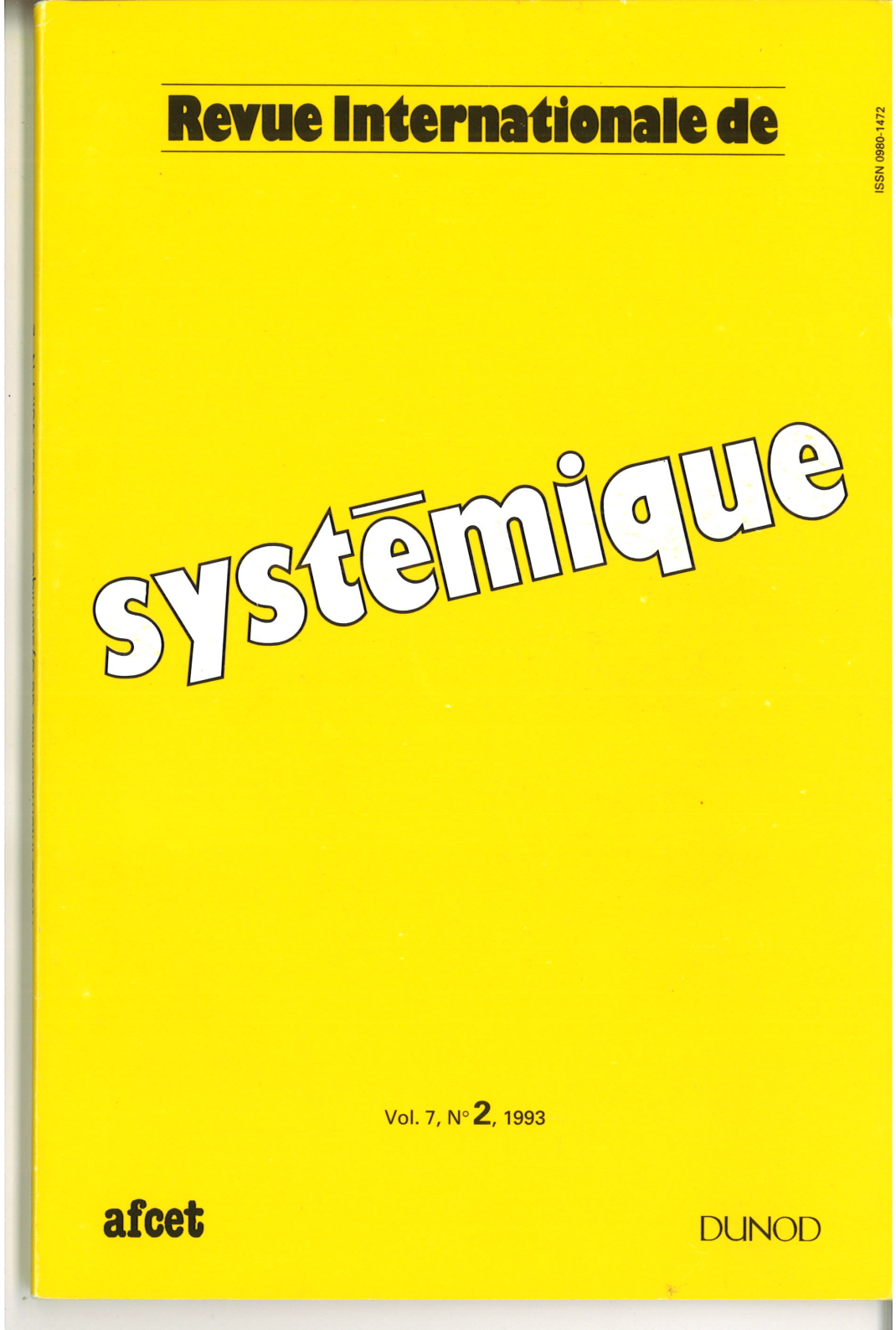


AFSCET

Revue Internationale de systēmique

Revue
Internationale
de Sytémique

volume 07, numéro 2, pages 117 - 142, 1993

Modeles génériques de comportements de systèmes de production

Daniel Thiel

Numérisation Afscet, août 2017.

Creative Commons

Revue Internationale de Systémique

Rédacteur en chef : B. Paulré
Rédacteur en chef adjoint : E. Andreewsky

Comité scientifique

J. Aracil, Université de Séville; **H. Atlan,** Université Hébraïque de Jérusalem; **A. Bensoussan,** Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique; **M. Bunge,** Université McGill; **C. Castoriadis,** École des Hautes Études en Sciences Sociales; **G. Chauvet,** Université d'Angers; **A. Danzin,** Consultant indépendant; **P. Davous,** EURE-QUIP; **J. P. Dupuy,** CREA – École Polytechnique; **H. Eto,** Université de Tsukuba; **H. von Foerster,** Université d'Illinois; **N.C. Hu,** Université de Technologie de Shanghaï; **R. E. Kalman,** École Polytechnique Fédérale de Zurich; **G. Klir,** Université d'État de New York à Binghamton; **E. Laszlo,** Institution des Nations Unies pour la Formation et la Recherche; **J.-L. Le Moigne,** Université Aix-Marseille II; **J. Lesourne,** Conservatoire National des Arts et Métiers; **L. Löfgren,** Université de Lund; **N. Luhmann,** Université de Bielefeld; **M. Mesarovic,** Université Case Western Reserve; **E. Morin,** École des Hautes Études en Sciences Sociales; **E. Nicolau,** École Polytechnique de Bucarest; **A. Perez,** Académie Tchécoslovaque des Sciences; **E. W. Ploman,** Université des Nations Unies; **I. Prigogine,** Université Libre de Bruxelles; **B. Roy,** Université Paris-Dauphine; **H. Simon,** Université Carnegie-Mellon; **L. Sfez,** Université Paris-Dauphine; **R. Trappl,** Université de Vienne; **R. Thom,** Institut des Hautes Études Scientifiques; **F. Varela,** CREA – École Polytechnique.

Comité de rédaction

Bureau

D. Andler, CREA – École Polytechnique (*Rubrique Cognition*); **E. Andreewsky,** Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Rédacteur en chef adjoint); **H. Barreau,** Centre National de la Recherche Scientifique (*Rubrique Archives*); **E. Bernard-Weil,** CNEMATER – Hôpital de la Pitié (*Rubrique Applications*); **B. Bouchon-Meunier,** Centre National de la Recherche Scientifique (*Rubrique Applications*); **P. Livet,** CREA – École Polytechnique (*Rubrique Fondements et Épistémologie*); **T. Moulin,** École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (*Rubrique Théorie*); **B. Paulré,** Université de Paris-Dauphine (Rédacteur en chef); **J. Richalet,** ADERSA (*Rubrique Applications*); **R. Vallée,** Université Paris-Nord (*Rubrique Théorie*); **J.-L. Vullierme,** Université de Paris-I (*Rubrique Fondements et Épistémologie*).

Autres membres

J.-P. Algoud, Université Lyon-II; **A. Dussauchoy,** Université Lyon-I; **E. Heurgon,** Régie Autonome des Transports Parisiens; **M. Karsky,** ELF-Aquitaine - CNRS; **M. Locquin,** Commissariat Général de la Langue Française; **P. Marchand,** Aérospatiale – Université Paris-I; **J.-F. Quilici-Pacaud,** Chercheur en Technologie; **A. Rénier,** Laboratoire d'Architecture n° 1 de l'UPA 6; **J.-C. Tabary,** Université Paris-V; **B. Walliser,** École Nationale des Ponts et Chaussées; **Z. Wolkowski,** Université Pierre-et-Marie-Curie.

Membres correspondants

ARGENTINE : C. François (Association Argentine de Théorie Générale des Systèmes et de Cybernétique). BELGIQUE : J. Ramaekers (Facultés Universitaires de Notre-Dame de la Paix). BRÉSIL : A. Lopez Pereira (Université Fédérale de Rio de Janeiro). ESPAGNE : R. Rodriguez Delgado (Société Espagnole des Systèmes Généraux). ÉTATS-UNIS : J.-P. Van Gigch (Université d'État de Californie). GRÈCE : M. Decleris (Société Grecque de Systémique). ITALIE : G. Teubner (Institut Universitaire Européen). MAROC : M. Najim (Université de Rabat). MEXIQUE : N. Elohim (Institut Polytechnique National). SUISSE : S. Munari (Université de Lausanne).

Revue Internationale de Systémique is published 5 times a year: March, May, July, September, December. Date of issue: May 1993.
Subscription price, per volume: Institutions US $ 196.
Second-class postage paid at Rahway, N.J. ISSN N° 0980-1472, USPS N° 007728.
U.S. Mailing Agent: Mercury Air-freight Intnl. Ltd., 2323 Randolph Ave., Avenel, NJ07001.
Published by Dunod, 15, rue Gossin, 92543 Montrouge Cedex France and Gauthier-Villars North America Inc., 875-81 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139, USA.
Postmaster. Please send all address corrections to: Dunod, c/o Mercury Air-freight Intnk. Ltd. 2323 Randolph Ave., Avenel, NJ 07001, USA.

REVUE INTERNATIONALE DE SYSTÉMIQUE
Vol. 7, N° 2, 1993, pp. 117 à 142

MODÈLES GÉNÉRIQUES DE COMPORTEMENT DE SYSTÈMES DE PRODUCTION

D. THIEL

Professeur à l'ESC-Tours[1]
Chercheur au LAIM Université Aix-Marseille III[2]

Résumé
L'essentiel de ces travaux a consisté à mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement des systèmes de production. Ces systèmes que l'on peut décrire en termes de structures de *feedback* sont souvent trop complexes pour être traités mathématiquement. C'est une description cybernétique qui a pu rendre compte des mécanismes et des modes de comportement induits par les structures statiques et dynamiques des systèmes.
Cette présentation est principalement conceptuelle et s'est fondée sur une démarche systémique basée sur le paradigme de la dynamique des systèmes de Jay W. Forrester.
A terme, l'objectif de cette recherche sera d'élaborer une base de connaissance sur les comportements à court, moyen et long terme des systèmes industriels de production.
Cette recherche est avant tout cognitive mais peut également être considérée comme prévisionnelle, décisionnelle et même normative.

Mots clés
Modélisation, simulation, système de production, dynamique des systèmes, comportement.

I. INTRODUCTION

I.1. Enquête préalable

Une approche qualitative des systèmes réels de production a permis empiriquement d'élaborer un ensemble de modèles de simulation. Cette phase

1. Groupe École Supérieure de Commerce, 1, rue Léo Délibes, 37000 Tours.
2. Centre Scientifique de Saint-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 13.

Rev. intern. systémique. 0980-1472 Vol. 7/93/02/ 117 /26/$ 4.60/© Afcet Gauthier-Villars

s'est déroulée en deux parties, une pré-enquête par interviews de responsables de production suivie d'une enquête intensive.

Cette recherche s'est intéressée aux mécanismes de régulation des organisations de production face à des fluctuations imprévues des composantes de leur système. Par rapport aux objectifs initiaux et avec une vision cybernétique de ces systèmes, quatre types d'informations ont été extraits d'une première pré-enquête, les entrées régulières et les entrées « perturbantes » du système, la structure « agrégée » des modèles, les modes de régulation passive et active (mécanismes de décision) et les sorties et objectifs du système.

Il restait à décrire de façon objective, systématique, le contenu de ces interviews. Cette première analyse a été réalisée dans un but d'exploration et pour éviter une influence trop forte d'orientations personnelles initiales. Il s'agissait également de vérifier le réalisme et le degré de validité des hypothèses déjà arrêtées.

Il a été dégagé quatre catégories permettant de décrire les fonctionnements des systèmes de production définis par leurs entrées-sorties et leurs mécanismes de contrôle et de régulation. Ces catégories ont été classées de façon exhaustives et exclusives (sans chevauchement).

a. Les entrées du système :

Il a fallu distinguer les entrées déterministes et stochastiques ne déstabilisant pas le système de production à court, moyen et long terme et les entrées provoquant des perturbations aléatoires et brutales.

b. Les sorties objectifs à court, moyen et long terme

Il a été relevé que l'amélioration du service était liée à la maximisation du nombre de commandes livrées à temps, l'amélioration de la qualité à la minimisation du taux de rebut et de retouches et l'amélioration des performances économiques au respect des coûts prévus, voire à la réduction des coûts réels.

c. La structure du système

Une représentation graphique de l'organisation produit/process proposée par l'Association Française de Gestion Industrielle a été retenue à partir de trois formes de base [RFG 89] (voir *fig.* 1).

d. Les mécanismes de régulation et les variables de commande

Il s'agissait d'identifier les paramètres et principaux indicateurs permettant le contrôle permanent de l'activité de production et les mécanismes de pilotage mis en oeuvre en cas de déséquilibre et de dysfonctionnement dans le système.

Remarque : Les résultats détaillés de l'enquête ne sont pas décrits dans ce texte mais peuvent être consultés dans notre référence [THIEL 93].

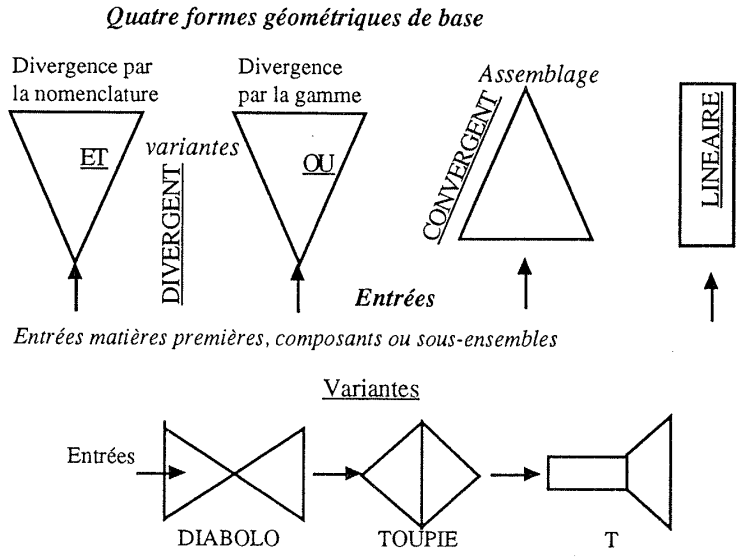


Figure 1. *Représentation proposée dans la* Revue Française de Gestion Industrielle, *Paris, Dunod,* n° 1, 1989.

I.2. Formulation opérationnelle des objectifs

Le premier objectif de cette recherche a porté sur l'étude des comportements des entreprises industrielles face à des dysfonctionnements de leur système productif.

Des modèles simplifiés et agrégés représentant les différents types de systèmes de production ont été simulés par rapport à leurs problématiques particulières.

Les hypothèses de cette recherche découlent du travail préalable de défrichage et des résultats de la pré-enquête. Ces hypothèses vérifiables et spécifiques se sont efforcées d'établir les interrelations complexes et abstraites entre les variables des systèmes de production. Leur rôle a été d'indiquer les voies possibles de réponses aux différentes problématiques.

Des systèmes de production réels ont été sélectionnés et analysés à partir de leur typologie la plus représentative.

La phase de modélisation s'est effectuée à partir d'une agrégation de boucles cybernétiques de contrôle et de pilotage des systèmes.

Rappelons que nous ne sommes intéressés qu'aux seuls mécanismes décisionnels de régulation dans des systèmes de production perturbés en univers incertain.

II. PROPOSITION DE MODÈLES GÉNÉRIQUES DE SYSTÈMES DE PRODUCTION INDUSTRIELS

Nous avons constaté globalement une absence de méthodes structurantes de construction de modèles de systèmes de production.

Notre premier objectif a été de modéliser différents systèmes de production, pour mettre en évidence le comportement dynamique et les boucles de régulation de ces systèmes face à des fluctuations et des aléas divers.

L'objectif d'un système de production et par conséquent de son modèle, est de transformer des matières premières, composants ou sous-ensembles en produits finis dans un délai requis, avec les moyens appropriés et organisés dans un but commun et à un coût déterminé. Un moyen considéré comme un agent physique de la production est entièrement défini par sa capacité et son savoir-faire. L'organisation quant à elle, représente la coordination de l'ensemble de ces moyens dans un but commun de livraison des clients (ou de constitution d'un stock de produits ouvrés ou semi-ouvrés) dans le délai et la qualité imposés en respectant les coûts prévus.

La modélisation des systèmes de production s'est donc établie sur le principe suivant : l'organisation est le reflet des sous-systèmes d'information et de pilotage, les moyens et leur agencement spatial celui du sous-système opérant.

Le constat de difficultés de modélisation de systèmes de production joint aux difficultés que nous avons rencontrées lors de nos expériences antérieures de modélisation conduites dans une perspective d'ingénierie, nous a amené à développer une réflexion conceptuelle pour répondre à cette problématique.

II.1. Structuration des modèles

Les modèles représentent les neuf classes types définies dans [KIEFFER 86] (voir en annexe un rappel de cette typologie). La typologie du système de production identifiée à partir de la complexité et de l'incertitude sera complétée par la dimension temporelle de l'horizon de la décision. On observe sur la figure 2 les 27 types de systèmes de production représentatifs.

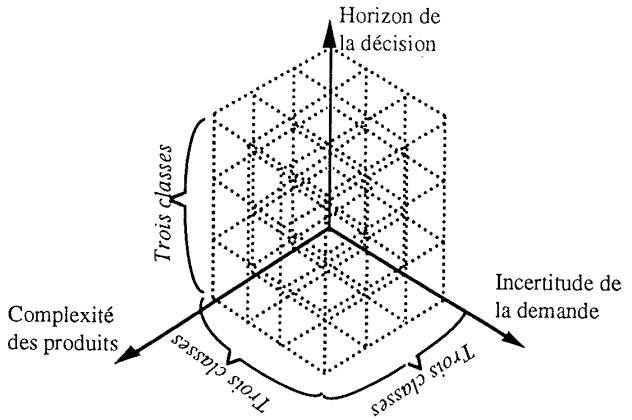


Figure 2. Représentation tri-dimensionnelle d'une typologie des systèmes de production.

Ce schéma fait apparaître les trois dimensions retenues pour caractériser les systèmes de production industriels : la complexité des produits, l'incertitude de la demande et l'horizon temporel des décisions.

En se référant aux concepts classiques de la théorie des systèmes, nous pouvons proposer un schéma conceptuel (*fig.* 3).

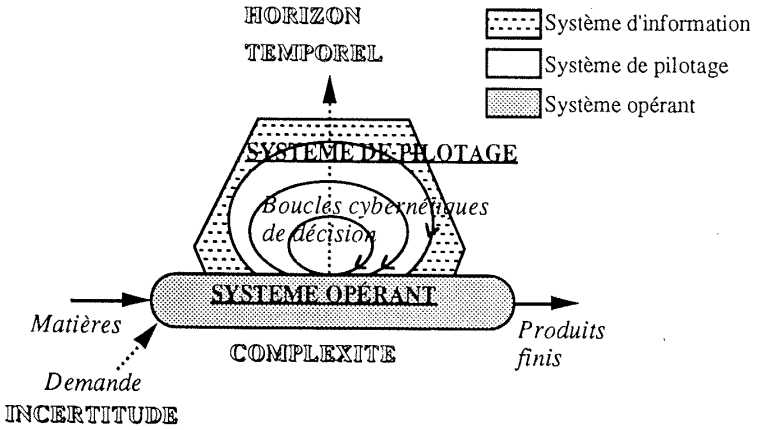


Figure 3. Schéma systémique des systèmes de production.

On y observe les trois composantes des systèmes de production, le sous-système opérant, le sous-système d'information et le sous-système de pilo-

tage avec ses boucles cybernétiques représentant les niveaux des décisions [ANTONY 65]. Les variables de commande agissent directement sur le sous-système opérant, au travers de ces boucles et sur trois niveaux temporels.

En réfléchissant à une typologie des systèmes de pilotage et des systèmes opérants, nous avons pensé intéressant de définir des types de modèles construits à partir d'une agrégation de primitives standards, correspondant respectivement à différents types de systèmes opérants et à différents types de systèmes de décision.

Nous avons donc retenu la vision systémique du système de production proposée par le LURPA [BOURDET *et al.*] à partir des travaux de J. L. Le Moigne et de J. Mélèse (voir [LE MOIGNE 77] et [MÉLÈSE 80]).

II.2. Sous-systèmes d'information et de pilotage

II.2.1. Indicateurs de contrôle

Le schéma de la figure 4 représente les différentes variables d'influence dans les systèmes de production. Les principaux indicateurs de contrôle relevés dans l'enquête sont les indicateurs les plus sensibles. En fait, ces variables sont externes au sous-système opérant et le commandent « artificiellement ».

Ces variables seront quantifiées pour la simulation afin de vérifier de façon permanente les indicateurs de l'activité et de « capter » les dysfonctionnements conduisant à déséquilibrer les systèmes.

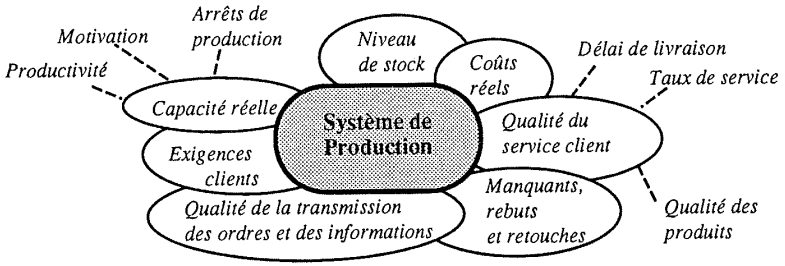


Figure 4. Les indicateurs de contrôle du système de production.

Les exigences commerciales des clients peuvent être des commandes clients ou des délais de livraison souhaités par le marché. Ce sont des variables exogènes au système, qui sont à la base de la gestion de l'activité de production.

La capacité réelle exprime l'efficacité de l'outil productif par rapport au programme de production fixé. Le rapport entre la capacité brute et la charge nette de production permet de quantifier globalement la productivité. Il avait été constaté dans l'enquête précédente que cette variable était la plus contrôlée dans les systèmes de production car elle agissait directement sur la capacité, sur la motivation du personnel, sur l'organisation physique ainsi que sur le contrôle et le suivi de l'activité.

Le facteur de motivation n'est pas contrôlé directement mais est souvent activé par une décision générée à partir d'un indicateur de contrôle.

Les stocks de produits finis, semi-ouvrés et matières premières ainsi que les en-cours sont mesurés et comparés aux volumes autorisés.

Les coûts réels de consommation de matières et de main-d'oeuvre sont également valorisés et comparés aux dépenses initialement budgétées.

La qualité de service client est quantifiée à partir du respect des délais prévus (taux de service), de la qualité des produits et des services et de la valeur du délai moyen de livraison par rapport à l'exigence du marché.

Les taux de manquants, de rebuts et de retouches, la qualité de la transmission des informations et des ordres influencent le comportement du système de production.

II.2.2. Perturbations et incertitude

Les perturbations externes et internes stimulant les systèmes ont différentes origines :

• Les entrées extérieures aux systèmes de production comme les demandes commerciales sont les plus influentes et souvent les plus imprévisibles. L'incertitude de ces demandes est propre à chaque classe de systèmes de production. Les produits sont spécifiques et élaborés à la commande pour les classes 1, 4 et 7. Les produits sont standards et assemblés ou façonnés à la commande pour les classes 2, 5 et 8. Pour les classes 3, 6 et 9, les ordres clients sont anticipés par un programme prévisionnel. Pour le long terme, le marché peut exiger une réduction progressive du délai de livraison pour rester compétitif. Dans ce cas, il sera supposé pour les simulations plusieurs évolutions possibles de ces délais.

• Les indicateurs d'activité et de qualité permettant le contrôle de la stabilité du système de production sont les suivantes :

– la capacité de production évolue en fonction de la variation de la productivité, de l'augmentation de l'absentéisme, des arrêts machines, des risques de grèves, des manquants fréquents par non-respect des dates de

livraisons des fournisseurs ou par non-respect des dates du planning des ateliers amont ;

– l'efficience de la circulation des ordres et des informations ;

– les niveaux de stocks ;

– les coûts réels de fabrication dépendant des écarts de consommation de matières (retouches, rebuts...) ou des écarts de main-d'oeuvre (baisse de rendements...) ;

– la réaction extérieure de la clientèle sur le non-respect des dates de livraisons (qualité de service), les problèmes de qualité ou les délais de livraison trop longs.

II.2.3. Boucles cybernétiques de décision

En partant du paradigme énonçant que toute décision est prise à l'intérieur d'une boucle de *feedback,* nous avons pu associer aux principaux indicateurs de contrôle de l'activité, les mécanismes de décision dans les systèmes de production. Ceci nous a permis de conceptualiser huit types de boucles de *feedback* élémentaires couplées.

Cette recherche des liens de causalité dans les systèmes productifs, et tout spécialement les boucles cybernétiques, positives ou négatives, a permis d'élaborer les différents schémas causaux ou chaînes causales (voir les *figures* 5). Dans ces différentes figures, il est décrit les mécanismes de commande du sous-système opérant par des variables de contrôle. Nous n'utiliserons pas le terme variable de décision car nous considérons que ces variables sont continues, cf. [WALLISER 77].

Il faut noter que ces boucles de rétroaction ne prennent pas en compte l'horizon de la décision. Il s'agissait de décrire de façon générale le comportement de ces différentes classes de systèmes. Les macro-modèles seront par la suite, spécifiques à la typologie de chaque système de production et à l'horizon décisionnel. Ces boucles élémentaires correspondent aux mécanismes de décision dans les organisations, après influence ou stimulation de leurs indicateurs sensibles.

Les deux premières boucles modélisent les décisions des systèmes de production face à différentes exigences commerciales et aux variations de la qualité du service client.

Les exigences des marchés peuvent agir sur le plan de production et la capacité productive et peuvent même remettre en cause l'organisation

physique des ateliers par des actions ponctuelles ou une remise en cause totale (boucles BC1) [1].

En cas de mauvaises livraisons en quantité, qualité et délai, les systèmes agissent rapidement en augmentant leurs contrôles ou en modifiant les planning ou essaient de mettre en cause à leur méthode de travail et la motivation de leurs personnels (BC2).

Les deux boucles BC3 et BC4 modélisent les décisions en cas de baisse de la productivité et de détection d'arrêts de travail.

Des arrêts ou des baisses de productivité exigent fréquemment des reprises par une augmentation de la capacité de production ou progressivement par

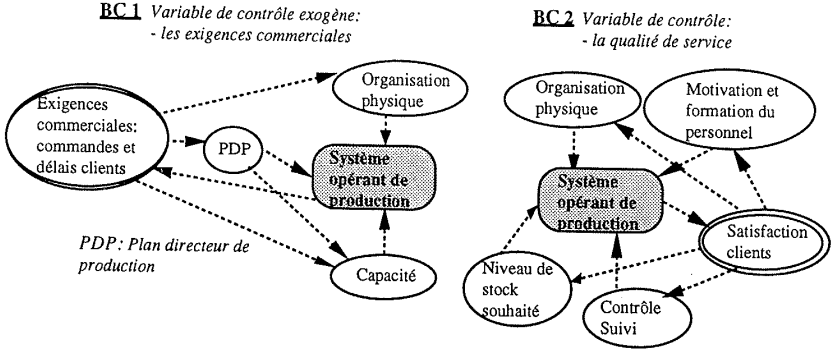


Figure 5.1. *Boucles BC1 et BC2.*

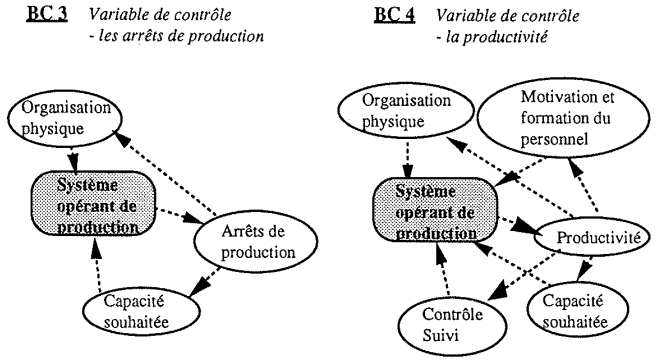


Figure 5.2. *Boucles BC3 et BC4.*

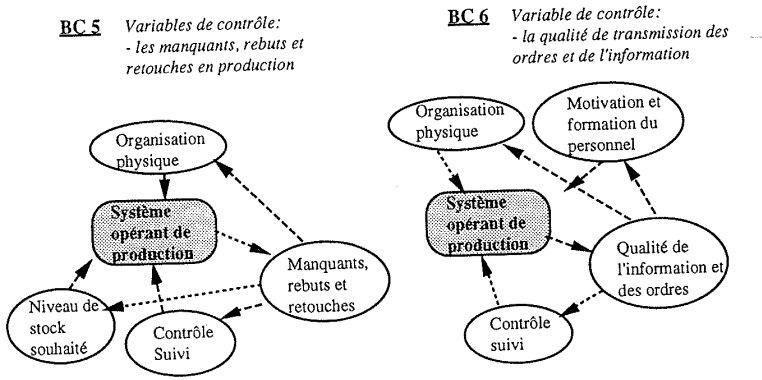


Figure 5.3. *Boucles BC5 et BC6.*

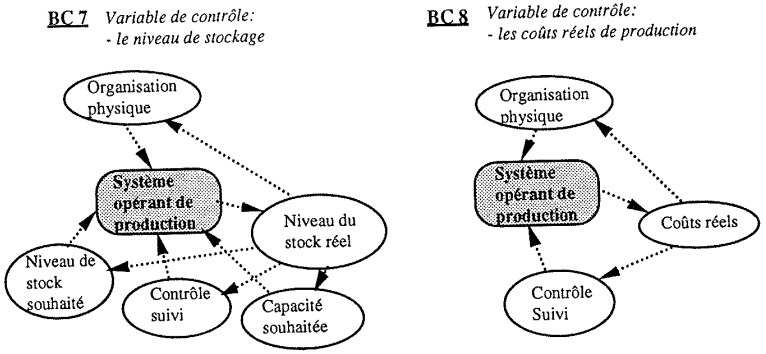


Figure 5.4. *Boucles BC7 et BC8.*

Figure 5. *Huit types de boucles élémentaires de feedback dans les systèmes de production.*

des actions de formation du personnel ou une modification de la topologie des ateliers.

Beaucoup d'entreprises intensifient leurs contrôles en cas de baisse de productivité.

Les boucles BC5 et BC6 représentent le comportement des entreprises face à des problèmes de qualité et de dysfonctionnements internes liés à l'augmentation des manquants et la mauvaise circulation des informations et des ordres.

Les systèmes augmentent leur contrôle interne ou agissent sur l'organisation de leur système opérant.

Des actions éventuelles sur la politique de lancement et sur le niveau de stock ont également été observés (BC5).

La formation du personnel permet d'améliorer la transmission de l'information en introduisant de nouvelles technologies efficientes.

En cas de variation significative du niveau de stock par rapport à un objectif budgétisé, les entreprises intensifient leur contrôle de gestion ou remettent globalement en cause leur logique de planification (BC7).

Pour la dernière boucle BC8, en cas de variation des coûts réels de production par rapport à un coût budgété, il a été observé dans l'enquête préalable, que le système de production s'autorégulait par une augmentation du contrôle et du suivi de production à court terme, ou encore par une remise en cause de l'organisation physique des ateliers et de l'organisation des flux.

Variables d'action agissant sur le sous-système opérant

La réorganisation physique du système opérant améliore les délais de production. Elle agit également sur la réactique globale de ce système.

Le plan de production PDP des boucles de type BC1, BC2, BC3 et BC4 indique les dates prévisionnelles de début et de fin des ordres et la capacité de production des différents postes.

La motivation agit sur l'efficience et la productivité de la production. La formation professionnelle du personnel améliore la flexibilité par une augmentation de la polyvalence. Ces éléments sont présents dans BC2, BC3, BC4 et BC6.

Le contrôle et le suivi de production activent la fluidité de la production et réduisent les délais (dans BC1, BC4, BC5, BC6, BC7 et BC8).

Le niveau de stock désiré dans la boucle BC5 permet de définir une politique de lancement en fixant la taille des séries de production.

Vingt-sept modèles seront élaborés à partir de ces schémas et seront spécifiques à chaque type de systèmes de production pour un horizon décisionnel donné.

Méthodes de contrôle dans les systèmes

Pour les différents horizons de décision, il s'agit de décrire de façon spécifique, les boucles cybernétiques des figures 5 qui assurent la régulation

dans les neuf classes de systèmes de production. Ces choix sont effectués à partir des comportements observés dans l'enquête préalable.

Rappelons les principaux mécanismes de contrôle dans les systèmes. Le contrôle par *feed forward* qui permet de réguler un système par une action par l'aval, par exemple en réajustant l'effectif de production à partir de ventes réalisées. Ce mode de contrôle est souvent utilisé dans les cas où la variable qui perturbe le système est exogène et qu'il est donc impossible d'agir sur elle de l'intérieur du système. On essaie alors d'anticiper la variable à contrôler pour l'adapter aux changements subis en amont et par encore transmis jusqu'à elle. Le contrôle dynamique et le contrôle intégral par *feedback* permettent de renvoyer l'information en direction des variables de contrôle qui influent directement sur la variable contrôlée, origine et cause de la modification. Le contrôle dynamique régule le système en se basant sur l'écart constaté entre une valeur de référence et la valeur mesurée de façon continue. Le contrôle intégral se base sur le cumul de ces écarts observés dans le passé.

Rappelons également quelques caractéristiques des boucles de *feedback* qui sont leur polarité et leur ordre d'intégration.

Un contrôle par *feedback* positif conduit à écarter en permanence une variable d'une valeur de référence alors qu'un contrôle par un boucle négative permet de ramener perpétuellement cette variable vers une valeur de référence.

Le nombre d'intégrations dans une boucle détermine son ordre par le nombre de niveaux qui y figurent, ce qui permet déjà de prévoir des types de comportements possibles.

On peut constater dans le tableau 1 que les boucles fermées de nos macro-modèles sont toutes des boucles homéostatiques de polarité négative. Ces boucles de *feedback* ont un gain négatif et sont autorégulatrices. Leur ordre sera précisé par la suite en fonction des niveaux des sous-systèmes opérants retenus.

Tableau 1. *Caractéristiques des boucles de feedback.*

	Codes des boucles (voir figures 5)							
	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5	BC6	BC7	BC8
Nombres de boucles	4	4	3	4	3	3	2	2
Méthode de contrôle	Contrôle dynamique	Contrôle par feed-forward	Contrôle dynamique	Contrôle dynamique	Contrôle dynamique	Contrôle intégral	Contrôle intégral	Contrôle dynamique
Polarité	–	–	–	–	–	–	–	–

II.3. Sous-système opérant

Pour chaque type de système de production, un modèle simplifiée du système physique opérant sera retenu. Ces modèles seront représentatifs de la dimension « complexité » des systèmes réels.

Les caractéristiques des différentes classes de production sont résumées dans le tableau suivant (tableau 2).

Tableau 2. *Caractéristiques courantes des différentes classes de systèmes de production.*

	Classes des systèmes de production								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Système									
Système d'assemblage	X	X	X	X	X	X			
Système de fabrication							X	X	X
Complexité									
Produits complexes	X	X	X						
Produits simples				X	X	X			
Taille des séries									
Séries unitaires	X			X					
Petites séries		X			X				
Petites et moyennes							X	X	
Moyennes et grandes									X
Grandes séries			X						
Très grandes séries						X			
Organisation									
Autour du produit	X								
En sections							X	X	
En lignes		X	X		X	X			X
Anarchique				X					

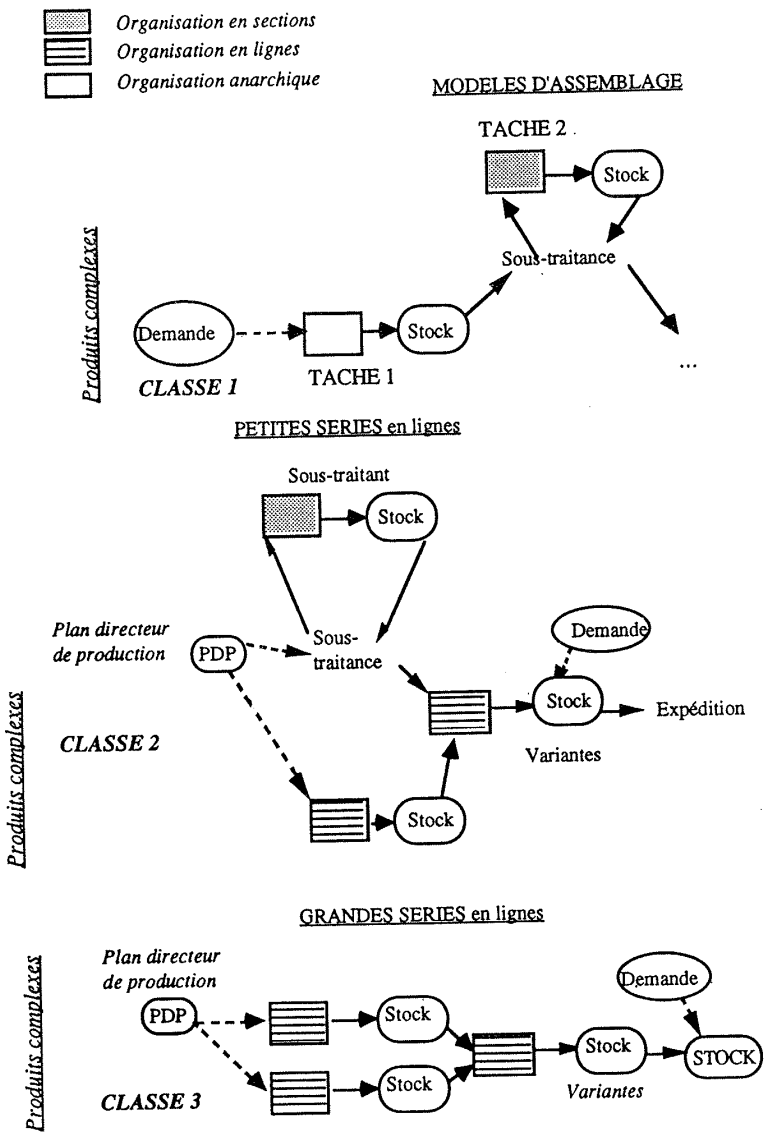
Modèles des systèmes physiques opérants

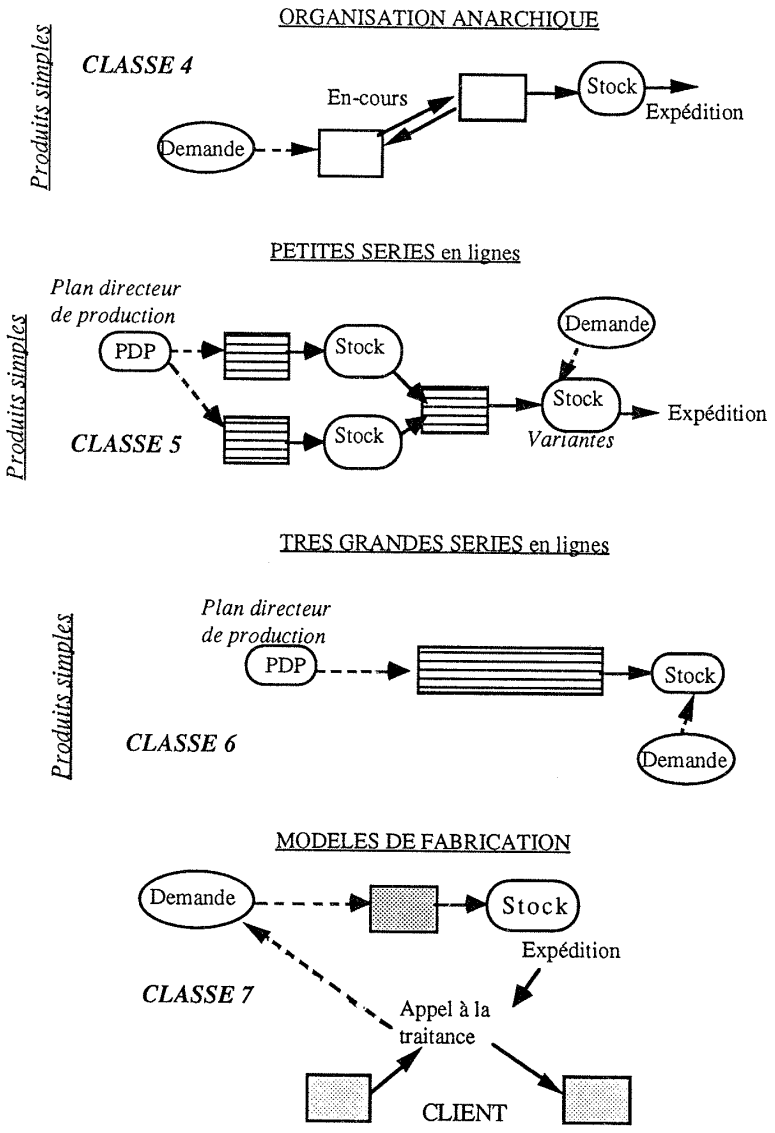
Un premier choix dans la modélisation des systèmes opérants est effectué en prenant des modèles relativement simples au départ. Ces modèles symbolisant les systèmes opérants des différentes classes de production sont représentés dans la figure 6. Ils sont élaborés à partir de structures élémentaires de base.

Les classes 1, 2 et 3 représentent les systèmes comportant des produits complexes à plusieurs niveaux de nomenclatures et à délais de production très longs.

La classe 1 comme les classes 4 et 7 produisent sur commande et les classes 3, 6 et 9 livrent les clients à partir de stocks.

Les classes intermédiaires 2, 4 et 8 anticipent la demande en constituant des stocks de produits semi-finis qui seront par la suite assemblés à la commande.


Organisation en sections
Organisation en lignes
Organisation anarchique
MODELES D'ASSEMBLAGE
TACHE 2
Stock
Sous-traitance
Produits complexes
Demande
Stock
CLASSE 1
TACHE 1
...
PETITES SERIES en lignes
Sous-traitant
Stock
Plan directeur de production
PDP
Sous-traitance
Demande
Stock
Expédition
CLASSE 2
Variantes
Stock
Produits complexes
GRANDES SERIES en lignes
Plan directeur de production
PDP
Stock
Stock
Demande
Stock
STOCK
CLASSE 3
Variantes
Produits complexes


ORGANISATION ANARCHIQUE
Produits simples
CLASSE 4
En-cours
Stock
Expédition
Demande
PETITES SERIES en lignes
Plan directeur de production
Produits simples
PDP
Stock
Demande
Stock
Stock
Expédition
CLASSE 5
Stock
Variantes
TRES GRANDES SERIES en lignes
Plan directeur de production
Produits simples
PDP
Stock
CLASSE 6
Demande
MODELES DE FABRICATION
Demande
Stock
Expédition
CLASSE 7
Appel à la traitance
CLIENT

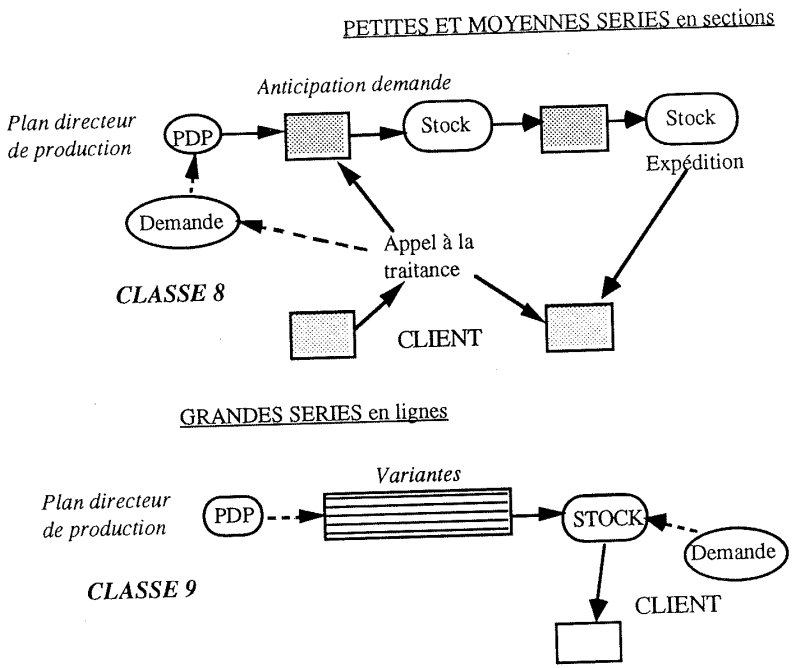


Figure 6. Modèles court terme des différents systèmes opérants

Les systèmes d'assemblages que sont les six premières classes se différencient par la complexité des produits et la durée des cycles.

Les classes 7, 8 et 9 représentent les industries de fabrication qui peuvent intervenir dans les systèmes d'assemblage précédents.

Le tableau 2 précédent présentait de façon synthétique le type d'organisation de la production des différentes classes. La légende de la figure 6 permet de les identifier dans chacune des classes.

Ces modèles génériques ont été élaborés en combinant ces différents éléments de base.

II.4. Hypothèses sur les délais

Dans nos macro-modèles de production, nous avons distingué trois types de délais :

a. Les délais opérationnels « courants » observés dans l'écoulement des flux physiques de production.

b. Les délais de perception et de prise d'informations dans les variables de contrôle qui assurent le pilotage du système opérant.

c. Les délais de réactivité de l'organisation industrielle correspondant aux durées de « réajustement » de l'activité suite à des perturbations internes ou externes (voir *fig.* 7).

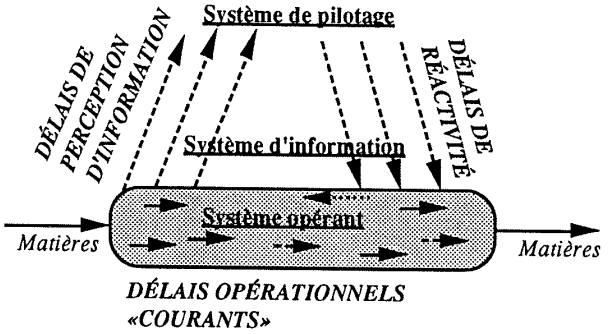


Figure 7. Trois types de délais dans les systèmes de production.

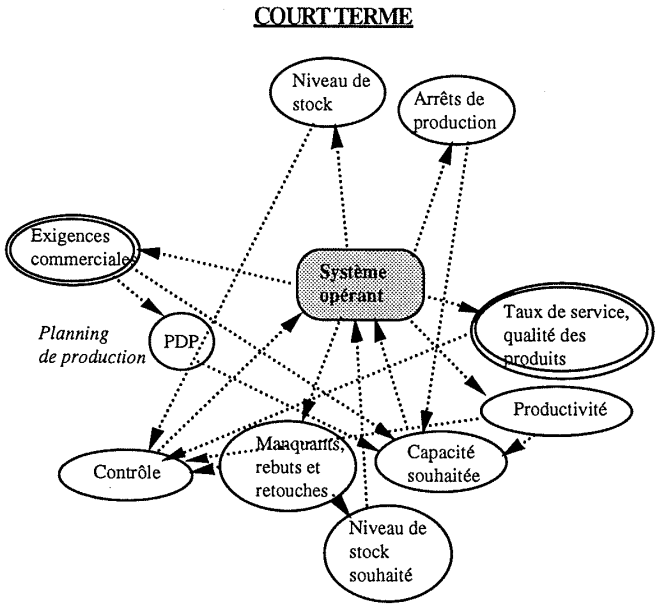


Figure 8.1. Macro-modèle de pilotage du système de production.

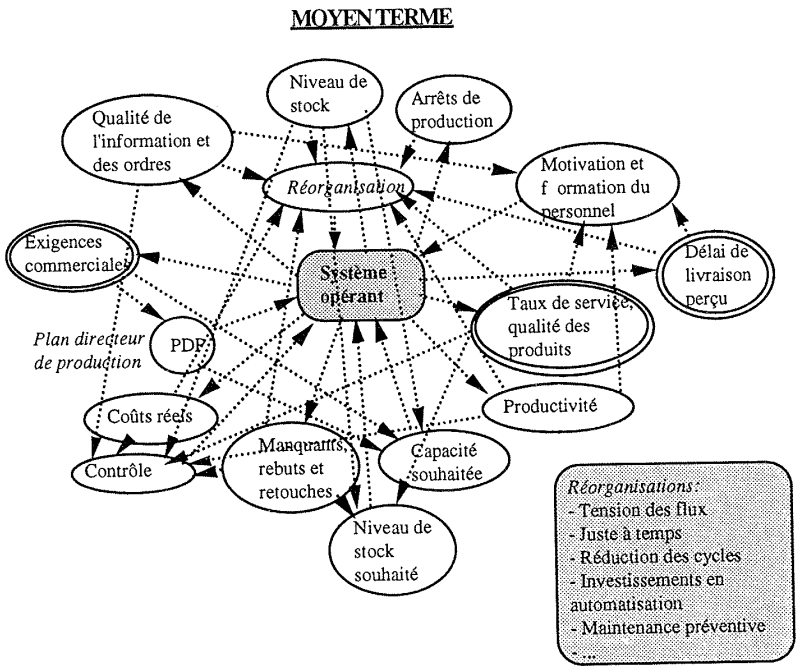


Figure 8.2. *Macro-modèle de pilotage du système de production.*

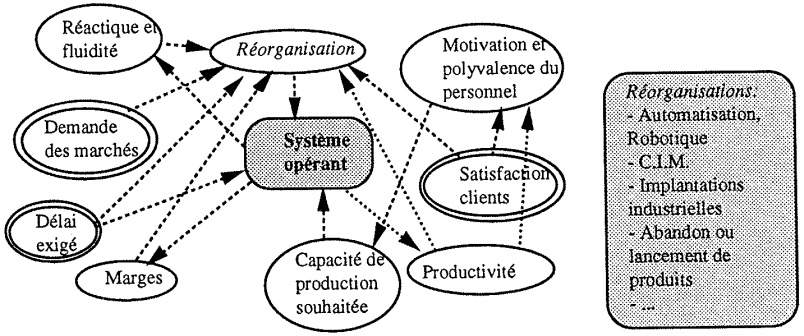


Figure 8.3. *Macro-modèle de pilotage du système de production.*

II.5. Modèles génériques

Les figures 8-1, 8-2 et 8-3 représentent les modèles génériques des systèmes de production. Ces modèles sont issus des boucles précédentes et rapportés aux décisions de production spécifiques aux court, moyen et long termes.

On y observe les variables essentielles de contrôle des systèmes opérants et les variables intermédiaires d'action dans ces systèmes.

III. RÉSULTATS DE SIMULATION

Analyse des résultats des classes 1 et 4

Test individuel boucle par boucle de la classe 1 à court terme

Nous avons testé une par une les différentes boucles pour en étudier séparément leur sensibilité individuelle et pour valider progressivement le modèle. Cette analyse sera effectuée une seule fois, la dynamique d'un système complexe non-linéaire n'étant pas nécessairement dépendante de

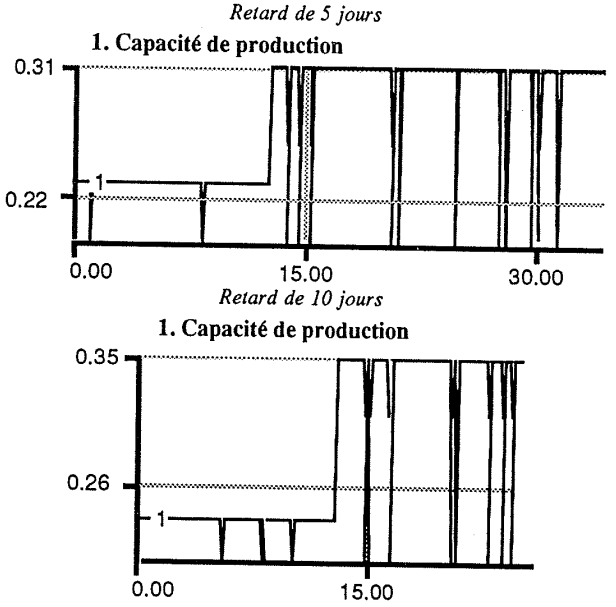


Figure 9. *Boucle BC2 - Influence du nombre de jours de retard sur la capacité.*

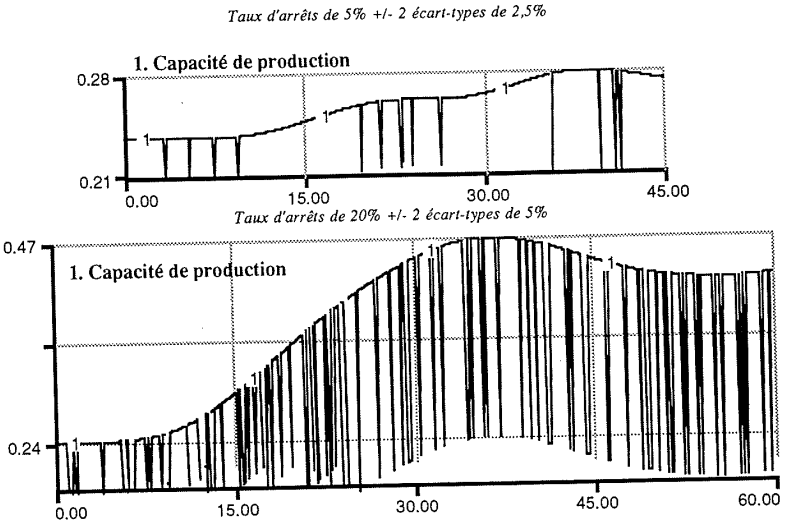


Figure 10. *Boucle BC3 - Influence des arrêts de production sur la capacité.*

la dynamique individuelle des boucles. L'investigation à court terme s'est effectuée sur 60 jours ouvrables soient trois mois environ. La boucle BC2 testée individuellement contrôle la date de fin de la première tâche à réaliser. En fonction du nombre de jours de retard, elle augmente la capacité de la tâche aval. Les figures 9 montrent les courbes de variation de cette capacité pour cinq et dix jours de retard de la tâche antérieure. Dans les deux cas, le modèle arrive à rattraper le retard qui a été pris.

La boucle BC3 agit sur les capacités de production en cas d'arrêts de travail fréquents. Pour des taux de 5 % et 20 %, le modèle a été capable de réguler la capacité pour rattraper la totalité du retard prévisible (voir *fig.* 10). La durée d'ajustement de la capacité devant ces aléas dépend du coefficient de lissage

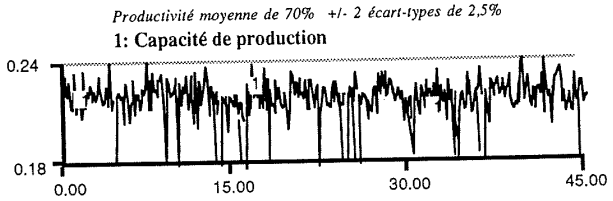


Figure 11.1. *Boucle BC4a - Influence de la productivité sur la capacité.*

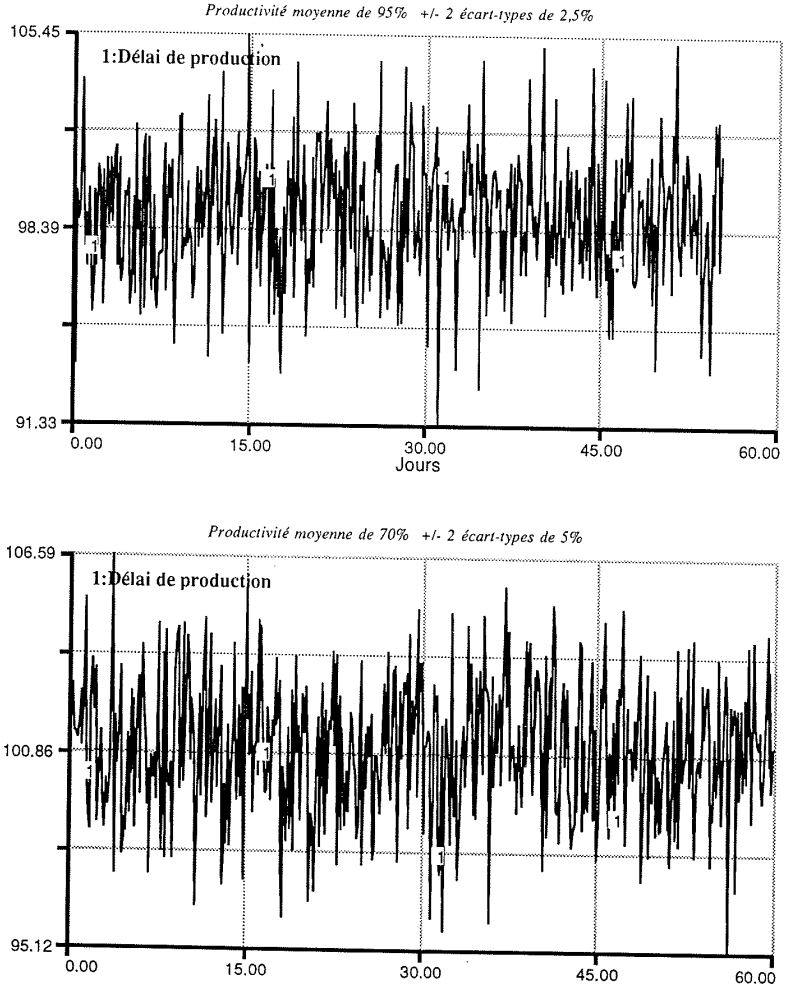


Figure 11.2. *Boucle BC4b - Influence de la productivité sur les délais.*

choisi. Le modèle a donc prouvé son efficacité. Sans cette boucle de contrôle et pour un taux d'arrêt de 20 %, le retard de la tâche 2 aurait été de trois jours.

La boucle BC4a agit sur la capacité de production en cas de baisse de productivité. La productivité nominale ayant été fixée à 95 %, un passage à 70 % est trop significatif pour que la boucle puisse agir efficacement (voir

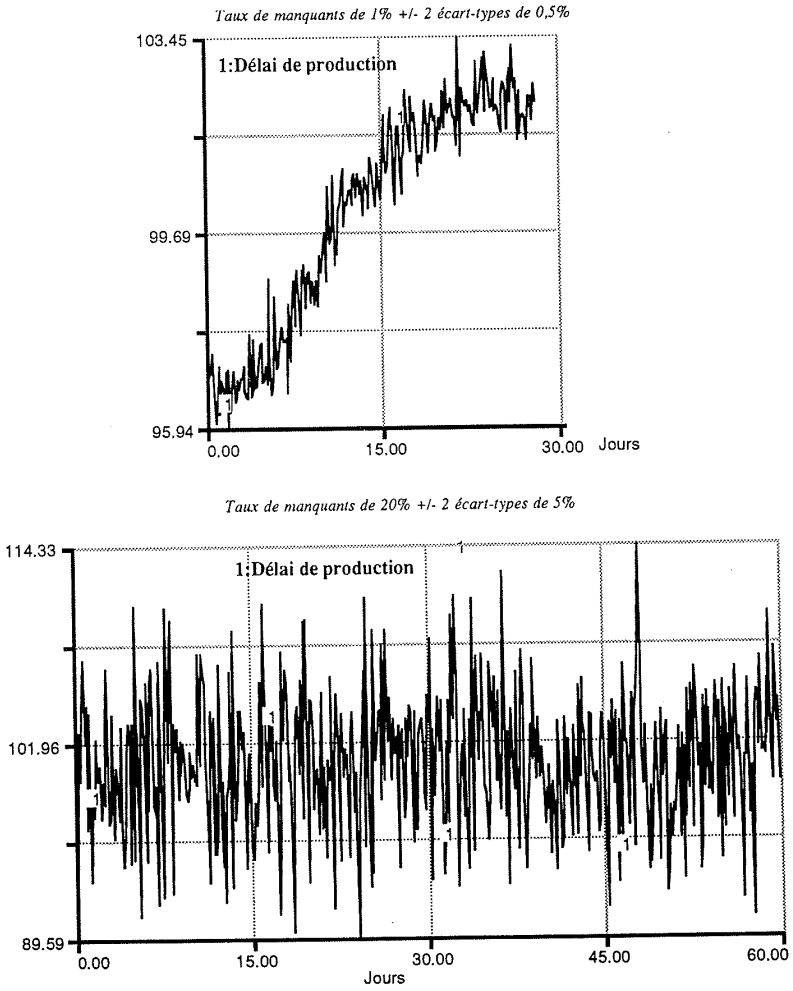


Figure 12. *Boucle BC5 - Influence des manquants, rebuts et retouches sur les délais.*

fig. 11-1). En effet, la tâche 1 prend quatre jours de retard et la tâche 2, huit jours. En baissant le coefficient de lissage de 10 à 2, le retard augmente et passe à 10 jours pour la tâche 2. Cette boucle n'est donc pas assez efficace devant des baisses de productivité importantes.

Elle constitue ainsi un « chaînon » sensible dans ce type de systèmes de production.

La deuxième boucle BC4-b agit sur les délais de production (voir *fig*. 11-2). Comme la boucle BC4-a, elle manque également d'efficacité et conduit à des

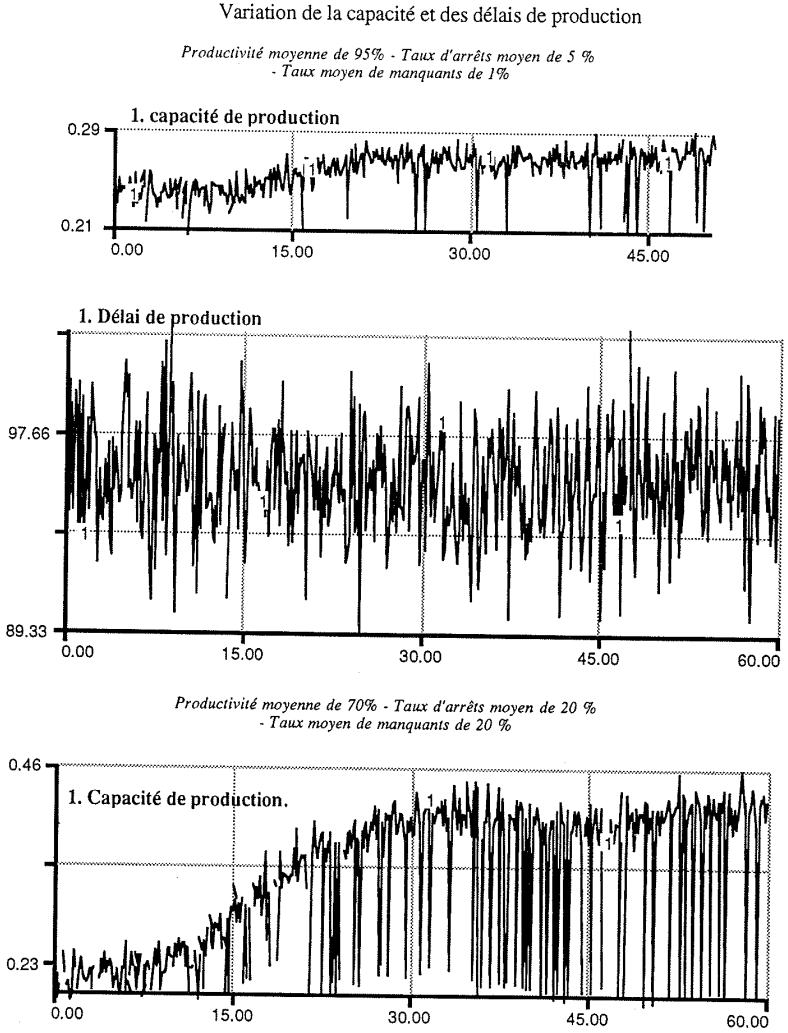


Figure 13. *Classe 1 Modèle complet à Court Terme.*

retards de cinq jours pour la tâche 1 et de 9,5 jours pour la tâche 2. Ces boucles BC4 en activité sont toutefois utiles, puisque la même simulation sans régulation entraîne un retard du projet de 17 jours.

La boucle BC5 réduit les délais de production en cas d'augmentation du taux de manquants, de rebuts et de retouches. Cette boucle en activité a permis de rattraper le retard prévisionnel. Les courbes de la figure 12 montrent une stabilisation du modèle vers un délai « optimal » correspondant au respect des délais du projet.

Les réponses du modèle complet avec un système opérant simplifié sont représentées en figure 13. Toutes les boucles sont activées simultanément et agissent sur les deux variables de commande, les capacités productives et les délais. Les premières courbes montrent le comportement global de ce modèle pour une productivité fluctuant autour de 95 %, un taux de manquants moyen de 1 % et un taux d'arrêts moyen de 5 %. La capacité de production augmente progressivement de façon ondulatoire. Les délais oscillent également et croissent lentement ce qui explique l'inefficacité du modèle en présence de variables aléatoires pénalisant les délais. Cette observation confirme d'ailleurs les hypothèses concernant le manque de réactivité des systèmes à court terme.

On constate néanmoins que le modèle ne prend aucun retard même en cas de productivité moyenne de 70 %, de taux moyen de manquants de 20 % et de taux d'arrêts moyen de 20 %. Sans les différentes boucles de régulation et avec ces mêmes paramètres, le projet serait pénalisé de 34 jours de retard.

IV. CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés aux modèles non-linéaires et aux décisions complexes non-programmables, structurées et hybrides (au sens de H. A. Simon [SIMON 60]). Des macro-modèles de simulation ont été élaborés pour chaque classe de systèmes de production, en prenant en compte l'horizon temporel des décisions. Une enquête préalable et des travaux de simulation ont été menés dans différentes entreprises, pour valider ces modèles par induction et pour les généraliser.

Ces travaux permettront de créer une base de connaissance sur les comportements types des systèmes industriels de production. Cette base pourra ainsi permettre aux praxéologues de ces systèmes de faciliter leurs investigations. Elle sera également normative et pourra être intégrée dans des systèmes experts de diagnostic de comportement des entreprises industrielles de production.

Annexe

Les classes de systèmes de production (d'après [KIEFFER 86])

• Les systèmes d'assemblage de produits complexes

Classe 1 : entreprises d'ingénierie élaborant sur commande des installations industrielles. Il s'agit d'entreprises produisant de très gros équipements comme des navires, avions ou systèmes automatisés de production.

Classe 2 : entreprises d'assemblage de matériels destinés à l'équipement industriel qui pourraient regrouper les fabriquants de machines-outils, de matériel agricole ou de matériel de manutention.

Classe 3 : entreprises de production de biens complexes tels que les biens d'équipements par exemple, les automobiles, les matériels électriques ou les appareils ménagers.

• Les systèmes d'assemblage de produits simples

Classe 4 : entreprises « pseudo-artisanales » réalisant des travaux sur-mesure, de petites installations sur mesure, outillages ou autres.

Classe 5 : entreprises d'assemblage de produits simples tels que les meubles, les outillages ou la charpente métallique.

Classe 6 : entreprises d'assemblage final dans une filière de transformation (bois, textile, parachimie, pharmacie...) correspondant à de petits matériels tels que le vêtements, chaussures ou d'autres articles de grande consommation.

• Les systèmes de fabrication

Classe 7 : entreprises de sous-traitance d'opérations d'usinage, de traitement thermique, de circuits imprimés, ...

Classe 8 : entreprises proches de la classe 7, comprenant des entreprises de sous-traitance mais également des ateliers spécialisés de grands groupes industriels. Elles façonnent souvent des pièces pour les besoins de systèmes de types 1, 2 ou 3 ou après une élaboration par des systèmes de classe 9.

Classe 9 : ateliers spécialisés de grands groupes industriels fabriquant sur programme des composants « standard » pour les besoins de la classe 3 ou encore des sociétés produisant des produits semi-ouvrés qui subiront un parachèvement dans la classe 8.

Notes et Références

1. On pourra remarquer des boucles ouvertes.

R. N. ANTONY, *Planning and Control Systems. A framework for Analysis*, Harvard University, Boston, 1965.

J. W. FORRESTER, *Industrial Dynamics*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 6e édition, 1969.

BOURDET, KIEFFER, LE ROY, LESAGE, TIMON, *Prise en compte de l'existant dans la conception de la conduite des systèmes intégrés de production*. IIIe Congrès de Génie Industriel, Tours le 20-21-22 mars 1991.

J. P. KIEFFER, *Les systèmes de production, leur conception et leur exploitation*, Thèse d'État, Université Aix-Marseille 3, 1986.

J. MELESE, *La gestion par les systèmes - Essai de praxéologie*, Éditions Hommes et Techniques, 1980.

J. L. LE MOIGNE, *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France, 1977.

Revue Française de Gestion Industrielle, n° 1, 1989, p. 6 à 13, Paris, Dunod, 1989.

H. A. SIMON, *The new science of management decisions*, Evanston, Harper and Row, New York, Publishers, 1960.

D. THIEL, *Management industriel, une approche par la simulation*, Economica, 1993.

B. WALLISER, *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Éditions du Seuil, 1977.

REVUE INTERNATIONALE DE SYSTÉMIQUE
Vol. 7, N° 2, 1993, pp. 143 à 182

LES DYNAMIQUES DE LA MOTIVATION

MODERE : un modèle de la motivation, son application aux politiques de rémunération

Gérard DONNADIEU[1] et Michel KARSKY[2]

Résumé

Le modèle MODERE, présenté et illustré dans ce document, constitue à ce jour une des rares tentatives pour simuler, par un modèle mathématique exploitable sur ordinateur, le processus complexe de la motivation humaine. Ses fondements conceptuels reposent sur l'articulation de plusieurs théories du comportement issues des sciences humaines et sociales ainsi que de la neurologie. Le formalisme mathématique utilisé est celui, classique, de la dynamique des systèmes.

Une illustration des possibilités du modèle est donnée au travers d'une application particulièrement intéressante pour l'entreprise : le choix d'une politique de rémunération. Trois situations d'entreprise sont ainsi analysées, relativement à plusieurs types de comportement. La simulation retrouve bien, dans l'ensemble, le jugement empirique de l'expert.

Pour acquérir une crédibilité plus grande MODERE devrait naturellement être validé sur un plus grand nombre de simulations.

Abstract

MODERE, the model described in the present paper, is one of the very few existing models which can be used in a practical way to simulate the complex process of human motivation. Conceptually it is based on a combination of several theories of behavior coming from social sciences as well as neurology. The mathematical approach is that of System Dynamics.

A practical application of the model shown here, which is of particular interest for business : the choice of the type of salary policy. Three types

1. Directeur d'Etudes à Entreprise & Personnel, 48, route de la Reine, 92100 Boulogne. Maître de conférences associé à l'IAE, Université Paris-Sorbonne.
2. Directeur Général de KBS, 340, rue Saint-Jacques, 75005 Paris.

Rev. intern. systémique. 0980-1472 Vol. 7/93/02/ 143 /40/$ 6.00/© Afcet Gauthier-Villars