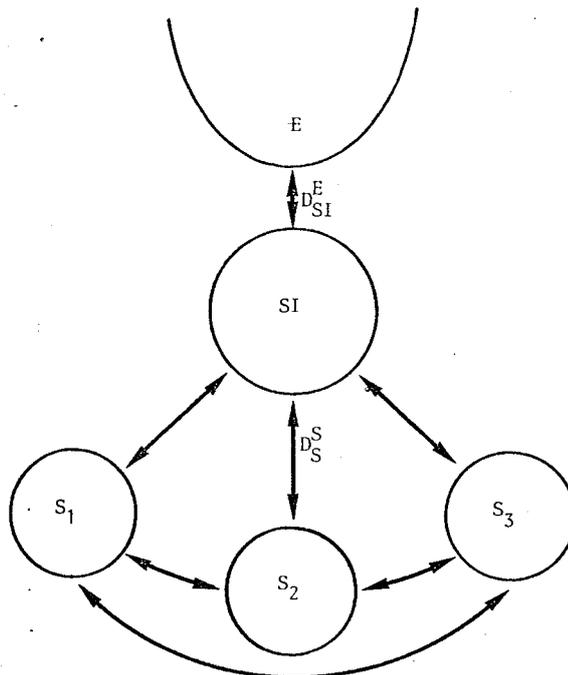


FIG 37-2  
COORDINATION PAR POURSUITE

Le comportement d'un système intermédiaire représente ainsi la meilleure réalisation des objectifs de l'environnement par l'ensemble des systèmes vus par le système intermédiaire (compte tenu de sa nature, de sa structure et de ses paramètres), en respectant la situation réelle des systèmes. Pour améliorer la représentativité du système intermédiaire, il est possible d'améliorer sa connaissance (paramètres) et de minimiser la distance composée (D) (372-1) par rapport à l'entrée (u) et aux paramètres (p)

$$u = \min_{p, u} (D) \quad (372-2)$$

Car le système intermédiaire caractérise le comportement de l'ensemble ; il forme un environnement proche pour les systèmes, et formule ainsi des directives (création d'un environnement) qui peuvent être plus facilement réalisées par chaque système.

Ces systèmes sont conduits de manière à minimiser leur distance par rapport aux parties du système intermédiaire qui les représentent et par rapport aux autres systèmes (F 37-2). Ce comportement contribue à la satisfaction des objectifs de l'environnement (E) et assure ainsi une forme de coordination sous-optimale grâce à la poursuite du système intermédiaire (SI). Ce système, en général simplifié, est appelé souvent modèle coordonnateur, modèle global, modèle de niveau... Ce système intermédiaire répartit les tâches pour chaque système qui coordonne de manière à assurer leur cohérence dans la réalisation d'un but global présenté par l'environnement. Une simplification du système intermédiaire trop poussée entraîne l'incohérence dans la réalisation des tâches et en conséquence des différences importantes (intéactions) entre les systèmes. La stabilisation décentralisée (362) réalisée simultanément sur l'exemple présenté (F 37-2) corrige ces erreurs. De même son apport est important en cas de défaillance du système intermédiaire car il permet

d'assurer le fonctionnement, même dégradé, de l'ensemble en cas d'absence de directives du système intermédiaire.

Dans l'exemple présenté (F 37-2), le comportement du système ( $S_2$ ) est conditionné par :

$$u_2 = \min_{u_2} (D_{S_2}^E, D_{S_2}^{S_1}, D_{S_2}^{S_3}) \quad (372-3)$$

Il en est de même pour les autres systèmes.

La minimisation simultanée des distances (372-1) qui régissent le comportement du système intermédiaire et de chaque système (372-3), réalise la stabilisation et la coordination de l'ensemble par rapport à l'environnement défini.

### 373 Sélection d'un système intermédiaire (localisation d'un modèle).

La création d'un système intermédiaire (371) est fondée sur les caractéristiques (structure, nature, régime, comportement...) de l'ensemble des systèmes et de l'environnement. Si ses caractéristiques changent, il est opportun de créer plusieurs systèmes intermédiaires, chacun étant associé à une particularité envisagée.

La sélection d'un système parmi plusieurs possibles consiste dans la comparaison des distances entre le système (S) considéré et les systèmes voisins pris en compte (F 37-3).

Dans l'exemple représenté sur la figure (F 37-3) le choix consiste dans la résolution de :

$$\inf [(D_{SI_1}^E, D_{SI_1}^S) ; (D_{SI_2}^E, D_{SI_2}^S) ; (D_{SI_3}^E, D_{SI_3}^S)] \quad (373-1)$$

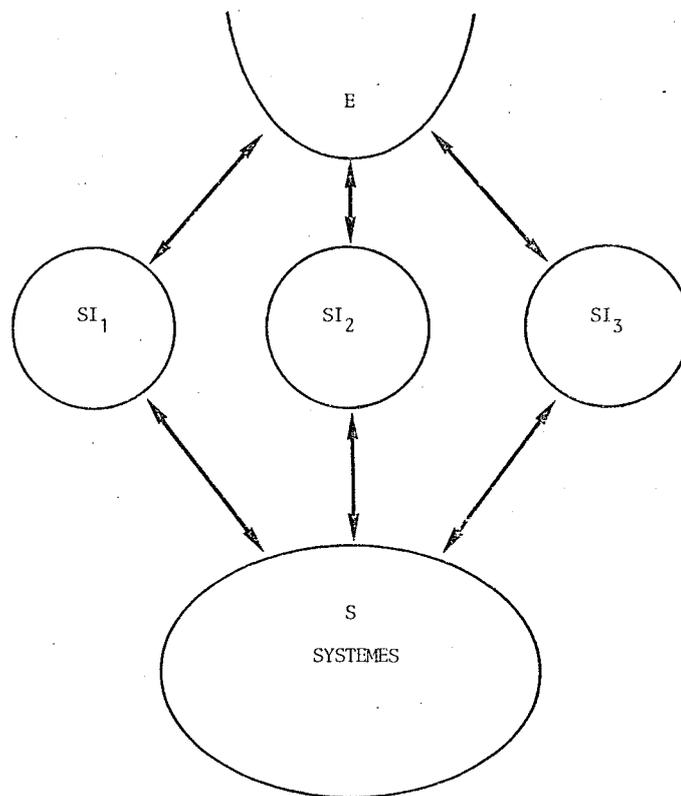


FIG 37-3

SELECTION D'UN SYSTEME INTERMEDIAIRE

Parfois on prend en considération seulement les relations avec l'environnement ou au contraire les relations avec les systèmes (S.). Le premier cas est utilisé dans le choix d'une structure physique de l'ensemble des systèmes [3BN] [3Bi2] qui assure la meilleure réalisation des objectifs de l'environnement. Le deuxième cas est à la base de la localisation d'un meilleur modèle parmi plusieurs qui peuvent représenter le système passif [3Mo].

#### 374 Correction et coordination duale par amélioration.

La technique de poursuite simultanée permet d'analyser des erreurs dans le comportement du système passif par rapport à son modèle, utilisé pour l'élaboration de l'action appliquée à ce système.

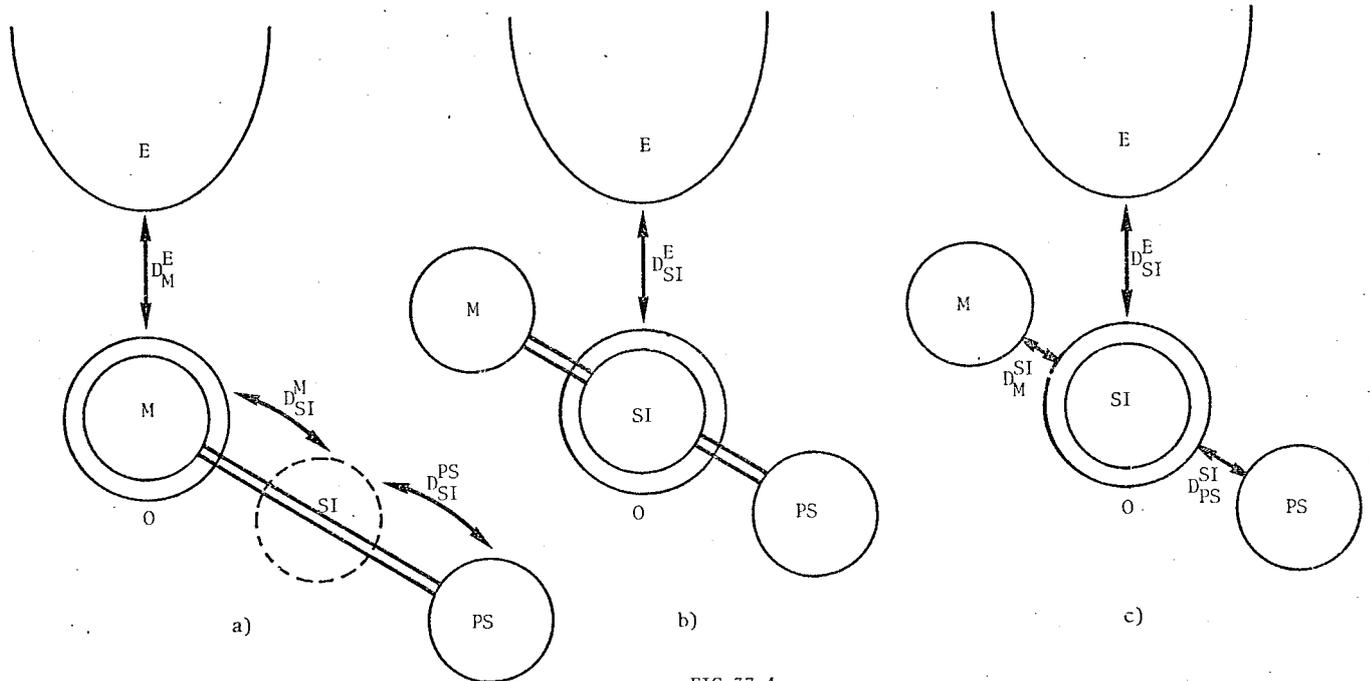


FIG 37-4

CORRECTION ET COORDINATION DUALE

Une observation de la figure (F 37-4a) montre la stabilisation du modèle (M) par rapport à l'environnement (E) par la minimisation de la distance ( $D_M^E$ ) (330-5). Les erreurs de modélisation du système passif (PS), la simplification trop poussée du modèle ou des perturbations sur le système passif réel entraînent une position du système passif (PS) différente de celle de son modèle (M), ayant la position optimale (O).

Nous proposons de créer (371-1) un système intermédiaire (SI) (F 37-4a) qui, par analogie, peut être appelé "centre de gravité" de l'ensemble {modèle M-système PS}. Couramment on prend pour le système intermédiaire (SI) une représentation (nature, structure éventuellement paramètre) identique à celle du modèle (M). La poursuite simultanée du

modèle (M) et du système (PS) détermine la position du système intermédiaire (SI) qui diffère par ses états des systèmes voisins (M) et (PS).

Le système intermédiaire représente l'ensemble {M-PS}, où peut s'élaborer une action appliquée sur l'ensemble {M-SI-PS} (F 37-4b) de manière à assurer la stabilisation (330-5) du système intermédiaire (SI) par rapport à l'environnement (E)(SI=0). Ceci entraîne un éloignement du modèle par rapport à la position optimale (augmentation de  $(D_E^M)$ ).

Un double but consiste à positionner l'ensemble {M-PS} par rapport à l'environnement et à réduire la distance entre modèle (M) et système (PS). La figure (F 37-4c) montre la réduction de cette distance par la poursuite complémentaire du système intermédiaire (SI) par le système passif (PS) ce qui amène la réduction de la distance entre modèle et système (PS) : à la limite on serait conduit à leur association avec le système intermédiaire (SI) qui se trouve dans la position optimale (0).

Dans nos propositions, nous avons considéré que le modèle (M) et le système intermédiaire (SI) représentent valablement le système passif (PS) qui poursuit (M) (compte tenu des contraintes de représentation). Dans ce cas, toutes les différences dans l'évolution entre modèle (M) et procédé (PS) sont introduites comme des modifications des états internes du modèle (M) (éventuellement (SI)) qui corrigent le système passif (PS). Une autre action duale réside dans l'amélioration du modèle (M) éventuellement du système intermédiaire (SI). Cette amélioration peut être obtenue soit par l'identification des paramètres du procédé (PS), soit par une agrégation dans le cas de connaissances détaillées du système passif (PS), soit enfin par une localisation du modèle si la description multiple (du (PS)) est envisagée.

La solution du problème exposé peut faire appel à la stabilisation décentralisée (362) dans laquelle chaque système établit séparément ses actions dans le sens d'une coopération mesurée par les distance vis-à-vis

des systèmes les plus proches. Il est possible dans ce cas de prendre en compte les diverses formes de distances et d'étudier éventuellement un problème de multicritère dans un ensemble complexe.

Pour l'exemple présenté (F 37-4) et dans le cas de modèles (M) et (SI) définis, on peut déterminer la conduite des systèmes sous les formes suivantes :

$$u_{SI} = \min_{u_{SI}} \{D_{SI}^E, D_{SI}^M, D_{SI}^{PS}\} \quad (373-1)$$

$$u_M = \min_{u_M} \{D_M^{SI}, D_M^E\} \quad (373-2)$$

$$u_{PS} = \min_{u_{PS}} \{D_{PS}^M, D_{PS}^{SI}\} \quad (373-3)$$

Le but global peut être représenté par la minimisation de l'ensemble des distances par les trois actions :

$$\min_{u_{SI}, u_M, u_{PS}} \{D_{SI}^E, D_M^E, D_{PS}^E ; D_{SI}^M, D_{SI}^{PS}, D_{PS}^M\} \quad (373-4)$$

Dans les cas simples la minimisation de la distance ( $D_{PS}^M$ ) dans l'équation (373-4) est remplacée par l'action ( $u_M$ ) élaborée suivant (373-2).

Remarquons que la technique que nous proposons ici est utilisable dans la coordination des systèmes dynamiques par la poursuite d'un modèle réduit (M). Dans ce cas (PS) représente un ensemble de systèmes qui poursuivent le modèle (M), stabilisé par rapport à l'environnement (E). L'existence de la distance entre (M) et (PS) est principalement due à la réduction du modèle (M). Elle est exprimée par les écarts entre les interactions prévues par le modèle (M) et leurs valeurs réelles obtenues sur le procédé (PS). La technique exposée conduit à la réduction de ces écarts et à l'amélioration de la réalisation des objectifs de (E) par l'ensemble complexe (PS).

# SYNTHESE DES ALGORITHMES TEMPS REEL

CHAPITRE 4SYNTHESE DES ALGORITHMES TEMPS REEL.

Les chapitres précédents ont eu comme but de montrer que l'approche par poursuite de la conduite des systèmes constitue dans l'histoire de l'automatique un développement logique qui peut être utile, comme nous avons essayé de le montrer, dans la résolution des problèmes que pose actuellement l'automatisation. Cette utilité réside dans un symbolisme physique, souvent négligé, et dans la forme que prend la solution proposée. L'apport d'une formulation mathématique s'appuyant sur une signification physique est très appréciable dans le travail de groupes multidisciplinaires où l'automaticien joue souvent un rôle central "fédérateur".

Mais une telle philosophie ne peut pas s'imposer si elle n'est pas accompagnée des moyens nécessaires pour la mettre en application. C'est pour cette raison que la suite de notre travail consiste à développer des algorithmes qui mettent en oeuvre l'approche présentée. Cette tâche est si importante que nous pouvons seulement y apporter une contribution dans quelques cas particuliers où des hypothèses sur la forme et les propriétés des systèmes facilitent ce travail.

N'oublions pas de souligner que notre effort bénéficie de l'existence de certains algorithmes qui sont compatibles avec l'approche proposée, même si leur développement n'a pas suivi la même voie. Dans certains de nos algorithmes on retrouve d'ailleurs des algorithmes déjà existants comme cas particuliers de la solution proposée.

Le développement des algorithmes de poursuite des systèmes nécessite l'utilisation de modèles mathématiques de ces systèmes. Nous choisirons (410) des modèles dynamiques linéaires et nous remplacerons la distance par un critère quadratique. Ces deux hypothèses permettent d'exploiter la technique d'optimisation quadratique (chap. 420) pour obtenir des solutions aux problèmes posés.

Les algorithmes de poursuite généralisée présentés en Annexe (A 10), (A 20) peuvent être simplifiés et appliqués en temps réel pour la conduite des systèmes isolés (430 à 452) et des systèmes complexes (460 à 473). Dans le souci d'une application réelle et afin de ne pas alourdir le chapitre, nous ne présenterons des algorithmes temps réel que pour les systèmes discrets linéaires invariants.

#### 410 REPRESENTATION

Le représentation du système passif par un modèle dépend des caractéristiques de ce système et de l'utilisation envisagée de ce modèle qui est liée aux méthodes de conduite et à l'environnement considérés.

Le choix d'un modèle, en particulier de sa nature et de sa structure est souvent difficile parce que les objectifs qui conditionnent ce choix sont quelquefois contradictoires. Les conditions de fidélité du modèle d'une part et de simplicité de son utilisation d'autre part, ne peuvent pas toujours être remplies simultanément.

Il paraît naturel qu'aucun modèle ne puisse se substituer à la réalité et il faut admettre que la description du système passif est plus ou moins erronée. De plus, il n'existe pas de méthode universelle pour obtenir directement le meilleur modèle possible, du point de vue en particulier de sa nature et de sa structure. Les méthodes d'analyse structurale ainsi que l'analyse physique du système passif peuvent seulement guider dans le choix d'un modèle et dans l'utilisation des méthodes d'identification.

L'objectif de notre travail et des méthodes susceptibles d'être employées orientent notre attention vers les systèmes dynamiques linéaires ; la distance entre ce système et un environnement lui aussi dynamique linéaire, peut être représentée par un critère quadratique.

Les deux représentations des systèmes linéaires (forme polynomiale ou espace d'état) se prêtent bien à nos objectifs, même si les méthodes d'optimisation sont différentes (programmation dynamique ou principe de Pontryagin). Nous adopterons comme base de notre travail la représentation sous forme de variables d'état en laissant de côté l'exploitation de la représentation polynomiale qui font l'objet d'autres études [4Ba].

#### 411 Système dynamique.

Nous donnerons ici la description des systèmes dynamiques linéaires déterministes (S) sous forme d'équation d'état utilisées au cours du développement des algorithmes de poursuite (A 10) et (A 20). La description continue ou discrète peut être utilisée aussi bien pour un groupe de systèmes que pour l'environnement.

Conformément au paragraphe (222) supposons un système (222-1) :

$$S : \quad y = T \{u, x, h, \ell, t\} \quad (411-1)$$

avec les variables :

entrées	états	perturbations états    sorties	sortie
$u = \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}$	$x$	$h \quad \ell$	$y = \begin{bmatrix} v \\ y \end{bmatrix}$
			(411-2)

Ce système peut être représenté soit sous forme continue, soit sous forme discrète selon l'intervalle considéré :

continu	$t \in [0, T]$	(411-3)
discret	$t \in [0, t_1, t_2, \dots, T]$	

Supposons un système dynamique linéaire décrit par ses équations d'état et de sortie :

forme continue

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + h(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) + \ell(t) \end{cases}$$

forme discrète

$$\begin{cases} x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + h(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) + \ell(t) \end{cases}$$

(411-4)

Remarquons à partir de ce modèle une difficulté d'interprétation physique de cette expression de la sortie à la fin de la période considérée (A 20). On peut alors proposer la forme suivante :

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t-1) + \ell(t)$$

(411-5)

Les matrices et les vecteurs ont les dimensions suivantes :

$$A : [n \times n]$$

$$x : [n \times 1]$$

$$h : [n \times 1]$$

$$C : [n \times m]$$

$$y : [m \times 1]$$

(411-6)

$$\ell : [m \times 1]$$

$$B : [n \times r]$$

$$u : [r \times 1]$$

$$D : [m \times r]$$

Il existe une importante classe de systèmes invariants ayant la matrice (D) et les vecteurs (h) et ( $\ell$ ) nuls :

$$\begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

(411-7)

Les systèmes (411-4,7) sont supposés commandables et observables et les variables ne sont pas soumises à des contraintes.

(411-8)

412 Environnement.

Un environnement (E) est caractérisé par ses objectifs (O) qui prédéterminent le comportement des variables du système (S) qui poursuit cet environnement. En général on associe aux variables d'entrées (u), d'états (x) et de sorties (y) du système des objectifs correspondants :

$$E : \quad O = \{z_i, z_s, z_o; t\} \quad (412-1)$$

objectifs entrée                      objectif état                      objectif sorties

$$z_i = \begin{bmatrix} z_w \\ z_i \end{bmatrix} \quad z_s \quad z_o = \begin{bmatrix} z_v \\ z_o \end{bmatrix} \quad (412-2)$$

Les dimensions des vecteurs objectifs sont identiques à celles des variables :

$$z_i [r \times 1] \quad z_s [n \times 1] \quad z_o [m \times 1] \quad (412-3)$$

Les objectifs peuvent être constants, fonction des autres variables ou fonction du temps (t). Dans certains cas les vecteurs objectifs sont déterminés par des systèmes ou modèles objectifs de forme équivalente au système (411-4,5,7).

413 Distance.

Le point essentiel de notre approche est la notion de distance qui permettra de juger de la position d'un système soit par rapport à un autre système, soit par rapport à un environnement (de dynamique connue ou non spécifiée). Cette notion de distance est pour nous une convention issue de l'analyse physique du problème, mais nous ne trouvons pas toujours sa

formulation par la distance mathématique au sens strict. Dans un but de simplification nous utiliserons le mot de distance de manière générale et il convient donc de vérifier les propriétés de cette "distance" chaque fois qu'on envisage de réaliser des opérations avec des distances au sens mathématique.

Le choix d'une forme de distance est orienté par le souci d'une formulation commune pour exprimer aussi bien des relations entre des variables que des relations entre des systèmes ou des groupes de systèmes. L'intérêt que représente la conduite des systèmes dynamiques d'une part, la disponibilité des méthodes variationnelles d'autre part, ont conduit au choix d'une forme quadratique pour la distance .

Soit un vecteur variable :

$$v \in \mathbb{R}^n \text{ de composantes } \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

qui a une certaine position par rapport à un vecteur objectif

$$z \in \mathbb{R}^n \text{ de composantes } \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$$

Nous choisirons comme distance entre ces deux vecteurs la forme quadratique :

$$d = d_{\underset{v}{z}}^z M = (z-v)' M(z-v) \quad (413-1)$$

avec  $M$  ( $n \times n$ ) matrice diagonale semi définie positive.

Remarquons que dans certains cas l'analyse physique ou la satisfaction de certaines hypothèses mathématiques conduisent à une matrice ( $M$ ) non diagonale ce qui impose la considération des distances croisées entre les composantes de deux vecteurs. De même au cas de relation entre deux groupes de vecteurs  $(z_1-v_1)$  et  $(z_2-v_2)$  de dimension différente, la matrice ( $M$ ) devient rectangulaire dans la formulation suivante :

$$d = d_{\substack{z_1 z_2 \\ v_1 v_2}} M = (z_1 - v_1)' M (z_2 - v_2) \quad (413-2)$$

Conformément à l'équation (413-1) nous proposons comme distance quadratique instantanée la somme des distances entre variables de l'environnement ( $z_i, z_s, z_o$ ) et du système ( $u, x, y$ ) :

$$\begin{aligned} D_{\text{Miso}} &= d_i + d_s + d_o = d_u^{z_i} M_i + d_x^{z_s} M_s + d_y^{z_o} M_o \\ &= (z_i - u)' M_i (z_i - u) + (z_s - x)' M_s (z_s - x) + (z_o - y)' M_o (z_o - y) \end{aligned} \quad (413-3)$$

avec des matrices  $M_i, M_s, M_o$  de dimensions appropriées aux dimensions des vecteurs.

De manière analogue, on peut définir la distance entrée-sortie  $D_{\text{Mio}}$  et la distance sortie  $D_{\text{Mo}}$ . (413-4)

La nécessité de comparaison des évolutions dynamiques des systèmes conduit au choix d'un critère quadratique qui peut être associé à une distance. On utilise couramment la forme incluant la distance finale et la distance dynamique.

Représentation continue

$$ID_{\text{iso}} = [D_{\text{Fiso}}(T)] + \int_{t=t_0}^T [D_{\text{Qiso}}(t)] dt \quad (413-5)$$

$t \in [t_0, T]$

Représentation discrète

$$ID_{\text{iso}} = [D_{\text{Fiso}}(T)] + \sum_{t=t_0}^T [D_{\text{Qiso}}(t)] \quad (413-6)$$

Ces représentations peuvent être écrites au moyen de l'équation (413-3) où les distances entre vecteurs sont engendrées par les matrices :

$$\begin{aligned} F_i, F_s, F_o & \quad \text{matrices constantes} & (413-6) \\ Q_i(t), Q_s(t), Q_o(t) & \quad \text{matrices variables ou constantes} \end{aligned}$$

Ces matrices ont des dimensions correspondant aux vecteurs considérés ( $u(t)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$ ) (411-6) et elles sont symétriques, semi définies et positives.

#### 420 POURSUITE OPTIMALE

La poursuite de l'environnement (E) par un système (S) peut être interprétée (330-8) comme l'élaboration d'une entrée ( $u$ ) de ce système qui minimise ou la distance (D) (413-3), ou la distance (ID) (413-6)

$$u = \min_u (D) \quad (420-1)$$

$$u(t) = \min_{u(t)} (ID) \quad (420-2)$$

Le premier cas appartient à l'optimisation statique, le deuxième à l'optimisation dynamique. Les méthodes utilisées pour l'optimisation statique peuvent être classées en trois groupes :

- méthodes utilisant le gradient
- méthodes sans calcul du gradient
- méthodes de recherche statistique

Nous orientons en particulier notre attention vers la solution du cas appartenant à la classe de la commande optimale dynamique. La démarche classique exploitant la théorie de Pontryagin conduit à la solution du problème posé [1PB][1TR].

Soit (p) l'état adjoint et Hamiltonien sous la forme discrète :

$$H[x,p,u,t] = D_{Q_{iso}}(t) + p(t+1)[x(t+1)-x(t)] \quad (420-3)$$

satisfaisant l'équation :

$$p(t+1) - p(t) = - \frac{\partial H}{\partial x(t)} \quad (420-4)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité expriment la minimisation de l'Hamiltonien le long de la trajectoire d'entrée optimale ( $u^*(t)$ ) pendant la période considérée ( $t \in [t_0, T]$ ) :

$$\frac{\partial H}{\partial u^*} = 0 \quad (420-5)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial u^{*2}} \geq 0$$

La solution pour la poursuite traitée comme un cas d'optimisation quadratique est présentée en annexe du mémoire (A 10), (A 20). La poursuite généralisée de l'environnement par toutes les variables du système est résolue dans les cas continu et discret. Les diverses simplifications montrent quelle voie il faut prendre pour aboutir aux algorithmes applicables en temps réel. De même on peut estimer les limites et les conséquences de ces simplifications soit sur la généralité des algorithmes, soit sur l'optimalité des solutions proposées.

L'utilisation du matériel informatique comme support des algorithmes oriente notre intérêt vers la représentation discrète des systèmes et des algorithmes. Nous reprenons l'algorithme général (A 21-16) et nous l'adaptions aux critères et conditions couramment utilisés (A 22-9).

L'entrée (u) d'un système invariant (S) (411-7) qui poursuit l'environnement (E) (412-1) en minimisant la distance dynamique (IDiso) (413-6) peut être écrite sous la forme suivante :

$$u(t) = -L(t)x(t) + S(t)B'g(t+1) + S(t)Q_i z_i(t) \quad (420-6)$$

avec

$$\begin{aligned} L(t) &= S(t)B'K(t+1)A \\ S(t) &= [Q_i + B'K(t+1)B]^{-1} \end{aligned} \quad (420-7)$$

où la matrice de Riccati (K) et le vecteur forcé (g) sont calculés à partir des équations suivantes :

$$K(t) = A'K(t+1)A - A'K(t+1)BS(t)B'K(t+1)A + Q_s + C'Q_oC \quad (420-8)$$

$$\begin{aligned} g(t) &= [A' - A'K(t+1)BS(t)B']g(t+1) \\ &\quad - A'K(t+1)BS(t)Q_i z_i(t) + Q_s z_s(t) + C'Q_o z_o(t) \end{aligned} \quad (420-9)$$

Les conditions limite pour (g(T)) et (K(T)) sont fonctions de la forme de la distance finale. Si on ne tient compte que des états ( $D_{F_s}$ ) (413-4), on obtient :

$$\begin{aligned} K(T) &= F_s \\ g(T) &= F_s z_s(T) \end{aligned}$$

Notre souci est une construction progressive du système de conduite des procédés industriels complexes ce qui impose la compatibilité des algorithmes ainsi que leur modification facile en vue de les adapter à de nouvelles conditions. Les algorithmes de commande des systèmes isolés doivent être utilisables aussi pour la conduite des systèmes complexes. Dans cette optique l'exigence d'optimalité de la solution (en particulier globale) semble moins importante dans la commande des procédés industriels.

Cette condition facilite la simplification des algorithmes en vue de leur adaptation en temps réel et de leur adaptation aux diverses situations qui se présentent en automatique.

#### 430 POURSUITE D'UN ENVIRONNEMENT PAR UN SYSTEME

Nous allons traiter les problèmes de la commande d'un système isolé qui est stabilisé par rapport à un environnement se présentant par l'ensemble des objectifs générés par un ou plusieurs modèles de référence.

#### 431 Stabilisation d'un système.

Dans le cas d'un environnement avec des objectifs constants (F 43-1), on remarque deux phases de stabilisation :

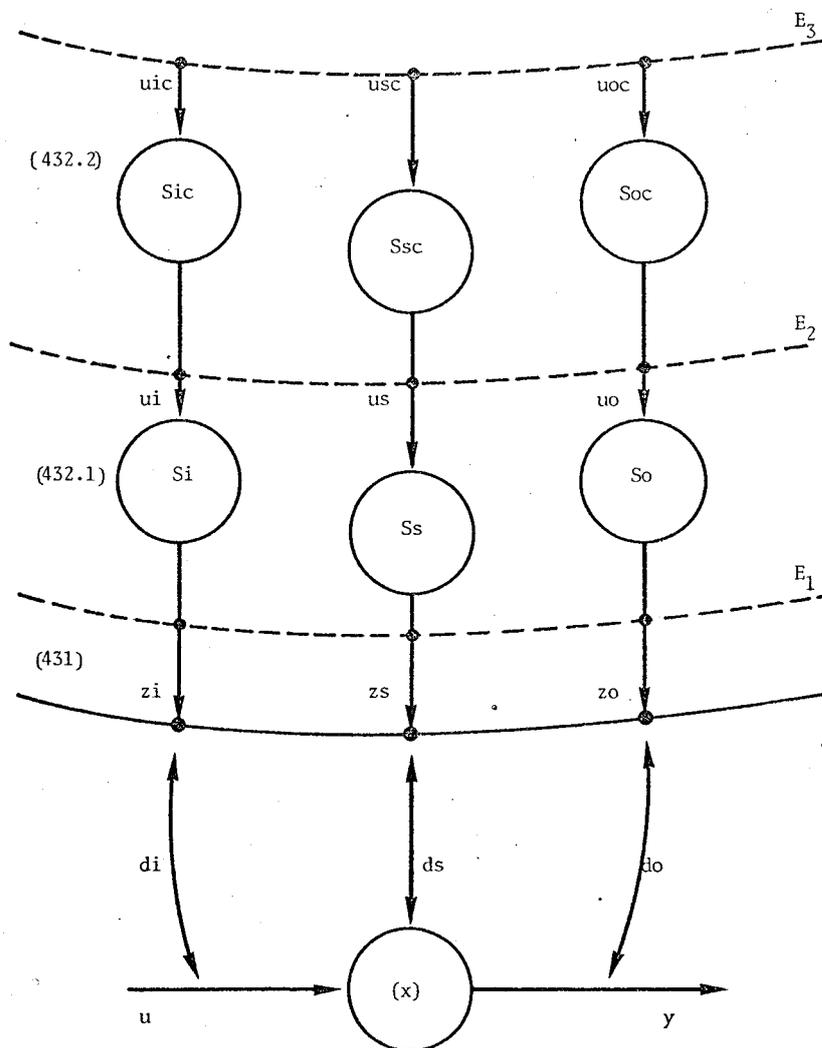


FIG 43-1

STABILISATION ET POURSUITE DES VARIABLES OBJECTIFS

- La première phase est caractérisée par le déplacement du système à partir du point initial vers un point final. Ce déplacement dépend des états du système et du bouclage qui tient compte des propriétés du système et de la distance.
- La deuxième phase est caractérisée par le maintien de la position définitive du système compte tenu de ses propriétés, de la forme de la distance et des objectifs de l'environnement.

L'entrée ( $u$ ) du système ( $S$ ) étant déterminée par l'équation (420-6) nécessite la définition du vecteur forcé ( $g$ ) (420-9). Celui-ci dépend des propriétés du système et de l'environnement et il est fonction des variables objectifs ( $z_i$ ) ( $z_s$ ) ( $z_o$ ). Ces variables supposées constantes dans l'horizon considéré peuvent assurer pour une certaine forme de la distance finale, des valeurs constantes pour ( $g$ ) et pour ( $K$ ) (A 23-8,9). Si les objectifs varient, l'origine de l'horizon est déplacé de façon à coïncider avec l'instant de la variation.

L'application de ces hypothèses (A 23-9) permet d'écrire l'équation de conduite du système (420-6) sous la forme représentée sur la figure (F 43-2).

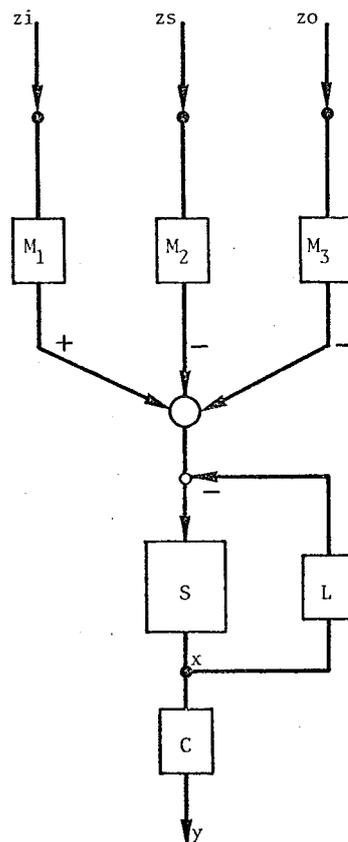


FIG 43-2

ALGORITHME DE STABILISATION DU SYSTEME

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 z_i(t) - M_2 z_s(t) - M_3 z_o(t) \quad (431-1)$$

$$\begin{aligned} \text{avec} \quad L &= SB'KA \\ M_1 &= S[B'(G'-I)^{-1}L'+I]Q_i \\ M_2 &= SB'(G'-I)^{-1}Q_s \\ M_3 &= SB'(G'-I)^{-1}CQ_o \end{aligned} \quad (431-2)$$

$$\text{où} \quad S = [Q_i + B'KB]^{-1}$$

K est la solution de l'équation (420-8)

$$A'KA - A'KBSB'KA + Q_s + C'Q_oC = 0$$

#### 432 Poursuite des objectifs engendrés par modèles de références.

L'algorithme de stabilisation présenté dans le paragraphe précédent (431) peut être adapté au cas de l'évolution dynamique de l'environnement. La connaissance de cette évolution permet de déterminer la valeur du vecteur forcé (g) et ainsi de l'entrée (u) qui stabilise le système en poursuivant des objectifs dynamiques par les variables du système (F 43-1).

##### 432.1 Entrées des modèles constantes.

Supposons que les objectifs de l'environnement pour chaque variable du système commandé soient engendrés par les modèles linéaires (Si), (Ss), (So) (A 23-10). Les entrées de ces modèles (ui), (us), (uo) sont supposées constantes (A 23-11). Ce sont ces entrées et les états de ces modèles (xi), (xs), (xo) qui permettent [4BC] de calculer le vecteur forcé (g) (A 23-22, 23, 24, 25) et de déterminer ainsi l'entrée (u) (A 23-4) du système (S) (A 23-1) sous la forme suivante (F 43-3) :

$$\begin{aligned}
 u(t) &= -Lx(t) \\
 &-M_1 u_i(t) + M_2 x_i(t) \\
 &+ M_3 u_s(t) - M_4 x_s(t) \\
 &+ M_5 u_o(t) - M_6 x_o(t)
 \end{aligned}$$

(432-1)

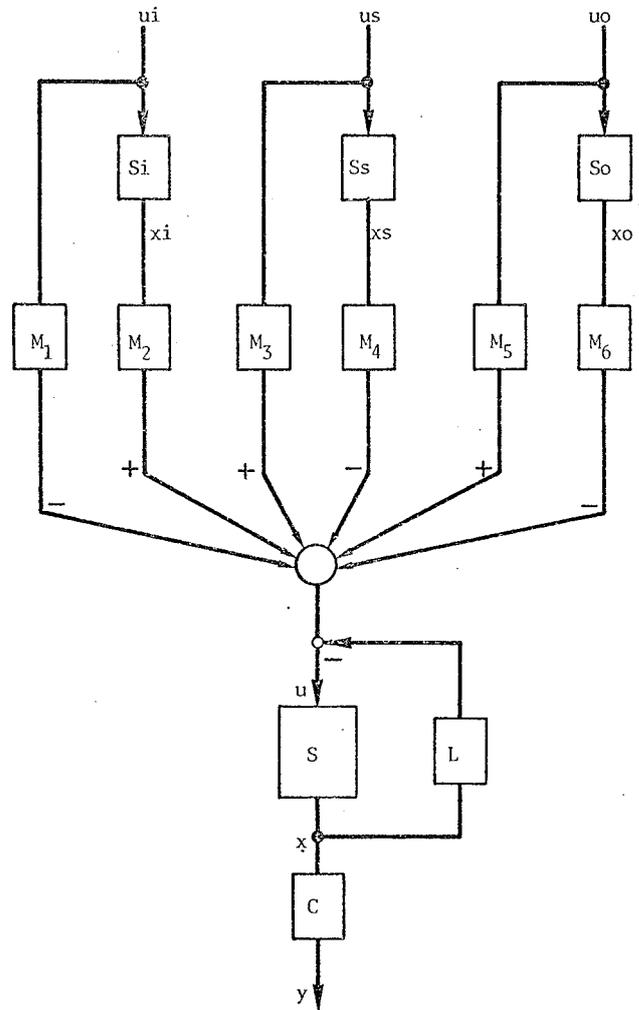


FIG 43-3

POURSUITE DES MODELES DE REFERENCE DES VARIABLES

avec les matrices :

$$\begin{aligned}
 L &= SB'KA \\
 M_1 &= SB'[G'-I]^{-1}[MiBi - L'QiDi] - SQiDi \\
 M_2 &= SB'MiAi + SQiCi \\
 M_3 &= SB'[G'-I]^{-1}[MsBs - QsDs] . \\
 M_4 &= SB'MsAs \\
 M_5 &= SB'[G'-I]^{-1}[MoBo - C'QoDo] \\
 M_6 &= SB'MoAo
 \end{aligned}
 \tag{432-2}$$

où :

$$S = [Q_i + B'KB]^{-1}$$

$$G = A - BL$$

et où les matrices  $M_i$ ,  $M_s$ ,  $M_o$  sont solutions de :

$$M_i : G'M_iA_i - M_i = L'Q_iC_i$$

$$M_s : G'M_sA_s - M_s = Q_sC_s \quad (432-3)$$

$$M_o : G'M_oA_o - M_o = C'Q_oC_o$$

Remarquons que la solution pour le vecteur forcé (g) (A 23-13,16) peut être trouvée si la classe des évolutions concernant des entrées ( $u_i$ ), ( $u_s$ ), ( $u_o$ ) est définie. Dans notre cas la dynamique n'était pas spécifiée et nous avons supposé les entrées des modèles de références constantes. La poursuite est optimale si ces hypothèses sont respectées. Dans les autres cas il est nécessaire d'admettre une sous optimalité ou de compléter la partie prédiction de l'algorithme par les blocs complémentaires liés à la spécification de la dynamique des entrées.

#### 432.2 Entrées générées par un système linéaire.

Comme exemple, supposons que l'entrée ( $u_i$ ) du modèle de référence d'entrée ( $S_i$ ) soit générée par le système linéaire complémentaire ( $S_{ic}$ ) (A 23-12) :

$$S_{ic} : \begin{cases} x_{ic}(t+1) = A_{ic} x_{ic}(t) + B_{ic} u_{ic}(t) \\ u_i(t) = C_{ic} x_{ic}(t) + D_{ic} u_{ic}(t) \end{cases} \quad (432-4)$$

La formulation d'un nouveau modèle de référence par la composition de deux systèmes  $\begin{bmatrix} S_i \\ S_{ic} \end{bmatrix}$  (A 23-26) et l'hypothèse ( $u_{ic}$ ) constante conduisent à remplacer dans l'algorithme (432-1) le terme :

$$[M_1 u_i(t)] \text{ par les deux blocs } [M_1 c u_{ic}(t) - M_1 c c x_{ic}(t)] \quad (432-5)$$

On obtient, de manière analogue l'extension des blocs pour les modèles des objectifs d'états (Ss), (Ssc) et de sorties (So), (Soc). La solution pour le vecteur forcé (g) (A 23-27, 28, 29) donne l'entrée (u) sous la forme représentée sur la figure (F 43-4).

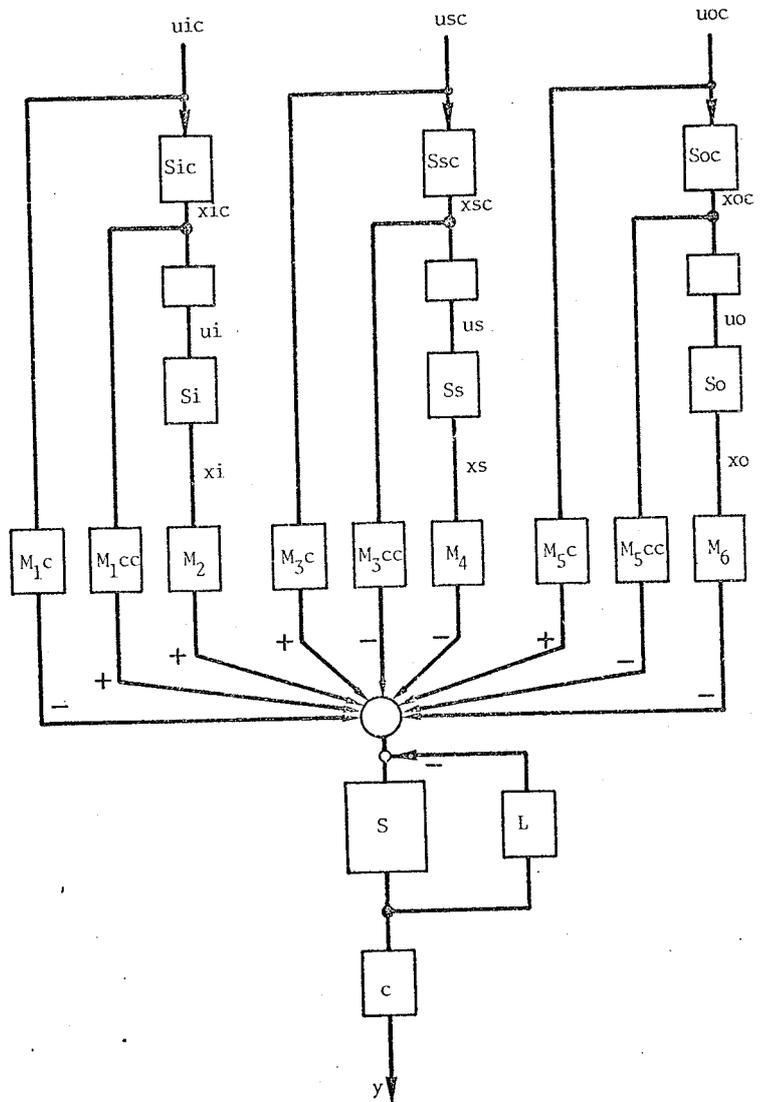


FIG 43-4

POURSUITE DE DEUX GROUPES DE MODELES DE REFERENCES EN SERIE

$$u(t) = -L x(t)$$

$$\begin{aligned} & -M_1c uic(t) + M_1cc xic(t) + M_2xi(t) \\ & +M_3c usc(t) - M_3cc xsc(t) - M_4xs(t) \\ & +M_5c uoc(t) - M_5cc xoc(t) - M_6xo(t) \end{aligned}$$

(432-6)

avec les matrices :

$$\begin{aligned}
 L &= SB'KA \\
 M_{1c} &= SB'(G'-I)^{-2}[G'MiBi - L'QiDi] \\
 M_{1cc} &= SB'(G'-I)^{-1}[MiBi - L'QiDi] + SQiDi \\
 M_2 &= SB'MiAi + SQiCi \\
 M_{3c} &= SB'(G'-I)^{-2}[G'MsBs - QsDs] \\
 M_{3cc} &= SB'(G'-I)^{-1}[MsBs - QsDs] \\
 M_4 &= SB'MsAs \\
 M_{5c} &= SB'(G'-I)^{-2}[G'MoBo - C'QoDo] \\
 M_{5cc} &= SB'(G'-I)^{-1}[MoBo - C'QoDo] \\
 M_6 &= SB'MoAo
 \end{aligned} \tag{432-7}$$

Les matrices (S), (L), (Mi), (Ms), (Mo) sont déterminées suivant les équations (432-2,3).

#### 433 Poursuite d'un système de référence.

Certaines applications de la conduite des systèmes nécessitent de traiter le problème de poursuite des variables d'un modèle de référence par les variables du système (Fig. 43-5). Le problème consiste à positionner le système le plus proche du modèle de référence, cette position étant mesurée par une distance définie (par exemple (Dio) entrée-sortie).

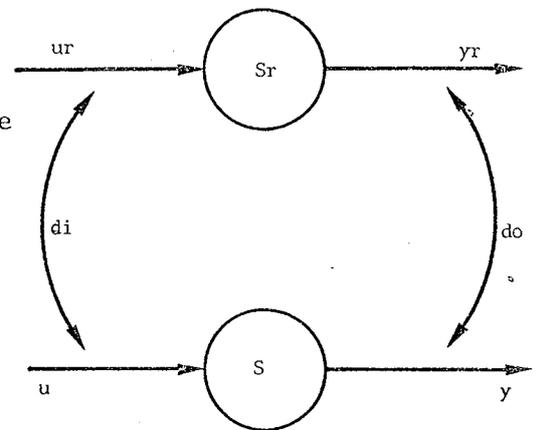


FIG 43-5

POURSUITE D'UN SYSTEME DE REFERENCE

Supposons que l'environnement soit représenté par le système linéaire (Sr) :

$$E \equiv Sr : \quad \begin{cases} xr(t+1) = Ar xr(t) + Br ur(t) \\ yr(t) = Cr xr(t) \end{cases} \tag{433-1}$$

où les variables objectifs sont :

$$z_i(t) = u_r(t)$$

$$z_o(t) = y_r(t)$$

et où l'entrée ( $u_r$ ) a une dynamique non spécifiée que nous supposons constante.

L'application des solutions données par (A 23-9) aux objectifs d'entrée ( $z_i$ ) et (A 23-22) aux objectifs de sortie ( $z_o$ ) donne la solution du problème posé sous la forme (F 43-6) :

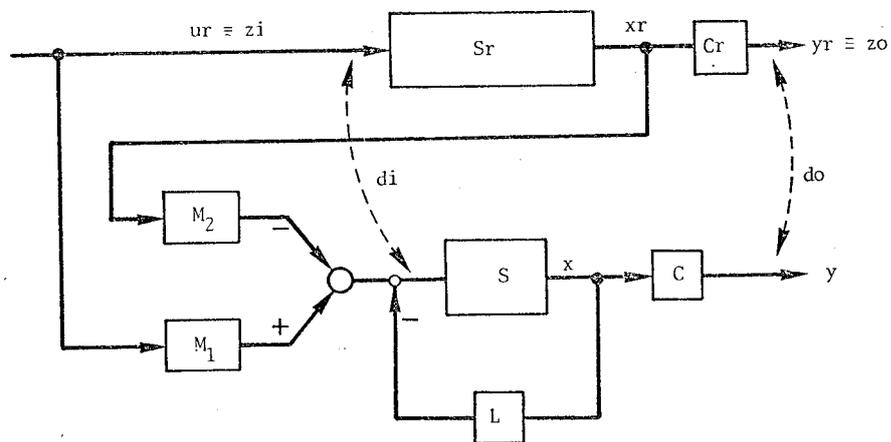


FIG 43-6

ALGORITHME DE POURSUITE D'UN SYSTEME DE REFERENCE

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 u_r(t) - M_2 x_r(t) \quad (433-2)$$

avec

$$\begin{aligned} L &= SB'KA \\ M_1 &= SB'[G'-I]^{-1}[L'Q_i - M_o B_r] + SQ_i \\ M_2 &= SB'M_o A_r \end{aligned} \quad (433-3)$$

où

$$M_o : \quad G'M_o A_r - M_o = C'Q_o C_r \quad (433-4)$$

L'algorithme développé assure une distance (entrée-sortie) minimale entre les deux systèmes. Pour une autre classe d'entrées du système de référence, le problème peut être traité de manière analogue à celle du paragraphe précédent (432-5,6,7).

#### 433.1 Application à l'estimation d'états.

Supposons que l'environnement ( $E \equiv S_r$ ) soit formé par un élément physique poursuivi par le système (S). Dans l'hypothèse où l'objet physique est bien représenté par ce système, la distance obtenue en cours de poursuite peut être nulle, ce qui signifie que les variables (prises en compte dans la distance) de ces deux systèmes sont identiques. Dans ce cas, conformément à la figure (F 43-5), on peut écrire :

$$S_r \equiv S \quad (433-5)$$

Si, en plus, la structure du système (S) est telle qu'il est possible de trouver pour la matrice ( $M_0$ ) (433-4) une solution de la forme :

$$M_0 = MC \quad (433-6)$$

la solution (433-2) pour l'entrée ( $u$ ) du système est (F 43-7) :

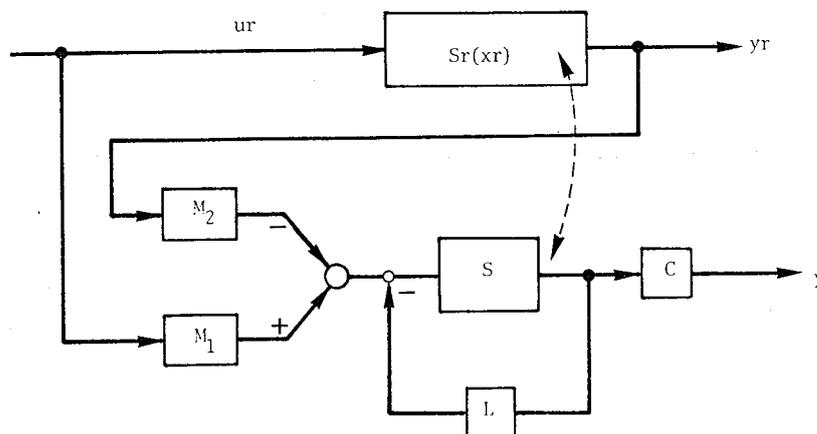


FIG 43-7

ESTIMATION D'ETATS PAR POURSUITE

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 ur(t) - M_2 yr(t) \quad (433-7)$$

avec des matrices

$$\begin{aligned} L &= SB'KA \\ M_1 &= SB'[G'-I]^{-1}[L'Qi - MoB] + SQi \\ M_2 &= SB'G'^{-1}[CQo + M] \end{aligned} \quad (433-8)$$

La solution est optimale si l'entrée (ur) est constante : dans le cas contraire il faut connaître sa dynamique et utiliser les résultats du paragraphe (A 23-2) ou (432), ou bien admettre la solution sous-optimale.

La condition (433-6) exigée pour la substitution de l'information se trouvant dans les états par l'information contenue dans la sortie peut être satisfaite par exemple pour les matrices (Mo) et (A) commutatives. Ceci permet de calculer la matrice M :

$$M = [G'A - I]^{-1}CQo \quad (433-9)$$

La figure (F 43-7) présente l'algorithme obtenu qui peut, avec les hypothèses indiquées précédemment, donner les états de l'élément physique. Un indice de performance de cette estimation par le modèle peut être mesuré par la valeur de la distance (Dio) effectivement réalisée au cours de la poursuite. La dégradation de la qualité de la poursuite permet de faire apparaître l'infidélité de la représentation des états.

#### 433.2 Localisation d'une représentation.

Un environnement peut être poursuivi simultanément par plusieurs systèmes. L'indice de performance de cette poursuite associé à la distance réalisée est à l'origine de diverses applications (373). Citons comme exemples la sélection d'un meilleur modèle et le choix d'une

meilleure structure. La technique proposée donne la possibilité d'utilisation de plusieurs modèles simultanément pour l'estimation (états, paramètres) ou pour la conduite (variation des régimes ou structures, temps partagé par plusieurs modèles).

La figure (F 43-8) représente un algorithme de poursuite de l'objet ( $S_r$ ) par les systèmes ( $S_1$ ), ( $S_2$ ), ( $S_3$ ). L'algorithme exploite les résultats (433-2,3,4) ou (433-7,8) pour le calcul des matrices correspondantes ( $M_{11}, M_{12}, L_1 ; M_{21}, M_{22}, L_2 ; M_{31}, M_{32}, L_3$ ).

La localisation d'une meilleure représentation ( $S^\circ$ ) d'un élément peut être effectuée par la comparaison des distances ( $Dio$ ) (instantanées, ou éventuellement dynamiques).

$$S^\circ = \inf_S \{Dio_1, Dio_2, Dio_3\} \quad (433-10)$$

avec

$$Dio_j = (ur - u_j)' Q_{i_j} (ur - u_j) + (yr - y_j)' Q_{o_j} (yr - y_j) \quad (433-11)$$

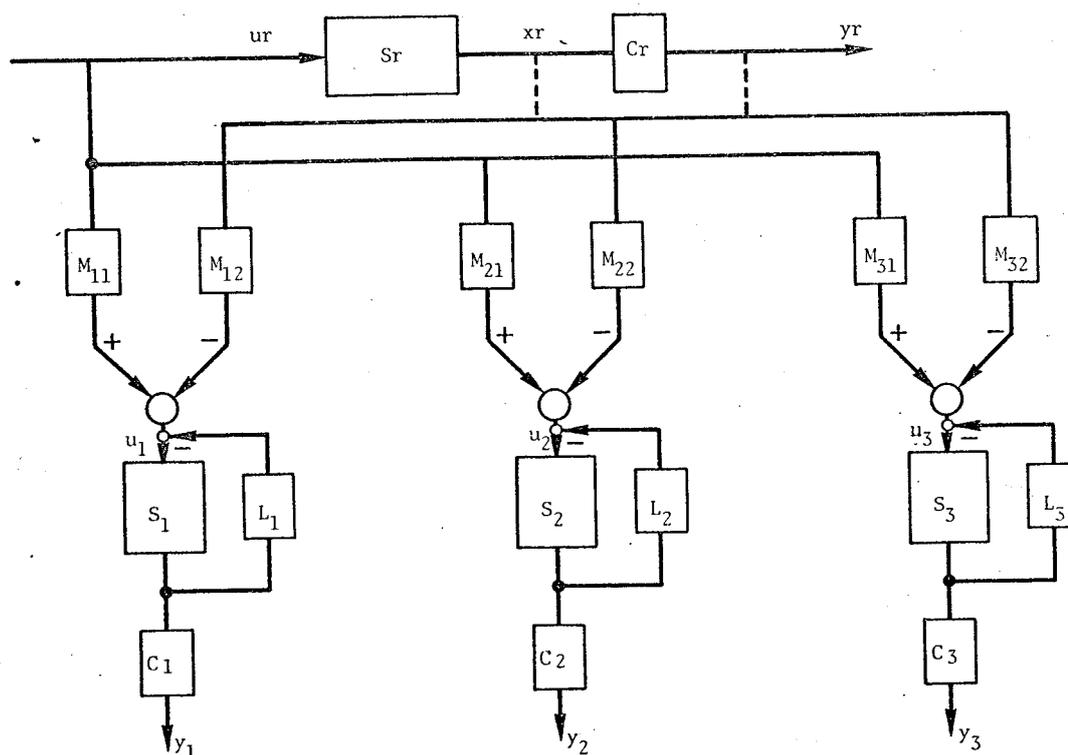


FIG 43-8

SELECTION D'UNE MEILLEURE REPRESENTATION

## 440 CREATION D'UN ENVIRONNEMENT

La stabilisation conduit le système à occuper la position la plus proche de l'environnement. La meilleure conduite est déterminée à partir des propriétés du système et des objectifs de l'environnement. En général on ne tient pas compte initialement des situations particulières comme les contraintes sur certaines variables ou les conséquences d'évolutions différentes du modèle et du procédé.

Il convient alors de modifier par création d'un environnement fictif qui se compose avec l'environnement d'origine, les objectifs fournis par l'environnement de manière à respecter les particularités locales.

441 Satisfaction des contraintes.

Sur les systèmes réels, en général toutes les entrées ne peuvent pas évoluer librement : certaines dépendent d'autres systèmes (interactions) ou sont soumises à des contraintes.

Nous proposons deux méthodes pour traiter ces cas :

- Les interactions sont considérées comme perturbations mesurables. Leurs conséquences sont mesurées ou estimées à l'aide d'un modèle et poursuivies par le reste du système (entrée libre) en vue de les compenser [4Bi].
- L'environnement utilisé pour la stabilisation est modifié jusqu'à la satisfaction des contraintes (351) [4BB]. Cette méthode se prête bien aux respects des contraintes par les variables du système (entrées, états, sorties).

Nous présentons cette deuxième méthode appliquée au système (S) (A 23-1) stabilisé dans le sens de la distance (Dio) (A 23-3) par rapport à l'environnement constant (E) (A 23-2).

Soit le système (S) :

$$S : \begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (441-1)$$

conduit par l'entrée (u) :

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 zi(t) - M_2 zo(t) \quad (441-2)$$

avec les matrices  $(M_1)$ ,  $(M_2)$  déterminées par les équations (431-2) (la matrice  $(M_3)$  figurant dans ces équations représente la matrice  $(M_2)$  de ce paragraphe).

La sortie du système est :

$$y(t+1) = C [A-BL]x(t) + CBM_1 zi(t) - CBM_2 zo(t) \quad (441-3)$$

Supposons que parmi les entrées (u) et les sorties (y) certaines soient libres ( $u'$ ), ( $y'$ ), les autres étant dépendantes ou soumises à des contraintes ( $w$ ), ( $v$ ) :

$$u(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ u'(t) \end{bmatrix} \quad (441-4)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} v(t) \\ y'(t) \end{bmatrix}$$

De même les objectifs de l'environnement peuvent être décomposés en :

$$zi(t) = \begin{bmatrix} zw(t) \\ zi'(t) \end{bmatrix} \quad (441-5)$$

$$zo(t) = \begin{bmatrix} zv(t) \\ zo'(t) \end{bmatrix}$$

De manière analogue on peut extraire des matrices figurant dans les équations (441-2,3) des sous-matrices de dimensions appropriées aux vecteurs soumis aux contraintes (w), (v) :

$$\begin{array}{ll}
 \text{matrice } M_1 & M_{1w} \\
 M_2 & M_{2v} \\
 \text{CBM}_1 & \text{CBM}_{1w} \\
 \text{CBM}_2 & \text{CBM}_{2v} \\
 L & L_w \\
 C(A-BL) & C(A-BL)_v
 \end{array} \quad (441-6)$$

Supposons que les entrées (w) et les sorties (v) soient soumises aux contraintes ( $\bar{w}$ ) et ( $\bar{v}$ ). En vue de calculer la valeur des objectifs fictifs (zwf) et (zvf) pour respecter ces contraintes, nous exprimons les relations entre les objectifs et les variables sous contraintes :

$$\begin{bmatrix} M_{1w}, M_{2v} \\ \text{CBM}_{1w}, -\text{CBM}_{2v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} zw(t) \\ zv(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(t) \\ v(t+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_w & x(t) \\ C(A-BL)_v & x(t) \end{bmatrix} \quad (441-7)$$

A partir de cette équation on peut calculer les objectifs (zwf) et (zvf) qui satisfont les contraintes ( $\bar{w}$ ) et ( $\bar{v}$ )

Dans les cas de contraintes d'inégalité, on peut modifier les vecteurs objectifs de la valeur ( $\Delta zw$ ), ( $\Delta zv$ ) qui correspond aux dépassements ( $\Delta w$ ) ( $\Delta v$ ) précalculés ou estimés des variables sous contraintes [4BB].

Les calculs sont faits de la même manière :

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta zw(t) \\ \Delta zv(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta w(t) \\ \Delta v(t+1) \end{bmatrix} \quad (441-8)$$

Ce calcul peut être effectué en temps réel ou en temps différé à partir de la prévision du dépassement des contraintes, en vue de leur

respect ou de la limitation du séjour dans la zone de contraintes.

Remarquons que la dimension de la matrice (M) est fonction du nombre des variables du système qui sont soumises aux contraintes. La régularité de la matrice (M) indique la possibilité de satisfaire des contraintes par toutes les variables considérées ; dans le cas contraire il est nécessaire de "libérer" une ou plusieurs variables car le système n'est plus commandable par les variables restant libres.

Comme application du respect de contraintes d'égalité ou d'inégalité, citons :

- le respect des interactions à l'entrée ou à la sortie des systèmes interconnectés
- la poursuite parfaite d'un modèle de référence.

#### 442 Suppression de la pondération des variables.

La forme de la distance prise pour le développement des algorithmes peut être un handicap dans certaines applications. En particulier la pondération de certaines variables peut s'avérer néfaste surtout si la définition des objectifs ne peut pas être réalisée ou justifiée.

Dans ce cas nous proposons de modifier la forme de la distance (352) par la suppression de la pondération de certaines variables à l'aide de la génération d'un environnement fictif autonome. Cette technique consiste à substituer aux objectifs les variables correspondantes du système considéré.

Dans l'hypothèse où tous les objectifs sont autonomes, c'est l'environnement autonome qui est engendré par le système lui-même et il se poursuit ainsi lui-même. Cette particularité peut être exploitée pour déplacer et positionner le système en fonction d'autres considérations.

Supposons que la conduite du système assure la stabilisation  
(431) (F 43-2) à l'aide de l'entrée :

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 z_i(t) - M_2 z_s(t) - M_3 z_o(t) \quad (442-1)$$

Supposons ensuite que les objectifs fictifs soient générés  
par les variables du système (F 44-1) :

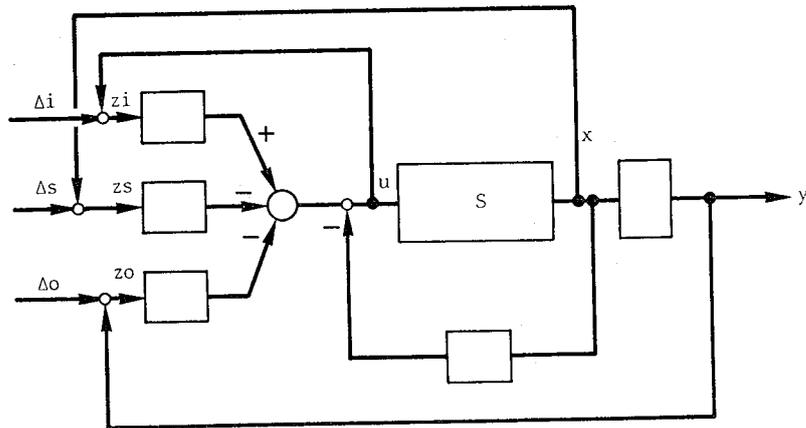


FIG 44-1

GENERATION D'UN ENVIRONNEMENT AUTONOME

$$\begin{aligned} z_i(t) &= u(t-\tau_i) + \Delta i \\ z_s(t) &= x(t-\tau_s) + \Delta s \\ z_o(t) &= y(t-\tau_o) + \Delta o \end{aligned} \quad (442-2)$$

Les retards ( $\tau_i$ ,  $\tau_s$ ,  $\tau_o$ ) dans la génération des objectifs de l'environnement introduisent une pondération transitoire et forment une distance transitoire qui détermine l'évolution du système.

Dans le cas où :

$$0 = \Delta i = \Delta s = \Delta o$$

la valeur du vecteur d'état du système est conservé, c'est-à-dire que :

$$x(t+1) = x(t) \quad (442-3)$$

avec l'entrée :

$$u(t) = Mx(t)$$

Une valeur de  $(\Delta)$  ( $\Delta i$  ou  $\Delta s$  ou  $\Delta o$ ) non nulle entraîne ainsi un déplacement du système entier jusqu'à ce que la cause du déplacement disparaisse ( $\Delta = 0$ ) ou que les déplacements ( $\Delta i$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta o$ ) soient tels que leurs effets s'annulent.

$$M_1 \Delta i - M_2 \Delta s - M_3 \Delta o = 0 \quad (442-4)$$

#### 442.1 Application à la correction.

La technique de génération d'un environnement autonome peut être utilisée pour la construction des correcteurs de type intégrale ainsi que pour la réalisation d'une poursuite parfaite pouvant être assurée aussi à l'aide des contraintes (441).

Sur la figure (F 44-2) nous présentons un schéma de correcteur du procédé. L'entrée du modèle et aussi celle du procédé satisfont dans ce cas à la relation suivante :

$$u(t) = [M_1 - I]^{-1} [[L + M_2 C]x(t) + M_2 \Delta o] \quad (442-5)$$

où  $\Delta o$  représente la différence entre la consigne (c) et la sortie (yp) du procédé.

Le modèle et aussi le procédé sont déplacés jusqu'à l'annulation de  $(\Delta o)$ , donc jusqu'à ce qu'une consigne (c) soit respectée par la sortie (yp) du procédé. La consigne peut être délivrée par un modèle qui détermine la stabilisation (431) du procédé ou par un modèle avec un objectif spécifique par exemple le découplage des sorties.

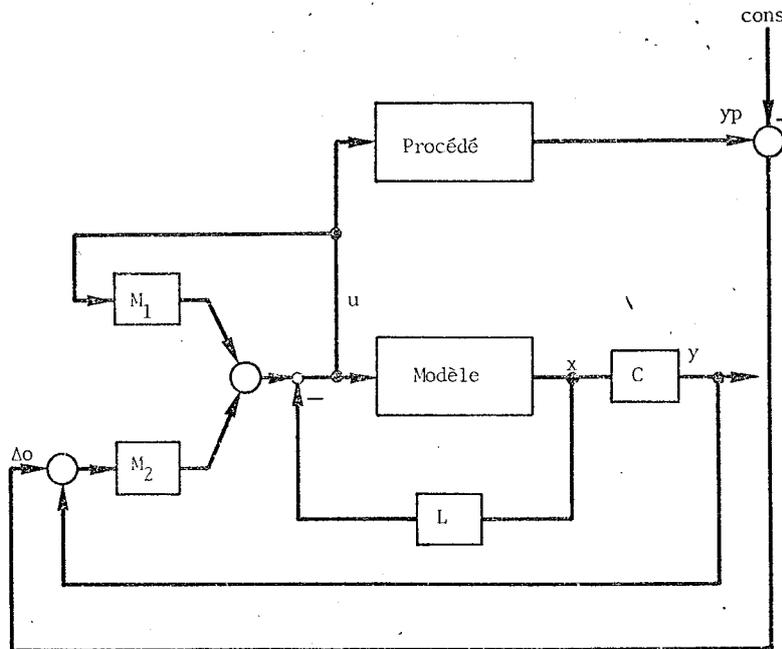


FIG 44-2  
CORRECTION DU PROCEDE

Remarquons que l'action sur le procédé est proportionnelle au déplacement du modèle (de ses états), ce qui entraîne leur éloignement mesuré par la distance de sortie ( $\Delta o$ ).

#### 450 STABILISATION DECENTRALISEE D'UN ENSEMBLE INTERCONNECTE

La technique de poursuite réciproque des systèmes constitue un outil pour la conduite des systèmes complexes interconnectés. Elle forme une approche décentralisée au problème de coordination de ces systèmes. Il est à souligner que les méthodes proposées sont compatibles avec la conduite locale par les algorithmes développés précédemment. Ces algorithmes sont généralement une base dont les propriétés ne sont modifiées qu'à l'aide de la génération d'un environnement dépendant du comportement des autres systèmes de l'ensemble interconnecté.

Nous sommes intéressés par la synthèse progressive des algorithmes, ce qui conduit dans le cas présent à trois fonctions qui peuvent être situées sur des niveaux différents dans la hiérarchie de la conduite :

- stabilisation des systèmes indépendants
- respect des interactions à l'entrée
- respect des interactions par coopération

Nous supposons que le système complexe est formé par l'ensemble des systèmes interconnectés où chaque système, stabilisé par rapport à son environnement (431), respecte des interactions par la génération d'objectifs fictifs (441), et contribue à réduire les conséquences de ces interactions sur les autres systèmes.

#### 451 Stabilisation du système indépendant.

Le premier niveau de commande considère l'ensemble complexe formé par les systèmes indépendants dont chacun est stabilisé par rapport à ses propres objectifs (environnement) déterminés par exemple à l'aide d'une optimisation statique globale.

Nous disposons pour chaque système d'une description de la forme :

$$x(t+1) = Ax(t) + B \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} (t) \quad (451-1)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ y \end{bmatrix} (t+1) = Cx(t+1)$$

L'algorithme de stabilisation (431) a la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} (t) = -Lx(t) - M_1 \begin{bmatrix} zv \\ zo \end{bmatrix} (t) + M_2 \begin{bmatrix} zw \\ zi \end{bmatrix} (t) + M_2 \begin{bmatrix} zwf \\ 0 \end{bmatrix} \quad (451-2)$$

452 Respect des interactions à l'entrée du système.

La génération d'un objectif fictif de l'entrée ( $zw_f$ ) est déterminée de façon à amener l'entrée optimale ( $w^o$ ) ( $zw_f=0$ ) à prendre la valeur ( $w$ ) de la sortie du système amont ( $w=v$ ).

A partir du dépassement prévu (441-8) on peut calculer la valeur d'un objectif fictif à chaque instant :

$$zw_f = M_{1w}^{-1}(v-w^o) \quad (452-1)$$

Si la technique de génération des objectifs fictifs est appliquée pour respecter les contraintes ( $v=w$ ), on peut, à partir de la connaissance de l'objectif fictif ( $zw_f$ ) et de la valeur de l'interaction ( $v$ ) retrouver l'entrée optimale ( $w^o$ ) qui aurait dû être appliquée si le système n'était pas interconnecté.

453 Coopération dans le respect des interactions.

Comme conséquence du respect des interactions à l'entrée (452), les systèmes situés en aval subissent les conséquences du comportement des systèmes situés en amont. Ces conséquences peuvent être mesurées par le degré de sous-optimalité de chaque système (par rapport au comportement qui ne tient pas compte des interactions). Les conséquences peuvent être mesurées aussi par la valeur des objectifs fictifs ( $zw_f$ ) indispensables au respect des interactions.

Cette dernière information est utilisée pour réaliser la coopération du système amont : on élabore pour ce système un objectif fictif de sortie ( $zv_f$ ) pour approcher sa sortie ( $v$ ) de l'entrée optimale ( $w^o$ ) du système aval.

Le calcul des objectifs fictifs ( $zv_f$ ) de sortie (du système amont) est fondé sur les considérations suivantes. Les sorties du système (451-1)

peuvent être écrites (451-2) :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v \\ y \end{bmatrix} (t+1) &= C[A-BL]x(t) + CBM_1 \begin{bmatrix} zw \\ zi \end{bmatrix} (t) \\ &- CBM_2 \begin{bmatrix} zv \\ zo \end{bmatrix} (t) - CBM_2 \begin{bmatrix} zv_f \\ 0 \end{bmatrix} (t) \end{aligned} \quad (453-1)$$

Pour ( $zv_f = 0$ ) nous obtenons la solution optimale caractérisée par ( $v = v^\circ$ ).

On peut envisager une modification de la sortie de ( $\Delta v$ ) :

$$\Delta v = F(w^\circ - v^\circ) \quad (453-2)$$

et calculer les objectifs fictifs ( $zv_f$ ) correspondants (441-8) :

$$zv_f = M_{2v}^{-1} \Delta v \quad (453-3)$$

Si la coopération dans la satisfaction des interactions peut être exprimée par une variation équivalente des sorties et des entrées, c'est-à-dire si :

$$\Delta v = F \Delta w \quad (453-4)$$

où F représente un opérateur de coopération, la relation suivante entre des objectifs fictifs correspondants

$$zv_f = M_{2v}^{-1} M_{1w} F zw_f \quad (453-5)$$

avec des matrices  $M_{1w}$ ,  $M_{2v}$  déterminées suivant les relations (441-6,7,8).

Remarquons que l'opérateur de coopération F peut être déterminé en fonction de considérations sur le comportement d'un ensemble interconnecté

telles que la stabilité, l'optimisation globale, la coordination de l'ensemble, etc.....

#### 460 STABILISATION ET COORDINATION PAR POURSUITE

Dans le paragraphe (350) nous avons présenté la création et l'utilisation du système intermédiaire. C'est lui qui, dans notre cas, représente le système complexe. Son évolution prédétermine la transition des éléments du système complexe compte tenu de la finesse et de la précision de sa représentation par un modèle appelé modèle coordonnateur. Les systèmes d'ensembles complexes poursuivent ainsi les parties de ce modèle.

Dans ce fonctionnement on peut distinguer deux niveaux :

- stabilisation dynamique du modèle coordonnateur par rapport à l'environnement
- stabilisation dynamique des systèmes par rapport au modèle coordonnateur.

Les étapes indiquées dans le paragraphe 450, en particulier le respect des interactions par coopération, forment le niveau de conduite inférieur et compatible avec la coordination par poursuite.

Les algorithmes proposés sont élaborés [4BC] dans l'hypothèse de systèmes linéaires et d'un environnement du coordonnateur supposé constant.

#### 461 Stabilisation du modèle coordonnateur.

Le modèle coordonnateur ( $Sc$ ) a la forme suivante :

$$Sc : \begin{cases} x_c(t+1) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) \\ y_c(t) = C_c x_c(t) \end{cases} \quad (461-1)$$

Il est stabilisé par rapport à l'environnement (E) avec les objectifs supposés constants :

$$E : \{z_{ic}(t), z_{sc}(t), z_{oc}(t)\} \quad (461-2)$$

L'entrée (u) de ce modèle minimise la distance (Diso) par rapport à l'environnement constant (431-1) :

$$u_c(t) = -L_c x_c(t) + M_{c_1} z_i(t) - M_{c_2} z_s(t) - M_{c_3} z_o(t) \quad (461-3)$$

avec les matrices  $L_c$ ,  $M_{c_1}$ ,  $M_{c_2}$ ,  $M_{c_3}$  calculées suivant les équations (431-2).

Le modèle coordonnateur joue le rôle d'un environnement pour les systèmes formant un ensemble complexe. L'environnement ainsi créé est représenté par les états de ce modèle et leurs trajectoires. On transforme le modèle avec sa conduite en système coordonnateur ( $\bar{S}$ )

$$\bar{S} : \quad \bar{x}(t+1) = \bar{A} \bar{x}(t) + \bar{B} \bar{u}(t) \quad (461-4)$$

avec

$$\bar{A} = [A_c - B_c L_c]$$

$$\bar{B} = [B_c [M_{c_1}, -M_{c_2}, -M_{c_3}]]$$

(461-5)

$$\bar{x}(t) = x_c(t)$$

$$\bar{u}(t) = \begin{bmatrix} z_i(t) \\ z_s(t) \\ z_o(t) \end{bmatrix}$$

A partir de l'ensemble des variables  $\bar{u}$ ,  $\bar{x}$  du système coordonnateur, on crée des objectifs pour chaque système de l'ensemble en vue de la prédiction de l'évolution de ces systèmes. Par exemple, dans le cas où les interactions des systèmes sont représentées par les états du modèle

$$L = SB'KA$$

$$M_1 = SB'[G'-I]^{-1}[L'QiDi + [Mo-Mi]\bar{B} - C'CoDo] + SQiDi \quad (462-3)$$

$$M_2 = SB'[Mo-Mi]\bar{A} - SQiCi$$

$$Mo : G'Mo\bar{A} - Mo = C'QoCo$$

$$Mi : G'Mi\bar{A} - Mi = L'QiCi \quad (462-4)$$

$$S = [Qi+B'KB]^{-1}$$

$$G = A - BL$$

K - solution limite  
(A 23-6)

La figure (F 46-1) présente un algorithme de coordination par poursuite pour les trois systèmes de l'ensemble complexe. La partie concernant le respect des interactions (450) est à ajouter. Remarquons aussi que dans certains cas les distances entre les systèmes peuvent être prises en compte. L'algorithme peut être complété par l'amélioration

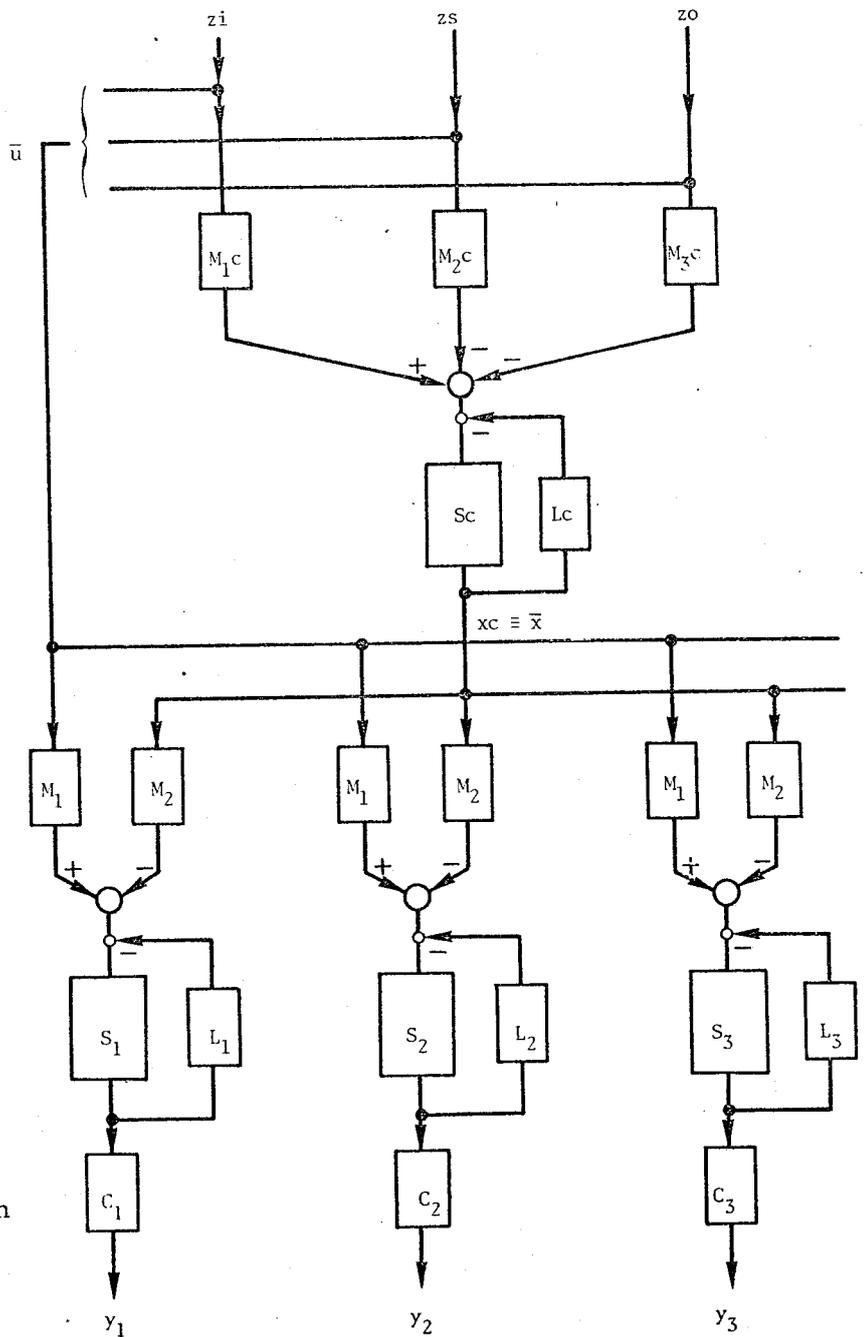


FIG 46-1  
COORDINATION PAR POURSUITE

du modèle coordonnateur (374). Par exemple les états de ce modèle peuvent être corrigés à partir de la différence entre le comportement prévu par le coordonnateur et celui effectivement réalisé par les systèmes de l'ensemble. Les objectifs fictifs ( $z_{s_f}$ ) servant à corriger ces états sont élaborés (374) à partir des déviations par rapport à un fonctionnement de référence qui peut être constitué soit par le comportement optimal du modèle coordonnateur, soit par les objectifs alloués à l'ensemble complexe.

#### 470 REPRESENTATION DES ALGORITHMES

Dans les paragraphes précédents de ce chapitre nous avons présenté quelques algorithmes de type poursuite susceptibles de résoudre certains problèmes posés par l'automatisation des procédés industriels complexes. Les hypothèses faites ont permis de simplifier ces problèmes et en conséquence de développer des algorithmes applicables en temps réel et ayant une structure relativement simple et modulaire. Mais leur application réelle nécessite souvent une collaboration entre automaticiens et spécialistes des procédés, ce qui entraîne des difficultés de compréhension qui doivent être surmontées. C'est pourquoi nous proposons un symbolisme graphique des algorithmes de conduite qui facilitera leur compréhension.

La technique de poursuite se prête assez bien à l'interprétation physique des relations entre systèmes et objectifs de l'environnement. En partant de cette idée, on peut aboutir à une représentation de ces algorithmes.

La notion de poursuite (330) d'objectifs ( $z_w, z_i', z_o', z_v$ ) par les variables du système ( $w, u', y', v$ ) peut être interprétée comme la recherche de la meilleure position (stabilisation) du système, compte tenu des distances correspondantes ( $d_w, d_i', d_o', d_v$ ).

La figure (F 47-1) représente la stabilisation du système (S) par rapport à son environnement (E). La position "centrale" du système représentée sur cette figure peut être atteinte par une pondération équivalente (compte tenu des gains du système) des distances {objectifs-variables} dans la distance globale (Dio) (413-4,5,6).

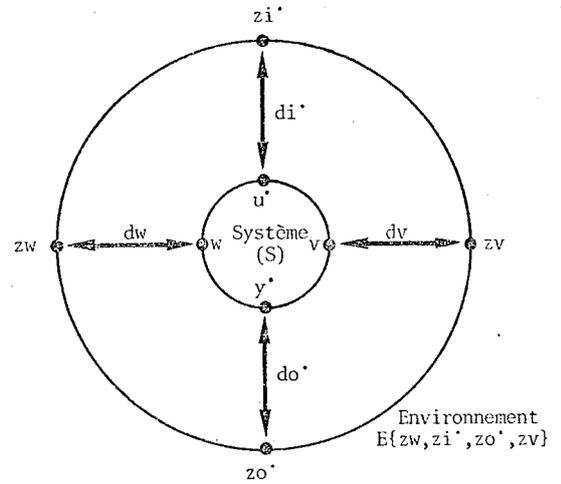


FIG 47-1

POSITIONNEMENT DU SYSTEME PAR LA POURSUITE

La figure (F 47-1) fait penser à un ensemble mécanique où une masse (S) est reliée par des ressorts aux quatre points d'un espace (E). La position de la masse dépend de la position des points d'attache (z), mais aussi de la rigidité des ressorts (d). La dynamique de la transition vers un nouveau point d'équilibre est liée aux caractéristiques du système : {masse-ressorts}. Il est à noter qu'on peut faire atteindre à un point choisi de la masse un point déterminé de l'espace grâce au déplacement des points d'attaches (z), si les contraintes relatives à leur déplacement le permettent. Le comportement de ce système mécanique est proche du fonctionnement d'un algorithme de poursuite et l'utilisation de cette image peut faciliter la compréhension de tous les membres d'un groupe pluridisciplinaire.

L'exemple présenté illustre bien la signification des pondérations des distances (variables-objectifs) ainsi que les conséquences de ces pondérations sur la position du système par rapport à l'environnement. En se référant à cet exemple on pourrait proposer le choix des pondérations de manière à obtenir les mêmes distances finales entre tous les objectifs et toutes les variables. Ceci pourra être réalisé dynamiquement si l'évolution d'autant plus valable des objectifs et des variables du système sont suffisamment compatibles (par exemple si les objectifs sont définis à l'aide d'un modèle simplifié).

Profitons de cet exemple mécanique pour illustrer la génération de l'environnement fictif et autonome (350), (440). La définition d'un objectif fictif est équivalente au déplacement d'un point d'attache ( $z$ ) jusqu'au respect d'une condition, par exemple la position du système ( $S$ ) dans l'espace. La génération d'un objectif autonome (identique à une variable ( $v$ ) du système) est équivalente à la situation dans laquelle les points d'attache sont sur la masse ( $S$ ) (par exemple  $z_v = v$ ). Ceci a pour effet de supprimer l'influence du ressort concerné ( $dv$ ). L'environnement autonome obtenu par l'association de tous les objectifs ( $z$ ) aux variables ( $v$ ) correspondantes de ( $S$ ) maintient la position de ( $S$ ) dans l'espace. La facilité du déplacement ou du maintien de la position du système apparaît clairement.

Dans l'exemple nous avons supposé que les sorties du système sont réparties en deux groupes : les sorties qui forment des interactions ( $v$ ) et les sorties libres ( $y'$ ). On schématise plus souvent le système par la figure (F 47-2) avec :

$$y = \begin{bmatrix} v \\ y' \end{bmatrix}$$

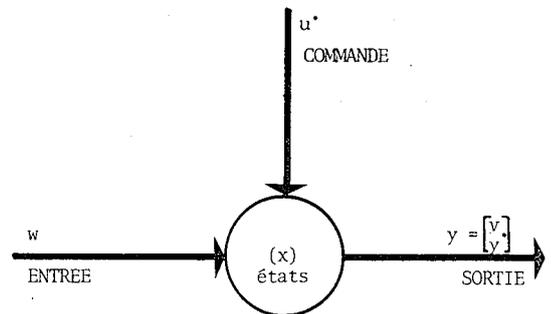


FIG 47-2  
REPRESENTATION DES ELEMENTS DU SYSTEME PASSIF

Dans ce cas la figure (F 47-1) pourra être transformée dans la figure (F 47-3) et utilisée pour la représentation des algorithmes de commande ou des systèmes de conduite aux différents niveaux. Sur cette figure on présente en plus la génération ( $G_w$ ) d'un objectif fictif ( $z_w$ ) en vue d'assurer l'identité entre la variable ( $w$ ) et sa valeur imposée ( $\bar{w}$ ).

Signalons que certaines applications de l'algorithme de poursuite peuvent être plus facilement expliquées sur la figure (F 47-3) si on prend comme distances (variables-objectifs) les projections de  $(dw)$ ,  $(di')$ ,  $(do)$  sur les plans orthogonaux aux vecteurs correspondants  $(w)$ ,  $(u')$ ,  $(y)$ .

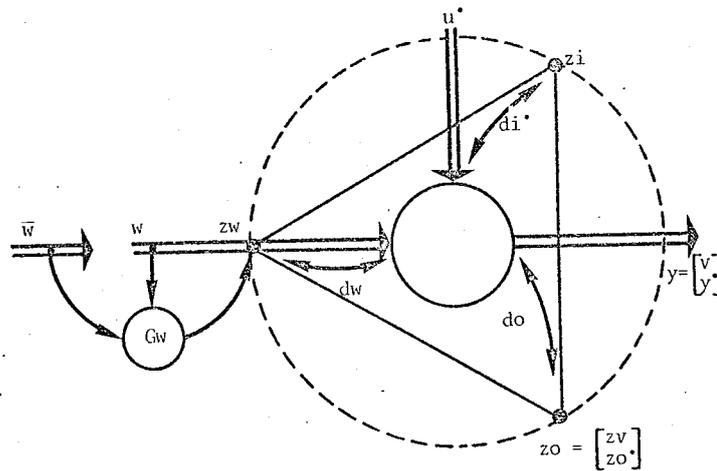


FIG 47-3

REPRESENTATION D'UN ALGORITHME DE POURSUITE



**APPLICATION**

CHAPITRE 5APPLICATION

Nous avons proposé une méthodologie de l'automatisation intégrée des procédés industriels (parag.200). Nous essayons de suivre cette méthodologie à travers un exemple d'application, pour montrer les avantages qui pourraient être particulièrement intéressants dans les applications industrielles. L'aspect de décentralisation et d'implantation progressive des algorithmes est un apport important dans cette perspective.

Comme exemple nous avons choisi un procédé pilote chimique. Nous allons extraire de ce procédé une partie constituée de deux colonnes à distiller (F 22-3) pour les représenter par des modèles et les conduire avec les algorithmes développés et présentés dans le chapitre précédent.

## 510 PRESENTATION DU PROCEDE PILOTE

Le procédé pilote chimique à structure variable installé au Laboratoire d'Automatique de Grenoble est représenté sur la photographie (F 51-1).

511 Architecture du système passif.

La définition du système passif est le résultat d'un compromis entre les buts et les moyens disponibles. Comme buts citons par exemple l'utilisation du système pour la recherche et l'enseignement. Les moyens disponibles sont limités par toutes les contraintes de réalisation liées au choix des éléments existants ou dont le développement s'avère nécessaire, ainsi que par des contraintes matérielles (contraintes financières, contraintes relatives à l'espace et au temps disponibles).

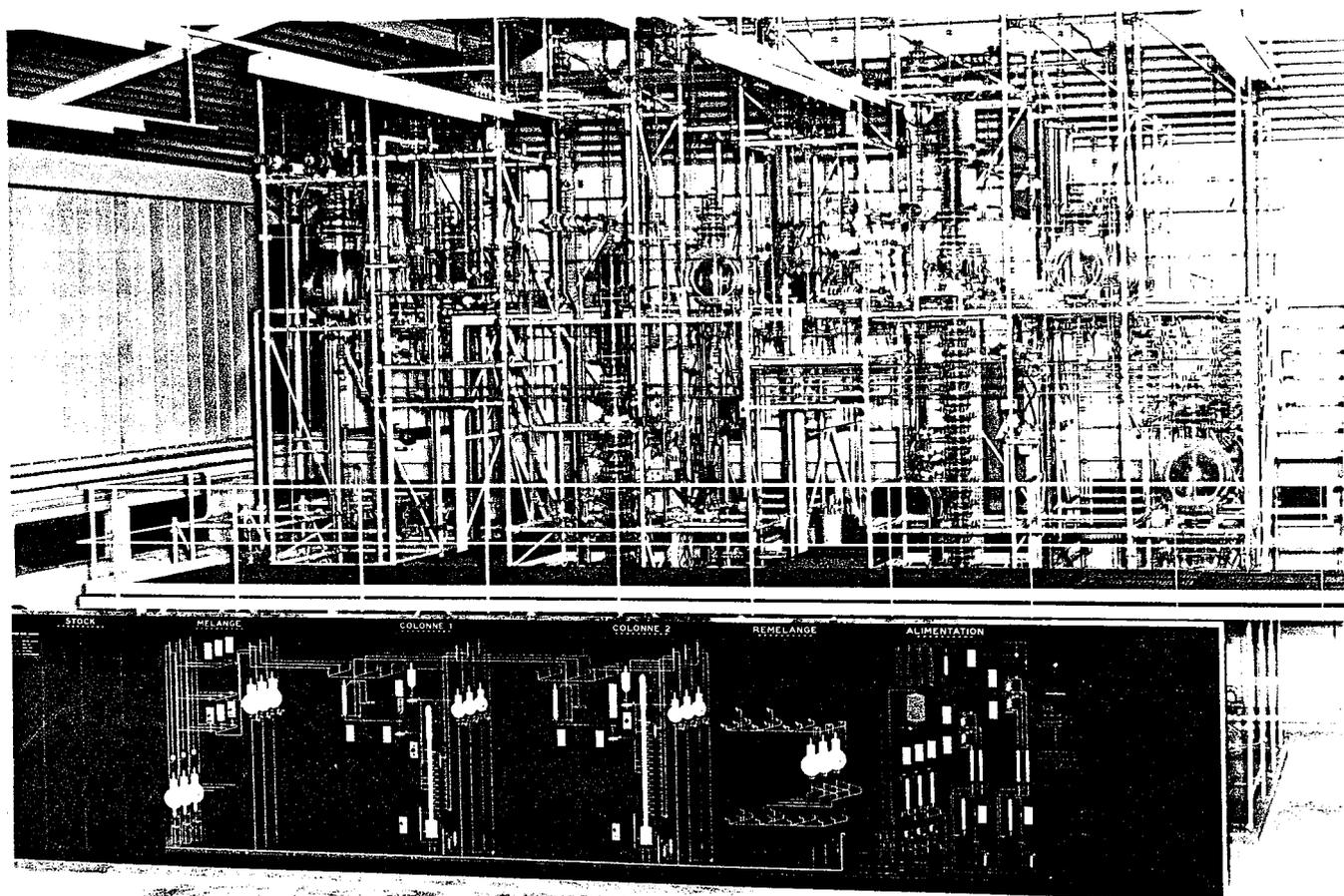


FIG 51-1

PROCEDE PILOTE CHIMIQUE A STRUCTURE VARIABLE

La recherche d'une solution optimale dans la conception des systèmes industriels est un problème très complexe, même pour les systèmes relativement simples. Les difficultés résident dans le traitement d'une quantité d'information qui se présentent sous des formes très diverses. Cette complexité conduit souvent à une conception en deux étapes :

- 1°) définition de la (macro) structure et de l'organisation du système passif
- 2°) assemblage ou réalisation des éléments qui constituent les unités du système passif.

Au cours de la première étape nous avons pris en compte les objectifs de la variation structurale. Dans la deuxième étape, la modularité

dans l'architecture du système passif a été considérée comme prioritaire.

Nous avons abouti à un ensemble comportant quatre unités de traitement, le système d'interconnexion et de transport de la matière, ainsi que des systèmes annexes tels que stockage, système de refroidissement, etc....

La partie fonctionnelle du procédé (F 51-2) comporte deux unités de séparation du produit (distillation I, distillation II) et deux unités de composition (mélange III, remélange IV). Les unités de séparation (I, II) peuvent être alimentées séparément ou connectées en série, en parallèle ou en série-parallèle. La connection entre unités de remélange (IV) et de mélange (III) permet de fermer le cycle de production.

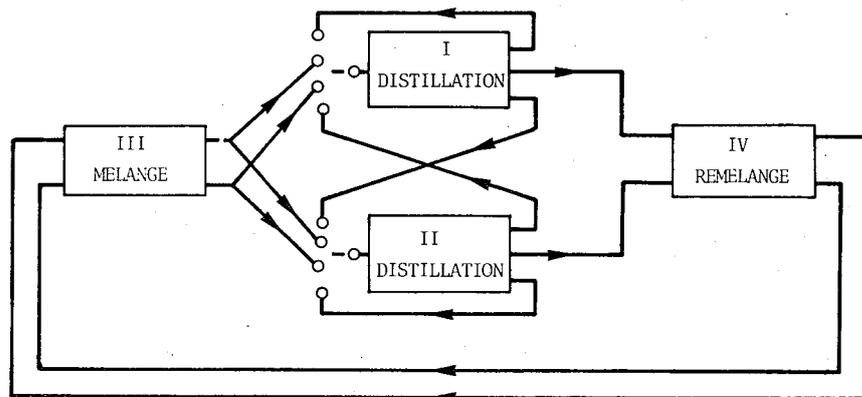


FIG 51-2  
INTERCONNEXION DES UNITES

Chaque unité de traitement est constituée par des éléments de transformation (222-1) des caractéristiques de la matière. Nous avons retenu trois caractéristiques :

- qualité (concentration X)
- quantité (débit L, éventuellement niveau N)
- enthalpie (température T)

Des éléments peuvent modifier une seule ou plusieurs caractéristiques simultanément.

#### Unités de distillation I,II (F 51-3).

Le rôle de ces unités est de séparer les composants d'un mélange (eau, méthanol, éventuellement éthanol) fourni, soit par l'unité de mélange, soit par une des unités de distillation (cas de connection en série par exemple).

L'unité est composée de quatre modules (222)

- l'interconnexion
- le conditionnement de l'alimentation avec le ballon tampon
- la colonne à distiller
- le stock de produits finis.

Le module d'interconnexion permet de choisir la conduite servant à alimenter la colonne ce qui définit la structure du procédé. Les variations d'alimentation (concentration et débit) peuvent être filtrées à travers un ballon tampon. Le liquide ayant un débit et une température définis peut alimenter plusieurs plateaux de la colonne à distiller. A l'aide de l'apport calorifique (chauffage et condenseur) et du recyclage interne (reflux), celle-ci assure la séparation voulue du produit fini.

Ce produit peut être stocké ou utilisé dans les autres unités du procédé.  
La figure (F 51-3) schématise la connexion des modules de l'unité.

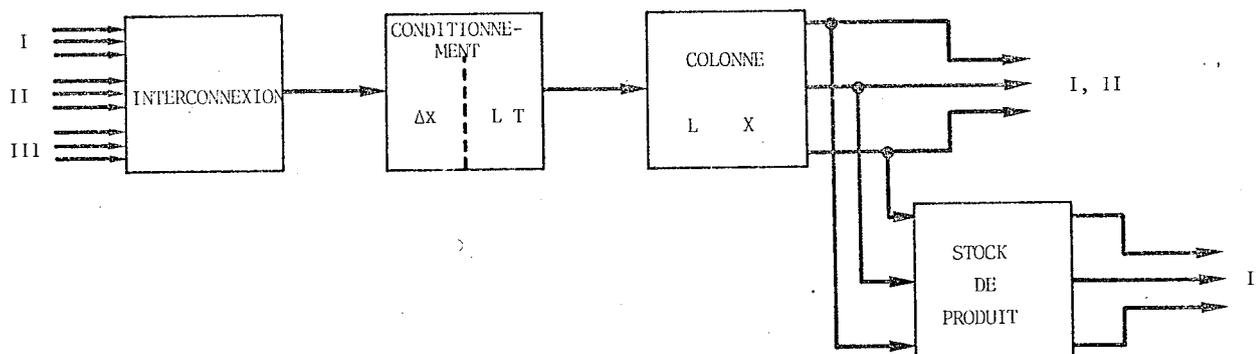


FIG 51-3  
COMPOSITION D'UNE UNITE DE DISTILLATION

### Unités de mélange en ligne III.

Le rôle de cette unité est de préparer le produit qui alimente les unités de distillation. Ceci consiste à mélanger en ligne des produits de base stockés dans les ballons en vue d'obtenir le produit de qualité et de quantité exigées pour le fonctionnement du procédé.

L'unité est composée des modules suivants :

- stock de produit de base (méthanol, eau, éventuellement éthanol, ou leur mélange)
- mélangeur
- stock de produits mélangés.

Unités de remélange IV.

Cette unité nécessaire dans le cas du procédé expérimental permet un fonctionnement du procédé en circuit fermé. Le système de sélection des stocks de produits finis permet de préparer des mélanges dont la qualité est identique à celle du produit de base puis de les verser dans les ballons de stockage de l'unité de mélange en ligne (III).

On peut reconnaître les modules suivants :

- sélecteur de stock
- stock de produits mélangés
- sélecteur de voie de recirculation.

Le schéma complet de l'installation avec les appareils de mesures et de régulation est représenté sur le panneau synoptique de la figure (F 51-4).

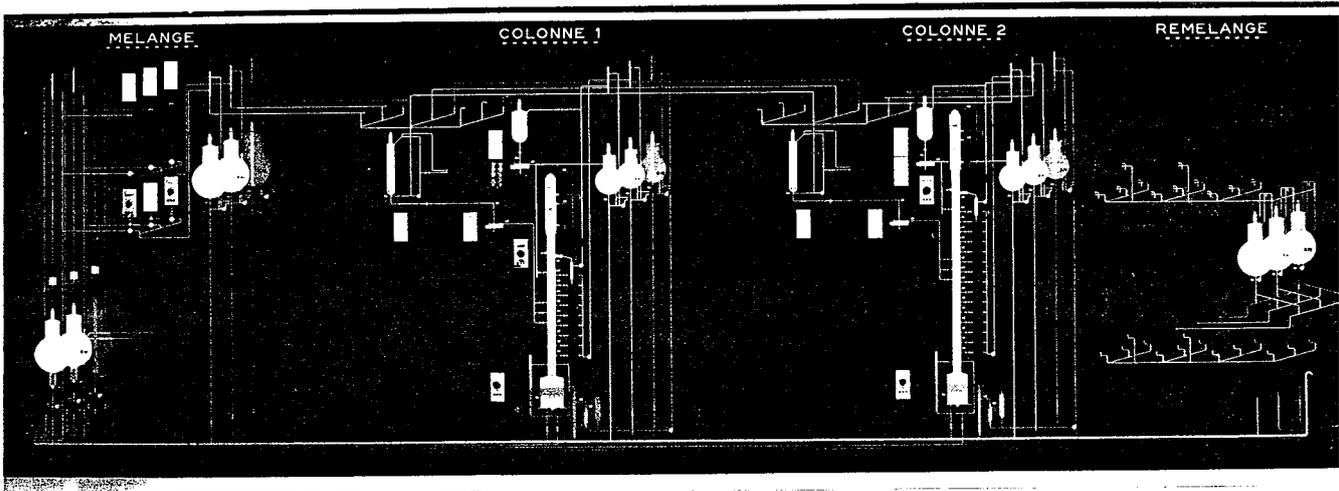


FIG 51-4  
SCHEMA DU PROCEDE PILOTE COMPLEXE

Une verrerie industrielle est utilisée pour toutes les parties fonctionnelles y compris les colonnes à distiller. Celles-ci sont à plateaux à cloche (9 pour l'unité I, 15 pour l'unité II) avec un chauffage électrique (72 kW pour l'unité I, 54 kW pour l'unité II). La production du procédé se situe autour de 2 tonnes par jour.

#### 512 Système de conduite.

Au cours de la définition du système passif, nous avons tenu compte de la possibilité d'implanter un système de conduite décentralisée coordonnée. La décentralisation peut concerner la décision, donc les algorithmes, mais aussi le support de ces algorithmes : c'est-à-dire le système informatique (logiciel et matériel).

En ce sens, chaque module constituant des unités comporte une ou plusieurs boucles de régulation ou des automates logiques. Ces éléments de l'instrumentation forment en général le premier niveau du système de conduite. Ils sont directement liés au procédé et assurent l'exécution des objectifs reçus sous forme de consignes. Dans le cas de plusieurs régulateurs groupés, une hiérarchie peut apparaître sous la forme d'une répartition des consignes.

Ces dernières remarques permettent d'envisager une substitution de plusieurs régulateurs classiques par un ou plusieurs microprocesseur qui formeront un centre d'instrumentation ou de décision locale assurant le fonctionnement interne d'un élément de transformation de base.

Le comportement du centre de décision est fonction de sa situation dans l'environnement représenté par les centres voisins (de même niveau ou de niveau supérieur) ainsi que par les éléments passifs appartenant au centre considéré ou aux centres voisins. Cet environnement présente des contraintes de fonctionnement ou des objectifs à réaliser par l'élément de transformation en question.

La figure (F 51-6) schématise une organisation hiérarchisée du système de conduite du procédé pilote. Les points noirs représentent les centres d'instrumentation ; les cercles représentent les centres de décisions qui conduisent les éléments de transformation et assurent ainsi le fonctionnement coordonné du procédé complet.

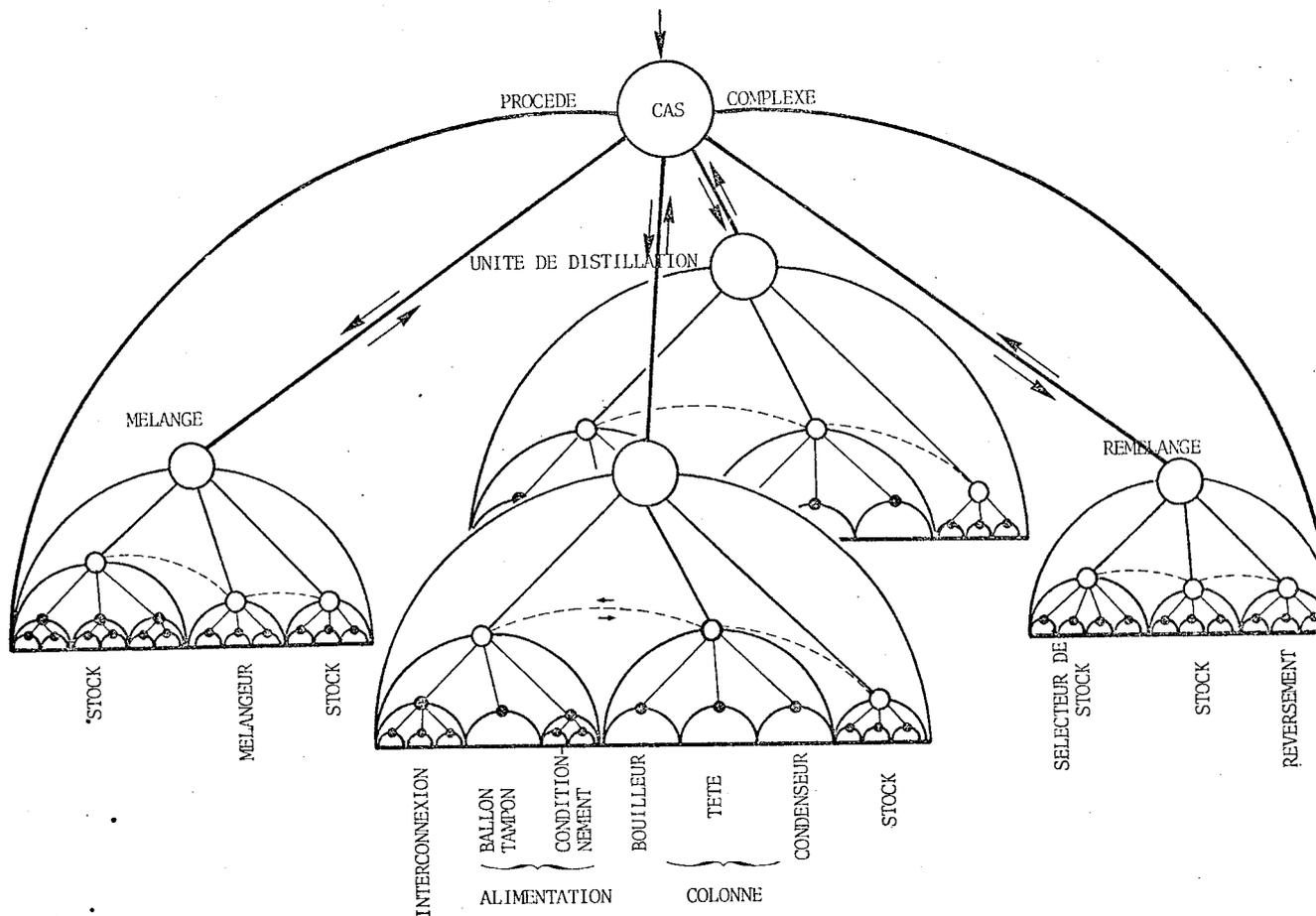


FIG 51-6

ORGANISATION DU SYSTEME DE CONDUITE

Pour un module de colonne à distiller les centres d'instrumentation assurent le comportement souhaité dans les différentes parties du module.

Le centre du bouilleur surveille le niveau du liquide, le débit de prélèvement et assure le chauffage compte tenu de la température du plateau ou de celle du débit de vapeur. Un centre de décision en tête de la colonne, assure le recyclage du produit de tête (reflux) interne ou externe, son débit et sa température. Un autre centre de décision détermine les conditions de fonctionnement optimale (débit, température, recyclage) du condenseur pour une récupération éventuelle de l'énergie.

Les relations entre les centres sont fonctions du rôle qu'ils jouent dans le module de transformation. Souvent les exigences de la sécurité nécessitent la liaison directe entre centres d'instrumentation (par exemple le fonctionnement du condenseur conditionne le chauffage), tandis que le fonctionnement du module, fondé sur son modèle, est assuré par le centre de décision spécifique situé au niveau supérieur. Le fonctionnement de ce centre de décision de même que celui des centres des niveaux supérieurs est assuré grâce aux fonctions {coopération - création - améliorations} que nous avons proposées dans le paragraphe (233).

La réalisation du système intégré revient en pratique à équiper des éléments du système passif de centres d'instrumentation et de décision et à implanter des centres coordonnateurs en vue d'assurer la réalisation des objectifs et le respect des contraintes de l'environnement par ce système intégré.

La définition des centres et leurs mise en place progressive coïncide avec la progression dans l'automation qui consiste à partir de la commande des systèmes isolés pour aller vers la commande décentralisée puis vers la coordination d'ensembles complexes.

Dans la suite nous essayons de suivre cette voie et de définir d'abord un centre de décision local, puis d'introduire la coopération entre centres voisins et enfin de développer un centre coordonnateur qui assure la transition et la stabilisation d'un ensemble complexe.

En vue de montrer le fonctionnement de ces centres dans une application réelle, nous avons choisi une partie du système passif (511) composée de deux colonnes à distiller (F 22-3), connectées en série et ne tenant pas compte des modules de conditionnement d'alimentation.

La figure (F 52-1) représente l'ensemble considéré où la séparation (transformation) dans chaque colonne (module) peut être modifiée grâce aux entrées libres ( $u$ ) qui, dans notre cas sont la puissance de chauffe ( $Q$  [kW]) et le taux de reflux ( $R$  [%]). L'alimentation de chaque colonne est caractérisée par sa qualité (concentration ( $X^F$  [%])) et sa quantité (débit  $LF$  [l/h]) et représente l'interaction ( $w$ ) des modules. Les sorties ( $y$ ) de chaque module qui sont constituées par le produit de tête sont caractérisées par les mêmes grandeurs physiques : la concentration ( $X^D$  [%]) et le débit ( $LD$  [l/h]).

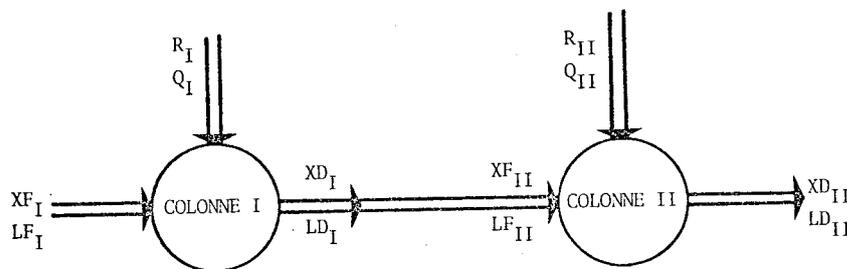


FIG 52-1

REPRESENTATION DE DEUX COLONNES A DISTILLER EN SERIE

## 520 CENTRE DE DECISION LOCAL

En se référant à l'exemple d'une colonne à distiller, nous allons montrer les fonctions du centre de décision qui est susceptible d'assurer la régulation et l'asservissement de cette colonne. Ces fonctions permettent en outre une coordination dynamique. Nous reprenons les fonctions de base d'un centre de décision proposées dans le paragraphe(233) en vue de montrer un exemple de leurs réalisations.

521 Accumulation des expériences (modélisation - identification).

L'objectif de la conduite du système passif ne peut être atteint sans la connaissance de celui-ci. L'analyse physique et la description mathématique du système peuvent servir de connaissance de base. Dans notre cas le modèle théorique de connaissance d'une colonne à distiller [2 Mo ] a une forme non-linéaire avec une représentation physique des variables d'états au niveau de chaque plateau.

L'utilisation d'un modèle théorique ne peut se faire sans sa vérification expérimentale. L'identification des paramètres du modèle est souvent difficile compte tenu de leur nombre et de leur mesure parfois indirecte. Ces difficultés, comme dans notre cas, empêchent souvent l'utilisation pratique des modèles de connaissance, ce qui est regrettable pour la conduite des systèmes. De plus, on cherche le modèle le mieux adapté à une utilisation future, par exemple le modèle qui convient le mieux aux méthodes disponibles pour la commande. Les modèles de connaissance ne sont pas toujours facile à utiliser dans ce but et leur simplification et leur linéarisation peuvent poser des problèmes supplémentaires.

Ces raisons nous ont conduit à la séparation des phénomènes statiques et dynamiques. Pour les premiers, l'expérience acquise sur le procédé

a permis de définir pour chaque colonne à distiller des points de fonctionnement qui ont les caractéristiques approximatives suivantes :

Colonne I :

alimentation ( $w_1$ )	$XF_1 \doteq 35\%$ (méthanol) $LF_1 \doteq 100$ l/h	
produit de tête ( $y_1 \equiv v_1$ )	$XD_1 \doteq 75\%$ $LD_1 \doteq 40$ l/h	(521-1)
actions ( $u_1$ )	$R_1 = 40\%$ $Q_1$ : sa valeur (exprimée en kW) dépend des conditions de fonctionnement	

Colonne II

alimentation ( $w_2 = y_1$ )	$XF_2 \doteq 75\%$ $LF_2 \doteq 40$ l/h	
produit de tête ( $y_2$ )	$XD_2 \doteq 95\%$ $LD_2 \doteq 30$ l/h	(521-2)
actions ( $u_2$ )	$R_2 = 40\%$ $Q_2$ : sa valeur (exprimée en kW) dépend des conditions de fonctionnement	

En ce qui concerne les phénomènes dynamiques, le comportement autour des points de fonctionnement choisis est représenté par un modèle linéaire, invariant, obtenu grâce à la méthode d'identification multivariable [5Ba] avec des entrées en échelon ( $\Delta LF_1, \Delta R_1, \Delta Q_1, \Delta R_2, \Delta Q_2$ ). Les variables

d'états ( $x$ ) des modèles n'ont pas de correspondance physique dans le système étudié.

On présente comme un exemple d'identification [5Ba] les modèles dynamiques de deux colonnes à distiller relatives aux points de fonctionnement (521-1,2). Les entrées  $w$  de la première colonne [ $XF_1$ ,  $LF_1$ ] sont maintenues constantes.

Colonne I

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0 & -0,73 & 0 & 0 \\ 1 & 1,72 & 0 & 0 \\ 1,2 & 1,1 & 0 & -0,45 \\ 0 & 0 & 1 & 1,38 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,05 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0,05 & -0,03 \\ 0 & 0 & -0,85 & 0,22 \\ 0 & 0 & 0,97 & -0,24 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta XF_1 \\ \Delta LF_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta R_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} XD_1 \\ LD_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) \quad (521-3)$$

Colonne II

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0 & 0,16 & 0 & 0 \\ 1 & 0,83 & 0 & 0 \\ 1,4 & -0,22 & 0 & 0,02 \\ 0 & 0 & 1 & 0,89 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -0,84 & 0,01 & -0,25 & 0,02 \\ -0,85 & -0,001 & -0,25 & -0,1 \\ -1,53 & 0,06 & 0,75 & -0,14 \\ 0,4 & -0,06 & -0,3 & -0,28 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta XF_2 \\ \Delta LF_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta R_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} XD_2 \\ LD_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) \quad (521-4)$$

$t$  : période choisié à 10s

522 Coopération - création (stabilisation).

Les expériences sur le fonctionnement de chaque colonne à distiller, exprimées par leurs modèles respectifs, permettent la réalisation d'autres fonctions dans un centre de décision.

Supposons que dans notre cas l'environnement de chaque colonne se présente comme l'ensemble des objectifs ( $z_0, z_i$ ) concernant la production (concentration (XD), débit (LD), l'apport énergétique (chauffage (Q), recyclage (condensation-vaporisation) (R)), ainsi que les contraintes d'égalité ( $\bar{w}$ ) pour l'alimentation (concentration (XF), débit (LF)) et éventuellement les contraintes d'inégalité sur les autres variables (par exemple chauffage (Q)). Les objectifs représentent des valeurs ou des trajectoires dynamiques désirées pour les différentes variables. Les contraintes d'égalité doivent être constamment respectées tandis que celles d'inégalité limitent les évolutions des variables et peuvent influencer ainsi la stratégie de conduite.

La fonction de coopération consiste dans la satisfaction par le système de l'ensemble des objectifs et des contraintes. Comme il est rare de voir l'ensemble compatible (statiquement et dynamiquement), la coopération se traduit par un compromis dans la satisfaction des objectifs, donc par une meilleure poursuite de l'environnement par le système. Dans notre exemple on cherche la réalisation de la production désirée (XD, LD) compte tenu des directives concernant la consommation énergétique (R, Q) et de l'alimentation qui est imposée (XF, LF).

La coopération peut être réalisée par l'algorithme de stabilisation (430) grâce aux expériences représentées par le modèle (521). L'algorithme et son fonctionnement peuvent être représentés (F 47-3) à l'aide du symbolisme graphique que nous avons proposé. L'application réelle de cet algorithme exige la connaissance instantanée des objectifs ( $z_i; z_0$ ) ainsi

que la classe de leurs évolutions (modèles d'objectifs). Le retour d'états assurant la stabilisation, ne peut pas être réalisé facilement dans notre cas, car les états n'ont pas de signification physique et le système n'est pas linéaire.

Pour ces raisons nous réalisons le retour d'état sur le modèle ; l'algorithme correspondant est représenté sur la figure (F 52-2). On assure la coopération avec l'environnement grâce à l'action prédictive ( $u_M$ ) élaborée sur le modèle en respectant les valeurs d'interactions ( $w$ ) mesurées sur le procédé (alimentation (XF), (LF)).

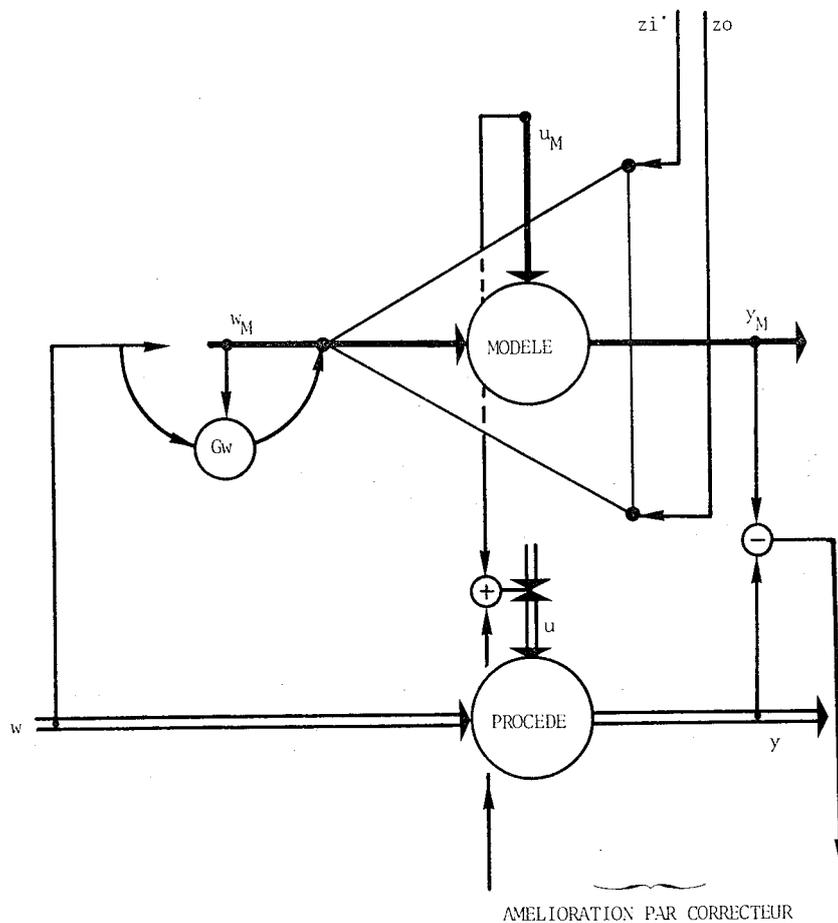


FIG 52-2  
STABILISATION

Remarquons que la fonction de création d'un environnement et de ses objectifs est dégradée dans le cas d'un centre de décision local. Dans notre cas cette fonction se traduit par la mise en échelle des actions du modèle ( $u_M$ ) et leur superposition éventuelle aux actions relatives au point de fonctionnement (521-1 ou 2).

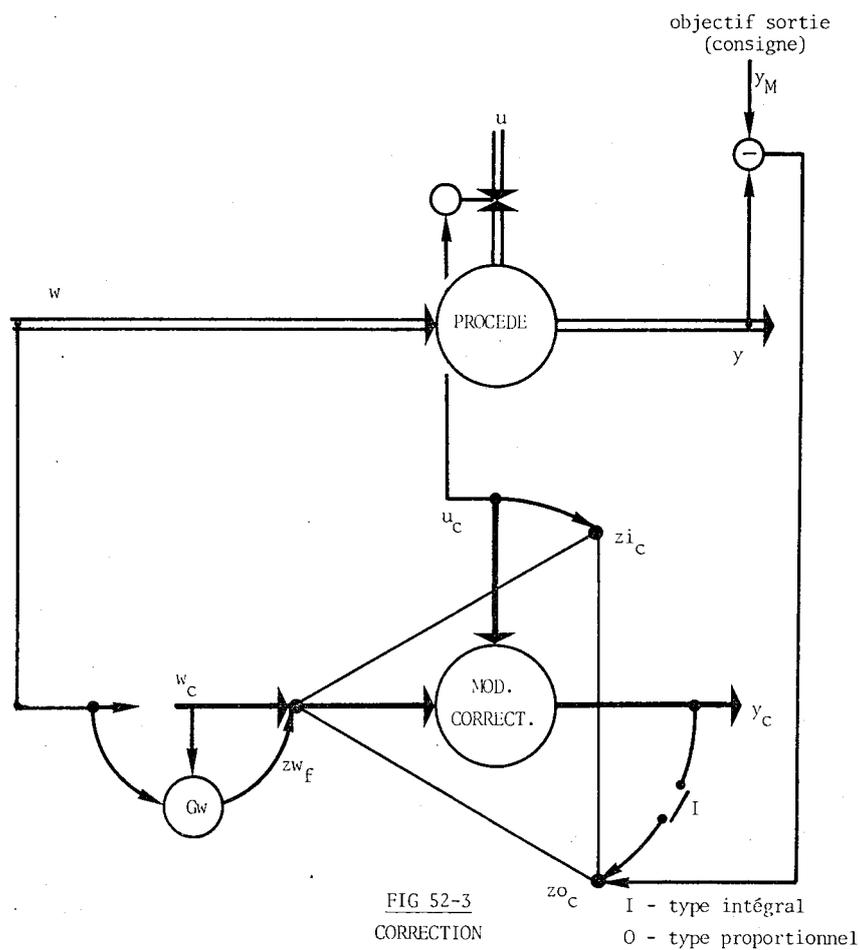
### 523 Amélioration (correction).

La fonction d'amélioration consiste dans l'exploitation de l'information disponible pour améliorer la réalisation des fonctions exposées précédemment (coopération - création). Dans le cas étudié l'information à notre portée est l'évolution du procédé caractérisée ici par la différence entre la sortie du modèle et les caractéristiques du produit de tête de la colonne à distiller mesurées sur le procédé.

Les origines de cette différence, comme les remèdes pour la réduire, peuvent être multiples. Citons l'amélioration ou le changement du modèle, la commande correctrice, la combinaison de plusieurs moyens. Il faut remarquer les résultats de la commande de la colonne à distiller obtenus à l'aide de plusieurs modèles linéaires [3Mo] avec leur localisation en temps réel. La commande duale adaptative [4Ba] du même procédé a donné de bons résultats grâce à la commande correctrice réalisée parallèlement avec l'identification du modèle utilisé pour son élaboration.

Dans le même but d'amélioration, nous présentons ici un "correcteur - poursuiveur" qui élabore la commande correctrice ( $u_c$ ) à partir de la différence entre la consigne (sortie du modèle de stabilisation ( $y_M$ )) et la sortie du procédé ( $y$ ). Le correcteur exploitant la technique de génération des objectifs fictifs et autonomes (350) est représenté sur la figure (F 52-3). L'action correctrice ( $u_c$ ) peut conduire à la réduction (action de type proportionnel) ou à l'annulation (action de type intégral) de l'écart ( $y_M - y$ ). La génération d'un objectif fictif ( $C_w$ ) garantit le respect de

l'interaction ainsi qu'une valeur d'entrée ( $w_c$ ) identique à la différence ( $w-w_M$ ) calculée au cours de la stabilisation. Cette différence est en général identique à zéro.



Dans notre cas, l'importance de la correction est augmentée par la nonlinéarité de la colonne à distiller et par le fait que sa commande est fondée sur un modèle linéaire valable autour d'un point de fonctionnement. Le but principal est de corriger des perturbations (en particulier des

perturbations de fréquences peu élevées) en vue de maintenir le point de fonctionnement, caractérisé par la qualité (XD) et la quantité (LD) du produit fini.

#### 524 Résultats expérimentaux.

Le centre de décision local est géré par les algorithmes de stabilisation et de correction présentés dans les paragraphes précédents. Sa réalisation matérielle utilise un microprocesseur INTELEC 8. La partie logicielle implantée sur 4k de mémoire comporte les sous-programmes d'opérations matricielles en virgule flottante, la gestion des entrées-sorties et un interpréteur destiné à constituer et à modifier des programmes en temps réel. Les résultats de stabilisation et de correction sont équivalents à ceux obtenus avec les programmes en PROCOL implantés sur le calculateur T 2000 [3BJ2]. L'application sur le procédé de discrétisation de 10 sec exige un temps de calcul de 1 sec pour le T 2000 et de 4 sec pour le microprocesseur INTELEC 8.

Nous présentons ici les résultats expérimentaux du fonctionnement du centre de décision qui conduit la première colonne à distiller à l'aide de son modèle dynamique (521-3).

Les deux premiers enregistrements (F 52-4) et (F 52-5) concernent le fonctionnement d'une partie du centre de décision représentée uniquement par le correcteur. Dans ce cas, la colonne a subi une perturbation supposée non mesurable qui dans notre cas est provoquée par l'augmentation de 30% de la valeur nominale du débit d'alimentation (LF).

Cette perturbation est détectée par le correcteur à travers la variation de la sortie caractérisée par la concentration (XD) et le débit (LD) du produit de tête de la colonne. La consigne (représentée en trait pointillé.....) reste inchangée au cours du fonctionnement.

Le premier enregistrement (F 52-4) est obtenu avec la colonne en boucle ouverte jusqu'à l'instant (T) où le correcteur est connecté. On voit les actions correctrices du reflux ( $R_1$ ) et du chauffage ( $Q_1$ ) qui compensent l'erreur sur la concentration ( $XD$ ).

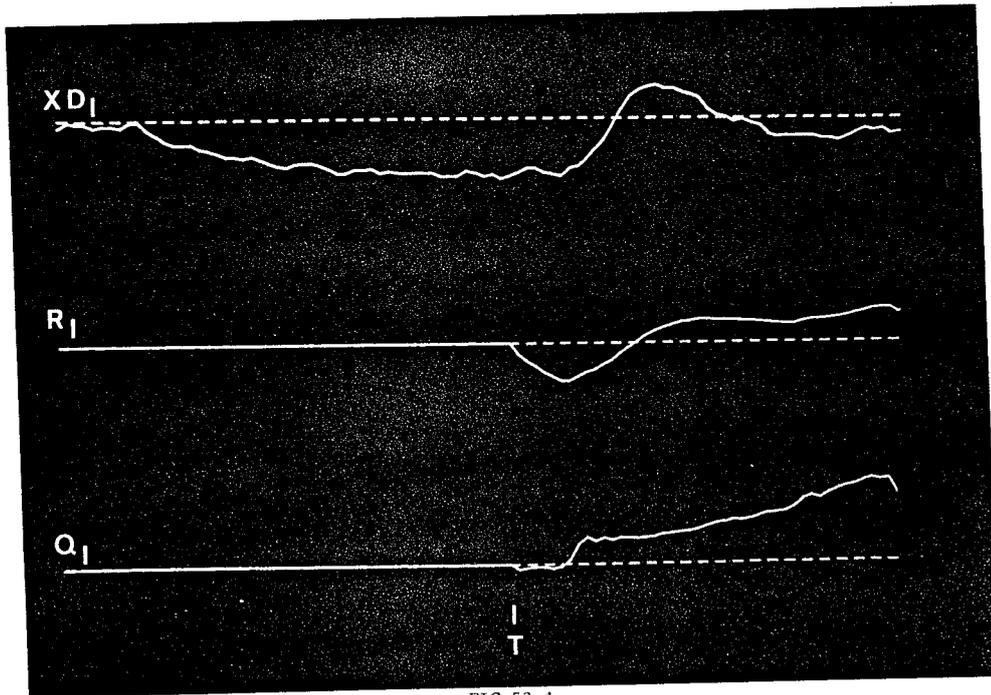


FIG 52-4  
CORRECTION D'UNE PERTURBATION APPARUE

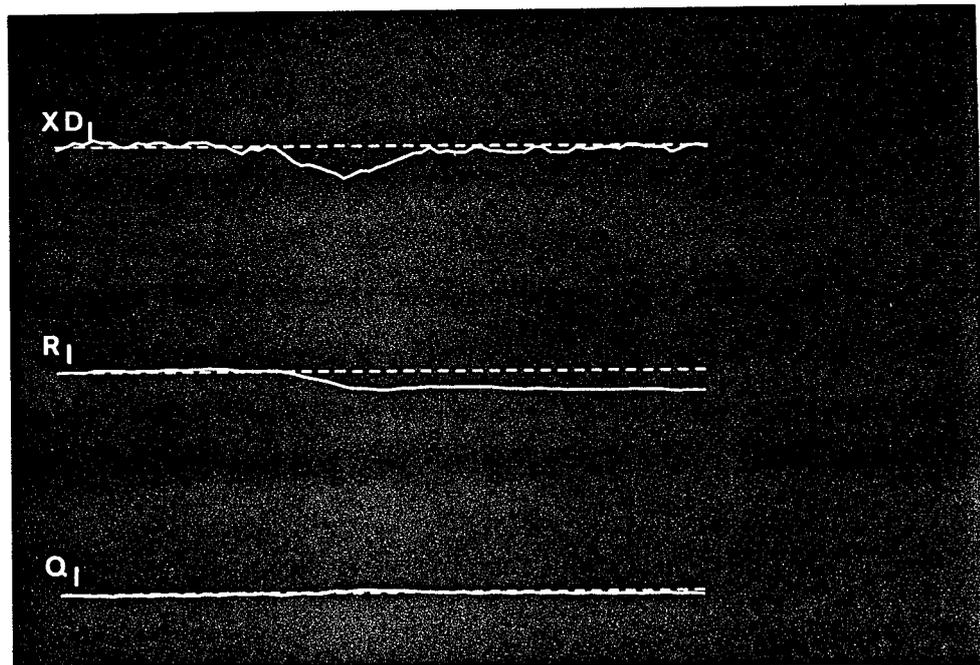


FIG 52-5  
FONCTIONNEMENT DU CORRECTEUR

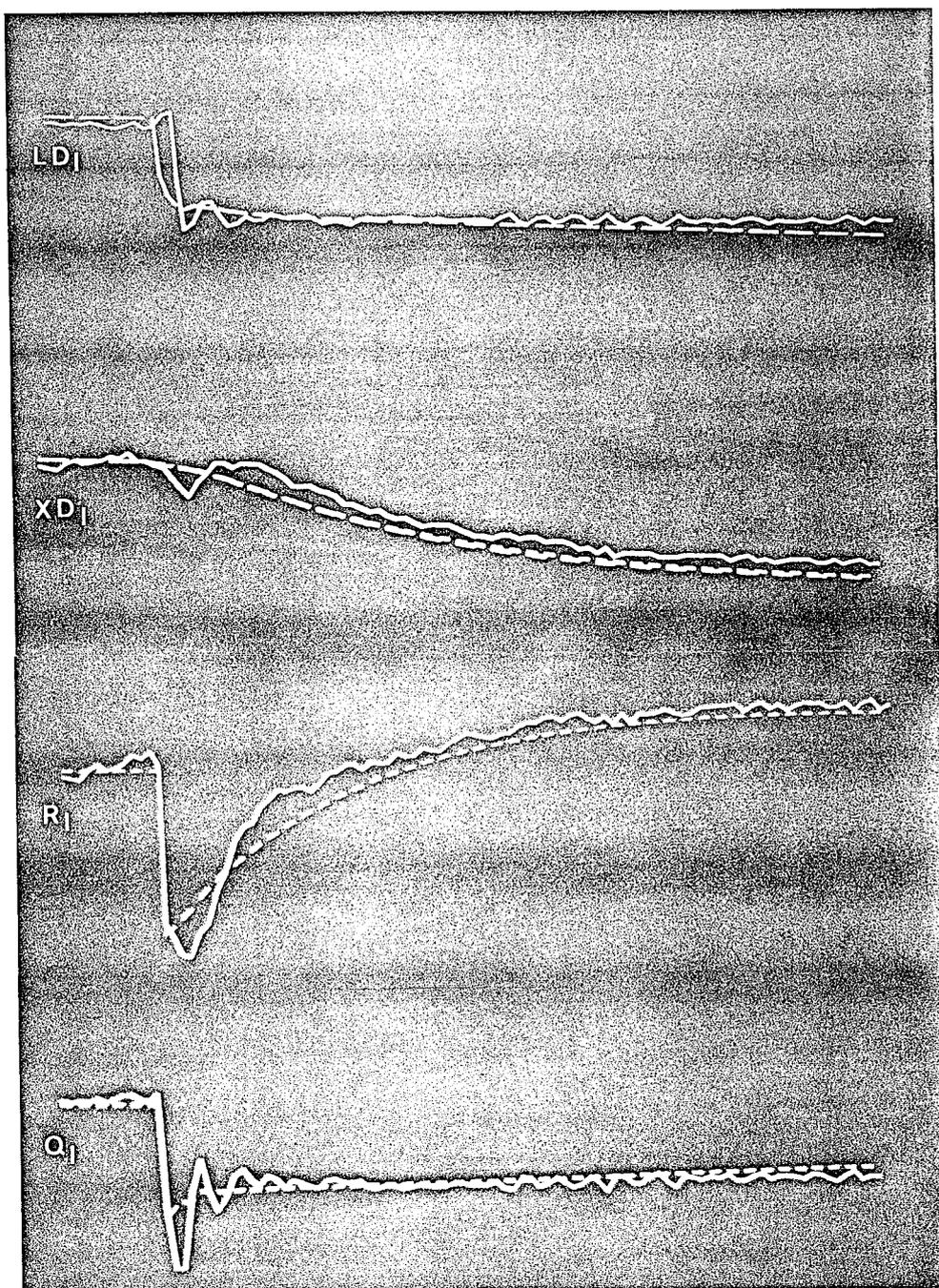


FIG 52-6  
STABILISATION AVEC CORRECTION

ECHELLE

Horizontal :   
= 120 secondes

Vertical :

- = -10% de concentration ( $XD_1$ )
- = - 5% de concentration ( $XD_2$ )
- = + 10% de reflux ( $R_1$  et  $R_2$ )
- = + 1kW de puissance de chauffe ( $Q_1, Q_2$ )
- = + 5 l/h débit de tête ( $LD_1$  et  $LD_2$ )

Les conséquences de la même perturbation ( $\Delta LF = 30\%$ ) en cours de fonctionnement du correcteur sont représentées par l'enregistrement (F 52-5).

L'enregistrement (F 52-6) représente le fonctionnement du centre de décision complet. La variation de l'environnement de ce centre est traduite par la variation des objectifs des variables. A l'aide d'un modèle on détermine le meilleur compromis possible (au sens d'une distance) dans le respect de ces objectifs (stabilisation). Par exemple la variation des objectifs (540) conduit au changement du point de fonctionnement ( $XD_1, LD_1$ ) et à l'évolution dynamique prévue par le modèle (trait pointillé.....). Cette évolution est poursuivie par les variables de la colonne à distiller (trait plein ———) grâce au correcteur qui remplit la fonction d'amélioration. Remarquons que la différence entre l'évolution du modèle et celle de la colonne est fonction de la qualité de la représentation du procédé par le modèle, des perturbations agissant sur la colonne à distiller, et aussi des caractéristiques du fonctionnement (intégral ou proportionnel) du correcteur qui compense ces différences. Sur l'enregistrement des actions ( $R_1, Q_1$ ) l'apport du correcteur apparaît sous forme d'une différence entre l'évolution de ces actions prévue par le modèle et celle qui est effectivement réalisée. Les résultats de la correction sont visibles sur l'enregistrement de l'évolution de la sortie de la colonne ( $XD_1, LD_1$ )

### 530 COOPERATION DANS UN SYSTEME DECENTRALISE

Le centre de décision locale assure la meilleure réalisation des objectifs, indépendamment du comportement des autres systèmes. Cette façon de conduire le procédé ne permet pas en général d'assurer l'identité entre variables des systèmes à connecter. Par exemple, on définit un objectif identique pour la sortie ( $XD_1, LD_1$ ) d'une colonne et pour l'entrée

( $XF_2$ ,  $LF_2$ ) de l'autre colonne à distiller mais les variables réelles ne seront identiques que dans des cas particuliers (tous les objectifs doivent être compatibles avec cette exigence).

La figure (F 53-1) représente l'algorithme de génération des objectifs fictifs destiné à résoudre ce cas. On peut modifier les objectifs relatifs à la sortie ( $y_1$ ) de la première colonne et à l'entrée ( $w_2$ ) de la deuxième en vue d'annuler la différence entre ces variables réelles et d'assurer ainsi le respect de l'interaction. La modification des objectifs peut être exprimée comme un effet de coopération entre ces systèmes interconnectés. Cette coopération a pour conséquence des résultats de conduite (par exemple consommation énergétique (Q)) moins bonne que si les objectifs n'étaient pas modifiés. Ces objectifs sont fournis par les générateurs (Gv) et (Gw) et peuvent garantir le respect des interactions, avec une contribution des générateurs exprimée par un opérateur de coopération (F) (453-5).

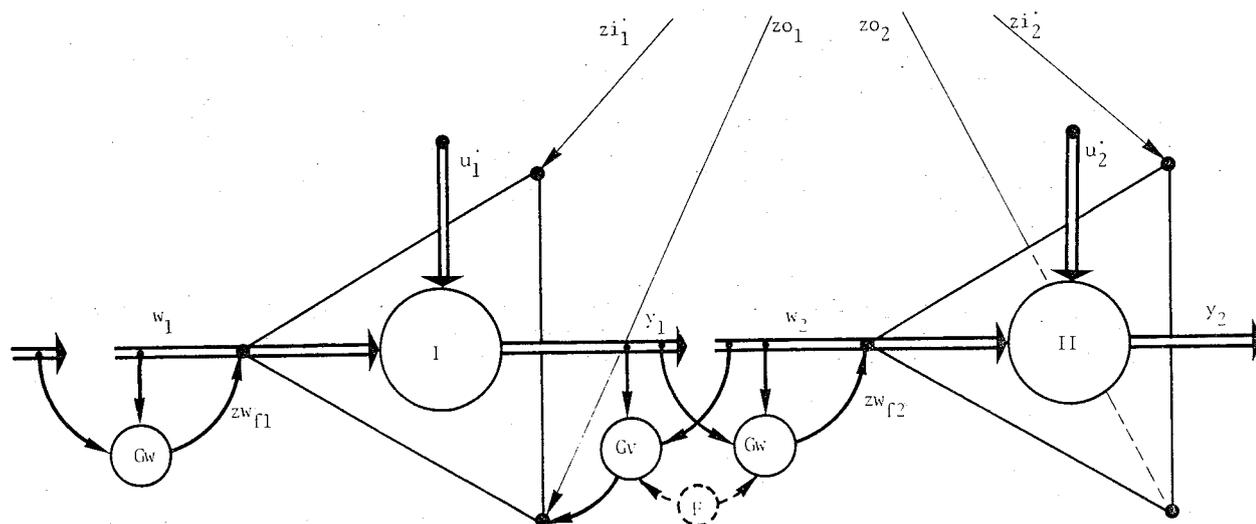


FIG 55-1

COOPERATION DE DEUX SYSTEMES EN VUE DE RESPECTER DES INTERACTIONS

La figure (F 53-2) représente les résultats obtenus avec l'algorithme (F 53-1) pour les différentes valeurs de l'opérateur de coopération (F). Dans tous les cas l'interaction est respectée, c'est-à-dire que concentration et débit d'entrée de la deuxième colonne, concentration et débit de la sortie de la première sont identiques ( $XF_2 = XD_1$ ,  $LF_2 = LD_1$ ). Sur la figure est enregistrée l'évolution de l'interaction au cours du changement des objectifs subi par chaque colonne (les objectifs sont définis par le modèle coordonnateur (540)).

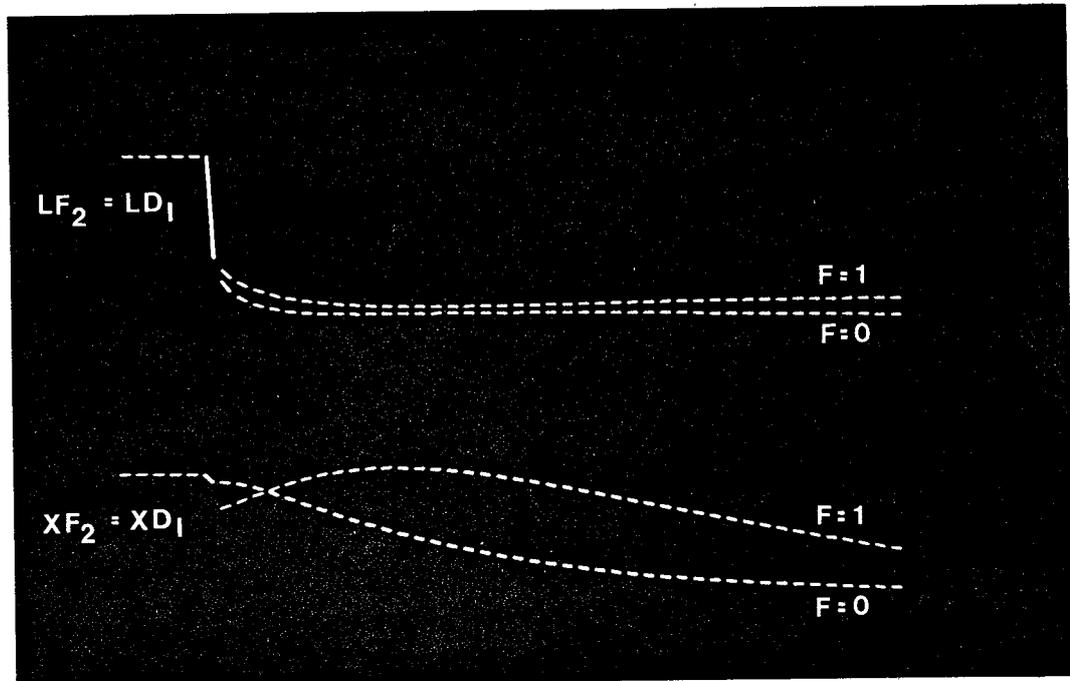


FIG 53-2  
CONSEQUENCES DU RESPECT DES INTERACTIONS

Les deux cas sont présentés : pour ( $F = 0$ ) l'effort pour respecter l'interaction est fournie par la deuxième colonne, la première étant en situation optimale. Pour ( $F = 1$ ) c'est l'inverse.

#### 540 CENTRE DE DECISION COORDONNATEUR

La coopération entre les systèmes interconnectés et les centres qui les conduisent (530) assure le respect des interactions et contribue à la stabilisation de l'ensemble interconnecté par rapport aux objectifs constants. Si ces objectifs évoluent la transition de l'ensemble des systèmes peut être coordonnée grâce à la poursuite du modèle coordonnateur (460).

Pour illustrer la réalisation d'un centre coordonnateur et le fonctionnement de celui-ci, nous avons pris comme exemple deux colonnes à distiller connectées en série.

#### 541 Accumulation des expériences (création d'un modèle coordonnateur).

La recherche d'une représentation d'un ensemble complexe se heurte au nombre des contraintes. La complexité et la dimension de cet ensemble sont souvent des obstacles à surmonter. La définition d'une représentation intermédiaire (371) fait appel aux méthodes d'agrégation [5BM] [5Da] ou à une identification moins fine de l'ensemble. Nous utilisons cette dernière méthode pour obtenir un modèle simplifié de l'ensemble de deux colonnes à distiller en série.

Conformément à la figure (F 52-1) et compte tenu des points de fonctionnement de chaque colonne (521-1) (521-2) l'identification a donné pour la période de discrétisation ( $t = 10$  sec) le modèle suivant :

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} 0,92 & 0 & 0 & 0 \\ 0,06 & 0,93 & 0 & 0 \\ 0,23 & 0,19 & 0,35 & 0 \\ 0,04 & -0,04 & 0,20 & 0,87 \end{bmatrix} x(t)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,03 & -0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,01 & 0,01 & 0,007 & -0,02 \\ 0 & 0 & 0,91 & -0,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,30 & 0,05 & 0,20 & -0,05 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta XF_1 \\ \Delta LF_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta R_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta R_2 \end{bmatrix} \quad (541-1)$$

$$\begin{bmatrix} XD_2 \\ LD_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(t)$$

#### 542 Fonctions du centre coordonnateur.

La fonction de coopération du centre coordonnateur assure essentiellement un compromis dans la réalisation des objectifs et des contraintes de l'environnement. Ce compromis peut être réalisé par la poursuite de cet environnement par le modèle coordonnateur.

Dans le cas envisagé ici de deux colonnes en série (F 52-1) (F 54-1) les objectifs de production de l'ensemble ( $z_{0c}$ ) concernent la qualité et la quantité désirées ( $XD_2$ ,  $LD_2$ ) du produit de sortie de la deuxième colonne. De même l'allocation de l'énergie ( $z_{1c}^*$ ) concerne la consommation de chaque colonne ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ) et éventuellement aussi le reflux ( $R_1$ ,  $R_2$ ). L'in-

formation sur l'approvisionnement ( $w$ ) de l'ensemble (qualité  $XF_1$ , quantité  $LF_1$ ) représente les contraintes de l'environnement à respecter.

La coopération peut être réalisée à l'aide d'un algorithme de stabilisation (460) et se présente comme une évolution du modèle coordonnateur. Les variables de ce modèle et leur évolution dynamique sont utilisées pour la création d'un environnement qui se traduit par des objectifs pour chaque système et pour chaque centre coordonné.

Dans notre cas par exemple un état (ou sortie) du modèle coordonnateur représente l'interaction entre les deux colonnes ( $y_1 = w_2$ ). Sa valeur détermine l'objectif concernant la qualité et la quantité du produit de la première colonne ( $XD_1, LD_1$ ), ainsi que la prévision des entrées de la deuxième colonne ( $XF_2, LF_2$ ) qui doivent être ajustées en fonction de la production réelle de la première colonne. De même, grâce au modèle coordonnateur on peut retrouver pour les entrées de chaque colonne ( $R_1, Q_1$ ), ( $R_2, Q_2$ ) des objectifs compatibles avec les objectifs des sorties.

La réalisation pratique de la fonction de création de l'environnement consiste d'une part dans l'allocation des variables du modèle coordonnateur comme objectifs des systèmes à coordonner ou création de ces objectifs, et d'autre part en une interprétation des objectifs et de leur évolution destinée aux systèmes à coordonner. L'interprétation de l'évolution dynamique peut être remplacée par l'information contenue dans tout ou partie des états du modèle coordonnateur. A partir de ces états, si l'on connaît les modèles du coordonnateur et du système à coordonner, on peut créer un vecteur objectif et calculer la commande ( $u$ ) pour chaque système (462-2) et traduire ainsi l'environnement dynamique de ce système.

La fonction amélioration du centre coordonnateur peut consister

dans un changement du modèle, de ses paramètres ou dans la modification de ses états. Les études actuellement en cours concernent le développement des algorithmes permettant de réaliser cette fonction en temps réel.

La figure (F 54-1) représente le centre coordonnateur stabilisé par rapport aux objectifs ( $z_{i_c}$ ,  $z_{o_c}$ ) et poursuivi par les centres de décision locaux. Dans la représentation simplifiée (F 47-3) des centres locaux, les cercles figurent dans notre cas, les colonnes avec leur correcteur (520).

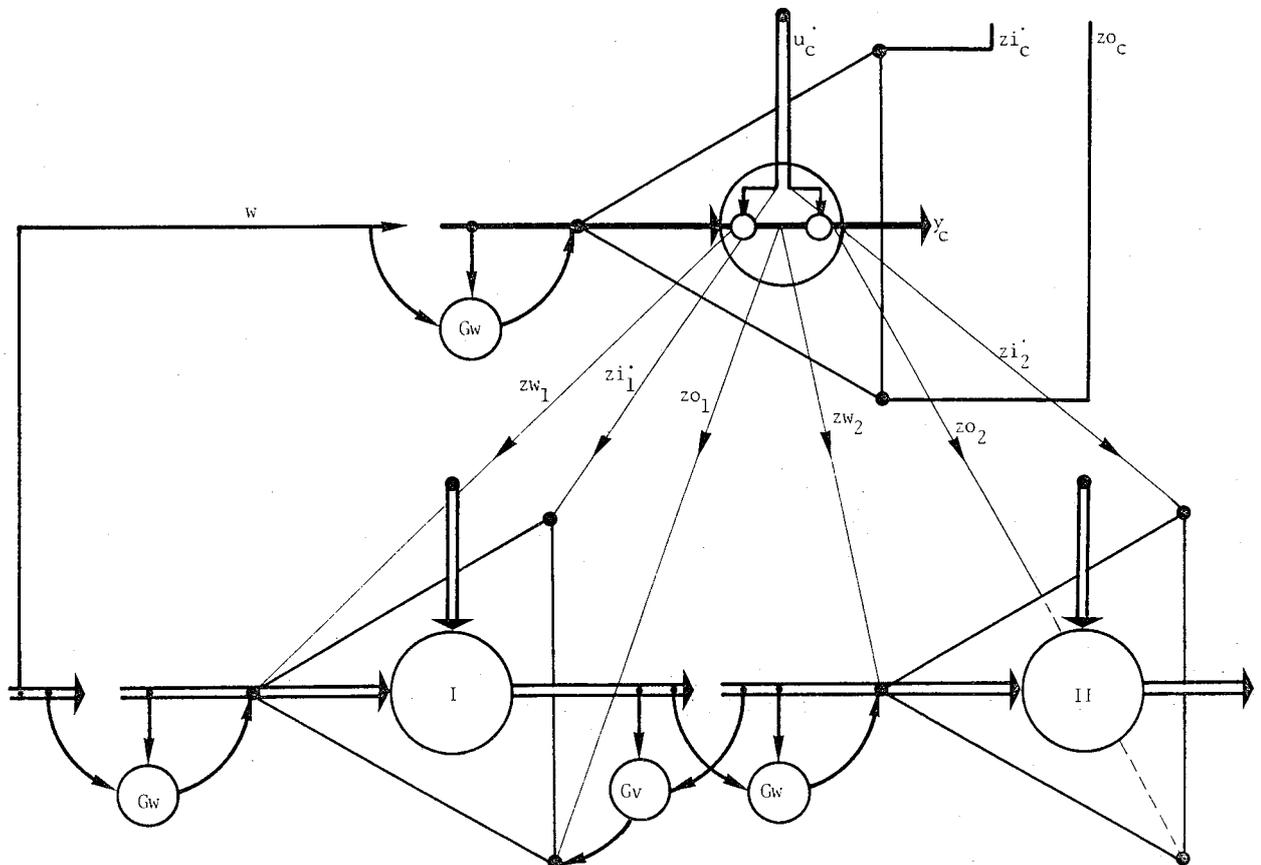


FIG 54-1  
COORDINATION PAR POURSUITE

543 Résultats expérimentaux.

L'algorithme de coordination par poursuite symbolisé sur la figure (F 54-1) est traduit en langage PROCOL et implanté sur le calculateur T 2000 connecté au procédé complexe en vue de conduire les deux colonnes à distiller [3BJ2].

Le logiciel comporte les sous programmes d'opérations matricielles occupant 2k mots de mémoire, des calculs préliminaires comportant les calculs des matrices de bouclage et d'anticipation et occupant 3k mots de mémoire, enfin les programmes de conduite en temps réel de 2,5k mots.

L'organisation du logiciel correspondant à la conduite de deux colonnes à distiller est représentée sur la figure (F 54-2). Son exécution appelée toutes les 10 sec dure approximativement 3,5 sec.

Les résultats obtenus au cours de la commande du procédé sont représentés sur la figure (F 54-3). Ils montrent l'évolution du modèle coordonnateur en fonction des changements des objectifs concernant la production globale de l'ensemble des deux colonnes. Cette évolution (-----) définit des objectifs pour les entrées et les sorties de chaque colonne ; comme exemple la figure (F 54-3) représente ces objectifs pour la sortie de la deuxième colonne (concentration  $XD_2$ , débit  $LD_2$ ). Ces objectifs sont poursuivis par les modèles du centre local (trait pointillé.....) et réalisent ainsi une fonction de coopération entre ces centres. On voit aussi sur la figure l'évolution des variables réelles (trait plein ———) mesurées sur le procédé.

La figure (F 54-4) obtenue dans les mêmes conditions que la figure (F 54-3) montre l'évolution des modèles locaux ainsi que celle des concentrations ( $XD_1$ ,  $XD_2$ ) mesurées sur les deux colonnes connectées en série. (Echelle verticale augmentée deux fois par rapport aux figures précédentes (F 52-6)).

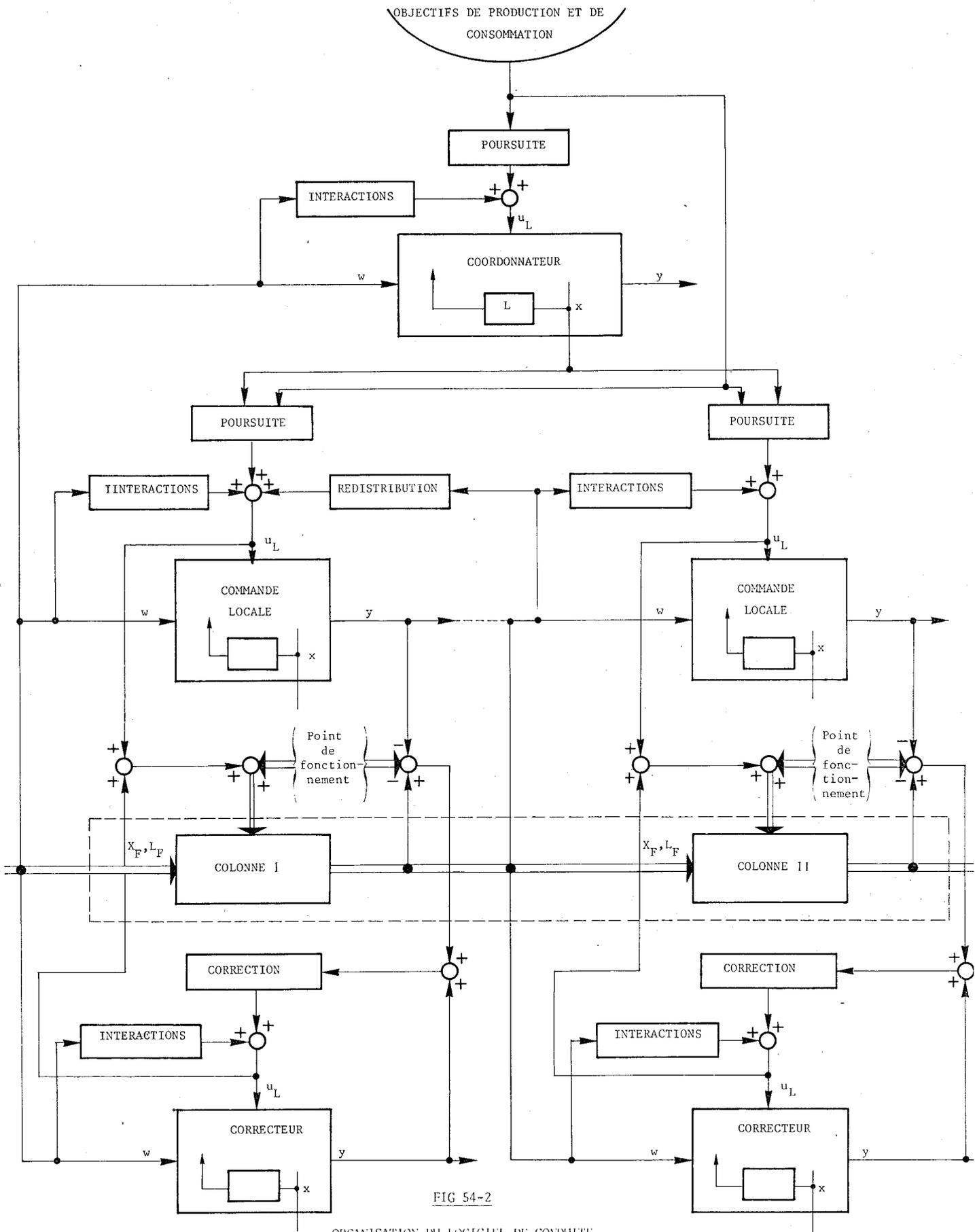


FIG 54-2

ORGANISATION DU LOGICIEL DE CONDUITE

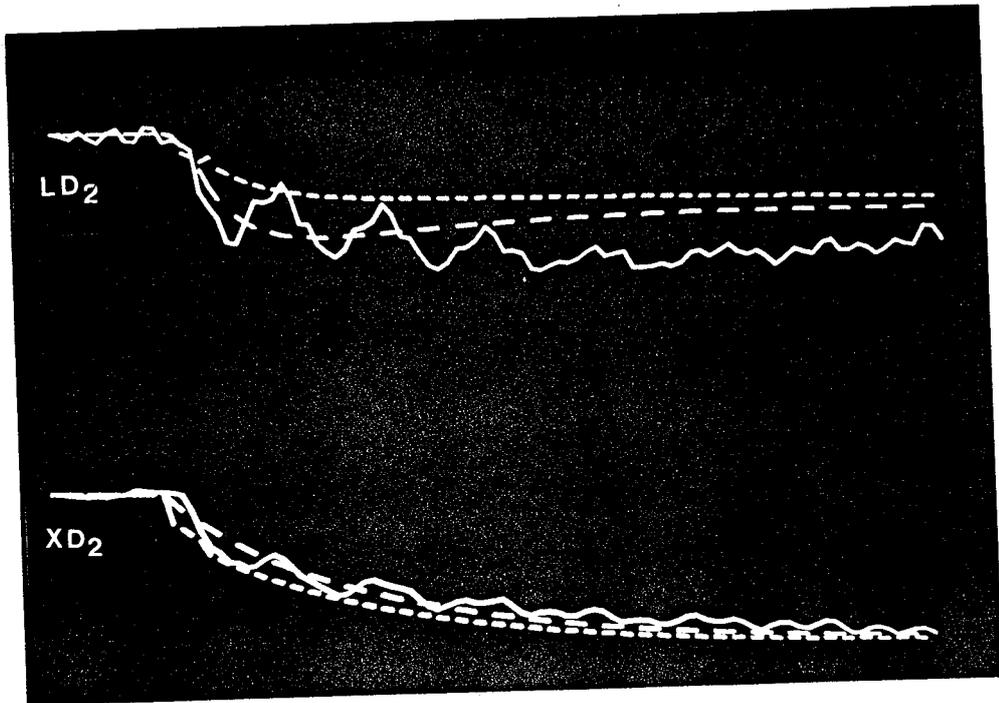


FIG 54-3  
CHANGEMENT DE LA PRODUCTION DE L'ENSEMBLE DE DEUX COLONNES EN SERIE

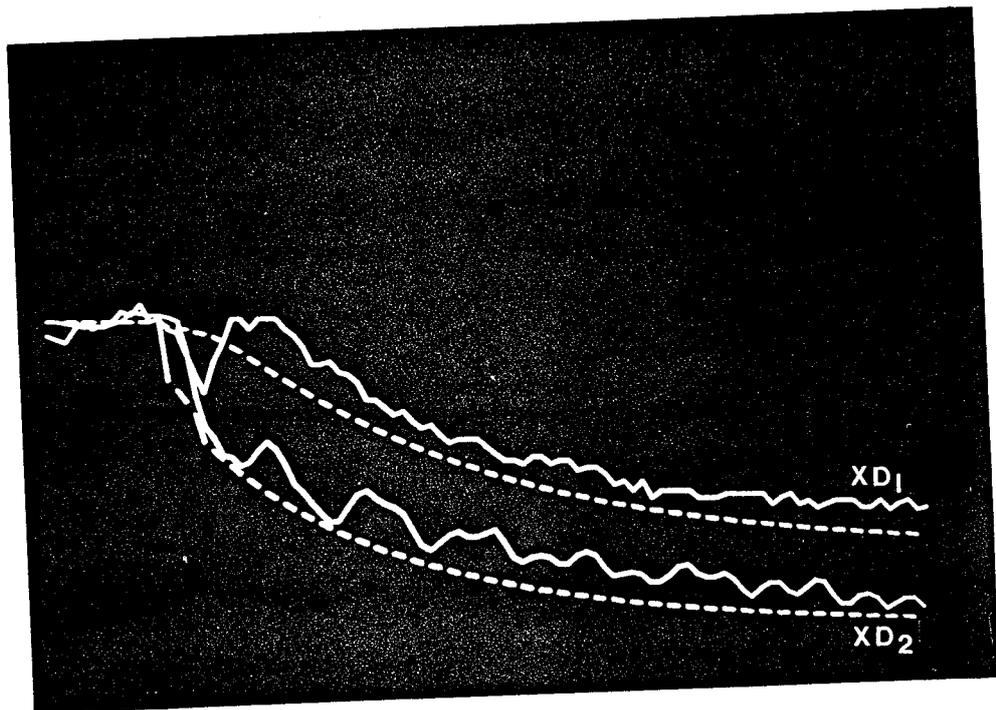


FIG 54-4  
REPARTITION DE LA PRODUCTION ENTRE LES DEUX COLONNES



**CONCLUSION**

CONCLUSION

Notre effort est orienté vers la conduite des systèmes complexes, et plus particulièrement vers l'organisation et vers le fonctionnement d'un système de conduite responsable de l'exécution des objectifs à réaliser.

L'expérience de l'homme dans ce domaine se traduit par l'organisation coopérative d'un système de décision hiérarchisé qui a constitué le point de départ de notre analyse. Nous avons donc été amenés à nous fixer comme objectif de substituer à l'intervention humaine des centres de décisions automatiques.

L'analyse des fonctions remplies soit par l'homme, soit par un tel centre, nous a conduit à la proposition d'introduire dans leur représentation la notion de distance. En particulier c'est la distance entre les modèles et/ou entre les éléments physiques qui facilite le formalisme et la compréhension des différentes situations qui peuvent apparaître au cours de la conduite de systèmes physiques ou de systèmes d'autre nature.

Le remplacement de la distance par un critère quadratique a représenté une deuxième étape dans la synthèse des algorithmes de conduite. Ceci nous a permis de bénéficier des résultats de l'optimisation quadratique et nous a conduit plus particulièrement à la technique de poursuite qui se prête à la solution du problème posé.

La poursuite généralisée que nous avons proposée dans nos travaux antérieurs sert de base à la synthèse des algorithmes de conduite. Les différentes simplifications de la solution optimale (au sens d'un critère) permettent le développement d'algorithmes temps réel. Leur adaptation aux situations étudiées forme un ensemble d'éléments modulaires facilitant la réalisation des centres de décision. De même ces centres sont des éléments de base dans l'architecture du système de conduite des procédés complexes.

La modularité du système de conduite permet sa réalisation progressive qui commence par l'implantation des centres de décisions de la commande locale du premier niveau et se poursuit par celle des centres se situant à des niveaux supérieurs. Cette caractéristique peut être à la base d'une décentralisation du support matériel (informatique) suivant la même organisation.

L'efficacité des algorithmes et leur mise en oeuvre progressive sont illustrées dans leur application à un procédé pilote chimique au moyen d'une informatique centralisée.

Par l'intermédiaire de notre travail nous avons l'intention de montrer les difficultés méthodologiques qui se présentent dans la recherche des solutions des problèmes réels. La solution théorique subit souvent des modifications importantes pour aboutir à une solution réellement applicable. Il n'est pas facile d'évaluer les conséquences de ces modifications car la vérification des hypothèses concernant le procédé est généralement difficile et quelquefois impossible. C'est surtout la représentation du système par des modèles (toujours approchés) qui pose des problèmes. Toute décision doit alors tenir compte de cette situation.

Ces remarques peuvent conduire entre autres à une proposition de poursuivre notre travail dans le domaine des systèmes probabilistes en vue de développer des algorithmes adaptés. Une autre voie que nous avons proposée concerne la fonction d'amélioration réalisée en temps réel dans un système à plusieurs niveaux. Ceci peut être réalisé en partant du niveau du procédé et en utilisant des modèles simplifiés et agrégés pour aller vers les niveaux supérieurs.

Dans notre travail nous avons considéré un système de conduite du procédé physique. L'application de l'approche proposée ici aux domaines socio-économique ou biomédical, nous paraît possible. Nous pensons que

dans ces domaines où l'approche "système" commence à porter ses fruits, l'application de notre travail peut représenter un apport efficace pour l'analyse et aussi pour la conduite de ces systèmes.

**ANNEXE**

ANNEXE

Cette annexe est consacrée à la recherche de la solution optimale dans la poursuite des systèmes. Le problème de poursuite généralisée est posé dans les paragraphes (410) et (420) et il est résolu grâce aux méthodes d'optimisation quadratique issues du calcul des variations et exploitant le principe de PONTYAGIN [1PG]. La simplification des résultats obtenus pour la formulation continue et discrète montre la voie pour le développement des algorithmes temps réel présentés dans les paragraphes (430) à (470).

## A 10 POURSUITE GENERALISEE DES SYSTEMES CONTINUS

La poursuite généralisée est caractérisée par le fait que toutes les variables du système poursuiveur

$$S \{u(t), x(t), y(t)\}$$

poursuivent les variables décrivant les objectifs de l'environnement

$$E \{z_i(t), z_s(t), z_o(t)\}$$

Le développement d'un algorithme général pour un système linéaire définit un point de départ pour les différentes formes de simplifications.

A 11 Développement d'un algorithme fondamental.

L'objectif est de conduire un système (S) (411-4) de manière optimale en minimisant la distance (ID) (413-5) par rapport à l'environnement (E) (412-1).

Le système (S) est de la forme :

$$S : \begin{cases} \dot{x}(t) = A(t) x(t) + B(t) u(t) + h(t) \\ y(t) = C(t) x(t) + D(t) u(t) + \ell(t) \end{cases} \quad (A 11-1)$$

dont les éléments satisfont aux conditions (411-2,6).

L'environnement (E) est représenté par les objectifs :

$$E : \{z_i(t), z_s(t), z_o(t)\} \quad (A 11-2)$$

qui influent sur le comportement des variables du système (u), (x), (y).

La distance à minimiser comporte deux parties finale et dynamique :

$$\begin{aligned} ID &= D_{Fiso} + \int_{t=to}^T D_{Qiso} dt & (A 11-3) \\ &= [d_u^{z_i} F_i(T) + d_x^{z_s} F_s(T) + d_y^{z_o} F_o(T) + d_x^{z_s} d_u^{z_i} F_c(T)] \\ &+ \int_{t=to}^T [d_u^{z_i} Q_i(t) + d_x^{z_s} Q_s(t) + d_y^{z_o} Q_o(t) + d_x^{z_s} d_u^{z_i} Q_c(t)] dt \end{aligned}$$

avec les formes quadratiques (d) conformes aux équations (413-1,2).

En vue du développement mathématique de l'algorithme recherché, nous supposons la description (ID) (A 11-3) mise sous la forme suivante [1AF] :

$$ID = D(to) + \int_{t=to}^T \left\{ \left[ \frac{d}{dt} D_{Fiso} \right] + [D_{Qiso}] \right\} dt \quad (A 11-4)$$

Pour simplifier l'écriture sans nuire à la généralité du problème, nous supposons le système (S) invariant (A, B, C, D constantes) et les matrices de distance constantes (F<sub>i</sub>, F<sub>s</sub>, F<sub>o</sub>, F<sub>c</sub>, Q<sub>i</sub>, Q<sub>s</sub>, Q<sub>o</sub>, Q<sub>c</sub> constantes).

L'Hamiltonien (H) du problème a la forme suivante :

$$H = \left[ \frac{d}{dt} D_{Fiso} \right] + [D_{Qiso}] + p'(t)\dot{x}(t) \quad (A 11-5)$$

L'application des conditions d'optimalité (420)

$$\frac{\partial H}{\partial u(t)} = 0 \quad \dot{p}(t) = - \frac{\partial H}{\partial x(t)} \quad (\text{A 11-6})$$

sont à la base du développement suivant.

En partant des équations (A 11-1,5,6) on peut écrire les équations concernant (x), (p), (u) sous la forme canonique [4BH]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{p}(t) \\ F\dot{u}(t) \end{bmatrix} = -\phi \begin{bmatrix} x(t) \\ p(t) \\ u(t) \end{bmatrix} + \pi \begin{bmatrix} h(t) \\ \lambda(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} + \psi \begin{bmatrix} z_i(t) \\ \dot{z}_i(t) \\ z_s(t) \\ \dot{z}_s(t) \\ z_o(t) \\ \dot{z}_o(t) \end{bmatrix} \quad (\text{A 11-7})$$

$$\begin{array}{c} \phi = \\ \pi = \end{array} \left[ \begin{array}{ccc} -A & 0 & -B \\ \begin{array}{l} [Q_s + C'Q_oC + F_sA + C'F_oCA \\ + A'F_s + A'C'F_oC - [F_c + C'F_oD]F^{-1} \\ \cdot [Q'_c + D'Q_oC + F'_cA + D'F_oCA + B'F_s \\ + B'C'F_oC] \end{array} & \begin{array}{l} [A' - F_c + C'F_oD \quad F^{-1}B'] \\ \end{array} & \begin{array}{l} [Q_c + C'Q_oD + F_sB + C'F_oCB \\ + A'F_s + A'C'F_oC \\ - [F_c + C'F_oD]F^{-1} \\ \cdot [Q_i + D'Q_oD + F'_cB + D'F_oCB \\ + B'F_c + B'C'F_oD] \end{array} \\ \begin{array}{l} [Q'_c + D'Q_oC + F'_cA + D'F_oCA + B'F_s \\ + B'C'F_oC] \end{array} & B' & \begin{array}{l} [Q_i + D'Q_oD + F'_cB + D'F_oCB \\ + B'F_c + B'C'F_oD] \end{array} \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{ccc} I & 0 & 0 \\ \begin{array}{l} -[F_s + C'F_oC + F_cF^{-1}] \\ [F'_c + D'F_oC] \end{array} & \begin{array}{l} -[C'Q_o + A'C'F_o \\ -F_cF^{-1}[D'Q_o + B'C'F_o] \end{array} & \begin{array}{l} -[C'F_o - F_cF^{-1}D'F_o] \\ \end{array} \\ \begin{array}{l} -[F'_c + D'F_oC] \end{array} & \begin{array}{l} -[D'Q_o + B'C'F_o] \end{array} & \begin{array}{l} -D'F_o \end{array} \end{array} \right]$$

$$\psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ [Q_c + A'F_c - F_cF^{-1}[Q_i + B'F_c]], & [F_cF^{-1}F_i - F_c], & [Q_s + A'F_s - F_cF^{-1}[Q_c' + B'F_s]] \\ [Q_i + B'F_c] & F_i & [Q_c' + B'F_s] \\ 0 & 0 & 0 \\ [F_s - F_cF^{-1}F_c'], & [C'Q_o + A'C'F_o - F_cF^{-1}[D'Q_o + B'C'F_o]], & [C'F_o - F_cF^{-1}D'F_o] \\ F_c' & [D'Q_o + B'C'F_o] & DF_o \end{bmatrix}$$

avec  $F = F_i + D'F_oD$

On peut exprimer la relation entre les trois vecteurs (p), (x), (u) sous la forme :

$$p(t) = K_1(t)x(t) + K_2(t)Fu(t) - g(t) \quad (\text{A } 11-9)$$

L'identification de cette équation avec celle de (A 11-7) permet de déterminer les équations différentielles pour les matrices de Riccati  $K_1(t)$  et  $K_2(t)$ , ainsi que pour le vecteur forcé  $g(t)$ .

$$\begin{aligned} \dot{K}_1^*(t) &= -K_1^*(t)A - A'K_1^*(t) + K_2^*(t)B'K_1^*(t) \\ &\quad + K_2^*(t) [D'Q_oC + D'F_oCA + F_c'A + Q_c'] \quad (\text{A } 11-10) \\ &\quad - Q_s - C'Q_oC \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_2^*(t)F &= -A'K_2^*(t)F + K_2^*(t) [Q_i + D'Q_oD + D'F_oCB + F_c'B] \\ &\quad + K_2^*(t)B'K_2^*(t)F - K_1^*(t)B - C'Q_oD - Q_c \quad (\text{A } 11-11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{g}^*(t) = & -[A' - K_2^*(t)B']g^*(t) \\
& + [K_1^*(t) - K_2^*(t) [F_c' + D'FoC]]h(t) \quad (A\ 11-12) \\
& + [K_2^*(t)Qi + K_2^*(t)B'Fc - Qc - A'Fc]z_i(t) + [K_2^*(t)Fi - Fc]z_i(t) \\
& + [K_2^*(t)Q_c' - Q_s]z_s(t) + K_2^*(t)Fcz_s(t) \\
& + [K_2^*(t)D'Q_o - C'Q_o][z_o(t) - \ell(t)] + K_2^*D'Fo[z_o(t) - \dot{\ell}(t)]
\end{aligned}$$

avec  $F = Fi + D'FoD$  (A 11-13)

$$\begin{aligned}
K_1^*(t) &= K_1(t) + \Delta_1 = K_1(t) + Fs + C'FoC \\
K_2^*(t) &= K_2(t) + \Delta_2 F^{-1} = K_2(t) + (C'FoD + Fc)F^{-1} \quad (A\ 11-14) \\
g^*(t) &= g(t) + \Delta_3 = g(t) + Fsz_s(t) + C'Fo[z_o(t) - \ell(t)] \\
\dot{g}^*(t) &= \dot{g}(t) + Fs \dot{z}_s(t) + C'Fo[\dot{z}_o(t) - \dot{\ell}(t)]
\end{aligned}$$

Les conditions de transversalité [IAF] déterminent la valeur finale du vecteur adjoint.

$$p(T) = K_1(T)x(T) + K_2(T)Fu(T) - g(T) = 0 \quad (A\ 11-15)$$

car la distance (ID) (A 11-4) ne comporte pas la partie finale, celle-ci étant intégrée dans la partie dynamique.

L'équation (A 11-15), pour tous les vecteurs (x) et (u), conduit aux conditions :

$$\begin{aligned}
K_1(T) = 0 & \quad \text{d'où} \quad K_1^*(T) = \Delta_1 \\
K_2(T)F = 0 & \quad K_2^*(T) = \Delta_2 \\
g(T) = 0 & \quad g^*(T) = \Delta_3
\end{aligned} \quad (A\ 11-16)$$

qui ressemblent aux conditions de transversalité du problème avec une partie finale explicite (A 11-3).

A partir des relations (A 11-7,9) on peut trouver la forme de l'entrée optimale (u(t)) :

$$u(t) = -L(t)x(t) + gc(t) \quad (\text{A 11-17})$$

avec les équations suivantes pour la matrice de bouclage L(t) et le vecteur de consigne du système commande (gc)(t) :

$$\begin{aligned} \dot{FL}(t) = & -[FL(t)A - (Q_i + D'Q_oD + F'_cB + D'F_oCB)]L(t) \\ & - B'K_2^*(t)FL(t) + FL(t)BL(t) + B'K_1^*(t) \\ & + Q'_c + D'Q_oC + F'_cA + D'F_oCA \end{aligned} \quad (\text{A 11-18})$$

$$\begin{aligned} Fgc(t) = & -[Q_i + D'Q_oD + F'_cB + D'F_oCB - B'K_2^*(t)F - FL(t)B]gc(t) \\ & + B'g^*(t) \\ & + [FL(t) - F'_c - D'F_oC]h(t) \\ & + [Q_i + B'F_c]z_i(t) + F_i \dot{z}_i(t) \\ & + Q'_c z_s(t) + F_c \dot{z}_s(t) \\ & + D'Q_o[z_o(t) - \ell(t)] + D'F_o[\dot{z}_o(t) - \dot{\ell}(t)] \end{aligned} \quad (\text{A 11-19})$$

## A 12 Comparaison avec les algorithmes existants.

L'algorithme de poursuite généralisée que nous avons développé dans le paragraphe précédent (A 11) peut varier en fonction de la généralité de description de la distance et aussi du système. Par diverses simplifications nous allons obtenir des algorithmes déjà connus.

Hypothèses de simplification :

$$\begin{array}{l} \text{Système} \\ \left| \begin{array}{l} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{array} \right. \end{array} \quad (\text{A 12-1})$$

$$\begin{array}{l} D = 0 \\ h = 0 \\ \ell = 0 \end{array}$$

$$\text{Distance } ID_{io} = D_{Fo} + \int_0^T D_{Q_{io}}(t) dt \quad (\text{A } 12-2)$$

$$\begin{aligned} F_i &= 0 \\ F_s &= 0 \\ F_c &= 0 \\ Q_s &= 0 \\ Q_c &= 0 \end{aligned}$$

$F_o$  - définie semipositive

$Q_i$  - définie positive et inversible

$Q_o$  - définie semipositive

Comme conséquence du choix de la distance finale, les équations (A 11-13,14) donnent :

$$\begin{aligned} F &= 0 \\ \Delta_1 &= C'FoC \\ \Delta_2 &= 0 \\ \Delta_3 &= C'Fo z_o(T) \end{aligned} \quad (\text{A } 12-3)$$

et les équations (A 11-10,11,18) donnent :

$$\begin{aligned} K_2(t) &= K_1^*(t) B Q_i^{-1} \\ \dot{K}_1^*(t) &= -K_1^*(t) A - A' K_1^*(t) + K_1^*(t) B Q_i^{-1} B' K_1^*(t) - C' Q_o C \\ L(t) &= Q_i^{-1} B' K_1^*(t) \end{aligned} \quad (\text{A } 12-4)$$

Nous obtenons un résultat identique à celui généralement utilisé [IAF] en posant la condition limite :

$$K_1^*(T) = \Delta_1 = C'FoC \quad (\text{A } 12-5)$$

De même on obtient pour le vecteur forcé :

$$\begin{aligned} \dot{g}^*(t) = & -[A' - K_1^*(t)BQ_i^{-1}B']g^*(t) \\ & + K_1^*(t)B z_i(t) - C'Q_0 z_0(t) \end{aligned} \quad (\text{A } 12-6)$$

$$g_c(t) = z_i(t) + Q_i^{-1}B'g^*(t) \quad (\text{A } 12-7)$$

On obtient les résultats bien connus [4Bi] en prenant comme valeur limite pour le vecteur forcé :

$$g(T) = \Delta_3 = C'F_0z_0(T) \quad (\text{A } 12-8)$$

et la commande optimale s'écrit alors sous la forme classique :

$$u = -Q_i^{-1}B'p(t) + z_i(t)$$

$$\text{où } u = -L(t)x(t) + g_c(t) \quad (\text{A } 12-9)$$

### A 13 Simplification - environnement connu.

Dans le paragraphe précédent (A 12) nous avons abouti à un algorithme de poursuite optimale déjà utilisé. Il donne la solution rigoureuse [4Bi] mais à condition d'effectuer les calculs en temps décroissant. Cette condition ne favorise pas l'application temps réel.

A partir de cet algorithme nous allons développer des algorithmes applicables en ligne : algorithme approché dans le cas d'un environnement constant et algorithme simplifié dans le cas d'un environnement dynamique linéaire.

Les difficultés dans le développement des algorithmes temps réel résident dans la recherche de solutions analytiques permettant les calculs en temps croissant. Les conditions aux limites qui dépendent de la forme

et de la valeur de la distance finale peuvent faciliter cette tâche. Les hypothèses d'horizon infini ou fuyant vont dans le même sens.

Rappelons maintenant la base de l'algorithme rigoureux.

Soit le système :

$$S : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (A 13-1)$$

Ce système (S) poursuit l'environnement :

$$E : \{ z_i(t), z_o(t), z_s(t) \} \quad (A 13-2)$$

La conduite optimale minimisant la distance (IDiso) (A 12-2) a la forme suivante :

$$u(t) = -Lx(t) + Q_i^{-1} B'g(t) + z_i(t) \quad (A 13-3)$$

$$L = Q_i^{-1} B'K(t)$$

avec la matrice de Riccati solution de l'équation (A 12-4)

$$\dot{K}(t) = -A'K(t) - K(t)A + K(t)BQ_i^{-1}B'K(t) - Q_s - C'Q_oC \quad (A 13-4)$$

et le vecteur forcé est donné par :

$$\dot{g}(t) = -G'g(t) + KB z_i(t) - Q_s z_s(t) - C'Q_o z_o(t) \quad (A 13-5)$$

$$G = A - B Q_i^{-1} B'K$$

Les conditions aux limites ( $t = T$ ) pour la matrice de Riccati ( $K(T)$ ) et le vecteur forcé ( $g(T)$ ) sont fonctions des paramètres et des variables prises en compte à l'instant final.

Le choix de la distance finale est souvent arbitraire et peut alors répondre aux conditions facilitant le développement mathématique, et facilitant la mise en application des algorithmes obtenus.

Supposons que la solution de l'équation de Riccati (A 13-4) converge vers une valeur constante (K) (en temps décroissant) [IAF] ; de plus, supposons que l'équation (A 13-5) converge vers une valeur du vecteur forcé constante (g) pour les objectifs (zi), (zs), (zo) constants. Dans ce cas admettons qu'il peut exister une distance finale telle que les conditions finales pour (K) et (g) soient identiques aux valeurs constantes. Dans cette hypothèse on peut écrire :

$$\begin{aligned} \dot{K} &= 0 \\ \dot{g} &= 0 \quad \text{pour } \dot{z}_i = \dot{z}_s = \dot{z}_o = 0 \quad (\text{A 13-6}) \end{aligned}$$

Remarquons que la satisfaction de ces hypothèses implique les conditions sur la distance finale ou au moins sur la valeur des matrices qui la forment. Par exemple le choix de la matrice (Fs) identique à la valeur limite de (K) entraîne sa valeur constante le long de la période considérée à condition que les matrices (Fi), (Fo) soient nulles. Si, en plus on peut choisir le vecteur objectif d'état (zs(T)) à l'instant final de telle sorte qu'il assure une valeur constante au vecteur forcé (g) (A 13-6), les simplifications suivantes peuvent être effectuées.

#### A 13.1 Objectifs constants.

Dans l'hypothèse (A 13-6) concernant la valeur constante du vecteur (g) dans l'horizon considéré et dans l'hypothèse des objectifs (zi), (zs), (zo) constants, on peut écrire directement :

$$g = [G']^{-1} [KB z_i - Q_s z_s - C'Q_o z_o] \quad (\text{A 13-7})$$

et l'entrée (u) a la forme :

$$u(t) = -Lx(t) + M_1 z_i - M_2 z_s - M_3 z_o \quad (\text{A } 13-8)$$

avec

$$\begin{aligned} L &= Q_i^{-1} B' K \\ M_1 &= Q_i^{-1} B' G'^{-1} K B + I \\ M_2 &= Q_i^{-1} B' G'^{-1} Q_s \\ M_3 &= Q_i^{-1} B' G'^{-1} C' Q_o \\ G &= A - B Q_i^{-1} B' K \end{aligned} \quad (\text{A } 13-9)$$

Si l'hypothèse (A 13-6) ne peut pas être vérifiée à cause de la distance finale ou à cause de variations d'objectifs, la formule (A 13-7) de calcul direct du vecteur forcé n'est valable que dans une partie de l'horizon considéré excluant la partie finale de la période : cela peut se faire, soit par le choix d'un horizon fuyant, soit par la simplification (A 13-25), soit par le déplacement du début de la période dans le cas de variation des objectifs.

### A 13.2 Objectifs engendrés par modèles.

Supposons que les objectifs de l'environnement ( $z_i$ ), ( $z_s$ ), ( $z_o$ ) aient une dynamique spécifiée décrite par les modèles linéaires ( $S_i$ ), ( $S_s$ ), ( $S_o$ ) :

$$\begin{aligned} S_i : & \begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) \\ z_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t) \end{cases} \\ S_s & \begin{cases} \dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s u_s(t) \\ z_s(t) = C_s x_s(t) + D_s u_s(t) \end{cases} \\ S_o : & \begin{cases} \dot{x}_o(t) = A_o x_o(t) + B_o u_o(t) \\ z_o(t) = C_o x_o(t) + D_o u_o(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{A } 13-10)$$

l'entrée de chaque système est déterminée sous la forme polynomiale :

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \sum_{\ell=0}^{n_i} U_i t^{\ell} \\ u_s(t) &= \sum_{k=0}^{n_s} U_s t^k \\ u_o(t) &= \sum_{m=0}^{n_o} U_o t^m \end{aligned} \quad (\text{A } 13-11)$$

La solution de l'équation (A 13-5) permet d'exprimer le vecteur forcé sous la forme suivante [4Bi] :

$$g(t) = e^{G'(T-t)} g(T) - I_i(t) + I_s(t) t I_o(t) \quad (\text{A } 13-12)$$

$$\text{ou } I_i(t) = \int_t^T e^{G'(\tau-t)} K B z_i(\tau) d\tau$$

$$I_s(t) = \int_t^T e^{G'(\tau-t)} Q_s z_s(\tau) d\tau \quad (\text{A } 13-13)$$

$$I_o(t) = \int_t^T e^{G'(\tau-t)} C Q_o z_o(\tau) d\tau$$

Pour calculer l'intégrale ( $I_i$ ) nous exprimons les états du système (Si) (434-10) sous la forme [4BB] :

$$x_i(t) = e^{A_i t} x_i(0) + e^{A_i t} \sum_{\ell=0}^{n_i} I_i(t) B_i U_i \quad (\text{A } 13-14)$$

$$\text{où } I_i(t) = -A_i t^{\ell} e^{-A_i t} + \ell A_i^{-1} I_i^{\ell-1}(t) \quad (\text{A } 13-15)$$

$\ell : 0, 1, \dots, n_i$

Par substitution de (A 13-14, 15, 16) dans l'expression (Ii)  
(A 13-13), nous obtenons :

$$I_i(t) = I_1 + I_2 + I_3 \quad (\text{A 13-16})$$

ou

$$I_1 = \int_t^T e^{G'(\tau-t)} KBCi e^{Ai\tau} x_i(0) d\tau \quad (\text{A13-17})$$

$$I_2 = \sum_{\ell=0}^{ni} \int_t^T e^{G'(\tau-t)} KBCi e^{Ai\tau} I_{i\ell}(\tau) BiU_{i\ell} d\tau$$

$$I_3 = \sum_{\ell=0}^{ni} J_{i\ell}(t) KBDiU_{i\ell} \quad (\text{A 13-18})$$

où  $(J_{i\ell})$  peut être calculé par la forme récurrente :

$$J_{i\ell}(t) = G'^{-1} [e^{G'(T-t)} T^\ell - t^\ell] - \ell G'^{-1} J_{i\ell-1}(t) \quad (\text{A 13-19})$$

En utilisant la relation (A 13-14) et la relation entre les systèmes et l'environnement exprimée par la matrice  $(M_i)$  solution de l'équation :

$$G'M_i + M_i A_i = KBCi \quad (\text{A 13-20})$$

on peut résoudre l'intégrale :

$$\int_t^T e^{G'(\tau-t)} KBCi e^{Ai\tau} d\tau = e^{G'(\tau-t)} M_i e^{Ai\tau}$$

et ainsi on trouve la solution de l'intégrale  $(I_1)$  (A 13-17) :

$$I_1 = [e^{G'(T-t)} M_i e^{AiT} - M_i e^{AiT}] x_i(0) \quad (\text{A 13-21})$$

$$I_2 = \sum_{\ell=0}^{ni} [e^{G'(T-t)} M_i e^{AiT} I_{i\ell}(T) - M_i e^{AiT} I_{i\ell}(t) - J_{i\ell}(t) M_i] BiU_{i\ell}$$

D'une façon analogue, on peut résoudre les intégrales (Is) et (Io) (A 13-13) et on peut écrire l'équation (A 13-12) sous la forme :

$$\begin{aligned}
 g(t) = & e^{G'(T-t)} [g(T) - M_i x_i(T) + M_s x_s(T) + M_o x_o(T)] \\
 & - M_i x_i(t) + M_s x_s(t) + M_o x_o(t) \\
 & - \sum_{\ell=0}^{n_i} J_{i\ell}(t) [M_i B_i + K B D_i] U_i \\
 & + \sum_{k=0}^{n_s} J_{s_k}(t) [M_s B_s + Q_s D_s] U_s \\
 & + \sum_{m=0}^{n_o} J_{o_m}(t) [M_o B_o + C' Q_o D_o] U_o
 \end{aligned} \tag{A 13-22}$$

( $J_{s_k}(t)$ ) et ( $J_{o_m}(t)$ ) ont des formes analogues à celles de ( $J_{i\ell}(t)$ ) (A 13-19) [4BB] et avec les conditions initiales :

$$J_i = J_s = J_o = G'^{-1} [e^{G'(T-t)} - I] \tag{A 13-23}$$

et les matrices ( $M_i$ ), ( $M_s$ ), ( $M_o$ ) sont les solutions des équations :

$$\begin{aligned}
 G' M_i + M_i A_i &= K B C_i \\
 G' M_s + M_s A_s &= Q_s C_s \\
 G' M_o + M_o A_o &= C' Q_o C_o
 \end{aligned} \tag{A 13-24}$$

L'exploitation de l'équation (A 13-22) nécessite la connaissance de la valeur finale du vecteur forcé ( $g$ ) ainsi que celle des vecteurs d'état ( $x_i$ ), ( $x_s$ ), ( $x_o$ ). Ceci peut être réalisé par exemple si les évolutions des systèmes objectifs convergent vers des valeurs connues ou estimées. Le calcul du vecteur forcé ( $g$ ) à la fin de la période peut être effectué suivant l'équation (A 13-7).

Une autre solution consiste à choisir une période d'optimisation longue, ce qui permet de tenir compte des propriétés de la matrice ( $G$ )

(valeurs propres négatives) et de négliger la partie de l'équation (A 13-22) multipliée par le terme [IAF].

$$e^{G'(T-t)} \approx 0 \quad (\text{A 13-25})$$

L'utilisation de cette hypothèse (A 13-25) dans les équations (A 13-22) et (A 13-23) ainsi que dans l'équation (A 13-19) et les équations analogues donnant  $(Js_k)$  et  $(Jo_m)$  permet d'obtenir un algorithme temps réel avec tous les calculs effectués en temps croissant.

Comme exemple, supposons les entrées des systèmes d'objectifs  $(ui)$ ,  $(us)$ ,  $(uo)$  constantes. L'entrée optimale (A 13-2) du système(S) (A 13-1) peut être déterminée :

$$\begin{aligned} u(t) = & -Lx(t) - M_1 ui + M_2 xi(t) \\ & + M_3 us - M_4 xs(t) \\ & + M_5 uo - M_6 xo(t) \end{aligned} \quad (\text{A 13-26})$$

avec les matrices :

$$\begin{aligned} L &= Q_i^{-1} B'K \\ M_1 &= Q_i^{-1} B'G'^{-1} [MiBi - KBDi] + Di \\ M_2 &= Q_i^{-1} B'Mi + Ci \\ M_3 &= Q_i^{-1} B'G'^{-1} [MsBs - QsDs] \\ M_4 &= Q_i^{-1} B'Ms \\ M_5 &= Q_i^{-1} B'G'^{-1} [MoBo - C'QoDo] \\ M_6 &= Q_i^{-1} B'Mo \end{aligned} \quad (\text{A 13-27})$$

où les matrices  $(Mi)$ ,  $(Ms)$ ,  $(Mo)$  sont déterminées par les équations (A 13-24).

A 14 Poursuite simultanée.

Supposons que l'environnement (E) soit représenté par un système linéaire appelé le système de référence :

$$E \equiv S_r : \begin{cases} \dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r u_r(t) \\ y_r(t) = C_r x_r(t) \end{cases} \quad (A 14-1)$$

$$z_i(t) = u_r(t) \quad z_o(t) = y_r(t)$$

Ce système de référence est poursuivi par les deux systèmes ( $S_1$ ) et ( $S_2$ ) qui se poursuivent entre eux :

$$S_j : \begin{cases} \dot{x}_j(t) = A_j x_j(t) + B_j u_j(t) \\ y_j(t) = C_j x_j(t) \end{cases} \quad j = 1, 2 \quad (A 14-2)$$

La distance à minimiser est :

$$\begin{aligned} ID = & (d_{y_1}^{z_o} F_{o_1} + d_{y_2}^{z_o} F_{o_2} + d_{y_2}^{y_1} F_{o_3}) \\ & + \int_0^T [(d_{u_1}^{z_i} Q_{i_1} + d_{u_2}^{z_i} Q_{i_2} + d_{u_2}^{u_1} Q_{i_3}) \\ & + (d_{y_1}^{z_o} Q_{o_1} + d_{y_2}^{z_o} Q_{o_2} + d_{y_2}^{y_1} Q_{o_3})] dt \end{aligned} \quad (A 14-3)$$

L'application des conditions d'optimalité (A 11-6) permet d'écrire la relation entre les vecteurs d'états ( $x_1$ ) et ( $x_2$ ) des systèmes poursuivés et leurs vecteurs adjoints ( $p_1$ ) et ( $p_2$ ) sous la forme suivante [4BB]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{p}_1(t) \\ \dot{p}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & -B_1 Q_{i_1} B_1', -B_1 Q_{i_1} P_2' \\ 0 & A_2 & -B_2 Q_{i_2} P_1', -B_2 Q_{i_2} B_2' \\ -C_2'(Q_{o_1} + Q_{o_3})C_1 & C_1' Q_{o_3} C_2 & -A_1' & 0 \\ C_2' Q_{o_3} C_1 & -C_2'(Q_{o_2} + Q_{o_3})C_2 & 0 & -A_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} B_1 M_1 N_1 z_1(t) \\ B_2 M_2 N_2 z_2(t) \\ C_1' Q_{o_1} z_0(t) \\ C_2' Q_{o_2} z_0(t) \end{bmatrix} \quad (\text{A } 14-4)$$

avec

$$\begin{aligned}
 P_1 &= Q_{i_3} [Q_{i_1} + Q_{i_3}]^{-1} B_1 \\
 P_2 &= Q_{i_3} [Q_{i_2} + Q_{i_3}]^{-1} B_2 \\
 M_1 &= [I - [Q_{i_1} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_2} [Q_{i_2} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_3}]^{-1} [Q_{i_1} + Q_{i_3}]^{-1} \\
 M_2 &= [I - [Q_{i_2} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_3} [Q_{i_1} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_3}]^{-1} [Q_{i_2} + Q_{i_3}]^{-1} \\
 N_1 &= Q_{i_1} + Q_{i_3} [Q_{i_2} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_2} \\
 N_2 &= Q_{i_2} + Q_{i_3} [Q_{i_1} + Q_{i_3}]^{-1} Q_{i_1}
 \end{aligned} \quad (\text{A } 14-5)$$

La relation (A 14-4) permet d'exprimer les vecteurs adjoints sous la forme :

$$\begin{aligned}
 p_1(t) &= K_1(t)x_1(t) + K_2(t)x_2(t) + g_1(t) \\
 p_2(t) &= K_3(t)x_1(t) + K_4(t)x_2(t) + g_2(t)
 \end{aligned} \quad (\text{A } 14-6)$$

La solution pour les actions optimales  $u_1$  et  $u_2$  est issue de conditions d'optimalité :

$$\begin{aligned}
u_1(t) &= M_1 [N_1 u_r(t) - B_1' p_1(t) - P_2 p_2(t)] = \\
&= M_1 [P_2 K_3(t) + B_1 K_1(t)] x_1(t) \\
&\quad - M_1 [P_2 K_4(t) + B_1 K_2(t)] x_2(t) \\
&\quad + M_1 N_1 z_i(t) - M_1 B_1 g_1(t) - M_1 P_2 g_2(t)
\end{aligned} \tag{A 14-7}$$

$$\begin{aligned}
u_2(t) &= M_2 [N_2 u_r(t) - P_1 p_1(t) - B_2 p_2(t)] = \\
&= M_2 [P_1 K_1(t) + B_2 K_3(t)] x_1(t) - M_2 [P_2 K_2(t) + B_2 K_4(t)] \\
&\quad + M_2 N_2 z_i(t) - M_2 P_2 g_1(t) - M_2 B_2 g_2(t)
\end{aligned}$$

avec les équations pour calculer  $(K_1, K_2, K_3, K_4)$  :

$$\begin{aligned}
\dot{K}_1(t) &= -A_1' K_1(t) - K_1(t) A_1 + K_1(t) G_1 K_1(t) - Q_1^* \\
&\quad + K_1(t) G_3 K_3(t) + K_2(t) G_2 K_1(t) + K_2(t) G_4 K_3(t) \\
\dot{K}_2(t) &= -A_1' K_2(t) - K_2(t) A_2 + K_2(t) G_2 K_2(t) + Q_2^* \\
&\quad + K_2(t) G_4 K_4(t) + K_1(t) G_1 K_2(t) + K_1(t) G_3 K_4(t) \\
\dot{K}_3(t) &= -A_2' K_3(t) - K_3(t) A_1 + K_3(t) G_3 K_3(t) + Q_3^* \\
&\quad + K_3(t) G_1 K_1(t) + K_4(t) G_4 K_3(t) + K_4(t) G_2 K_1(t) \\
\dot{K}_4(t) &= -A_2' K_4(t) - K_4(t) A_2 + K_4(t) G_4 K_4(t) - Q_4^* \\
&\quad + K_4(t) G_2 K_2(t) + K_3(t) G_3 K_4(t) + K_3(t) G_1 K_2(t)
\end{aligned} \tag{A 14-8}$$

et les vecteurs forcés  $(g_1(t))$  et  $(g_2(t))$  s'écrivent :

$$\begin{aligned}
\dot{g}_1(t) &= [-A_1' + K_1(t) G_1 + K_2(t) G_2] g_1(t) \\
&\quad + [K_1(t) G_3 + K_2(t) G_4] g_2(t) \\
&\quad - [K_1(t) B_1 M_1 N_1 + K_2(t) B_2 M_2 N_2] z_i(t) \\
&\quad + [C_1' Q_0] z_o(t)
\end{aligned} \tag{A 14-9}$$

$$\begin{aligned}
\dot{g}_2(t) = & [K_3(t)G_1 + K_4(t)G_2]g_1(t) \\
& + [-A_2' + K_3(t)G_3 + K_4(t)G_4]g_2(t) \\
& - [K_3(t)B_1M_1N_1 + K_4(t)B_2M_3N_3]zi(t) \\
& + [C_2'Qo_2]zo(t)
\end{aligned}
\tag{A 14-9}$$

avec les valeurs à l'instant final ( $t = T$ ) :

$$\begin{aligned}
K_1(T) &= C_1'(Fo_1 - Fo_3)C_1 \\
K_2(T) &= C_1'Fo_3C_1 \\
K_3(T) &= C_2'Fo_3C_2 \\
K_4(T) &= C_3'(Fo_2 - Fo_3)C_3 \\
g_1(T) &= -C_1'Fo_1zo(T) \\
g_2(T) &= -C_2'Fo_2zo(T)
\end{aligned}
\tag{A 14-10}$$

et les matrices :

$$\begin{aligned}
G_1 &= B_1M_1B_1' & G_2 &= B_2M_2P_1' \\
G_3 &= B_1M_1P_1' & G_4 &= B_2M_3B_2' \\
Q_1^* &= C_1'[Qo_1 + Qo_3]C_1 & Q_2^* &= C_1'Qo_3C_2 \\
Q_3^* &= C_2'Qo_3C_1 & Q_4^* &= C_2'[Qo_2 + Qo_3]C_2
\end{aligned}
\tag{A 14-11}$$

Les hypothèses concernant la longueur de la période d'optimisation et la classe des entrées du système de référence permettent d'obtenir un algorithme avec des calculs des vecteurs forcés ( $g_1$ ) et ( $g_2$ ) réalisés en temps réel comme au paragraphe (A 13).

## A 20 POURSUITE GENERALISEE DES SYSTEMES DISCRETS

Le développement des algorithmes pour des systèmes continus (A 10) précède historiquement l'intérêt porté aux systèmes discrets. Nous présentons dans ce chapitre le développement des algorithmes pour les systèmes discrets en suivant un chemin analogue à celui utilisé dans le chapitre précédent.

A 21 Algorithme fondamental - version discrète.

Nous allons déterminer l'entrée du système (S) qui positionne ce système par rapport à l'environnement (E) au moyen d'une distance quadratique (ID).

Le système (S) (411-4) peut être représenté par les équations suivantes :

$$S : \begin{cases} x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + h(t) \\ y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t-1) + l(t) \end{cases} \quad (A 21-1)$$

Le système est supposé commandable et observable avec les matrices de dimensions (411-5) correspondant aux vecteurs des variables.

L'environnement (E) (412-1) est représenté par les vecteurs d'objectifs :

$$E : \quad \{z_i(t), z_s(t), z_o(t)\} \quad (A 21-2)$$

et la distance (ID) (413-8) comporte une partie dynamique et une partie instantanée pour (t=T) :

$$ID : \quad ID_{iso} = DF_{iso} + \sum_{t=t_0}^{T-1} DQ_{iso}(t) \quad (A 21-3)$$

conduisent à l'expression canonique pour le vecteur d'état (x) et le vecteur adjoint (p) [4BH] :

$$\begin{bmatrix} x(t+1) \\ [I-(Fc+C'FoD)S_1^*B']p(t) \end{bmatrix} = \phi \begin{bmatrix} x(t) \\ p(t+1) \end{bmatrix} + \pi \begin{bmatrix} h(t) \\ \ell(t+1) \\ \ell(t) \end{bmatrix} + \psi \begin{bmatrix} zi(t) \\ zi(t-1) \\ zs(t+1) \\ zs(t) \\ zo(t+1) \\ zo(t) \end{bmatrix}$$

(A 21-9)

En vue de simplifier l'écriture, nous supposons que les matrices qui composent ( $\phi$ ), ( $\pi$ ), ( $\psi$ ) sont :

$$\phi = \begin{bmatrix} [A - BS^*S_2^*] & -BS^*B' \\ [A'[Qs+Fs]A + A'C'[Qo+Fo]CA - Fs - C'FoC - S_2^*S^*S_2^*] & [A'-S_2^*S^*B'] \\ + [Fc+C'FoD]S_1[B'[Qs+Fs] + [CB+D]'[Qo+Fo]+[Qc+Fc]'] & \end{bmatrix}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} I-BS^*[B'[Qs+Fs]+[CB+D]'[Qo+Fo]C + [Qc+Fc]'] & , & [-BS^*[CB+D]'[Qo+Fo]] & 0 \\ [A'[Qs+Fs]+A'C'[Qo+Fo]C - S_2^*S^*[B'[Qs+Fs] + [CB+D]'[Qo+Fo]C + [Qc+Fc]']] & [A'C'[Qo+Fo] & [-C'Fo + -S_2^*S^*[CB+D]'[Qo+Fo], [Fc+C'FoD]S_1, , [CB+D]'[Qo+Fo]] \end{bmatrix}$$

(A 21-10)

$$\psi = \begin{bmatrix} [BS^*[Qi+Fi]] & 0 & BS^*[B'[Qs+Fs]+Q'_c+F'_c] \\ [-A[Qc+Fc] & [Fc-[Fc+C'FoD]S_1[Qi+Fi]] & [-A'[Qs+Fs] \\ +S_2^*S^*[Qi+Fi]] & & +S_2^*S^*[B'[Qs+Fs]+Q'_c+F'_c]] \\ 0 & [BS^*[CB+D']][Qo+Fo]] & 0 \\ [Fs-[Fc+C'FoD]S_1 & [-A'C'][Qo+Fo] & [C'Fo-[Fc+C'FoD]S_1 \\ ,B'[Qs+Fs]+Q'_c+F'_c]] + S_2^*S^*[CB+D']][Qo+Fo]] & & ,[CB+D']][Qo+Fo]] \end{bmatrix}$$

$$S^* = [Qi+Fi+B'[Qs+Fs]B + [CB+D']][Qo+Fo][CB+D] + [Qc+Fc]'B]^{-1}$$

$$S_1 = [Qi+Fi + [CB+D']][Qo+Fo]D]^{-1}$$

$$S_2^* = [A'[Qs+Fs]B + A'C'[Qo+Fo][CB+D] + A'[Qc+Fc]]$$

Les relations entre les vecteurs adjoints (p) et d'état (x) peuvent être exprimées sous la forme :

$$p(t) = K(t) x(t) - g(t) \quad (A 21-11)$$

L'identification des éléments de cette équation à partir de (A 21-9) permet d'exprimer l'équation de Riccati sous la forme :

$$\begin{aligned} [I-C'FoDS_1B']K(t) &= A'K(t+1)A - A'K(t+1)BSB'K(t+1)A \\ &\quad -A'K(t+1)BS[B'[Qs+Fs]A+[CB+D']][Qo+Fo]CA+[QcFc]'A] \\ &\quad -S_2^*SB'K(t+1)A - S_2^*SS_2^* + A'[Qs+Fs]A \\ &\quad +A'C'[Qo+Fo]CA - Fs - C'FoC \\ &\quad + [Fc+C'FoD]S_1[B'[Qs+Fs] + [CB+D']][Qo+Fo]C+[Qc+Fc] \end{aligned} \quad (A 21-12)$$

$$\text{avec } S = [S^{*-1} + B'K(t+1)B]^{-1}$$

$$S_2 = [S_2^* + A'K(t+1)B]$$

Le calcul du vecteur forcé peut être effectué à partir de l'équation suivante :

$$\begin{aligned} g(t) + [Fc + C'FoD]B'g(t) &= [A' - S_2SB']g(t+1) \\ &+ [A'[Qs + Fs] - S_2S[B'[Qs + Fs] + [Qc + Fc]']]zs(t+1) \\ &- [Fs - [Fc + C'FoD]S_1[B'[Qs + Fs] + [Qc + Fc]']]zs(t) \\ &+ [A'C'[Qo + Fo] - S_2S[CB + D]'[Qo + Fo]]zo(t+1) \\ &- [C'Fo - [Fc + C'FoD]S_1[CB + D][Qo + Fo]]zo(t) \\ &+ [A'[Qc + Fc] - S_2S[Qi + Fi]]zi(t) \\ &- [Fc - [Fc + C'FoD]S_1[Qi + Fi]]zi(t-1) \\ &- [A[Qs + Fs] + A'C[Qo + Fo]C - S_2S[B'[Qs + Fs] \\ &+ [CB + D]'[Qo + Fo]C + [Qc + Fc]' + B'K(t+1)]]h(t) \\ &- [A'C'[Qo + Fo] - S_2S[CB + D]'[Qo + Fo]]\ell(t+1) \\ &+ [C'Fo - [Fc + C'FoD]S_1[CB + D]'[Qo + Fo]]\ell(t) \end{aligned} \quad (A \ 21-13)$$

Les valeurs limites pour l'instant final sont déterminées par les conditions de transversalité. Comme la distance finale est intégrée à la partie dynamique (A 21-3,4) elles sont nulles :

$$\begin{aligned} K(T) &= 0 \\ g(T) &= 0 \end{aligned} \quad (A \ 21-14)$$

En utilisant la condition d'optimalité (A 21-8), on peut écrire le vecteur de commande sous la forme :

$$\begin{aligned} u(t) &= S_1[-[B'[Qs + Fs] + [CB + D]'[Qo + Fo]C + [Qc + Fc]']]x(t+1) \\ &- B'p(t+1) + [B'[Qs + Fs] + [Qc + Fc]']]zs(t+1) \\ &+ [Qi + Fi]zi(t) + [[CB + D]'[Qo + Fo][zo(t+1) - \ell(t+1)]] \end{aligned} \quad (A \ 21-15)$$

L'utilisation de la relation sur le vecteur adjoint (A 21-11) permet d'écrire :

$$\begin{aligned} u(t) = & -L(t+1)x(t+1) + S_1 B'g(t+1) & (A\ 21-16) \\ & + S_1 [B'[Q_s+F_s] + [Q_c+F_c]'] z_s(t+1) \\ & + S_1 [Q_i+F_i]z_i(t) + S_1 [[CB+D]'][Q_o+F_o]] [z_o(t+1)-\ell(t+1)] \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned} L = S_1 [ & B'[Q_s+F_s] + [CB+D]'][Q_o+F_o]C \\ & + [Q_c+F_c]' + B'K(t+1)] \end{aligned}$$

#### A 22 Comparaison avec des algorithmes existants.

L'algorithme de poursuite généralisée que nous avons présenté est basé sur une description générale du système et de la distance et certaines simplifications apportées à cette description permettent de retrouver les algorithmes déjà publiés et connus.

Hypothèses de simplification :

$$\text{Système : } \begin{cases} x(t+1) = A x(t) + Bu(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (A\ 22-1)$$

$$\begin{aligned} D &= 0 \\ h &= 0 \\ \ell &= 0 \end{aligned}$$

Distance :

$$ID_{io} = d_y^{z_o} F_o(T) + \sum_{t=t_o}^{T-1} [d_u^{z_i} Q_i(t) + d_y^{z_o} Q_o(t+1)] \quad (A\ 22-2)$$

$$\begin{aligned} F_i &= 0 \\ F_s &= 0 \\ F_c &= 0 \\ Q_s &= 0 \\ Q_c &= 0 \end{aligned}$$

$F_o$  - définie semi positive

$Q_i$  - définie positive et inversible

$Q_o$  - définie semi positive

Après cette simplification, l'équation de Riccati (A 21-12) prend la forme suivante :

$$K^*(t) = A'K^*(t+1)A - A'K^*(t+1)BSB'K^*(t+1)A + A'C'Q_0CA \quad (A 22-3)$$

avec  $K^*(t) = K(t) + C'F_0C$

et pour le vecteur forcé, on obtient (A 21-13) :

$$\begin{aligned} g^*(t) = & [A'-A'C'Q_0CB + A'K^*(t+1)B]g^*(t+1) \\ & + [A'C'Q_0 - [A'C'Q_0 + A'K^*(t+1)BSB'C'Q_0]z_0(t+1) \\ & - A'[C'Q_0C + K^*(t+1)]BSQ_0z_i(t) \end{aligned} \quad (A 22-4)$$

avec  $g^*(t) = g(t) + C'F_0 z_0(t)$

Les valeurs limites sont, pour le vecteur adjoint (p) :

$$p(T) = 0 \quad \text{et} \quad p^*(T) = C'F_0Cx(T) - C'F_0 z_0(T) \quad (A 22-5)$$

et pour la matrice (K) et le vecteur (g) :

$$\begin{aligned} K(T) &= 0 & K^*(T) &= C'F_0C \\ g(T) &= 0 & g^*(T) &= C'F_0 z_0(T) \end{aligned} \quad (A 22-6)$$

et l'entrée optimale (u) (A 21-15,16) peut être écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} u(t) = & -Q_i^{-1}B'[C'Q_0C x(t+1) + p^*(t+1)] \\ & + Q_i^{-1}B'C'Q_0 z_0(t+1) + z_i(t) \end{aligned} \quad (A 22-7)$$

ou  $u(t) = -L(t+1)x(t+1) + Q_i^{-1}B'g^*(t+1) + Q_i^{-1}B'C'Q_0 z_0(t+1) + z_i(t)$  (A 22-8)

avec  $L(t+1) = Q_i^{-1}B'[C'Q_0C + K^*(t+1)]$

La forme de l'algorithme que nous avons obtenu est connue dans la littérature [1TR] mais elle n'est pas identique aux algorithmes couramment utilisés [2Sa] [3BJ]. Ces algorithmes sont élaborés à partir d'un critère formulé différemment :

$$IDio = d_y^{zo} Fo(T) + \sum_{t=to}^{T-1} [d_u^{zi} Qi(t) + d_y^{zo} Qo(t)] \quad (A\ 22-9)$$

La distance que nous avons proposée (A 22-2) tient compte à chaque instant de la sortie (y) et de l'entrée (u) qui engendre cette sortie. La forme (A 22-9) prend en considération l'entrée appliquée au cours de la période qui commence à l'instant considéré. De plus cette forme est difficilement utilisable pour les systèmes ayant une action directe sur la sortie ( $D \neq 0$ ) en particulier à l'instant final de la période considérée.

La minimisation de la distance (A 22-9) conduit à des différences dans la forme de la matrice de Riccati et du vecteur forcé par rapport aux solutions (A 22-3,4) :

$$K(t) = A'K(t+1)A - A'K(t+1)BS(t)B'K(t+1)A + C'QoC \quad (A\ 22-10)$$

$$g(t) = [A' - A'K(t+1)BS(t)B']g(t+1) + C'Qo zo(t) - A'K(t+1)BS(t)Qi zi(t) \quad (A\ 22-11)$$

et l'entrée optimale (u) est de la forme :

$$u(t) = zi(t) - Qi^{-1}B'p(t+1) \quad (A\ 22-12)$$

$$u(t) = -L(t)x(t) + S(t)B'g(t+1) + S(t)Qi zi(t)$$

avec

$$L(t) = S(t)B'K(t+1)A$$

$$S(t) = [Qi + B'K(t+1)B]^{-1}$$

A 23 Simplification - environnement connu.

Dans le paragraphe (A 22) nous avons montré les différences avec les algorithmes existants qui sont dues à diverses formulations du critère représentant la distance. Au cours du développement de l'algorithme général nous avons utilisé la forme (A 21-3,5) qui est physiquement justifiée et compatible à tous les instants de la période considérée ( $t = T$ ).

Les algorithmes de commande temps réel couramment utilisés sont issus de la minimisation de la distance de type (A 22-9) et pour que notre travail apporte un complément à ces algorithmes, nous utilisons dans les chapitres suivants ce type de distance. Il faut néanmoins signaler que l'on rencontre alors certaines difficultés concernant d'une part l'interprétation physique de la distance instantanée et concernant, d'autre part les applications à la classe de systèmes caractérisée par  $D \neq 0$ . Ces difficultés résident dans le fait que l'on pondère des entrées à un instant donné et des sorties engendrées par des entrées antérieures à cet instant.

Supposons que le système (S)

$$S : \begin{cases} x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (A 23-1)$$

poursuive l'environnement (E) caractérisé par les objectifs

$$E : \{z_i(t), \quad z_s(t), \quad z_o(t)\} \quad (A 23-2)$$

en minimisant la distance (IDiso)

$$IDiso = D_F + \sum_{t=t_0}^{T-1} [d_u^{z_i} Q_i(t) + d_x^{z_s} Q_s(t) + d_y^{z_o} Q_o(t)] \quad (A 23-3)$$

La solution consiste à définir l'entrée optimale (u) du système (S) :

$$u(t) = -Lx(t) + SB'g(t+1) + SQi zi(t) \quad (A 23-4)$$

avec

$$\begin{aligned} L &= SB'KA \\ S &= [Qi + B'KB]^{-1} \end{aligned} \quad (A 23-5)$$

où (K) est la solution de l'équation de Riccati

$$\begin{aligned} K(t) &= A'K(t+1)A - A'K(t+1)BS(t+1)B'K(t+1)A \\ &\quad + Qs + C'QoC \end{aligned} \quad (A 23-6)$$

où le vecteur forcé (g) est donné par :

$$\begin{aligned} g(t) &= [A-BL]'g(t+1) - L'Qi zi(t) \\ &\quad + Qs zs(t) + C'Qo zo(t) \end{aligned} \quad (A 23-7)$$

Admettons qu'il soit possible de trouver la forme et les paramètres de la distance finale tels que les valeurs finales de (K) et (g) soient identiques à leurs valeurs limite. Dans ce cas :

$$\begin{aligned} K(t) &= K(t+1) \\ g(t) &= g(t+1) \text{ pour } zi, zs \text{ et } zo \text{ constants} \end{aligned} \quad (A 23-8)$$

#### A 23.1 Objectifs constants.

Dans l'hypothèse d'objectifs poursuivis (zi), (zs), (zo) constants, la condition (A 23-8) permettra de trouver la solution (A 23-7) sous la forme :

$$g = [G'-I]^{-1} [-L'Qi zi + Qs zs + C'Qo zo] \quad (A 23-9)$$

Ce résultat est utilisé pour élaborer un algorithme de stabilisation dans le paragraphe (431):

#### A 23.2 Objectifs engendrés par modèles.

Supposons que les objectifs de l'environnement  $(z_i)$ ,  $(z_s)$ ,  $(z_o)$  soient engendrés par les modèles linéaires de forme couramment utilisée [4BC] :

$$\text{Si : } \begin{cases} x_i(t+1) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) \\ z_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t) \end{cases}$$

$$\text{Ss : } \begin{cases} x_s(t+1) = A_s x_s(t) + B_s u_s(t) \\ z_s(t) = C_s x_s(t) + D_s u_s(t) \end{cases} \quad (\text{A 23-10})$$

$$\text{So : } \begin{cases} x_o(t+1) = A_o x_o(t) + B_o u_o(t) \\ z_o(t) = C_o x_o(t) + D_o u_o(t) \end{cases}$$

Les entrées de chaque système  $(u_i)$ ,  $(u_s)$ ,  $(u_o)$  sont :

- soit à dynamique non spécifiée (A 23-11)
- soit générées par les systèmes linéaires complémentaires  $(S_{ic})$ ,  $(S_{sc})$ ,  $(S_{oc})$  de la forme suivante :

$$\text{Sic : } \begin{cases} x_{ic}(t+1) = A_{ic} x_{ic}(t) + B_{ic} u_{ic}(t) \\ u_i(t) = C_{ic} x_{ic}(t) + D_{ic} u_{ic}(t) \end{cases} \quad (\text{A 23-12})$$

$S_{sc}$ ,  $S_{oc}$  ont des formes analogues.

$(u_{ic})$ ,  $(u_{sc})$ ,  $(u_{oc})$  sont des entrées de ces systèmes que l'on suppose constantes, leur dynamique n'étant pas spécifiée.

Le vecteur forcé (A 23-7) peut être exprimé sous la forme :

$$g(t) = [G'^{-1}]^{-T+t} g(T) + I_i(t) - I_s(t) - I_o(t) \quad (A 23-13)$$

avec

$$I_i(t) = \sum_{\tau=t+1}^T [G']^{T-\tau} L'Q_i z_i(T+t-\tau)$$

$$I_s(t) = \sum_{\tau=t+1}^T [G']^{T-\tau} Q_s z_s(T+t-\tau) \quad (A 23-14)$$

$$I_o(t) = \sum_{\tau=t+1}^T [G']^{T-\tau} C'Q_o z_o(T+t-\tau)$$

Les équations (A 23-14) sont de même type et nous allons résoudre la première (I<sub>i</sub>) dans l'hypothèse (A 23-11) concernant les valeurs constantes des entrées (u<sub>i</sub>), (u<sub>s</sub>), (u<sub>o</sub>) des modèles de référence.

En utilisant pour le modèle (S<sub>i</sub>) la relation :

$$A_i^t x(0) + A_i^t [A_i - I]^{-1} B_i u_i = x_i(t) + [A_i - I]^{-1} B_i u_i \quad (A 23-15)$$

on peut exprimer (A 23-14) donnant (I<sub>i</sub>) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} I_i(t) = & \sum_{\tau=t+1}^T (G')^{T-\tau} [L'Q_i C_i (A_i)^{T+t-\tau} x_i(0) \\ & + L'Q_i C_i (A_i)^{T+t-\tau} (A_i - I)^{-1} B_i u_i \\ & - L'Q_i C_i (A_i - I)^{-1} B_i u_i + L'Q_i D_i u_i] \quad (A 23-16) \end{aligned}$$

Pour trouver la solution des quatre sommes qui apparaissent dans (A23-16), nous utilisons les hypothèses suivantes :

- les entrées ( $u_i$ ) du système sont constantes (A 23-17), ce qui permet d'utiliser la relation (A 23-15)
- il existe une relation [4BC][2Sa] qui relie le système et l'environnement

$$G'M_i A_i - M_i = L'Q_i C_i \quad (\text{A 23-18})$$

qui est la solution limite de l'équation :

$$M_i(t) = -\sum_{\tau=t+1}^T (G')^{T-\tau} L'Q_i C_i (A_i)^{T+t-\tau} \quad (\text{A 23-19})$$

- la période ( $t$ ) pendant laquelle la solution est recherchée est inférieure à l'horizon ( $T$ ) qui doit être assez grand pour que la relation puisse être utilisée pour un système stable :

$$(G')^{T-t-1} \approx 0 \quad (\text{A 23-20})$$

pour  $t \ll T$

La solution ainsi obtenue est [4BC] :

$$\begin{aligned} I_i(t) = & -M_i(A_i)^t x_i(0) + (G'-I)^{-1} L'Q_i C_i (A_i-I)^{-1} B_i u_i \\ & - M_i(A_i)^t (A_i-I)^{-1} B_i u_i - (G'-I)^{-1} L'Q_i D_i u_i \end{aligned} \quad (\text{A 23-21})$$

En utilisant la relation (A 23-15,18) on peut écrire :

$$I_i(t) = -M_i x_i(t) + (G'-I)^{-1} G' (M_i B_i - L'Q_i D_i) u_i \quad (\text{A 23-22})$$

et de manière analogue  $I_s$  et  $I_o$  (A 23-14)

$$\begin{aligned} I_s(t) &= -M_s x_s(t) + (G'-I)^{-1} G' (M_s B_s - Q_s D_s) u_s \\ I_o(t) &= -M_o x_o(t) + (G'-I)^{-1} G' (M_o B_o - C'Q_o D_o) u_o \end{aligned} \quad (\text{A 23-23})$$

avec des matrices  $M_s$  et  $M_o$  définies par :

$$\begin{aligned} G'M_s A_s - M_s &= Q_s C_s \\ G'M_o A_o - M_o &= C'Q_o C_o \end{aligned} \quad (A\ 23-24)$$

Dans l'hypothèse concernant l'horizon de poursuite (A 23-20) on peut simplifier l'équation (A 23-13)

$$g(t) = -I_i(t) + I_s(t) + I_o(t) \quad (A\ 23-25)$$

Cette solution sera utilisée dans le paragraphe (432).

Dans l'hypothèse où les entrées  $(u_i)$ ,  $(u_s)$ ,  $(u_o)$  des systèmes objectifs sont délivrées par les systèmes complémentaires conformes à l'équation (A 23-12), le vecteur forcé  $(g(t))$  peut être déterminé de manière analogue.

Comme exemple, on peut mettre sous la forme suivante l'ensemble des systèmes  $S_i$  (A 23-10) et  $S_{ic}$  (A 23-12) :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_i(t+1) \\ x_{ic}(t+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_i & B_i C_{ic} \\ 0 & A_{ic} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(t) \\ x_{ic}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_i D_{ic} \\ B_{ic} \end{bmatrix} u_{ic}(t) \\ z_i(t) &= \begin{bmatrix} C_i & D_i C_{ic} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_{ic} \end{bmatrix} + D_i D_{ic} u_{ic}(t) \end{aligned} \quad (A\ 23-26)$$

En suivant le développement (A 23-13 à 21) précédent, on peut aboutir pour  $I_{ic}$  à une forme analogue à  $(I_i)$  donné par (A 23-22)

$$\begin{aligned} I_{ic}(t) &= M_i x_i(t) + [M_{ic} + M_i B_i C_{ic}] x_{ic}(t) \\ &\quad + (G'-I)^{-1} [M_i B_i C_{ic} + M_{ic} B_{ic} - L'Q_i D_i D_{ic}] u_{ic} \end{aligned} \quad (A\ 23-27)$$

avec les matrices :

$$M_i : G'M_i A_i - M_i = L'Q_i C_i$$

$$M_{ic} : G'M_{ic} A_{ic} - M_{ic} = [L'Q_i D_i - G'M_i B_i] C_{ic} \quad (A\ 23-28)$$

De manière analogue à (A 23-27,28), on peut calculer les valeurs de  $(I_{sc})$  et de  $(I_{oc})$  et obtenir la valeur du vecteur forcé (A 23-25) :

$$g(t) = -I_{ic}(t) + I_{sc}(t) + I_{oc}(t) \quad (A\ 23-29)$$

Ce qui donnera un algorithme composé de blocs origine dépendant du système  $(S_i)$ ,  $(S_s)$ ,  $(S_o)$  et des blocs complémentaires liés aux systèmes  $(S_{ic})$ ,  $(S_{sc})$ ,  $(S_{oc})$  (voir paragraphe (432)).

## BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

La méthodologie de l'automatisation intégrée concerne un vaste domaine comportant un grand nombre de travaux théoriques et appliqués, parmi lesquels nous avons sélectionné un nombre restreint de références, classées de la manière suivante :

- B 10 - Ouvrage général
- B 20 - Commande de procédé (colonne à distiller)
- B 30 - Systèmes complexes
- B 40 - Méthodes spécifiques de commande (poursuite optimale)
- B 50 - Autres

B 10 Ouvrages, articles de synthèse.

Les ouvrages que nous citons ici donnent des informations générales sur les différents domaines que nous avons abordés au cours de notre étude. En partant de l'analyse historique [1Ry] et en mentionnant l'approche "système" [1Kl], [1ZP], nous avons abordé les problèmes d'automatisation [1TR], [1BD], [1Ro] et notamment la commande optimale dynamique [1PB], [1Sa], [1LM] dans laquelle notre développement a suivi la démarche présentée en [1AF]. L'approche de la commande des grands systèmes est issue des travaux [1MM] et [1Ku], et elle est suivie par un développement important dans les domaines présentés en [1FC], [1La], [1Fi] et [1Ti]. Les méthodes spécifiques présentées par différents éditeurs concernent des méthodes d'optimisation statique [1Fk] et des méthodes applicables aux grands systèmes [1Hi], [1KS] et [1Wi2]. Compte tenu de l'application envisagée aux systèmes dynamiques industriels [1CP] nous avons mentionné les travaux faisant le point de l'automatisation dans la distillation [1Wi1] et [1BB].

- 1AF M.ATHANS, PL.FALB : Optimal Control. An Introduction to the theory and its application.  
Mc Graw Hill 1976.
- 1BB G.BORNARD, L.BADGUERAHANIAN : Automatisation of distillation processes : from the laboratory to the industrial plant.  
Dyn. Syst. Meas. and Control Vol. 96 n°4 1974.
- 1BD R.BOUDAREL, J.DELMAS, P.GUICHET : Commande optimale des processus.  
Dunod 1969.
- 1CP J.CERMAK, V.PETERKA, J.ZAVORKA : Dynamika regulovanych soustav.  
Academia Praha 1968.
- 1FC A.FOSSARD, M.CLIQUE, N.IMBERT : Aperçus sur la commande hiérarchisée.  
Rairo AFCET (8) 1972.
- 1Fi W.FINDEISEN : Wielopoziomowe układy sterowania.  
PWN Warsovie 1974.
- 1Fℓ R.FLETCHER (ed) : Optimisation.  
Acad. Press 1969.
- 1Hi D.M.HIMMELBLAU (ed) : Decomposition of large scale problems.  
Nord Holland 1973.
- 1Kℓ G.J.KLIR (ed) : Trends in General System Theory.  
John Wiley 1972.
- 1KS H.M.KUHN, P.G.SZEGO (ed) : Differential games and related topics.  
Nord Holland 1971.

- 1Ku R.KULIKOWSKI : Sterowanie w Wielkich Systemach.  
WNT Warsowie 1970.
- 1La L.S.LASDON : Optimisation theory for large systems.  
Macmillan N.Y.1971.
- 1LM E.B.LEE, L.MARKUS : Foundations of optimal control theory.  
John Willey 1967.
- 1MM M.D.MESAROVIC, D.MACKO, Y.TAKAHARA : Theory of Hierarchical Multi-  
level Systems.  
Acad. Press 1970.
- 1PB L.S.PONTRYAGIN, V.G.BOLTYANSKI, R.V.GAMKRELIDZE, J.F.MISCHENKO :  
The mathematical theory of optimal processes.  
Interscience Pub., New York 1962.
- 1Ro I.ROITENBERG : Théorie du Contrôle Automatique.  
MIR Moscou 1974.
- 1Ry R.RYCHTA : Science au carrefour (en tchèque).  
SNPL Praha 1967.
- 1Sa A.SAGE : Optimal Control.  
Printice Hall 1968.
- 1Ti A.TITLI : Commande hiérarchisée et optimisation des systèmes complexes  
Dunod Automatique Paris 1975.
- 1TR Y.TAKAHASHI, M.J.RABINS, D.M.AUSLANDER : Control and dynamic systems.  
Addison Wesley 1970.

- 1Wi1 T.J.WILLIAMS : Distillation Column Control Systems à Review, a compilation and an Analysis.  
Symp ISA Houston 4/1971
- 1Wi2 D.A.WISNER (ed) : Optimization methods for large Scale Systems with Application.  
Mc Graw Hill 1971.
- 1ZP L.A.ZADEN, E.POLAK : Systeme Theory.  
Mc Graw Hill 1969.

B 20 Commande d'un procédé.

Compte tenu de l'étendue du domaine de la commande des procédés isolés et de la variété des applications, nous ne mentionnons ici que des travaux réalisés au Laboratoire d'Automatique de Grenoble et aussi les travaux personnels [2Bi1], [2Bi2]. Nous avons cité ceux qui portent sur la commande de colonne à distiller [2Bi3], [2Bc], [2BB], [2BC1], [2BC2], [2Mo] sur la commande multivariable [2Fo], [2No], et sur l'utilisation des modèles de références dans la commande des procédés [2FG], [2FZ], [2Sa], [2La].

- 2BB J.C.BECQUAERT, J.B.BERN, Z.BINDER, R.PERRET : Automatic Control of a distillation Column by Digital Computer.  
Congress CHISA Prague 1972.
- 2BC1 G.BORNARD, D.COCHET, A.MENENDEZ, R.PERRET : Computer Control of the Cold Distillation Unit of a Steam-Cracking.  
Congress IFAC Paris 1972.

- 2BC2 Z.BINDER, L.CALVILLO : Dynamic Control of a Pilot Distillation Column by Digital Computer.  
Conf. IFAC/IFIP Zurich 1974.
- 2Be J.C.BECQUAERT : Optimisation mixte du fonctionnement d'une colonne de distillation pilote.  
Thèse Docteur-Ingénieur Grenoble 1972.
- 2Bi1 Z.BINDER : Automatisation de la coulée semi-continue de lingots en alliage d'aluminium (en Tchèque)  
Rapport du contrat de recherche KOB Bridlicna 1962.
- 2Bi2 Z.BINDER : Recuit continu par l'effet Joule de fils conducteurs en alliage d'aluminium (en Tchèque).  
Rapport du contrat de recherche KOB Bridlicna 1962.
- 2Bi3 Z.BINDER : Commande optimale dynamique d'une colonne à distiller.  
Congress CHISA Marianske Lazne (Tchécoslovaquie) 1969.
- 2Fo M.FOND : Contribution à la synthèse de la commande dynamique de systèmes multidimensionnels.  
Thèse de Docteur-Ingénieur Grenoble 1971.
- 2FG C.FOULARD, S.GENTIL, J.P.SANDRAZ : Commande et régulation par calculateur numérique.  
Ed Eyrolles Paris 1977.
- 2FZ C.FOULARD, P.ZOYDO-CRESPO : Commande modale et commande découplée multidimensionnelle par des techniques de poursuite d'un modèle de référence.  
Conf. IFAC Zurich 1974.

- 2La I.LANDAU : A Survey of Model Reference Adaptive Techniques - Theory and Applications.  
Automatica Vol. 10 1974 pp. 353-379.
- 2Mo B.MONNIER : Non linear modeling and control of a distillation unit.  
Congress CHISA Prague 1975.
- 2No M.NOUGARET : Sur une méthode de synthèse, par retour d'état, de la commande des procédés physiques.  
Thèse Docteur ès Sciences Grenoble 1972.
- 2Sa J.P. SANDRAZ : Identification et commande multidimensionnelle d'une unité pilote de fabrication de papier.  
Thèse de Docteur-Ingénieur Grenoble 1973.

B 30 Systèmes complexes.

Les travaux sur les systèmes complexes sont nombreux étant donné la diversité des problèmes traités et des méthodes utilisées. En dehors des références à nos travaux, nous avons sélectionné des études qui offrent des similitudes avec notre approche, ainsi que des travaux faits dans d'autres laboratoires français et relatifs aux domaines abordés ici.

En ce qui concerne notre approche de l'automatisation intégrée et de la conduite décentralisée coordonnée, nos publications portent les références suivantes : [3BE], [3Bi2], [3EB2].

Le développement des algorithmes et la discussion des problèmes spécifiques permettant la mise en oeuvre de ces algorithmes, sont mentionnés en [3BN], [3EB1], [3Mo].

L'organisation de la partie matériel compatible avec notre approche de la décentralisation des moyens est présentée dans les publications : [3Bi3], [3DB], [3Ra].

Les résultats d'application de l'approche développée sont mentionnés en [3BJ1], [3BJ2], [3Mo].

Parmi les autres références, notons une approche de la commande décentralisée [3IP] et des travaux portant sur l'organisation du système de conduite [3BL1], [3Ma], [3VN], [3Na] qui offrent des similitudes avec le présent mémoire.

Le problème de la commande décentralisée est aussi abordé dans les travaux [3Ch1], [3Co], [3Si], l'approche décomposition-coordination est définie en [1Hi], [3BL2], [3BB] ; les algorithmes et les méthodes sont présentés dans les publications suivantes : [3GT2], [3SH], [3Ti], [3TG], [3TL].

Les travaux concernant l'application des calculs et de la commande hiérarchisée à des procédés industriels sont présentés en [3GT1], [3PF], [3Ch2], [3TS].

3Ao M.AOKI : Some iterative schemes for decentralized dynamic system control.

Congress IFAC Paris 1972.

3BB A.BENVENISTE, P.BERNHARD, G.COHEN : On the decomposition of stochastic control problem.

Symposium IFAC Udine 1976.

- 3BE Z.BINDER, Y.M.EL FATTAH, E.NAWARECKI, R.PERRET : Synthesis of Complex Control Objects.  
Progress in Cybernetics and Syst. Research Vol.1, Hemisphere Pub. 1975.
- 3Bi1 Z.BINDER : Processus d'oxydation continu des feuilles conductrices d'aluminium (en Tchèque).  
Rapport du contrat de recherche KOB Bridlicna 1963.
- 3Bi2 Z.BINDER : Stabilisation, coordination and Structuralization in the automatization of complex systems.  
Int J. of Biomed Comp, Vol. 7 1976.
- 3Bi3 Z.BINDER : Problems of instrumentation set in the control of complex systems.  
Congress IMEKO London 1976.
- 3BJ1 Z.BINDER, A.JANEX, B.MONNIER, D.REY : Commande à plusieurs niveaux d'un procédé pilote chimique.  
Journées AFCET Toulouse 1976.
- 3BJ2 Z.BINDER, A.JANEX, B.MONNIER, D.REY : Coordinated decentralized Control of Complex Distillation Pilot Plant.  
IFAC/IFIP Conf. La Haye Juillet 1977.
- 3BL1 V.N.BURKOV, A.Ya.LERNER : Fair-Play in Control of Active Systems.  
Dans [KKS].
- 3BL2 A.BENSOUSSAN, J.L.LIONS, R.TEMAN : Décomposition des problèmes d'optimisation.  
Cahier IRIA (11) 1972.

- 3BN Z.BINDER, E.NAWARECKI : A Computer Algorithm of variable structure for the control of complex objects.  
Conférence IFAC/IFIP Zurich 1973.
- 3Ca J.L.CALVET : Optimisation par calcul hiérarchisé et coordination en ligne des systèmes dynamiques de grande dimension.  
Docteur de Spec. Toulouse 1976.
- 3Ch1 B.CHENEVEAUX : Contribution à l'optimisation hiérarchisée des systèmes dynamiques.  
Thèse de Docteur-Ingénieur Nantes 1972.
- 3Ch2 G.CHALAYE : Commande et calcul hiérarchisés, application à une usine de fabrication.  
Docteur de Spec Grenoble 1975.
- 3Co G.COHEN : Contribution à la théorie de la commande décentralisée et la coordination en ligne des systèmes dynamiques.  
Thèse de Docteur-Ingénieur Univ. Paris (Sud) 1975.
- 3DB P.DESCHIZEAUX, Z.BINDER : Spécification des structures multi-micro-processeurs pour la conduite des procédés.  
Symp. MIMI Zurich 1975.
- 3EB1 Y.M.EL FATTAH, Z.BINDER : A Computer Algorithm for integrated Control Systems.  
Congress COMP-CONTROL Szeged (Hung) 1974.
- 3EB2 Y.M.EL FATTAH, Z.BINDER : An Approach to organization and control of complex systems with application on a distillation plant.  
Congress IFAC Boston 1975.

- 3GT1 G.GRATELOUP, A.TITLI : General principles and applications in chemical engineering of the multilevel static and dynamic optimal control. CHISA Marianske Lazne (Tchécoslovaquie) 1972.
- 3GT2 G.GRATELOUP, A.TITLI : Two level dynamic optimization method. Journ. of Optimis. theory and apl. 5/1975.
- 3Ho Y.C.HO : Information problems in Large Scale Control Systems. Symposium IFAC Udine 1976.
- 3IM T.ISHIMATSU, A.MOHRI, M.TAKATA : Optimization of weakly coupled subsystems by a two-level method. Int. J. Control, Vol.22, n°6, 1975.
- 3IP L.ISAKSEN, H.J.PAYNE : Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway regulation. IEEE trans. AC-18, 3/1973.
- 3Ma A.V.MALISHEVSKII : Models of Joint Operation of many Goal - Oriented Elements. Automatika i Telemehhanika 11,12/1972.
- 3Mo B.MONNIER : Contribution à la commande d'une classe de procédés dynamiques industriels dans de grands domaines de fonctionnement. Thèse de Docteur-Ingénieur, INPG Grenoble 1977.
- 3Na E.NAWARECKI : Non analytical models and algorithmes with variable structures for controlling Complex production processes. Scient. bul. University of Mining and Metallurgie, Cracow, 1975.
- 3Pe J.D.PEARSON : Dynamic decomposition techniques.  
Dans [1Wi2]

- 3PF S.PIGGOT, I.FREIDENSON : Hierarchical automatic Control Systems for chemical plant.  
Congress IFAC Paris 1972.
- 3RN G.RAMOS NIEMBRO : Contribution à l'étude de la commande séquentielle des procédés complexes.  
Thèse de Docteur de Spéc. Grenoble, 1975.
- 3Sc J.D.SCHOEFFLER : Static Multilevel systems. In : Optimization methods for large scale systems.  
(D.A.Wismer, ed). Mc Graw Hill, N.Y. 1971.
- 3Si M.SINGH : A new algorithm for the on-line multilevel Control of large interconnected Systems with fast dynamics.  
Int. J. of Control 4/1975.
- 3SH M.SINGH, M.HASSAN : A comparison of two hierarchical optimization methods.  
Int. J. of Control 6/1976.
- 3Te Yu.D.TENISBERG : Some Models of Collective Behavior in Dynamic Processes of Market Price Formation.  
Aut i Telem 7/1969.
- 3Ti A.TITLI : Contribution à l'étude des structures de commande hiérarchisées en vue de l'optimisation des processus complexes.  
Thèse de Docteur ès Sciences, Toulouse 1972.
- 3TG A.TITLI, J.GOLY, M.G.SINGH : Methodes de décomposition coordination en calcul des variations et couplage par variable d'état.  
Revue Rairo, Avril 1976.

- 3TL A.TITLI, T.LEFEVRE, M.RICHETIN : Multilevel optimization methods for the separable problems and application.  
Int. J. of Systems Sciences, 6/1973.
- 3TS E.TAZAKI, A.SHIDO, T.UMEDA : Decentralized Optimization of Chemical Process by a Feasible Method.  
Automatica, pp.543-554, 1972.
- 3VN R.VISWANATHAN, K.S.NARENDRA : Competitive and Cooperative Games of Variable - Structure Stochastic Automata.  
J. of Cybernetics, 3/1973.
- 3Za L.A.ZADEH : Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.  
IEEE Trans. SMC -3, 1/1973.

B 40 Méthodes spécifiques de commande.

Les références présentées concernent les méthodes de commandes des procédés industriels, en particulier le développement des techniques de poursuite généralisée. Les autres méthodes spécifiques sont présentées dans les publications [4Fo], [4As], [4La], [4KB], où on trouve la bibliographie concernant les domaines abordés.

Le développement des méthodes de poursuite généralisée issues de la commande quadratique [4Bi], [4BH] sert à l'application de cette technique aux systèmes complexes [4BC] et représente une approche des différents problèmes de commande [4BB], [4Pi], ainsi qu'une technique spécifique utilisant une modification des objectifs [4BB2].

Par ailleurs, on a mentionné en [4Ba] une étude sur la commande duale issue des techniques de poursuite.

- 4As S.J.ASSEO : Application of optimal control to perfect model following.  
Aut. Contr. Conf. Arbor, 1968.
- 4Ba O.BADR : Contribution au problème de la Commande duale des systèmes  
stochastiques multivariés et de son application à un procédé  
industriel.  
Thèse de Docteur ès Sciences, INPG, Grenoble, 1977.
- 4BB1 Z.BINDER, O.BADR, R.PERRET : Tracking approach to the control  
problems.  
Congress IFAC, Boston, 1975.
- 4BB2 O.BADR, Z.BINDER, D.REY : Contrainte et correction par la technique  
de poursuite.  
Congrès AFCET, Toulouse, 1975.
- 4BC Z.BINDER, C.COMMAULT, D.REY : Poursuite généralisée et ses appli-  
cations.  
LAG 1974.
- 4BH Z.BINDER, A.HAGRAS : Développement des algorithmes de poursuite  
généralisée.  
LAG, 1976.
- 4Bi Z.BINDER : Commande optimale dynamique d'un procédé industriel  
multivariable.  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Grenoble, 1971.
- 4Fo C.FOULARD : Sur la commande quasi-optimale obtenue par apprentissage  
d'une classe de procédés physiques.  
Thèse de Docteur ès Sciences, Grenoble, 1969.

4KB R.KONAKOVSKY, Z.BINDER : A Multimodal Searching technique using a Learning Controller.  
Symp. IFAC, Ischia, 1973.

4La I.D.LANDAU : Sur une méthode de synthèse des systèmes adaptatifs avec modèle utilisés pour la commande et identification d'une classe de procédés physiques.  
Thèse de Docteur ès Sciences, Grenoble, 1974.

4Pi R.S.PINDYCK : An application of the linear quadratic Tracking problem to economic stabilization policy.  
IEEE Trans. on Aut. Control (6), 1972.

B 50 Divers.

Parmi les références concernant d'autres domaines, notons celles qui portent sur l'identification [5Ba], [5Ge], [5RR], et sur la réduction des modèles [5BM], [5Mi], [5Da].

5Ba A.BARRAUD : Réalisation minimale et approximation optimale des systèmes dynamiques linéaires invariants.  
Thèse de Docteur ès Sciences, Univ. Nantes, 1975.

5BM P.BERTRAND, G.MICHAILESCO, J.M.SIRET : Sur la synthèse des modèles réduits par agrégation.  
Rairo, Juillet 1976.

5Bo G.BORNARD : Contribution à l'étude de modèles de colonnes à distiller.  
Thèse de Docteur ès Sciences, Grenoble, 1971.

- 5CM P.E.CHAINES, D.G.MAYNE : On the discrete time matrix Riccati equation of optimal control.  
Int. J. of Control, Vol.12, n°5, 1970.
- 5Da I.E.DAVISON : A method for simplifying linear dynamic system.  
IEEE, T.A.C., January, 1966.
- 5Gc S.GENTIL : Etude comparative de diverses méthodes statistiques d'identification de systèmes dynamiques.  
Thèse de Docteur Spéc., Grenoble, 1972.
- 5IL ILO : Social Aspects of Automation (Bibl.).  
Intern. Labour Office, Genève, 1969.
- 5Mi D.MITRA : The reduction of complexite of linear time invariant systems.  
4th Congress IFAC, Warsaw, 1969.
- 5RR J.RICHALET, A.RAULT, R.POULINGEN : Identification des processus par la méthode du modèle.  
Gardon Breach, Théorie du Syst., Vol.4, 1972.

LEXIQUE

LEXIQUE

	<u>Pages</u>
<u>Accumulation</u> (des expériences). Acquisition et conservation sous forme de modèle des expériences.	2.20
<u>Agrégation</u> (des régimes, des éléments, des structures). Assemblage des parties dans une représentation compacte.	2.11
<u>Amélioration</u> (de l'expérience, du modèle, de conduite). Action concernant des modifications du modèle, de ses états ou de ses paramètres ou concernant une correction de la conduite.	2.22, 3.31
<u>Automatisation intégrée</u> . Méthodologie de regroupement progressif d'un système fonctionnel (physique) et de son système de conduite dans un ensemble compact.	1.6
<u>Bloc</u> (fonctionnel). Élément de base du procédé.	2.9
<u>Centre de décision</u> (de conduite). Élément modulaire du système de conduite.	2.20
<u>Commande assistée</u> . Déroulement automatique des opérations avec possibilité d'intervention d'un opérateur.	2.20
<u>Conduite</u> . Commande et gestion.	2.15

	<u>Pages</u>
<u>Conduite décentralisée.</u>	3.25
Conduite élaborée à l'aide d'informations disponibles localement.	
<u>Conduite décentralisée coordonnée.</u>	2.15
Méthode de conduite décentralisée exploitant une représentation simplifiée de l'ensemble en vue de lui assurer un comportement cohérent vis-à-vis d'objectifs alloués.	
<u>Coopération.</u>	2.21
Contribution à la réalisation (par un centre de décision) des objectifs de l'environnement.	
<u>Création</u> (d'un environnement, d'objectifs, d'un système, d'un modèle).	2.22, 3.27
Elaboration selon des critères spécifiques.	
<u>Distance.</u>	2.4, 4.5
Moyen d'exprimer des relations entre éléments, systèmes, modèles ou variables les caractérisant. La distance, terme employé ici dans un sens plus large qu'en mathématique, peut être exprimée par un critère.	
<u>Duale</u> (décision, coordination).	3.23, 3.31
Caractérisée par l'utilisation simultanée des deux moyens de réduction d'une distance (commande optimale et amélioration du modèle).	
<u>Élément intégré.</u>	2.5
Partie d'un système intégré ayant une autonomie de fonctionnement vis-à-vis du reste du système (qui constitue son environnement).	

	<u>Pages</u>
<u>Elément passif.</u>	2.8
Elément d'un système passif.	
<u>Elément de transformation.</u>	2.8
Elément caractéristique de la fonction du procédé.	
<u>Environnement</u> (d'un système, d'un élément).	2.5, 4.5
Ensemble des éléments et des influences qui sont susceptibles d'agir de l'extérieur et qui se manifestent sous forme de contraintes et d'objectifs.	
<u>Environnement autonome.</u>	3.21
Environnement engendré par le système et qu'il est tenu de poursuivre.	
<u>Environnement fictif.</u>	3.18
Environnement complémentaire destiné à modifier dans un sens désiré le comportement du système tout en conservant les lois régissant la conduite.	
<u>Localisation.</u>	3.30
Définition de la situation d'un système par rapport à un ensemble de modèles.	
<u>Module</u> (de transformation).	2.9
Elément du procédé.	
<u>Objectif</u> (variable, vecteur, fonction, trajectoire).	4.5
But à atteindre pour les variables du système (ou du modèle).	

	<u>Pages</u>
<u>Objectif autonome.</u>	3.22, 4.26
Objectif traduisant l'environnement autonome.	
<u>Objectif fictif.</u>	3.20, 4.24
Objectif traduisant l'environnement fictif.	
<u>Poursuite.</u>	3.1
Déplacement (mesuré par une distance) d'un système poursuiveur en vue de le rapprocher d'un objet poursuivi (environnement, système).	
<u>Poursuite généralisée.</u>	A.1, A.20
Poursuite d'un environnement par toutes les variables (entrée - état - sortie) ou éventuellement par les seules variables externes (entrée - sortie) d'un système.	
<u>Poursuite optimale.</u>	4.8
Poursuite au cours de laquelle est minimisée la distance entre des objets se poursuivant.	
<u>Poursuite paramétrique.</u>	2.13
Poursuite assurée par la modification des paramètres ou de la structure du poursuiveur.	
<u>Poursuite réciproque.</u>	3.12, 3.23
Poursuite mutuelle de deux systèmes.	
<u>Poursuite simultanée.</u>	3.13, 3.26
Poursuite de plusieurs environnements et/ou de plusieurs systèmes.	

	<u>Pages</u>
<u>Procédé.</u>	2.9
Ensemble de production.	
<u>Régime.</u>	2.6
Mode de fonctionnement d'un procédé ou de ses éléments.	
<u>Stabilisation</u> (statique ou dynamique).	3.14
Recherche et maintien de la position d'un système par rapport à son environnement.	
<u>Système de conduite.</u>	2.13
Ensemble des éléments destinés à modifier le comportement d'un système passif.	
<u>Système intégré</u> (actif, cybernétique).	2.1
Ensemble constitué par un système passif et par son système de conduite et susceptible de communiquer avec l'environnement et de s'adapter à celui-ci.	
<u>Système intermédiaire</u> (coordonnateur, global, de niveau, de tendance).	3.27
Système assurant la liaison entre des systèmes et leur environnement.	
<u>Système passif</u> (fonctionnel, physique).	2.7
Système possédant un fonctionnement propre ne pouvant être modifié sans intervention extérieure.	
<u>Unité.</u>	2.9
Partie du procédé.	

PRINCIPALES NOTATIONS

A B C D	matrices du système
$D, D_S^E$	distance {environnement - système}
$D_{iso}, D_{Miso}$	distance (entrée - état - sortie)
$D_{io}, D_{Mio}$	distance (entrée - sortie)
$d, d_v^z$	distance entre vecteurs
$d_i, d_u^{zi} Q_i$	distance {objectif - entrée}
$d_s, d_x^{zs} Q_s$	distance {objectif - état}
$d_o, d_y^{zo} Q_o$	distance {objectif - sortie}
$d_c, d_x^{zs} d_u^{zi} Q_c$	distance croisée
E	environnement
e	base des logarithmes népériens
F	opérateur de coopération ou matrice
$F_i, F_s, F_o, F_e$	matrice de la distance finale
G	matrice
g	vecteur forcé
H	Hamiltonien
h	vecteur de perturbation d'état
I	somme, intégrale
ID	critère représentant la distance
J	intégrale
j	indice
K	matrice de Riccati
L	matrice de bouclage
LD	débit de tête
LF	débit d'alimentation

## L.7

$\ell$	vecteur de perturbation de sortie
M	matrice
$\min ( \quad )$ u,M	$\min ( \quad )$ minimisation par u $\in$ U l'entrée et par le M $\in$ M modèle
N	matrice
P	matrice
p	vecteur adjoint
Q	puissance de chauffe
Qi, Qs, Qo, Qc	matrice de la distance dynamique
R	reflux
S	matrice
T	instant final
t	variable temps
u	vecteur d'entrée
u'	vecteur de commande
v	vecteur de sortie dépendant (intéraction)
w	vecteur d'entrée dépendant (intéraction)
XD	concentration de tête
XF	concentration d'alimentation
x	vecteur d'état
y	vecteur de sortie
y'	vecteur de sortie libre (indépendant)
zi', zw, zi	vecteur objectif d'entrée
zs	vecteur objectif d'état
zo', zv, zo	vecteur objectif de sortie
$\Delta$	variation
$\tau$	variable de temps

AUTORISATION DE SOUTENANCE

VU les dispositions de l'article 5 de l'arrêté du 16 Avril 1974

VU les rapports de M. **onsieur... C. FOULARD**.....

M. **onsieur R. PERRET**.....

M. **onsieur A. TITLI**.....

M. ....

M. **onsieur Zdenek J. BINDER**..... est autorisé

à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'ETAT ES SCIENCES.

Fait à GRENOBLE, le

Le Président de l'U.S.M.G.

Le Président de l'I.N.P.F.