Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production

Daniel Thiel

▶ **To cite this version:**

Daniel Thiel. Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production : Conception de modèles génériques et simulation continue. Automatique. Université Paul Cézanne (Aix Marseille III), 1993. Français. NNT : . tel-02162739

HAL Id: tel-02162739
https://hal.science/tel-02162739

Submitted on 22 Jun 2019

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.

UNIVERSITE DE DROIT, D'ECONOMIE ET DES SCIENCES D'AIX-MARSEILLE III

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE SAINT-JEROME

THESE

présentée par

Daniel THIEL

Ingénieur ECL

pour obtenir le grade de **Docteur en Sciences**

Spécialité: Automatique et Informatique

VERS UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE PRODUCTION / TOWARDS A BETTER UNDERSTANDING OF THE PRODUCTION SYSTEM BEHAVIORS

Conception de modèles génériques et simulation continue / Development of generic models and continuous simulations

Soutenue le 8 septembre 1993 devant la commission d'examen :

MM.	JC.	BERTRAND	Université d'Aix Marseille III
	JP.	KIEFFER	Université d'Aix Marseille III (directeur)
	J.A.D.	MACHUCA	Université de Séville (rapporteur)
	P.	DEJAX	Ecole Centrale Paris (rapporteur)
	R.	SOENEN	Université de Valenciennes
	M.	KARSKY	Société KBS

RESUME

Cette thèse a consisté à mieux comprendre les mécanismes de régulation des entreprises industrielles, face à des dysfonctionnements de leur système productif.

En nous positionnant dans le référentiel théorique de la dynamique des systèmes de Jay W. FORRESTER, nous avons décrit des comportements non-linéaires à partir du concept des systèmes à structures de *feedback*.

Des modèles génériques continus ont été conçus en identifiant plusieurs mécanismes cybernétiques couplés, associés à différentes classes de systèmes opérants. Les résultats de simulation ont contribué à améliorer la connaissance, non-intuitive à priori, des comportements de ces systèmes complexes, et ceci, dans des horizons temporels différents.

Enfin, nous précisons que cette recherche s'est particulièrement intéressée aux relations entre les multiples structures des systèmes de production et la dynamique de leurs comportements.

MOTS-CLES

Systèmes de production, complexité, dynamique des systèmes, modèles génériques, simulation continue.

ABSTRACT

This thesis consists of a better understanding of the regulation mechanisms of industrial companies, faced with dysfunctions of their production system.

According to Jay W. Forrester's systems dynamics theoretical framework, we describe non-linear behaviors from the system concept of feedback structures.

Continuous generic models are developed by identifying multiple-coupled cybernetic mechanisms, associated with different classes of operating systems. The simulation results can help to improve the a priori non-intuitive knowledge of these complex systems behaviors, and this, in different time horizons.

Finally, this research mainly focuses on the relations between the multiple production systems structures and their behavior dynamics.

KEYWORDS

Production system, complexity, system dynamics, generic models, continuous simulation.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Les figures sont numérotées par chapitre.

Fig. I.1. Démarche globale de la recherche 18

Fig. IV.1. Caractéristiques des modèles de production 36
Fig. IV.2. Modèles hiérarchiques dans une aciérie 37

Fig. V.1. Décisions dans les systèmes de production 48

Fig. VI.1. Typologie des décisions dans les systèmes de production 53

Fig. 1. (conclusion partie 2). Outils et méthodes d'approche des décisions dans les systèmes de production 56

Fig. VII.1. Schéma systémique du système de production 61
Fig. VII.2. Caractéristiques courantes des différentes classes de systèmes opérants 62
Fig. VII.3. Les indicateurs du système de production 63
Fig. VII.4. Huit types de boucles élémentaires de feedback dans les systèmes de production 66-68
Fig. VII.5. Trois types de délais dans les systèmes de production 70
Fig. VII.6. Macromodèles de pilotage du système de production 71-72
Fig. VII.7. Les vingt-sept modèles génériques 72
Fig. VII.8. Deux approches de la simulation 74

Fig. VIII.1. Modélisation du processus production-stock 79
Fig. VIII.2. Modèles court terme des différentes classes de systèmes opérants 81
Fig. VIII.3. Modèles des systèmes opérants à moyen terme 83
Fig. VIII.4. Diagramme causal à court terme 85
Fig. VIII.5. Diagramme causal à moyen terme 86-87
Fig. VIII.6. "Contrôle" des investissements à long terme 88
Fig. VIII.7. Diagramme causal à long terme 89

Fig. IX.1. Phase transitoire 96
Fig. IX.2. Procédure de validation des modèles 97
Fig. IX.3. Bases quantitatives pour la simulation à court terme 99
Fig. IX.4. Bases quantitatives pour la simulation à moyen terme 99
Fig. IX.5. Bases quantitatives pour la simulation à long terme 99
Fig. IX.6. Scénarios d'évolution des investissements 100
Fig. IX.7. Types de perturbations par classes 101

Fig. X.1. Scénario 3: Capacités(t) 106
Fig. X.2. Step négatif: Service(t) 107
Fig. X.3. Step négatif: Capacité(t) 107
Fig. X.4. Saisonnalité: Demande et capacité(t) 107
Fig. X.5. Saisonnalité: Délai(t) 107

Fig. X.6. Délai(t) 109
Fig. X.7. Efficacité des boucles par classe à moyen terme 115

Fig. XI.1. Scénarios 2 et 3: Indice et service(t) 122
Fig. XI.2. Scénarios 2 et 3: Stocks et investissements(t) 122
Fig. XI.3. Scénarios 2 et 3: Capacité et délai(t) 122
Fig. XI.4. Scénario 3: Capacitéet délai suite à une augmentation des ventes 123
Fig. XI.5. Scénario 3: Capacité(t) et délai(t) suite à une baisse des délais 123
Fig. XI.6. Scénario 1: Indice et service(t) 125
Fig. XI.7. Scénario 1: Capacité(t) 125
Fig. XI.8. Scénarios 2 et 3: Stocks et investissements(t) 126

Fig. XII.1. Aides à la décision à court terme 139
Fig. XII.2. Aides à la décision à moyen terme 140

Fig. XIII.1. Différents apports de la thèse 143
Fig. XIII.2. Principe d'une simulation à base de connaissances 153
Fig. XIII.3. Schéma fonctionnel de l'outil d'audit systémique 154

ANNEXES

Graph. A2.1. Etape 1. Projection des individus et des modalités des variables sur les axes 189
Graph. A2.2. Etape 2 191
Graph. A2.3. Etape 3a à court terme 192
Graph. A2.4. Etape 3b à moyen terme 193
Graph. A2.5. Etape 3c à long terme 194

Graph. A3a.1. Influence de la qualité de service sur le contrôle de production 195
Graph. A3a.2. Influence du contrôle de production sur les délais 195
Graph. A3a.3. Influence de la productivité sur le contrôle de production 195
Graph. A3a.4. Influence du taux de manquants sur le contrôle de production 196
Graph. A3a.5. Influence du niveau de stock sur les capacités de production 196
Graph. A3a.6. Influence de l'effort de motivation et de formation sur les rebuts et retouches 196
Fig. A3b.1. Valeurs des capacités, délais, tailles des séries et stocks désirés 197
Fig. A3b.2. Contrôles de la qualité de service par classe à court terme 198
Fig. A3b.3. Contrôles de la qualité de service par classe à moyen terme 198
Fig. A3b.4. Evolution des ventes et des délais à long terme 199

Fig. A4.1. Modèle générique court terme des classes 2 et 5 200
Fig. A4.2. Symboles des modèles de la dynamique des systèmes 210
Fig. A4.3. Principe de calcul DYNAMO 210
Fig. A4.4. Délai exponentiel d'ordre 3 212
Fig. A4.5. Délai discret ou pipeline 212
Fig. A4.6. Principe du lissage exponentiel d'ordre 3 213

PREMIERE PARTIE

Le cadre théorique de référence

INTRODUCTION

Les systèmes de production industriels sont complexes et leurs décisions se prennent dans un environnement incertain.

Cette partie décrit plusieurs typologies de systèmes industriels en mettant en évidence la variété des mécanismes assurant leur pilotage.

Elle montre ensuite que la cybernétique et la théorie de systèmes contribuent par leur approche, à la réduction de la complexité de ces systèmes.

Par rapport à la problématique que nous avons décrite précédemment, nous présentons plus particulièrement les modèles continus de J.W. FORRESTER, qui contribueront à l'amélioration de la connaissance de la dynamique des systèmes de production.

Chapitre I

I. INTRODUCTION

L'évolution des marchés, de plus en plus exigeants en termes de délai, de prix, de variété et de qualité des produits, explique la mutation progressive des systèmes de production. L'évolution de leur organisation technique et sociale les fait basculer de l'industrie de masse vers une nouvelle forme «d'artisanat à taille industrielle». Mais cette transformation entraînant une réduction des stocks et misant sur la flexibilité instantanée à tout prix, rend les entreprises plus vulnérables face à des aléas internes et externes. En effet, la demande commerciale fluctuante et les dysfonctionnements internes perturbant les systèmes de production industriels, nécessitent des mécanismes de régulation efficaces. De multiples contrôles se sont mis progressivement en place pour répondre en «quasi-temps réel» à ces sollicitations.

En s'appuyant sur les concepts de la cybernétique, cette thèse s'intéresse aux mécanismes de régulation assurant la stabilité de ces systèmes. Nous utiliserons la simulation comme moyen d'exploration et de compréhension des phénomènes organisationnels générés dans ces situations.

1. ORIENTATIONS DE LA THESE

Nos connaissances actuelles du fonctionnement des systèmes de production sont souvent empiriques. Nos expériences professionnelles complétées par une enquête intensive, nous ont permis d'identifier deux modes principaux de fonctionnement :
- un mode que nous avons qualifié de «procédural», faisant appel à une logique formelle sur des bases déterministes,
- un mode «expert» plus qualitatif, faisant souvent appel à des règles habituelles du métier, acquises par un «apprentissage organisationnel».

Dans la réalité, certaines décisions «faciles» à prendre[1], semblent indispensables au contrôle en temps réel de l'activité de production. Nous avons constaté qu'à court terme, pour améliorer leur réactivité, les entreprises industrielles maîtrisaient rapidement des problèmes simples ou plus souvent, des problèmes simplifiés par réduction du niveau de leur complexité. Cependant, dans le cadre d'une vision plus globale, il existe des problèmes réellement complexes qui ne sont pas résolus. Par exemple dans certaines sociétés, comment expliquer et supprimer le nécessaire maintien d'un stock important, seul garant d'un service client correct ? Les responsabilités d'une telle anomalie sont diverses et peuvent aussi bien être imputées à l'outil de production peu flexible et sujet à de nombreux aléas, qu'à la mauvaise qualité de transmission des informations et des ordres. Cette thèse a consisté à identifier les principaux mécanismes mis en oeuvre pour pallier à de tels dysfonctionnements.
Notre démarche a également tenté de rapprocher les multiples structures cinématiques que nous avons pu identifier, de la dynamique de certains comportements industriels

[1] décisions programmables au sens de H.A. SIMON [SIM 60].

et ce, indépendamment de l'activité de l'entreprise. Pour cela, nous avons créé des modèles génériques[2] représentant les différents types de systèmes de production : industries d'assemblage, de fabrication, fabriquant sur commande ou sur stock, ...
Il ne s'agissait donc pas d'une analyse d'un système de production particulier, mais d'une recherche de relations entre différentes structures industrielles et des comportements primitifs types.
Pour cette raison et dans le cadre qui nous préoccupe, les résultats numériques de simulation n'ont qu'une valeur relative de comparaison entre les modèles élaborés[3].

Rappelons que **cette thèse se positionne dans le référentiel théorique «continu» de la dynamique industrielle de J.W. FORRESTER.**

De ce fait, les approches par événements discrets, également fort utilisées dans le domaine de la production, ne feront pas l'objet de notre recherche. Selon J.W. FORRESTER [FOR 69], les modèles de la dynamique des systèmes sont essentiellement conçus pour représenter et prévoir les caractéristiques comportementales des systèmes et non pour prédire les états futurs. Il suggère initialement une vision continue des flux permettant d'étudier les structures fondamentales des systèmes avec la possibilité ensuite, d'affiner un modèle continu grâce à l'introduction de discontinuités dans les variations des variables.

2. PROBLEMATIQUE

Les systèmes de production décrits en termes de structures de *feedback* sont en général trop complexes pour être traités mathématiquement et leurs comportements dynamiques ne peuvent être représentés que par des modèles non linéaires.

Une méthode d'analyse efficace, tant au niveau de l'objectivité que de la pertinence, consisterait à observer en temps réel sur le terrain, les décisions prises dans ces systèmes et en analyser les conséquences. Comme le note également J-C. MOISDON [MOI 84], «on ne peut guère analyser le fonctionnement de l'organisation que lorsque celle-ci se met en mouvement, de même qu'un champ de force dévoile sa structure quand on peut observer les déplacements des objets qui y sont plongés». Mais la durée de cette approche est trop longue, ce qui explique l'utilisation plus courante de la simulation informatique. Un des problèmes majeur des modèles de simulation est celui de leur validation. Dans une telle démarche, il est conseillé de s'inspirer à priori de théories existantes pour bâtir un modèle qui se complète ou «s'ajuste» par une observation du terrain (cf. [WAL 77] pour qui il s'agit d'un processus circulaire pouvant débuter à n'importe quel stade). Cette méthode d'investigation sur les comportements présente actuellement une lacune car il n'existe pas de lois décrivant les problèmes particuliers rencontrés dans les industries, comme par exemple: réduire les délais de production suite à une baisse de la productivité, réorganiser la production pour augmenter la capacité suite à une croissance de la demande;... Seules des théories plus générales telles que la théorie des systèmes et quelques théories sur la décision peuvent faciliter la modélisation de systèmes complexes. Les méthodes de planification et d'ordonnancement beaucoup plus «riches» en théories, notamment

[2] Nous ne sommes pas intéressés à un «modèle particulier» (cf. axe d'instanciation de l'approche tri-dimensionnelle CIM-OSA [CIM 88]).
[3] comme le conseillait J.W. FORRESTER : «une grande précision des résultats est secondaire pour l'amélioration de la connaissance» [FOR 69].

grâce aux développements de la recherche opérationnelle et des systèmes experts, ne font pas l'objet de cette thèse.

Cette recherche se positionne donc sur un terrain pratiquement vierge[4]. Il s'agit en quelque sorte d'une première approche, ce qui explique les choix limités dans l'élaboration des modèles face à une combinatoire importante.

3. OBJECTIFS

Les objectifs généraux au départ de cette recherche ainsi que les hypothèses retenues, se précisent et se vérifient notamment à l'issue d'une enquête préalable.

Les objectifs de cette recherche sont les suivants:

• L'objectif cognitif de cette thèse consiste à mieux décrire la cinématique et la dynamique des systèmes de production, ainsi que le suggère R. THOM [THO 72] : «...tout modèle comporte à priori deux parties: une cinématique dont l'objet est de paramétrer les formes ou les états du processus considéré; une dynamique, dont l'objet est de décrire l'évolution temporelle entre ces formes...».

• Des comportements peuvent être prévus en simulant différentes perturbations internes et externes.

• Les renforcements ou les suppressions de mécanismes cybernétiques apportent une aide à l'ingénierie des systèmes de pilotage.

• Enfin, ces travaux veulent proposer une méthodologie de conception de modèles de simulation dans un objectif d'analyse comportementale des systèmes de production.

4. METHODOLOGIE

En se référant à LOCKE[5], l'approche méthodologique de notre recherche peut être qualifiée d'expérimentalo-inductive. Cette expérimentation en laboratoire se base sur une recherche empirique réalisée à partir d'observations sur le terrain. Par rapport aux objectifs d'investigation que nous nous sommes fixés, «des modèles hypothético-déductifs basés sur une vision implicite considérée comme "non scientifique", ne sauraient prendre en compte la dynamique des comportements» (cf. M. MARCHESNAY [MAR 69]).

[4] Notons cependant qu'à l'origine, les travaux du M.I.T. et de J.W. FORRESTER se positionnaient dans le domaine de la dynamique industrielle. Par la suite, de nombreux modèles ont été développés (voir exemples dans [ROB 84]). Les aspects traités sont par exemple, l'étude de la dynamique du système logistique global de production-distribution [FOR 58], [FEY 62], [CAR 64], [LYN 88]. D'autres travaux se sont intéressés exclusivement au problème de la gestion du personnel de production ([ROB 84] pp. 163-184), ou de l'influence de la recherche-développement, ou encore de l'aspect financier des coûts de stockage par exemple [SHI 68], etc.

[5] LOCKE, philosophe anglais (1632-1704), déclarait en 1690 dans un essai sur l'entendement humain [GRA 90], que «nos idées ne peuvent venir que de notre expérience du monde extérieur».

Nous avons structuré nos travaux à partir de points de vue méthodologiques divers dont les principaux sont référencés en bibliographie (voir en particulier [GRA 90] et [AKT 87]).

Les méthodes, approches et techniques de la recherche

En utilisant les concepts de O. AKTOUF [AKT 87], il est possible de caractériser les méthodes et techniques de cette recherche par leurs aspects empirique et clinique d'une part et par leurs approches inductive et expérimentale d'autre part.
A partir d'une enquête sur le terrain, la méthode s'attache ainsi à décrire et à classer de façon cohérente les phénomènes observés en production et leur interaction, pour en dégager des «liaisons» constituant un guide de la politique, c'est-à-dire de la mise en oeuvre de la décision. Notre enquête est exploitée qualitativement par analyse de contenu d'interviews et quantitativement par analyse multidimensionnelle des données. Notons que cette démarche est d'ailleurs inspirée de M. MARCHESNAY [MAR 85].
Conformément aux propositions méthodologiques préconisées par CYERT et MARCH, c'est ensuite la modélisation qui fournit un cadre de travail pour l'investigation empirique et en retour, l'investigation empirique peut être utilisée pour affiner le modèle. «Grâce à ce processus "d'assistance mutuelle", il est désormais possible de savoir à quel moment un nombre suffisant d'informations empiriques ont été rassemblées et si celles-ci sont d'une qualité adéquate» [CYE 70]; [COH 61].
A partir des observations initiales, des modèles génériques de comportement sont élaborés par induction. Les propositions de pilotage des systèmes de production découlent donc de l'étude de comportements réels (démarche inductive) ainsi que de travaux de simulation informatique en laboratoire (expérimentation).
L'approche dynamique du comportement des systèmes de production industriels à travers une vision cybernétique est à la base de l'analyse des chaînes de causalité dans ces systèmes.

Cette recherche est donc le fruit d'une synergie entre:
- une approche «automaticienne» et cybernétique des mécanismes de régulation des systèmes de production,
- et une utilisation de la simulation informatique comme moyen d'exploration et de validation de modèles représentatifs de leurs comportements.

Il s'agit d'une recherche basée sur une rationalité inductive, courante en sciences expérimentales. Le cadre de travail y est dynamique et des événements extérieurs imprévisibles, vont venir influencer la «trajectoire» [CUR 87]. Ceci est contraire aux méthodes de recherche opérationnelle, où la rationalité est parfaite et intègre l'ensemble des informations.

5. PLAN DE LA THESE

Ce mémoire expose une première partie théorique permettant de positionner nos travaux dans un champ de connaissances existant. Puis les chapitres suivants développent la démarche et les concepts de la modélisation des systèmes de production et décrivent des modèles génériques de comportement de ces derniers. Ces travaux découlent d'une enquête préalable qui a orienté cette modélisation systémique.

Enfin, la dernière partie synthétise les résultats obtenus dans un objectif cognitif et propose un ensemble de recherches appliquées.
Le plan suivant se base sur les travaux de J-P. Van GIGCH [GIG 85] sur la hiérarchie des «*inquiry systems*». Nous tentons de référencer les différentes parties de cette thèse par rapport aux quatre niveaux de logique qu'il a proposés: le niveau du réel perçu (I), le niveau inférieur (II), le niveau "objet" (III) et le métaniveau (IV).

PARTIE 1. Le cadre théorique de référence

En premier lieu sont exposées différentes typologies de systèmes industriels. Cette partie se situe au niveau III en proposant des modèles prescriptifs et au niveau IV en exposant des modèles epistémologiques existants. La théorie des systèmes est présentée comme une contribution à la réduction de la complexité et de l'incertitude dans ces systèmes. En fin de cette partie, différentes théories de la modélisation sont décrites et plus particulièrement les modèles continus de la dynamique des systèmes et les modèles à événements discrets.

PARTIE 2. Enquête et classification des décisions de production

L'enquête intensive s'intéresse aux mécanismes de décision de différents types d'entreprises face à des perturbations de leur système productif. Elle se complète par une analyse critique des approches actuelles et une classification des décisions dans les systèmes de production (niveau I définissant des modèles descriptifs à partir du réel perçu).

PARTIE 3. Conception de modèles génériques de production

Cette partie propose une méthode d'approche des systèmes de production par la modélisation systémique et la simulation. Des modèles génériques sont décrits à partir de leurs composantes structurelles découlant de la représentation de systèmes d'information et de décision ainsi que de systèmes opérants (niveau II de la science appliquée aboutissant à des modèles explicatifs).

PARTIE 4. Simulation de modèles génériques

Il s'agit de la phase expérimentale de mise en oeuvre et de simulation des modèles décrits précédemment. Une présentation détaillée des caractéristiques de modélisation et du plan d'expériences retenus y sont présentés. Les comportements des différents types de systèmes de production sont analysés à partir du résultat des simulations (niveau II).

PARTIE 5. Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production

Cette partie constitue une synthèse des résultats de simulations et de leurs apports cognitifs.

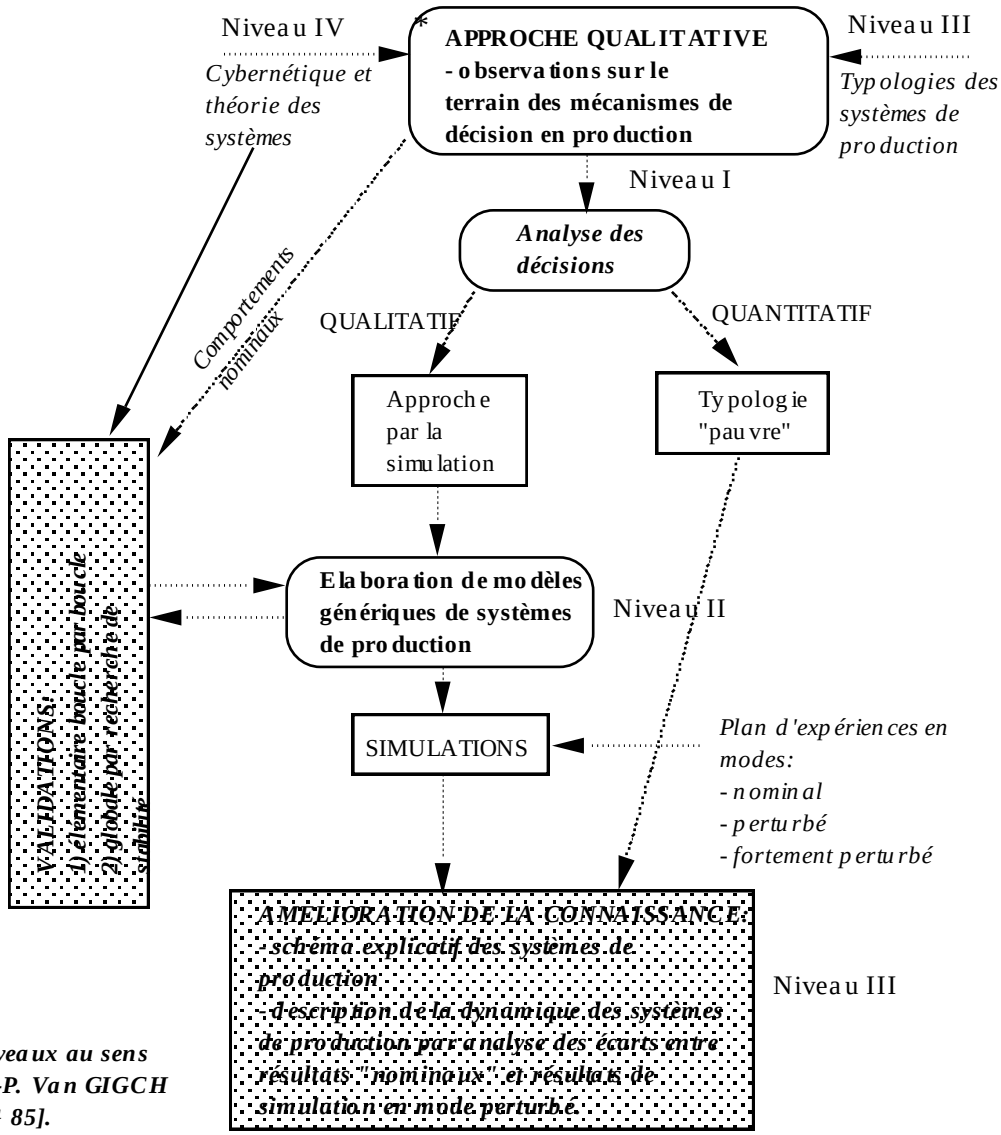
Leur analyse critique conduit:
1. A détecter des primitives de comportement des systèmes de production industriels,
2. à améliorer la conduite et le pilotage des systèmes de production en mettant en évidence des mécanismes sensibles, prééminents ou inefficaces,

3. à projeter ces résultats dans le but de poursuivre l'amélioration de la connaissance des comportements des systèmes de production industriels.

Cette dernière partie se situe probablement au niveau "objet" de la science pure dont l'objectif est de définir des modèles prescriptifs (niveau III).

La figure 1 présente une synthèse de la démarche suivie dans cette recherche. C'est à partir de l'approche qualitative des systèmes industriels que sont analysées et classifiées les décisions. Une première typologie "pauvre" établie à partir de l'analyse des données, se limite à une description «grossière» des comportements. Ceci nous conduit à développer des modèles de simulation élaborés à partir d'une analyse systémique des systèmes de production et de manière inductive d'après les résultats de l'enquête.

FIG 1 Démarche globale de la recherche



Ces modèles sont simulés et validés par deux méthodes:

- chaque boucle de régulation est testée individuellement,
- le modèle global doit assurer une stabilité et un équilibre en régime permanent (hypothèse de forte ergodicité du système).

Cette phase de validation s'appuie sur la cybernétique des systèmes à *feedback* et sur les comportements réels observés sur le terrain.

Le plan d'expériences s'établit également sur la base de trois scénarios:
- un mode de base dit «nominal» faiblement perturbé et correspondant à l'objectif de l'entreprise stabilisée établi sur des bases déterministes (par exemple le budget de production),
- deux modes moyennement et fortement perturbés (dans des limites réalistes) permettant d'observer plus finement les mécanismes mis en oeuvre par les entreprises face à des aléas internes et externes.

Cette recherche est cognitive mais également prévisionnelle et décisionnelle grâce à la simulation et même normative à partir de représentations «standardisées» à caractère générique de systèmes réels. Elle n'est pas de type intervention [AVE 85] car l'attitude vis-à-vis des structures organisées de production est contemplative et non transformative.

A l'issue de l'investigation théorique de cette recherche, nous avons rédigé un ouvrage décrivant l'approche conceptuelle des systèmes de production par la modélisation systémique et la simulation. Pour cette raison, la thèse développe essentiellement la phase expérimentale (et originale) de simulation de modèles génériques et de l'exploitation cognitive des résultats obtenus.

Nous utilisons fréquemment les vocables de théorie des systèmes et de systémique en les appliquant aux systèmes de production. Pour conclure, nous souhaitons caractériser nos travaux de modélisation dits «systémiques» par rapport aux neuf niveaux selon K. BOULDING [BOU 56][6], de perception de l'objet à modéliser. Dans ce cadre de référence, l'objet (le système de production) analysé dans cette thèse, se situe probablement au cinquième niveau puisqu'il décide de son activité à partir de «processeurs décisionnels agissant sur le processeur opérant» (selon les termes de J-L. LE MOIGNE [MOI 77]). D'après K. BOULDING, cet objet empirique se compose d'une «structure à dépendance génético-sociétale», dont l'équilibre peut être associé par une division du travail en son sein. Il s'en suit la nécessité d'assurer une coordination entre les différentes composantes du système.

Nous pensons donc que notre représentation «cybernétique» du système de production, dépasse le niveau 3 de l'objet à structure dite «thermostatique»

[6] ou neuf strates selon M. MESAROVIC.

CONCLUSION DE LA PARTIE

Nous avons présenté dans cette partie le cadre théorique de la thèse.

Nous avons tout d'abord analysé différents modèles descriptifs des systèmes de production.

A l'issue de cette étude, nous retenons trois caractéristiques essentielles de ces systèmes :
- la complexité des produits et des procédés,
- les incertitudes internes et externes,
- et la hiérarchie temporelle des décisions.

Puis nous notons que la dynamique des systèmes de J.W. FORRESTER, nous permet de mener une investigation en intégrant des aspects sociaux et économiques, présents dans les systèmes d'information et de décision des entreprises industrielles. Les modèles continus sont donc adaptés à notre problématique de recherche.

DEUXIEME PARTIE

Enquête et classification des décisions en production

INTRODUCTION

Toute démarche de modélisation en sciences expérimentales, nécessite de s'appuyer sur des analyses de terrain. Comme le conseille J.W FORRESTER, il faut cependant éviter une collecte extensive de données, sans avoir précisé initialement l'objectif du modèle à élaborer [FOR 69]. C'est donc à partir de la formalisation de la problématique, que sont orientées nos investigations correspondantes sur le terrain.

Cette partie développe les résultats d'une enquête sur les comportements des systèmes de production. L'objectif a plus particulièrement porté sur les mécanismes de régulation mis en jeu suite à différents déséquilibres causés par des variables internes ou externes à ces systèmes.
Une pré-enquête par interviews permet de classifier les décisions essentielles en production par niveaux au sens de R.N. ANTONY [ANT 65] et par méthodes au sens de H.A. SIMON [SIM 60].
L'analyse statistique des données de l'enquête aboutit à une typologie hiérarchisée des décisions.
Enfin, les principaux outils et techniques d'aide à la prise de décision sont répertoriés et analysés par rapport aux différents types de décisions établis.

Cette partie constitue une approche empirique des systèmes de production dans un objectif d'élaboration de modèles génériques.

Chapitre II

II. TYPOLOGIES DES SYSTEMES DE PRODUCTION

INTRODUCTION

On trouve dans la littérature de nombreuses descriptions d'un système de production. A.C. HAX et D. CANDEA dans [HAX 83], le décomposent en cinq parties: les moyens de production (usines, ateliers, machines,...), le réseau physique de distribution (dépôts, centres de distributions, moyens de transport,...), les produits à différents stades de la fabrication, le personnel de diverses compétences et un réseau de communication. Il s'agit d'une approche par fonctions ou fonctionalités du système de production.
Nous présentons ci-dessous différentes approches plus globales. J. MELESE dans [MEL 80], établit un modèle sur trois niveaux. Le premier niveau pilote l'ensemble à partir des variables essentielles du système physique. Le deuxième niveau appelé gestion, complète le modèle à partir d'informations extérieures et joue le rôle de contrôle au sens cybernétique. La gestion fixe les objectifs et transmet des directives sous forme de règles à l'exploitation. Le troisième niveau dit d'évolution, remet en question le niveau de gestion au vu des résultats, comparés à l'information extérieure.
Le système de production vu par l'automaticien, se décompose en une partie opérative et une partie commande qui intègre l'environnement, la coordination et l'asservissement [CET 82]. Cette notion a tendance aujourd'hui à s'élargir dans deux sens : horizontalement, en y intégrant plusieurs acteurs de l'entreprise et de son environnement externe, et verticalement, en partant du niveau de la commande de processus, pour aller jusqu'à la planification à moyen et à long terme.
Les évolutions actuelles visent l'intégration de ces différents concepts (cf. [AMM 88], projet CAM-I [CAM 88], projet CIM-OSA [CIM 88], [EDM 88]). Le projet CIM-OSA consiste à faciliter l'intégration grâce à des modèles situant les activités de production dans différentes dimensions. Cette approche permet d'effectuer des croisements entre différents facteurs du système de production, comme ses fonctions, ses informations, ses ressources et son organisation. Ce positionnement met en évidence les communications possibles entre activités.
Nous avons fréquemment constaté une hiérarchisation des systèmes de production. Par exemple, le projet ICAM [ICA 88] décompose les activités de production par fonction en les reliant à cinq niveaux physiques : l'usine, le centre, la cellule, la station et la machine. Le laboratoire GRAI a également mis au point une méthode hiérarchique d'analyse et de conception de systèmes de production. Elle s'appuie sur un formalisme de description des activités en fonction de leurs objectifs, de leurs variables et règles de décision.
En fait, de nombreux auteurs décomposent les systèmes de production en trois sous-systèmes : le système opérant, le système de pilotage et le système d'information (voir [ROB 88], [GRA 89], [IMP 89], [BOU 91], [GOU 91], [BES 91], [DIN 92], par exemple).

Nous avons retenu cette vision systémique hiérarchisée, car elle permet une approche globale de ces systèmes complexes que nous souhaitons modéliser[7].

Nous présentons dans ce chapitre trois typologies des systèmes industriels[8].
La typologie de J. WOODWARD s'intéresse plus particulièrement à la sociologie comme outil explicatif des phénomènes organisationnels. `
La typologie de J-P. KIEFFER et Y. GOUSTY explique les systèmes industriels en se fondant sur deux dimensions essentielles, la complexité et l'incertitude. Les systèmes ont des caractéristiques propres à ces deux dimensions et se décrivent par la structure des produits et des procédés et par le type de demande exogène.
La typologie de l'Association Française de Gestion Industrielle se situe à un niveau plus détaillé en décrivant essentiellement les types de flux dans les systèmes opérants.

1. TYPOLOGIE PROPOSEE PAR J. WOODWARD

Après une étude auprès de 92 entreprises anglaises, J. WOODWARD propose en 1965, une classification des entreprises industrielles suivant trois modes de production distincts, la production unitaire, la production de masse et la production en procédé continu (voir l'ouvrage de référence [WOO 65] ou [BOI 85], [WOO 71]). Par la non-standardisation de ses activités et produits, l'organisation à technologie unitaire a un fonctionnement qui permet justement cette flexibilité que nécessite l'ajustement constant aux spécifications des divers clients.

Par contre, dans une production de masse, la circulation des flux de production à l'intérieur des fonctions se fait du développement à la production pour se terminer à la fonction marketing.

Enfin, les organisations efficaces reposant sur une technologie en procédé continu, se caractérisent par une forte tendance vers une structure organique qui peut s'expliquer par le haut niveau d'autonomie des membres de l'organisation, de même que par l'automatisation du processus de production.

La thèse la plus répandue dans la littérature, est qu'il est possible que la forme bureaucratique d'organisation des entreprises convienne surtout (et peut-être seulement) à celles dont la technologie est mécanisée. La technologie et la structure sont reliées, la seconde dépendant vraisemblablement de la première d'après WOODWARD.

Bien que cette typologie comporte toujours une richesse cognitive, elle nécessiterait une actualisation par rapport aux nouvelles technologies apparues depuis plus de vingt ans, ce qui la rend un peu obsolète aujourd'hui.

2. TYPOLOGIE PROPOSEE PAR J-P.KIEFFER ET Y. GOUSTY

Après une analyse critique de l'approche traditionnelle de J. WOODWARD, de l'approche économique des systèmes de production et de sa classification par secteurs d'activité ou de la taille comme facteur de classification, ces auteurs proposent une typologie des systèmes de production basée sur deux dimensions fondamentales, la complexité et l'incertitude [KIE 86]; [KIE 88]. La complexité est liée essentiellement

[7] les principes de cette approche seront développés au chapitre III.

[8] plus récemment, une typologie des systèmes de production a été proposée par A. HATCHUEL et J-C. SARDAS [HAT 92]. Elle se fonde sur deux axes essentiels qui sont 1) cadence et continuité, 2) transformation et assemblage, gestion des ressources et gestion de la coordination.

à la structure des produits fabriqués ou transformés. L'incertitude aux travers d'aléas peut affecter les extrants, les intrants et les processus technologiques eux-mêmes. L'enquête intensive auprès de cent entreprises industrielles a permis de dégager deux grandes classes de systèmes de production, les systèmes d'assemblage et les systèmes de fabrication. Les premiers sont caractérisés par des nomenclatures souvent arborescentes des produits et dans lesquels les problèmes principaux se situent au niveau de la synchronisation des flux de produits et de la gestion des informations. Dans la deuxième classe de systèmes, les problèmes principaux sont des problèmes d'ordonnancement des interventions des moyens de production. La complexité croît à partir des systèmes de fabrication organisés en lignes jusqu'aux systèmes d'assemblage des produits complexes. Le croisement des deux dimensions complexité et incertitude fait apparaître les neuf classes de systèmes de production suivantes:

2.1. SYSTEMES 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 fabricants 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.

2.2. SYSTEMES 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 de 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 les vêtements, chaussures ou d'autres articles de grande consommation.

2.3. SYSTEMES 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. Cette classe façonne souvent des pièce pour les besoins de systèmes de types 1, 2 ou 3 ou après 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 du type 8.

3. TYPOLOGIE PROPOSEE PAR L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GESTION INDUSTRIELLE

Les quatre critères retenus pour cette classification sont le mode de réponse au marché, la répétitivité de la production, l'organisation produit-process par trois formes de base de transformations et la nature de la «valeur ajoutée» (voir [RFG 89]).
La production peut être unitaire non répétitive, en séries répétitives avec des produits multiples, des ressources polyvalentes et des circuits de fabrication complexes. Elle est également de masse répétitive (ou par cadence) en processus discrets avec une organisation et une activité des ressources industrielles dédiées pendant une certaine durée. Enfin, la production de masse répétitive en processus continus sans stockage intermédiaire se rencontre également. La transformation divergente «ET» ou «OU» correspond au cas où une même matière contribue à la réalisation de différents produits. La transformation de type «ET» est divergente par la nomenclature et caractérise les entreprises telles que la chimie de base par exemple. Le type «OU» ou divergence par la gamme caractérise les entreprises de la sidérurgie, la métallurgie, la papeterie, le textile etc.. Les transformations convergentes se rapportent aux entreprises d'assemblage comme la mécanique, l'électronique ainsi que l'agro-alimentaire, la chimie et la pharmacie. Les productions linéaires correspondent aux processus dédiés à un type de production et les secteurs «mono-métier» comme la forge, la fonderie, la sous-traitance, la maintenance... A partir de ces trois formes, il est possible de construire plusieurs combinaisons (diabolo, toupie et T par exemple).
La «valeur ajoutée» est constituée de main d'oeuvre directe, d'un savoir-faire d'études qui caractérise la capacité à innover, d'un savoir-faire technique qui met en évidence la maîtrise du métier et du service au client (assistance).

CONCLUSION

Les systèmes industriels se décrivent généralement en intégrant aussi bien les aspects économiques et sociaux, que les aspects essentiellement techniques de la production. En effet, les décisions de pilotage des systèmes de production émergent d'une organisation industrielle constituée d'individus et de technologies (même si elles ne commandent que des processus automatisés).
Pour décrire les systèmes de production, les trois typologies présentées peuvent être considérées comme complémentaires. La typologie de J-P. KIEFFER et Y. GOUSTY ne s'oppose pas à celle de J. WOODWARD qui, tout en restant intéressante, s'est basée sur des technologies anciennes. Quant à la typologie de l'AFGI, elle convient plutôt à une description physique des systèmes opérants.

Par rapport à notre problématique particulière, nous retiendrons un schéma descriptif du système de production basé sur la complexité de son fonctionnement[9] et sur l'incertitude de son environnement interne ou externe.

Le chapitre suivant expose l'approche systémique comme méthode d'exploration de ces systèmes complexes et perturbés.

[9] notons que d'après P. BARRANGER, il semble nécessaire d'établir une relation entre la complexité et la technologie [BAR 92].

CONCLUSION DE LA PARTIE

La complexité des systèmes de production rend difficile les prises de décisions non-programmables de pilotage et de planification. Les décisions de planification «stratégique» en production, de par leur dimension globalisante sont complexes, non-linéaires et se basent souvent sur des variables qualitatives. Elles ne peuvent donc pas être programmées de manière informatique à partir d'un simple algorithme. Par contre, les décisions à court terme de régulation de l'appareil productif assurant le fonctionnement opérationnel de l'outil, sont souvent struturables et basés sur des éléments quantitatifs. Elles doivent être prises rapidement avec des règles de décision simples pour assurer une continuité de l'exploitation industrielle. C'est ce que montre le tableau de la figure 1 qui expose de façon non exhaustive, les outils et les méthodes d'aide à la décision les plus couramment utilisés. Ils correspondent aux décisions observées dans l'enquête et répertoriées dans la figure 1 du chapitre V. Ces outils sont présentés de la même manière, sous forme d'un tableau croisant les décisions par niveau et les décisions par méthode.
Il ne s'agit pas uniquement d'outils d'aide à la décision, mais également de méthodes d'approche et de structuration de problèmes complexes pouvant contribuer à la prise de décision. Nous n'avons répertorié que les démarches rationnelles[10].

FIG 1 Outils et méthodes d'approche des décisions dans les systèmes de production

[10] nous ne développerons pas de propos sur les démarches dites «intuitives», notamment pour les décisions non-structurées comportant des aspects qualitatifs et subjectifs. Citons J.W. FORRESTER dans "Industrial Dynamics" : «Notre jugement intuitif n'est pas fiable» [FOR 69].

	Décisions de REGULATION	*Décisions de PILOTAGE*	*Décisions de PLANIFICATON*
Décisions PROGRAM-MABLES	- Tables de décisions - …	- Outils statistiques - …	
Décisions STRUCTU-REES	- Méthode MRP - Algorithmes d'ordonnancement - SIAD - Réseaux de Pétri - …	- Méthode MRP - Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle - SIAD - Simulation - …	- Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle - Méthodes multicritères - SIAD - Simulation - …
Décisions NON STRUCTU-REES ou HYBRIDES		- Analyse bayésienne - Simulation - …	- Méthode DELPHI - Méthodologie d'analyse et de conception (MERISE, SADT, GRAI) - System Analysis - Simulation - …

Ce tableau répertorie les outils statistiques, les techniques de recherche opérationnelle, les méthodes multicritères, la «*Systems Analysis*», les SIAD, etc. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas encore possible d'utiliser des techniques précises permettant d'optimiser le processus de décision inhérent aux décisions non programmables. Le problème qui reste à résoudre est celui de l'analyse précise du mécanisme de la pensée, confrontée à des problèmes complexes et nouveaux, tâche intéressant les spécialistes de l'«intelligence» artificielle [POP 73].

En conclusion, cette enquête a permis d'enrichir la connaissance des mécanismes de décision dans les systèmes industriels. Elle permettra d'élaborer des modèles de simulation en apportant des bases à leur structure cybernétique et à la quantification de leurs variables. On observe, comme le montre la zone grisée du tableau de la figure 1, une forte présence de la simulation comme outil d'aide à la décision, ce qui contribue à la légitimation dans les choix de cette thèse.

TROISIEME PARTIE

Conception de modèles génériques de production

INTRODUCTION

Cette partie expose une méthode d'élaboration de modèles évoqués dans les parties précédentes.

Ces modèles génériques découlent de l'approche qualitative préalable et d'une enquête menée sur le terrain dans un cadre théorique de référence (typologies des systèmes de production et approche systémique).

Dans un premier temps, les hypothèses d'ensemble d'une modélisation de différents types de systèmes de production sont présentées. Il s'agit d'une approche conceptuelle basée sur les principes de la cybernétique et la dynamique des systèmes de FORRESTER.

Cette phase permet de guider la conception de macromodèles représentatifs de différents sous-systèmes opérants et de différents sous-systèmes d'information et de pilotage.

En dernier lieu, sont développées les modalités particulières de mise en oeuvre de ces modèles de simulation. En ce qui concerne l'approche à long et à moyen termes, nous avons choisi une approche de simulation continue dont nous montrons la pertinence. Par contre, pour l'approche à court terme, nous aurions préféré utiliser des outils hybrides (continus et discrets), plus appropriés à la modélisation des systèmes opérants.

Chapitre III

III. CYBERNETIQUE ET APPROCHE SYSTEMIQUE

INTRODUCTION

La cybernétique est née de travaux interdisciplinaires pilotés par N. WIENER, physiologiste [WIE 61] et A. ROSENBLUETH. Elle a comme objectif d'aborder l'étude des organismes vivants avec le regard du constructeur de servomécanismes et réciproquement, considérer les servomécanismes avec l'expérience du physiologiste. J. MELESE [MEL 80] précise qu'elle ne se limite pas comme d'autres sciences, au niveau des objets pour se demander «qu'est-ce que cela ?» ou «comment cela fonctionne-t-il ?» mais à un niveau plus général où elle se demande «qu'est-ce que l'objet produit, quelles transformations apparaissent?». La cybernétique et la théorie de la commande des mécanismes technologiques et naturels se fondent sur les concepts d'information et de rétroaction et ne sont qu'une partie de la théorie générale des systèmes. D'après B. LUSSATO [LUS 70]: «la théorie des systèmes se préoccupe de décrire la réalité à travers des modèles aussi fidèles que possible». Son effort se porte sur le perfectionnement des moyens d'analyse et de connaissance.
Comme nous l'avons précisé précédemment, il nous est nécessaire de baser nos recherches sur ces modèles epistémologiques. Ce chapitre décrit le paradigme systémique qui facilite l'approche de la complexité des systèmes de production que nous souhaitons modéliser.

1. LA CYBERNETIQUE ET LA NOTION DE SYSTEME

Dans l'importante bibliographie traitant de cybernétique et de systémique, nous retenons que le système est une «boîte noire» définie seulement par ses intrants et ses extrants; on peut ainsi reconnaître la structure régulatrice même quand les mécanismes réels restent inconnus ou ne sont par décrits.
J. KLIR et M. VALACH citent en 1965 [KLI 65] dix-sept définitions de la cybernétique, dont la suivante: «la cybernétique est la science des mécanismes autorégulés et a pour objet principal l'étude des interactions entre systèmes gouvernants (ou systèmes de contrôle) et systèmes gouvernés (ou systèmes opérationnels), dans les milieux régis par des processus de rétroaction...». R. ASHBY [ASH 56] insiste beaucoup sur la propriété remarquable de la démarche cybernétique d'indifférence à l'égard de la nature des éléments observés. Elle ne s'intéresse pas aux parties mais aux interactions. De même les composants des systèmes importent peu, seul est pris en considération leur comportement global.
J.W. FORRESTER s'inspirant beaucoup des systèmes cybernétiques, crée en 1961 la dynamique industrielle[11] dont l'objectif est de définir les liens de causalité circulaire qui se manifestent dans un schéma cybernétique. Il affirme que toute décision dans une organisation est nécessairement prise à l'intérieur d'une structure de *feedback*. (voir fig.2 annexe 4b).
En 1932, W. CANNON découvre une propriété intéressante qu'il qualifie d'homéostasie en lui donnant cette définition: «C'est l'ensemble des mécanismes

[11] appelée aussi dynamique des systèmes.

assurant la régulation de l'organisme... Un système homéostatique (une entreprise, une grande organisation, une cellule) est un système ouvert maintenant sa structure et ses fonctions par l'intermédiaire d'une multiplicité d'équilibres dynamiques».

D'après D. FREEDMAN [FRE 93], «les managers pensent comprendre quelles sont les relations de cause à effet au sein de leurs organisations alors qu'en réalité les liens entre une action et son résultat sont plus complexes qu'ils ne pourraient l'imaginer». P. SENGE appelle cela «dilemme de l'assimilation de fond». «Penser en termes de système» selon la démonstration de P. SENGE [SEN 90], implique d'avoir la capacité de comprendre quelles relations clés influencent les comportements qui se manifestent dans les systèmes complexes au fil du temps et quelle est la capacité des managers lorsqu'il s'agit de «prendre ces ensembles en considération».

Notre investigation sur les systèmes de production justifie l'utilisation de ces théories comme moyen d'exploration des mécanismes de régulation homéostatique. Ces systèmes comme le précise J-C. SCHEID [SCH 80], possèdent des *feedbacks* positifs ou négatifs «qui pourront dire si l'organisation est stable ou instable, si elle est dotée ou non de régulateurs efficaces».

2. APPROCHE SYSTEMIQUE

B. WALLISER [WAL 77] caractérise l'approche systémique par les points suivants:
«- ...elle cherche d'abord à définir un langage unitaire de représentation des systèmes... en se fondant sur l'existence de propriétés communes à ces différents systèmes,...
- elle cherche à définir une démarche rationnelle d'analyse et de conception de systèmes... en se fondant sur l'existence de principes communs de modélisation,...
- elle cherche enfin à définir une problématique originale de pensée et d'action en se fondant sur l'espoir d'une synergie et d'un consensus dus au travail pluridisciplinaire...».

Le caractère d'une approche systémique est néanmoins plus descriptif que normatif [LUS 70]. J. MELESE la considère comme une praxéologie [MEL 80]. Sans vouloir développer une discussion sur ces propos, nous tenons à indiquer les confusions existantes dans les terminologies de système et d'analyse systémique (voir [GRA 90] et [MOI 77]).
Nous retenons cette approche comme une vision (une «métaconnaissance») globale des systèmes de production, se situant au niveau IV des «*inquiry systems*» (selon J-P. Van GIGCH [GIG 85]). En effet, les problèmes posés en production industrielle sont très diversifiés de part leurs natures technique, économique ou sociale. La démarche consistant à décomposer les systèmes en leurs éléments ou structures les plus simples, conduit souvent à des résultats partiels et même dans certains cas, sont en contradiction avec les objectifs même du système de production.

Nous pensons donc que c'est par une vision systémique globale que doivent être approchés ces systèmes.

3. APPROCHE DE LA COMPLEXITE ET DE L'INCERTITUDE

Dans les systèmes de production, la complexité apparait dans les produits et les procédés mais aussi dans les mécanismes de pilotage et le système d'information. Le sens mathématique de la complexité se traduit par le caractère non-linéaire de leur représentation par des modèles. B. WALLISER [WAL 77] introduit même une notion d'entropie traduisant une certaine complexité des systèmes quand elle est maximale. Citons à ce propos E. MORIN qui affirme que «...la complexité commence dès qu'il y a système» [MOR 84].

Quant à l'incertitude, elle caractérise un milieu dans lequel l'ensemble des résultats des choix possibles (stratégies) n'est pas totalement connu. En se référant à la thèse de S. FERNEZ-WALCH, nous distinguons l'incertitude conjoncturelle de l'incertitude opérationnelle [FER 91]. La première dépendant de l'environnement du système de production, n'est pas contrôlable et nous la percevons par un processus de conjecture. La seconde se rencontre dans les systèmes opérants en se traduisant par exemple par les risques d'arrêts de production. A la différence de l'incertitude conjoncturelle, il est possible d'exercer certains contrôles sur ce type d'incertitude.

T.L. SAATY dans [SAA 84], propose la Méthode de Hiérarchie Multicritère (MHM) pour décider face à la complexité. Cette méthode de pensée permet de prendre des décisions relatives à des problèmes complexes, en simplifiant et en accélérant nos processus de prise de décision naturels. Elle consiste:
- à décomposer une situation complexe et non structurée en ses composantes,
- à classer ses parties ou variables selon un ordre hiérarchique,
- à attribuer des valeurs numériques à des jugements subjectifs sur l'importance relative de chaque variable
- et enfin à synthétiser les jugements afin de déterminer les variables qui ont la plus grande priorité et sur lesquelles il convient d'agir pour parvenir à la solution.
T.L. SAATY énumère diverses possibilités d'organisation de la connaissance pour la prise de décision et cite l'approche déductive et l'approche systémique en insistant sur le rôle de la logique, de l'intuition et de l'expérience. Il se base également sur les théories béhaviouristes et sur les résultats de la recherche sur le cerveau.

H. A. SIMON met en évidence l'importance de l'analyse systémique pour architecturer la complexité et contribuer à la réduction de l'incertitude [SIM 60]. J-L. Le MOIGNE propose même une typologie opérationnelle des systèmes d'information à partir de la relation complexité-incertitude [MOI 74]. D'après lui, «la quantité d'information est une fonction monotone croissante de deux variables quasi indépendantes : la complexité de cette organisation et de son environnement et l'incertitude qui caractérise son action dans son environnement».

Comme nous l'avons vu au chapitre II, les systèmes de production possèdent certains caractères marqués par la complexité de leurs produits et de leurs procédés et par l'incertitude interne (aléas de production) et externe (demande fluctuante).

CONCLUSION

Les systèmes de production, quelle que soit leur appartenance à l'une ou l'autre des classes évoquées au chapitre II, sont considérés comme des systèmes à boucles de rétroaction ou de *feedback.* Leur objectif consiste à assurer une stabilité temporelle

par des mécanismes internes de régulation et ce, quelles que soient les perturbations internes et externes. Cette qualité de stabilité est intrinsèque aux systèmes.

Dans une première approche, il s'agit donc de définir les relations de causalité traduites par des boucles cybernétiques positives ou négatives, pour engendrer un schéma «causal» (cf. [ALJ 90]) et ce, malgré la complexité des systèmes de production[12].

[12] A ce propos, citons M. LANDRY [LAN 87]: « s'il nous est possible de penser "richement" le réel, la pensée ne peut cependant échapper à la logique analytique qui est segmentaire; la pensée complexe n'est rien sans elle.».

CONCLUSION DE LA PARTIE

La partie que nous venons d'exposer a constitué les bases fondamentales de nos travaux. Elle a découlé de nos investigations sur le terrain et du référentiel théorique que nous avions retenu. Elle s'est matérialisée par des modèles génériques de différents types de systèmes de production sur trois horizons décisionnels.

A ce stade de recherche, ces modèles permettent de décrire la cinématique des systèmes de production industriels grâce à la représentation de leurs mécanismes cybernétiques.

Nous pouvons maintenant passer à la phase expérimentale consistant à simuler de manière dynamique ces modèles à partir d'un plan d'expérience donné.

Chapitre IV

IV. MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION ET THEORIE DE J.W. FORRESTER

INTRODUCTION

J.D. LITTLE expliquait en 1970 la difficulté de faire accepter la modélisation par les décideurs, ceci pour trois raisons: «1. Les bons modèles sont difficiles et longs à créer, 2. un bon plan d'expérience est long et difficile à élaborer et 3. les dirigeants ne comprennent pas les modèles avec leur jargon particulier et des manipulations de données compliquées» [LIT 70].
De nos jours, le recours à la modélisation est devenu plus courant grâce notamment, à l'évolution des logiciels de simulation. Dans la pratique industrielle, il est courant de modéliser les systèmes de production dans un espace d'états discrets. Cette démarche se justifie par exemple, pour la conception d'un atelier automatisé ou plus généralement pour représenter les événements opérationnels de production. Mais différentes techniques de simulation sont aujourd'hui répertoriées et décrites dans de nombreuses publications dont nous citons les suivantes[13]:
- en simulation discrète: [LER 80], [BEL 85], [AMM 88], [CET 92], [MAR 87] (réseaux de Pétri), [BAR 91] (orienté objet),
- en simulation continue: [PUG 63], [TIM 81], [KIE 86],
- en simulation «mixte»: [LAR 92], [SEE 92], [NAK92].

Rappelons que nous avons situé initialement cette thèse, dans le champ théorique «continu» de la dynamique des systèmes de J.W. FORRESTER.
Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les difficultés d'élaboration des modèles de simulation de systèmes de production.
Puis nous décrirons l'approche continue retenue, par rapport à notre problématique particulière[14].

1. PROBLEMATIQUE DE LA MODELISATION

La complexité de la modélisation est la conceptualisation de certaines connaissances à partir de son propre référentiel épistémologique. Comme tout système complexe, le modèle d'un système de production est inévitablement construit de façon progressive et modulaire. Le paradoxe de la modélisation consiste à tenter de symboliser de façon triviale les modèles à partir de notre modèle mental du système étudié. Plus le modèle reflète la réalité observée à travers une représentation mentale, plus le modèle est complexe et détaillé. Nous retenons la démarche consistant d'abord à conceptualiser la connaissance du système réel, puis évoluer par étapes progressives vers une représentation graphique du système et sa formalisation mathématique[15].
La problématique de notre thèse exige une description étendue du système de production, intégrant également ses composantes économiques et sociales. On peut penser que les modèles continus sont alors plus appropriés. Ce choix semble d'autant

[13] nous avons également livré une analyse comparée de ces techniques (voir [THI 93a]).
[14] nous n'effectuerons pas d'analyse comparative entre modèles discrets et modèles continus.
[15] notons la remarque de E. MORIN: «la somme de nos formalisations logiques du réel ne pourra jamais épuiser le réel» [MOR 84].

plus justifié quand l'horizon d'analyse est temporellement élevé, c'est-à-dire dans le cadre d'une investigation à moyen ou à long terme.

2. CARACTERISTIQUES DES MODELES DE SIMULATION

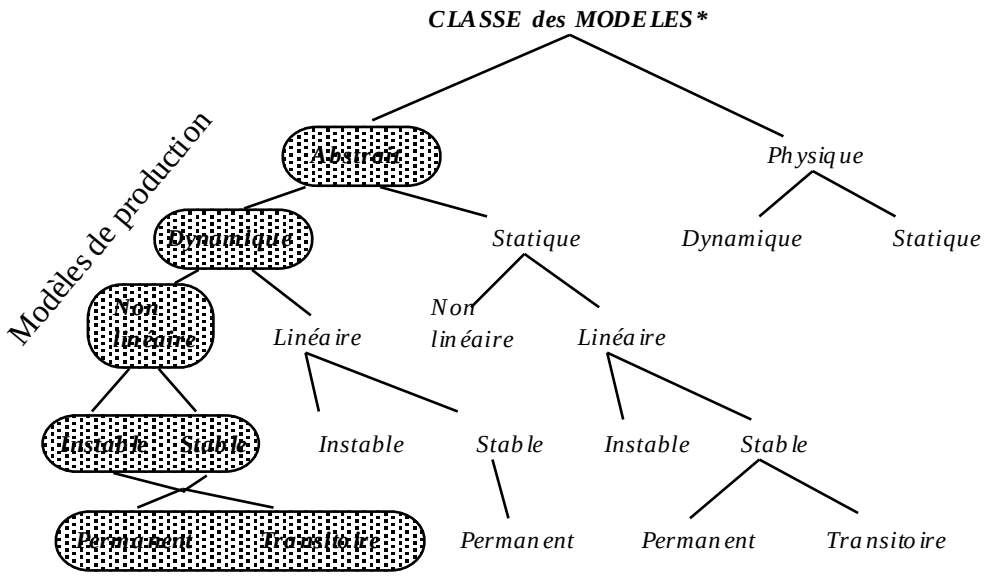
D'après F. LHOTE : «Le modèle d'un atelier de production vise à fournir une représentation mentale cohérente d'une organisation fondamentalement complexe d'acteurs multiples interagissant dans un même système, dont les objectifs de qualité, de productivité et de polyvalence se superposent. La structuration du modèle est nécessaire non seulement pour graduer l'analyse ou la spécification de la complexité, mais plus encore pour faire émerger les principes d'organisation et de conduite des installations en offrant une visibilité adaptée à la problématique motivant la représentation.» (23ème CIRP [LHO 91]).
Certains auteurs proposent de définir d'une part, un modèle de connaissance formalisant la structure et le fonctionnement du système de production, d'autre part, un modèle d'action traduisant le modèle de connaissance dans un formalisme mathématique ou dans un langage de programmation [GOU 91].
D'autres chercheurs [GUI 91] critiquent les approches classiques de la modélisation qui tendent à fusionner les procédés, les stations de travail et les ressources qu'elles utilisent. Ils observent une vision actuelle trop statique des problèmes des ateliers flexibles et proposent un modèle intégrant des noeuds hiérarchisés. L'atelier est représenté par la racine de l'arbre et les stations par des feuilles. Des connexions logiques relient les points d'entrée-sortie des noeuds pour créer l'architecture physique de l'atelier par des ressources, des *jobs*, des types de pièces, des procédés.
K. BOSKMA [BOS 82] suggère plusieurs types d'agrégation : une agrégation des métiers et des moyens de production, une agrégation logique, une agrégation du travail (tâches ou activités) et une agrégation du temps par discrétisation.

Face à ces différentes propositions de modélisation des systèmes de production, nous tentons dans un premier temps, de caractériser les modèles de simulation par leurs propriétés intrinsèques.
Ensuite, nous exposons quelques travaux d'auteurs ayant mis en évidence la nécessaire hiérarchisation des modèles de production.
Enfin, nous présentons les notions de variables discrètes et continues des modèles. F. LHOTE distingue les univers de production continus et discrets par leur origine technologique, relative aux flux matériels, qui se traduit par la prédominance essentielle d'un type de modèle mathématique par rapport à l'autre, mais pas par leur exclusion mutuelle. D'après lui, «...on se trouve donc devant deux cultures différenciées, comme on l'a connu pour les flux informationnels avec le distinguo analogique/logique» [LHO 92].
Nous ne nous poserons pas le problème du type de variable à utiliser, puisque nous avons justifié dès l'origine de cette thèse, le choix des modèles continus de la dynamique des systèmes de J.W. FORRESTER. Néanmoins, il nous a semblé utile de présenter ces différentes vues, sans pour autant les opposer systématiquement.

2.1. DESCRIPTION DES MODELES DE PRODUCTION

Nous retenons la classification des modèles de J.W. FORRESTER [FOR 69], pour caractériser les modèles de simulation des systèmes de production (voir figure 1).

FIG 1 Caractéristiques des modèles de production



** D'après une classification de l'ensemble des modèles proposée par J.Forrester dans « IndustrialDynamics» [FOR 69].*

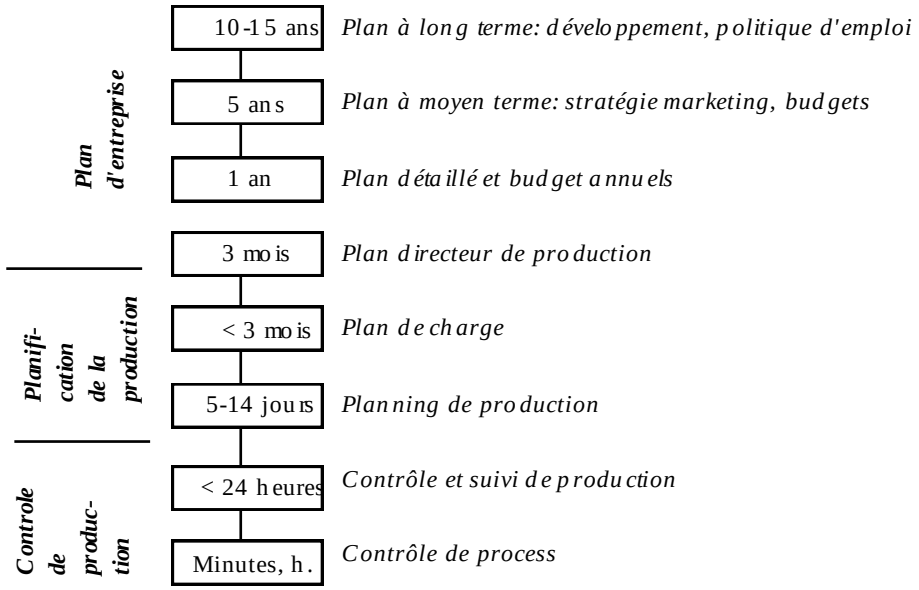
Ces modèles sont abstraits car ils incluent des images mentales et des règles de comportement. Ils sont également dynamiques en faisant intervenir le temps et sont presque toujours non-linéaires. En effet dans un modèle linéaire, la réponse à une perturbation s'effectue de façon totalement indépendante des événements qui ont précédés et qui succèderont. Ces systèmes sont stables et ont une tendance à revenir dans leur position initiale après perturbations tout en pouvant osciller. Ils reviennent dans un état stabilisé après un certain temps. Par contre, d'après J.W. FORRESTER, la plupart des systèmes se révèlent instables face à des stimulations de faibles amplitudes et stables face à des perturbations plus importantes [FOR 68] (voir également [FOR 92]).

2.2. HIERARCHISATION DES MODELES DE PRODUCTION

S'inspirant des concepts de décomposition hiérarchique établis par M.D. MESAROVIC [MES 70], G. DOUMEINGTS propose un modèle structurant GRAI composé de deux parties [DOU 84]:
- une macrostructure décrivant les relations existant entre les composantes du système de gestion de production pour les besoins décisionnels,
- une microstructure permettant d'identifier chacun des éléments déterminés dans la macrostructure pour les besoins de pilotage.

Cette représentation hiérarchisée de l'ensemble de la structure décisionnelle, permet de répondre aux problèmes de coordination et de synchronisation dans les systèmes de production.
D'autres auteurs [FIN 80] proposent une hiérarchisation temporelle des décisions, comme l'illustre l'exemple d'une aciérie dans la figure 2.

FIG 2 Modèles hiérarchiques dans une aciérie



Extrait de FINDEISEN, BAILEY, BRDYS, MALINOWSKI, TATJEWSKI, WOZNIAK, Control and Coordination in Hierarchical Systems, John Wiley and Sons, Inc., New York [FIN 80].

A chacun des huit niveaux représentés, correspond un modèle allant du contrôle de l'activité à très court terme, à la planification de l'entreprise à long terme.
D'autres représentations hiérarchiques des systèmes de production ont été proposées, notamment dans le cadre des projets suivants[16] : ICAM [ICA 88], CAM-I [CAM 88], CIM-OSA [CIM 89].

2.3. MODELES A ESPACES D'ETATS DISCRETS OU CONTINUS

Suivant le but de la modélisation, un même système peut être modélisé avec des changements d'états[17] continus ou discrets. Dans les systèmes de production, les variables essentielles peuvent avoir des caractéristiques continues ou discontinues. En effet, des changements continus traduisent l'évolution de ces variables, mais des modifications brutales ou transitions sont également observées et démontrent leur discontinuité. C'est le modèle et non le système qui est continu ou à événements discrets. B. WALLISER dans [WAL 77], définit une hiérarchie d'invariants temporels et observe que les caractéristiques des différents niveaux tendent à être de plus en plus discontinues lorsqu'on passe des niveaux les plus changeants aux niveaux les plus figés (exemple des aiguilles d'une montre).

2.4. MODELES DIS-CONTINUS

Un groupe de travail commun à l'AFCET et à la SEE[18], a publié en 1992 un rapport de synthèse sur les systèmes qualifiés de «dis-continus» ou hybrides (pour le compte

[16] ces projets ont été cités dans l'introduction du chapitre II.
[17] d'après G. BEL, cette notion d'état est à rapprocher de la même notion en automatique continue [BEL 85].
[18] AFCET: Association française des sciences et technologies de l'information et des systèmes et SEE: Société des Electriciens et Electroniciens.

du Ministère de la Recherche et de la Technologie, voir [SEE 92]). Leur premier objectif a été de rassembler industriels et universitaires spécialistes des «domaines» continu et manufacturier. Ce groupe a étudié la manière de traiter les problèmes par certains modèles et certaines méthodes de développement en s'attachant à discerner les points communs et complémentaires des deux domaines.
La tendance actuelle consiste à développer des outils de simulation mixte permettant de modéliser des phénomènes continus et discrets. Certains logiciels possèdent déjà des bibliothèques discrètes ou des modules continus. Une nouvelle génération de logiciels est en cours de développement et permettra de faciliter la modélisation de ces processus hybrides. Lors du colloque AFCET sur les processus dis-continus (voir les références de [LAR 92] et [NAK 92]), CISI Ingénierie a présenté entre autres, le projet CP2M s'appuyant simultanément sur des outils généraux de résolution de problèmes continus (NEPTUNIX) et discrets (QNAP2)[19]..

2.5. CONCLUSION

Les différents modes de description des modèles que nous avons présentés, nous permettent de positionner les modèles de simulation de la thèse. Comme nous l'avions déjà précisé, nous considérons les modèles de production comme des modèles abstraits, dynamiques et non-linéaires dans la plupart des cas. Nous retenons également une hiérarchisation temporelle des décisions sur trois horizons : court, moyen et long termes. Ce choix se justifie par l'objectif de la thèse, consistant à mieux comprendre la dynamique des comportements des entreprises, donc essentiellement de leur processus de décision. Enfin, en se référant au modèle du *National Bureau of Standard* [DIN 92], nos modèles se situent aux niveaux 1 et 2 de conduite des systèmes de production, c'est-à-dire de l'usine et de l'atelier. Nous ne nous intéresserons donc pas aux événements discrets apparaissant au niveau des cellules (niveau 3), des postes de travail (niveau 4) et des équipements (niveau 5).
Dans le cadre de travaux futurs, nous pensons qu'une approche mixte pourrait améliorer notre vision à court terme de l'activité des ateliers de production, par la superposition d'un modèle à événements discrets du système opérant, et un modèle continu du système de pilotage.

3. MODELES CONTINUS DE LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES

Comme nous l'avions précisé dès le début de cette thèse, nous avons retenu le référentiel théorique de J.W. FORRESTER[20] pour développer nos modèles de connaissances.
Dans ce paragraphe, nous présentons cette approche de manière plus détaillée.

3.1. PRINCIPE DU MODELE DE J.W. FORRESTER

L'un des concepts fondamentaux de cette théorie, est la notion de *feedback* sur laquelle repose toute organisation dynamique. Le système réel est représenté par un modèle abstrait décrivant mathématiquement les liaisons internes entre ses composantes et avec l'extérieur. Le système est décrit par des équations différentielles

[19] ce projet a fortement évolué depuis (cf. notre rencontre très récente avec P. BOURSEAU, chercheur à l'ENSCP, UR Modélisation-Procédés, dans le cadre d'un groupe de travail AFCET).
[20] d'après l'ouvrage «Industrial Dynamics» [FOR 69], (voir également [POP73].

(ou plutôt par des équations aux différences finies qui sont une approximation du cas continu). Une des raisons essentielles de l'utilisation de ces modèles de simulation continue, est de considérer que les décisions ne sont pas prises instantanément, mais de façon progressive exprimant ainsi un *continuum* spatio-temporel «décision-action». La méthode s'attache également à prendre en compte les délais ou facteurs d'hystérésis qui se manifestent entre la décision et l'achèvement de l'exécution de cette décision. D'après A. ALJ et R. FAURE dans [ALJ 90], cette théorie peut se rattacher à la théorie des graphes de fluence, car elle comporte l'état d'un graphe dans lequel les arcs liant les sommets représentent les niveaux, les taux de variation de ces niveaux[21] indiquent comment interagissent les taux ou les gains pour modifier les niveaux initiaux, lorsque le système représenté évolue dans le temps (voir également la thèse de M. TIMOULALI [TIM 81]).

3.2. MODELES CONTINUS ET SYSTEMES DE PRODUCTION

Les objectifs de nos modèles sont dirigés vers l'identification et la modification des symptômes de déséquilibres des systèmes de production, plutôt que vers les causes véritables. W. KIRSH [KIR 74] justifie l'utilisation de modèles «forrestériens» pour l'expérimentation et la compréhension des comportements temporels. B. BRAUNSCHWEIG ajoute que ces modèles ont un but unique de simulation à des fins prédictives [BRA 91][22].
Comme nous le faisions remarquer dans la conclusion du paragraphe précédent, nous ne souhaitons pas représenter la réalité physique de l'activité d'une cellule ou d'un poste de travail. En effet, le modèle de FORRESTER serait un instrument qui prendrait difficilement en compte la structure réelle, avec sa répartition hiérarchique et fragmentée des décisions (cf. J-C. SCHEID [SCH 80]). Nous avons également signalé en introduction de la thèse, que nous ne recherchions pas de précision absolue dans les résultats de simulation. Cette remarque rejoint les propos de B. LUSSATO, qui considère le comportement de ce type de modèle comme «statistique et ne permettant ni de décrire ni de prévoir avec précision tel ou tel événement particulier. A ce titre, il ne convient qu'à la simulation des niveaux élevés de gestion et à l'étude des équilibres micro- et macro-économiques» [LUS 70]. Cette dernière affirmation ne va donc pas à l'encontre de notre investigation, puisque nos recherches sont orientées vers l'étude comparative entre différents types de comportement de production.

CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de caractériser les modèles de production que nous développerons.
En choisissant initialement de situer notre thèse dans le champ théorique de la dynamique des systèmes de J.W. FORRESTER, nous avons justifié le choix des modèles continus par rapport à notre problématique[23].

---

[21] ou amplificateurs auxiliaires.

[22] d'après B. PAULRE, la dynamique industrielle n'est pas simplement une méthode de simulation de systèmes dynamiques ou une méthode d'analyse des systèmes, mais une démarche tournée vers l'intelligence des systèmes complexes [PAU 91] (voir également [KAR 91].

[23] dans le cadre de nos travaux d'ingénierie précédents utilisant le langage de simulation continue DYNAMO (PUGH-ROBERTS Associates, Cambridge, Massachusetts, 02139), nous avons également retenu cette démarche pour différentes investigations dans une industrie du secteur textile-habillement (voir [THI 90, 91, 92 et 93a]).

En effet, le modèle à flux continu permet de se concentrer sur l'essentiel du comportement des systèmes, alors qu'une modélisation discrète risquerait de masquer l'essentiel par son niveau de détail[24]. Une modélisation continue peut donc souvent être une première approximation d'événements et de décisions «discrètes» qui vont se produire. C'est un bon point de départ, qui par la suite, peut exiger une modélisation plus précise à événements discrets.

[24] par exemple, une analyse à long terme de l'évolution des stocks, peut être effectuée sur des bases continues, même si les mouvements réels de stocks sont discrets [HOW 64] (voir également [GOR 71a]).

CONCLUSION DE LA PARTIE

Nous avons analysé et comparé les résultats de simulation des différents modèles génériques représentatifs de neuf classes de systèmes de production. Ce travail a consisté à rapprocher leurs différentes structures cinématiques, de la dynamique de certains comportements industriels et ce, indépendamment de l'activité de l'entreprise.

Trois horizons de décision ont été étudiés.

De nombreuses classes, notamment à moyen terme, ont de grandes difficultés à assurer un service correct devant un scénario fortement perturbant (scénario 2).
Dans la plupart des modèles, nous avons observé des boucles de régulation prééminentes.
D'autres boucles ont été jugées inutiles et même dans certains cas préjudiciables car leur action, en s'opposant à celles de boucles efficaces, avait pour conséquence une dégradation des variables de résultat.
Enfin, nous avons répertorié des boucles insuffisamment efficaces devant des hypothèses sévères des variables qui les pilotaient.

Ces différentes observations ont donc apporté une meilleure connaissance de la dynamique des comportements des systèmes de production.

Rappelons qu'à long terme, nous avons limité notre investigation à l'étude de l'influence de différentes politiques d'investissements sur la qualité de service, à partir d'un exemple particulier.

CINQUIEME PARTIE

Vers une meilleure connaissance du comportement dynamique des systèmes de production

INTRODUCTION

Cette partie constitue l'aboutissement de cette recherche cognitive sur les mécanismes de décision dans les systèmes de production perturbés.

Nous proposons tout d'abord, de manière pratique, des améliorations de certains comportements de systèmes de production à court et à moyen termes et de leur pilotage.

Ensuite, en prenant plus de recul, nous effectuons une synthèse globale de cette recherche sous des aspects cognitif, normatif et décisionnel.

Puis nous tentons d'évaluer ces travaux de modélisation et de simulation en dégageant leurs limites et en proposant des améliorations.

En fin de partie, nous développons des perspectives de recherches appliquées.

Chapitre V

V. PRE-ENQUETE QUALITATIVE

INTRODUCTION

La pré-enquête et l'enquête que nous avons menées, sont présentées dans ce chapitre et le suivant. Nous pensons qu'une analyse approfondie du terrain industriel, ne peut être construite qu'à partir d'une enquête préalable à caractère qualitatif[25].
L'objectif recherché consiste d'une part à identifier les mécanismes de décision essentiels dans les systèmes de production et d'autre part, à tenter de dégager une typologie reliant la structure des systèmes et leurs comportements.
La phase préalable présentée ci-dessous, est réalisée de manière classique par interviews et analyse de contenu de ces dernières.

1. DEROULEMENT DE LA PRE-ENQUETE PAR INTERVIEWS

Cette phase initiale de terrain apporte une aide pour constituer une problématique plus précise de cette recherche et pour bâtir des hypothèses valides et fiables. A ce stade d'étude, l'objectif de la pré-enquête est de faciliter l'élaboration d'un questionnaire concernant la structure des systèmes de production, leurs problématiques à court, moyen et long terme, leurs intrants et extrants et leurs comportements dans l'incertain.
Rappelons que cette recherche s'intéresse aux mécanismes de régulation des organisations de production face à des fluctuations imprévues des composantes de leur système.
Il s'agit d'interviews de type «clinique» avec un degré de liberté laissé au répondant, relativement élevé. Cependant, les entretiens se centrent sur un sujet précis et bien délimité par rapport à la problématique posée.
Dix-huit entreprises industrielles sont consultées. Ces entreprises représentant un échantillon réduit de la population ciblée, sont sélectionnées à partir de la classification définie dans [KIE 86] (voir également le ch. II §2). Un certain nombre de ces entreprises (de la région Centre pour la plupart) appartient à des groupes internationaux avec une indépendance plus ou moins importante au niveau de la gestion à court terme (centres de profit). Les personnes interviewées sont pour la plupart des directeurs de production, membres de la direction générale de leur entreprise.
Nous avons observé quelques difficultés lors de ces entretiens. En effet, des problèmes de confidentialité notamment sur les aspects sociaux de l'entreprise, ont sans doute «biaisé» certaines indications. D'autre part, même si les interviews étaient orientés sur les bases conceptuelles de la théorie des systèmes, les responsables interviewés se sont souvent recentrés sur des descriptions parcellaires et détaillées de leur système de production.

[25] approche empirique, d'après O. AKTOUF [AKT 87].

2. ANALYSE DE CONTENU DES INTERVIEWS

Les informations enregistrées sur bande magnétique sont analysées et «filtrées». Il reste à décrire de façon objective, systématique le contenu de ces interviews. Cette analyse est réalisée dans un but d'exploration et pour éviter une influence trop forte d'orientations personnelles initiales. Il s'agit également de vérifier le réalisme et le degré de validité des hypothèses déjà arrêtées (hypothèses «fondamentales» au sens de M. MARCHESNAY [MAR 85], c'est-à-dire empruntes de la vision).
En s'appuyant sur la théorie des systèmes, il est 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.

Il est utile de préciser que les modèles que nous allons développer, nécessitent une telle description.

Les catégories sont classées de façon exhaustive et exclusive (sans chevauchement) et elles permettent d'effectuer la synthèse des informations de la pré-enquête (voir ci-après).

1. Les entrées du système
Il est distingué les entrées déterministes ou stochastiques ne «déstabilisant» pas le système de production à court, moyen et long termes des entrées provoquant des perturbations brutales irréversibles.
2. Les sorties objectifs à court, moyen et long terme
Les objectifs essentiels relevés sont l'amélioration du service liée à la maximisation du nombre de commandes livrées à temps, l'amélioration de la qualité dépendant de la minimisation du taux de rebut et de retouches et l'augmentation de la rentabilité fonction du respect des coûts prévus (voire la réduction des coûts réels).
3. La structure du système opérant
Trois formes de base ([RFG 89] voir chapitre II §.3) sont utiles à la représentation graphique simple de l'organisation produit-process.
4. Les mécanismes de régulation et les variables de commande
Certains paramètres et indicateurs sensibles permettent le contrôle permanent de l'activité de production par des mécanismes de pilotage mis en oeuvre en cas de déséquilibre et de dysfonctionnement dans le système.

Nos publications [THI 92a] et [THI 93b], développent de manière plus détaillée cette analyse de contenu d'interviews. Les réactivités à court terme (journée, semaine), à moyen terme (mois, semestre, année) et à long terme (trois à cinq ans) y sont décrites par les mécanismes de régulation passive ou active mis en oeuvre.
Le paragraphe suivant expose de façon synthétique les résultats de cette pré-enquête.

3. CLASSIFICATION DES DECISIONS DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION

L'analyse de contenu des interviews permet déjà de classifier certaines décisions de production en univers incertain et perturbé.

En se basant sur les classifications des décisions par niveau [ANT 65] et par méthode [SIM 60], nous proposons de croiser ces deux typologies (cf. [GOR 71] et [MOI 74])

et de représenter dans le tableau de la figure 1, les décisions observées dans cette pré-enquête.

FIG 1 Décisions dans les systèmes de production

NIVEAU DES DECISIONS selon R.N. ANTONY

DECISIONS classées par METHODES selon H.A. SIMON

	Décisions de REGULATION (court terme)	*Décisions de PILOTAGE (moyen terme)*	*Décisions de PLANIFICATION (long terme)*
Décisions PROGRAM-MABLES	- Modifier l'effectif à court terme - Former le personnel - Suivre la production et contrôler les coûts - Effectuer des achats urgents	- Mettre en oeuvre une maintenance préventive - Modifier la politique de gestion des stocks - Mettre en oeuvre des inventaires réguliers - Analyser et contrôler les budgets	
Décisions STRUCTU-REES	- Planifier et ordonnancer les ordres de production	*Politique industrielle:* - Sous-traiter des opérations de production	*Stratégie industrielle* -Spécialiser les usines par produit ou technologie - Localisation d'usines
Décisions NON STRUCTU-REES ou HYBRIDES		*Politique "sociale":* - Motiver le personnel - Mettre en oeuvre des horaires flexibles - Améliorer la collaboration interne entre les services *Politique industrielle:* - Investir - Réorganiser - Réduire les niveaux de nomenclatures - Mettre en oeuvre une GPAO - Mettre en oeuvre le KANBAN - Améliorer la collaboration externe avec les fournisseurs - Diversifier ou réduire le nombre de fournisseurs *Politique financière:* - Fixer le niveau des stocks	*Stratégie "sociale":* - Embaucher ou licencier du personnel - Motiver le personnel *Stratégie industrielle* - Automatiser et concevoir des systèmes de production - Investir, automatiser, robotiser *Stratégie informatique* - Automatiser les traitements de l'information

On distingue dans cette figure les décisions opérationnelles assurant le fonctionnement «courant» du système opérant (court terme) et les décisions politiques (moyen terme) et stratégiques (long terme). Il est constaté que l'horizon temporel explique le type de décision.

On y observe également l'absence de décisions de planification programmables ainsi que l'absence de décisions de régulation non-structurées[26]. Ceci s'explique par la croissance de la complexité de la prise de décision en fonction du temps. Plus

[26] un problème structuré est un problème pour lequel il existe une formulation régularisée et reconnue (cf. M. LANDRY [LAND 87]).

l'horizon temporel est lointain (décisions de long terme par exemple), plus les décisions dans les systèmes sont complexes et ne permettent pas l'utilisation d'outils de prises de décision simples. Et inversement, pour les décisions à court terme, elles se prennent plus rapidement en mettant en jeu moins de variables .

CONCLUSION

Cette pré-enquête constitue une démarche préalable que nous jugeons nécessaire à la rationalisation du processus de décision induite par la modélisation. Elle s'inspire d'une démarche sociologique permettant une meilleure appréhension des organisations sociales complexes.

Elle permet d'inventorier les décisions en production et servira ensuite de base à la construction d'un questionnaire.

CONCLUSION DE LA PARTIE

En se référant à la typologie des recherches en gestion de production décrite par Alain BENSOUSSAN[27] [BEN 82], nos travaux pourraient se situer aux trois niveaux suivants:

- le niveau stratégique d'aide à la conception du système productif par la mesure des performances de l'organisation de la production (par agrégation d'indicateurs en temps et en espace),

- le niveau tactique par des conseils de mise en place d'indicateurs physiques et financiers de jugement des performances du système productif à court et à moyen terme,

- le niveau opérationnel par une amélioration de la régulation du système de production, en traitant les aléas et les incidents sans remettre en cause la totalité du système.

Au niveau de la méthode d'investigation, nous avons opté pour la modélisation. Comme le précise A. BENSOUSSAN, le premier objectif de la modélisation est positiviste dans le sens où il développe des modèles de connaissance. Le second aspect normatif, a pour objectif d'aider le praticien à «objectiver» les images qu'il perçoit de façon subjective (J.W. FORRESTER qualifie cette découverte progressive d'«anti-intuitive» [FOR 68]).

[27] directeur scientifique à l'INRIA et rapporteur d'un groupe de réflexion sur la recherche en gestion organisé par la FNEGE.

Chapitre VI

VI. ANALYSE QUANTITATIVE DE L'ENQUETE

INTRODUCTION

Suite à la pré-enquête, une enquête intensive a été menée. Ce chapitre en expose les résultats essentiels, notamment l'analyse statistique des données qui a permis de dégager une typologie des décisions de production.

1. METHODE D'ENQUETE

L'enquête s'organise à partir de l'analyse de contenu préalable (ch. V § 2).

Les objectifs de l'enquête peuvent être résumés en trois points:
1. Identifier le système productif en proposant une typologie comportementale hiérarchisée en partant d'une typologie fonctionnelle et structurelle basée sur les modes d'organisation socio-technique, la complexité des produits fabriqués et l'incertitude des marchés. Cette démarche a pour objectif de définir des comportements types d'entreprises industrielles face à des dysfonctionnements internes ou externes.
2. Apporter une aide à la conception de macro-modèles représentatifs de ces systèmes. Ces modèles génériques seront élaborés à partir des mécanismes de décisions les plus courants observés en cas de déséquilibres.
3. Apporter des bases réalistes de quantification pour une simulation informatisée de ces modèles et pour élaborer des schémas types de systèmes opérants.

Un questionnaire[28] est envoyé à un échantillon d'entreprises industrielles. L'échantillonnage initial se base sur la méthode empirique des quotas à partir des neuf classes de systèmes de production. Les données concernant les ventes, le service, l'outil de production, la qualité, les stocks et les fournisseurs, ont pour objectif de classer les entreprises en fonction de la répétitivité de leur production, de leur réponse au marché, de la complexité de leurs produits et de l'organisation de leur production. L'identification des décisions essentielles de production de ces entreprises permet une analyse approfondie de leurs réponses face à l'imprévu ou face à des dysfonctionnements internes. L'organisation de la production, les mécanismes de régulation extraits de ce questionnaire sont utilisés pour construire des modèles généraux de représentation de différents systèmes de production industriels.

L'enquête permet d'analyser 1082 réponses correspondant aux décisions face aux divers dysfonctionnements dans 29 entreprises. Sur une année, ce nombre peut paraître faible mais les non-réponses au questionnaire s'expliquent essentiellement par des problèmes de confidentialité et dans certains cas de compréhension des questions

[28] voir en annexe 1.

posées. Pour des raisons de temps, nous nous limitons à ces 29 entreprises[29]. Dégager des valeurs moyennes à partir d'un échantillon si faible conduirait à des erreurs d'interprétation puisque l'intervalle de confiance à 95% des résultats est de l'ordre de +/- 20%. La technique de l'analyse multivariée est donc choisie et plus particulièrement l'analyse factorielle des correspondances multiples (AFC) appropriée au traitement des variables qualitatives.

2. ANALYSE DES RESULTATS

L'étude s'est réalisée en trois étapes chronologiques:
1ère étape: Vérifier et valider la typologie structurelle et fonctionnelle des systèmes industriels décrite au chapitre II § 2 [KIE 86].
2ème étape: Vérifier si cette typologie est une typologie comportementale.
3ème étape: Dégager des comportements types pour les trois horizons de décision (court, moyen et long terme) pour en définir une typologie comportementale hiérarchisée (voir paragraphe suivant §.2.3.).

Les résultats détaillés de cette enquête sont présentés dans nos publications [THI 92a] et [THI 93a et b] et sont exposés en annexe 2 de cette thèse.

2.1. ETAPE 1: VALIDATION DE LA TYPOLOGIE STRUCTURELLE ET FONCTIONNELLE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Une partie du questionnaire a comme objectif de décrire la structure et l'organisation du système de production. L'analyse des données permet de dégager les deux dimensions essentielles de ces systèmes, l'incertitude sur l'axe horizontal et la complexité sur l'axe vertical (voir le graphique 1 de l'annexe 2). Ce résultat est identique à celui que J-P. KIEFFER et Y. GOUSTY avaient observés en 1986 (cf. ch. II § 2).

2.2. ETAPE 2: RELATIONS ENTRE DECISION ET ORGANISATION DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION

Les 220 variables représentant les décisions à court, moyen et long terme sont issues des réponses des 29 systèmes de production. Chaque entreprise est classée au départ de manière empirique par rapport à son activité principale, sa structure et son mode d'organisation de la production.
Après l'AFC, les deux premiers axes expliquent près de 50% de l'inertie. La projection des individus et des modalités des variables sur les axes (voir le graphique 2 en annexe 2) permet d'observer qu'elles ne se regroupent pas suivant les deux composantes complexité et incertitude qui ont permis de valider cette typologie.
De cette observation, nous en déduisons que la typologie précédente n'est pas de type comportementale.
Il faut cependant noter que cette conclusion découle d'une analyse basée sur un regroupement de toutes les décisions (à court, moyen et long termes). Il semble donc nécessaire d'effectuer une analyse hiérarchique des décisions. En conclusion, cette analyse statistique ne peut décrire des comportements dynamiques et se limite à

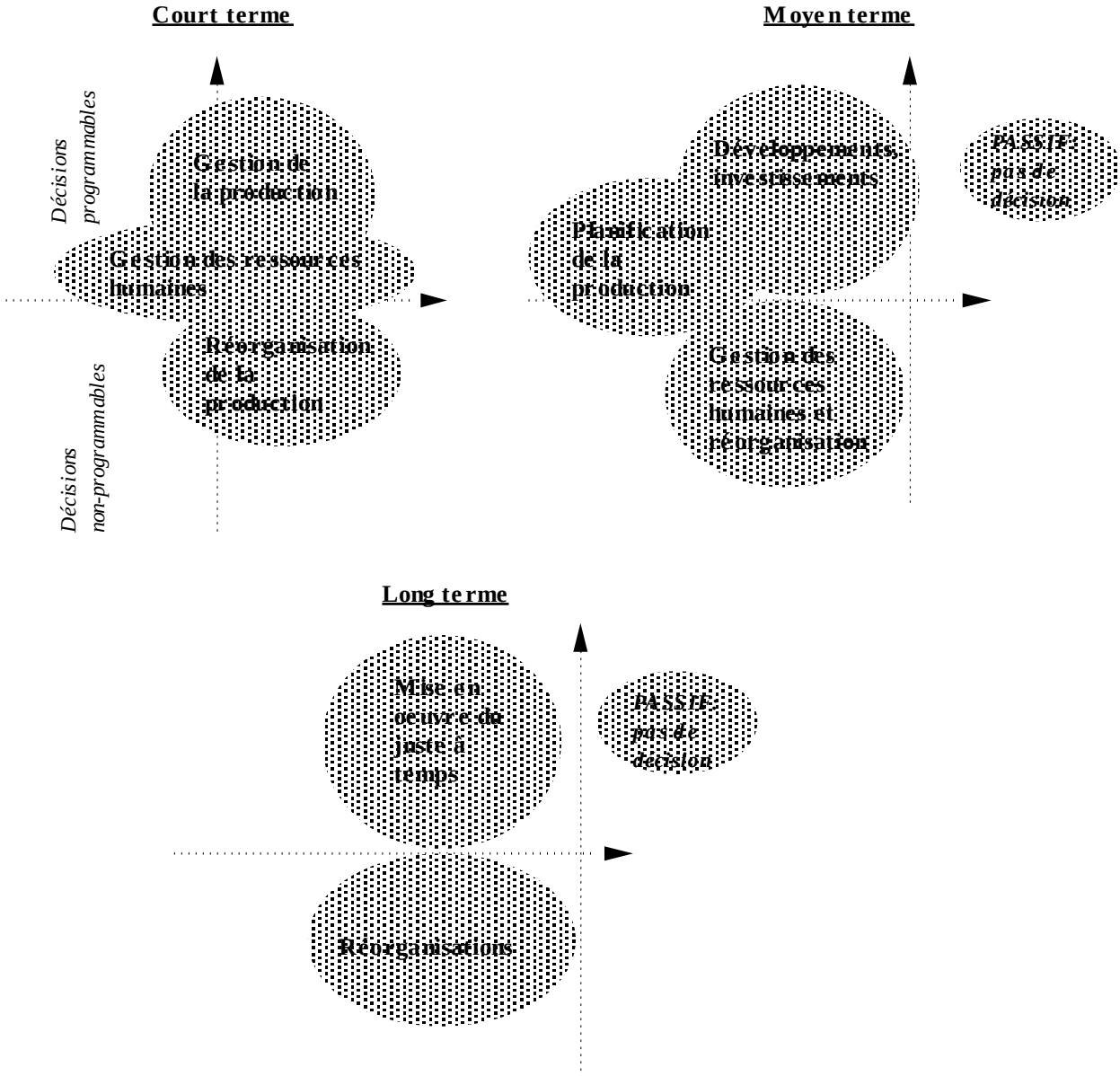
[29] nous avons récemment relancé de nouvelles interviews dans le cadre de travaux pratiques d'un enseignement de gestion de production (3ème année filière logistique, ESC Tours).

classifier des décisions découlant de ces comportements. Seule une typologie des décisions est donc proposée à l'issue de cette étude.

2.3. ETAPE 3: ANALYSE HIERARCHISEE DES DECISIONS DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION

Les décisions prises par les différentes entreprises s'étudient séparément après une répartition hiérarchique. Dans un premier temps, toutes les réponses possibles de même type sont regroupées dans moins de 30 variables de décisions.
Cette analyse hiérarchique permet d'élaborer le tableau de synthèse de la figure 1 qui résume les trois typologies des décisions des entreprises industrielles sur les trois horizons de décision, court, moyen et long termes.

FIG 1 Typologie des décisions dans les systèmes de production



Les entreprises passives devant certains problèmes de production à moyen et long terme se marginalisent par rapport aux réponses actives proposées par la plupart des

industries. Il s’agit notamment d’investissements importants de développement de leur système productif.
Sur le court terme, il est facile de mettre en évidence les décisions à caractère technique et les décisions de gestion de l’activité de production. Il est par ailleurs intéressant d’observer la dimension humaine à l’interface de ces deux types de décisions.
A moyen terme, des décisions d’ordre socio-technique se distinguent par rapport aux décisions de planification et d’investissements.
Quant aux décisions à long terme, elles s’intègrent dans la stratégie industrielle des entreprises et donc dans leur stratégie globale.

CONCLUSION

L'analyse statistique se limite à l'étude des mécanismes facilement identifiables. Une analyse de données du type qui vient d'être décrit, ne peut expliquer que partiellement des comportements de systèmes complexes. L'aspect dynamique des prises de décisions interactives en production est absent d'une telle méthode qui n'explique pas les relations de causalité dans les systèmes.

Comme le note A. MICALLEF, «une gamme de modèles adaptés aux caractéristiques de l'industrie, ouvre de nouvelles voies vers l'interprétation de la relation structures-comportements-performances» [MIC 85]. C'est une raison pour laquelle, nous avons retenu la simulation informatique de modèles, comme outil d'investigation dans cette thèse.

Chapitre VII

VII. HYPOTHESES D'ENSEMBLE D'UNE MODELISATION GENERIQUE

INTRODUCTION

Il s'agit de décrire les hypothèses «opératoires» ou fonctionnelles[30] de nos modèles.

En s'inspirant d'un schéma conceptuel des systèmes de production, ce chapitre présente la structure de modèles génériques, constituée d'une partie opérante (représentant le système physique) et d'une partie «duale» assurant le pilotage et la transmission de l'information.
Ces modèles de simulation se décrivent par leurs fonctions opérantes et par des schémas cybernétiques traduisant les relations causales et les fonctions de transfert[31] internes.

En fin de chapitre, une discussion sur la validité de ces modèles génériques est développée. Rappelons à ce propos l'absence de lois de comportement de systèmes de production perturbés décrivant les mécanismes de régulation homéostatiques.

Cette phase de conceptualisation des modèles a été présentée de manière synthétique et en cours d'élaboration au 8th International Congress of CAD/CAM and Factory of the future, Metz, Car's FOF, 17-18 Août 1992 [KIE 92] (voir également les références [THI 93a et c]).

[30] au sens de M. MARCHESNAY. D'après cet auteur, ces hypothèses ont pour objet de dégager les «variables pertinentes des modèles qui doivent se mouler dans le moule logico-mathématique, perdant alors toute référence à la vision» [MAR 85].

[31] nous définissons une fonction de transfert comme une relation entre l'amplitude d'un signal sortant S, sur celui d'un signal entrant E. Cette fonction est matérialisée dans les logiciels de simulation que nous utilisons, par une courbe S = f (E).

1. REPRESENTATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Conformément au champ théorique que nous avons retenu dans cette thèse, nous nous appuyerons sur le schéma systémique des systèmes de production, proposé par le LURPA[32]. Il s'agit d'une personnalisation du système général de J-L. Le MOIGNE [MOI 77], à la spécificité des systèmes de production. Ce modèle s'inspire également des travaux de J. MELESE [MEL 80] et a été décrite dans une de leurs communications [BOU 91]: «...à partir du schéma classique du système «entreprise» de J-L. Le MOIGNE constitué de trois parties, système de pilotage (décision), système d'information et système opérant (production), travaux orientés «gestion de l'information», ce même modèle est réutilisé pour représenter un Système Intégré de Production (SIP) avec un flux de produits occupant une place aussi importante que le flux d'informations. Les raisons étant que le produit est la finalité du système de production et la plupart des données manipulées par le système d'information du système de production sont relatives au produit...».

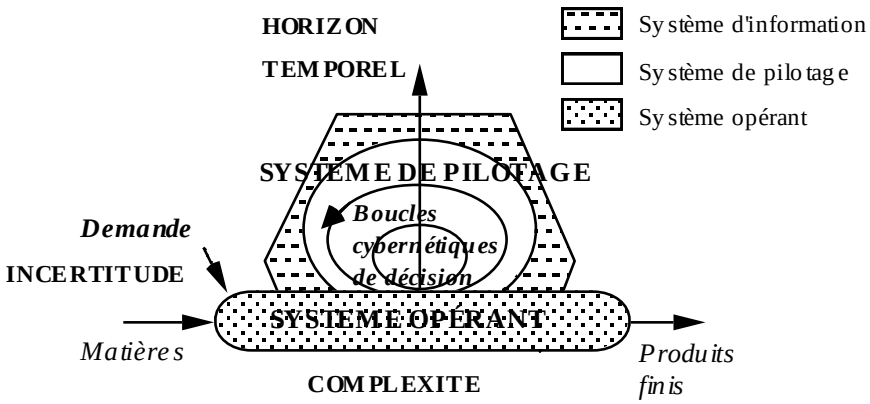
Comme nous l'avions indiqué en fin de première partie, nous souhaitons caractériser les systèmes opérants à partir des dimensions «complexité et incertitude». Ces deux axes ont été identifiés dans la typologie proposée au chapitre II §2 [KIE 86]. Nous l'avons également vérifiée dans notre enquête précédente[33] (voir ch. VI § 2.1.). Pour cette raison, nous allons représenter les systèmes opérants à partir de neuf classes de production distinctes, établies par croisement de ces deux dimensions. Notons que la typologie de l'AFGI convient moins à notre investigation, car elle est orientée vers une décomposition des systèmes de production en structures simples. Nous jugeons ce mode de représentation inadapté à notre problématique exigeant une approche systémique globale.

En résumé, nous proposons de caractériser les systèmes de production à partir de trois dimensions essentielles: la complexité, l'incertitude et l'horizon des décisions (à court, moyen et long termes).
Ces trois dimensions sont quasi-indépendantes et décrivent:
- d'une part la complexité de l'organisation physique du système opérant,
- d'autre part les incertitudes externes sur la demande commerciale et les risques internes de dysfonctionnements en production
- et enfin l'horizon des décisions dans les systèmes de pilotage et d'information.

Ces trois composantes que sont le sous-système opérant, le sous-système d'information et le sous-système de pilotage avec ses boucles cybernétiques représentant les niveaux[34] des décisions, sont mises en évidence dans la figure 1. Les variables de commande agissent sur le sous-système opérant par l'intermédiaire de ces boucles et sur les trois niveaux temporels.

[32] Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée, ENS Cachan.
[33] des étudiants de l'Ecole d'Ingénieurs en Informatique Industrielle de Tours ont retraité ces données différemment et ont également vérifié ces deux axes.
[34] au sens de ANTONY [ANT 65].

FIG 1 Schéma systémique du système de production



Critique de cette représentation

P.R. LAWRENCE et J.W. LORSCH montrent à l'issue d'études empiriques que «les structures organisationnelles ne résultent pas de principes universels, ce qui signifie que chercher le "seuil" moyen pour gérer rationnellement l'entreprise, conduit à fausser complètement les problèmes d'organisation. Leur conclusion tend à faire de l'environnement la seule variable explicative d'une structure organisationnelle (l'environnement étant décrit en termes de marchés recherchés et de technologies à mettre en oeuvre, et étant caractérisé par différentes formes et degrés d'incertitude, de complexité et d'innovation)» [JAM 85]; [LAW 73].
A cette remarque, nous précisons que nous ne recherchons pas dans cette thèse, des principes immuables (et statiques) de fonctionnement des systèmes de production, mais une logique fonctionnelle décrivant leur dynamique interne face aux fluctuations de leur environnement et aux aléas internes.

2. MODELISATION DES SOUS-SYSTEMES OPERANTS

Les caractéristiques des différentes classes de systèmes opérants retenus figurent dans le tableau suivant (fig. 2).
Ce tableau synthétise les propriétés de ces neuf classes en termes de complexité des produits et d'organisation de la production (cf. [KIE 86], voir ch. II §2).

FIG 2 Caractéristiques courantes des différentes classes de systèmes opérants

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	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					

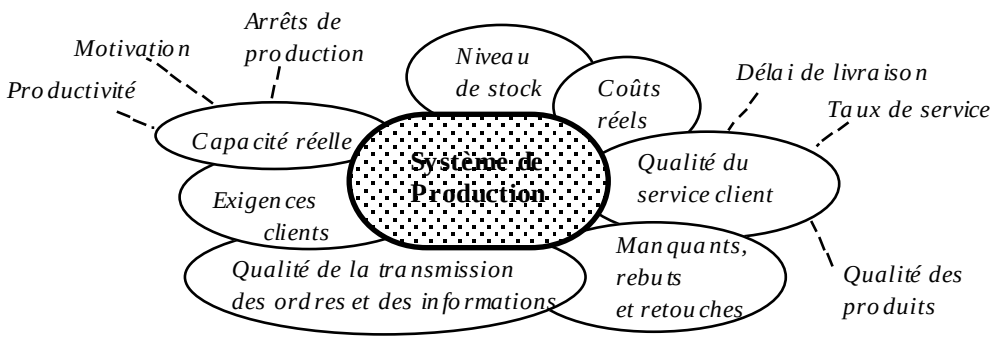
3. MODELISATION DES SOUS-SYSTEMES D'INFORMATION ET DE PILOTAGE

Notre objectif de modélisation consiste à mettre en évidence le comportement dynamique et les boucles de régulation de ces systèmes face à des fluctuations et des aléas divers.

3.1. INDICATEURS

Le schéma de la figure 3 présente les variables influentes dans les systèmes de production. Ces indicateurs ont été relevés dans l'enquête et sont les plus sensibles. Ils seront mesurés de manière continue durant les simulations des modèles pour détecter et réagir devant des dysfonctionnements éventuels.

FIG 3 Les indicateurs du système de production



Les variables de commande sont les suivantes:

Les exigences commerciales, variables exogènes au système de production, peuvent être des commandes clients ou des délais de livraison souhaités par le marché.
Le volume des stocks de produits finis, semi-ouvrés et de matières premières ainsi que la taille des en-cours se contrôlent et se comparent en permanence aux valeurs autorisées.
Les coûts réels de consommation de matières et de main-d'oeuvre se valorisent et se comparent aux dépenses initialement budgétisées.
La qualité de service client se quantifie à partir du respect des délais prévus (taux de service), de la qualité des produits et des services livrés 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 se quantifient également pour évaluer la performance du système de production.

Ces variables ne sont pas toutes indépendantes. En effet, la dégradation du taux de manquants par exemple, explique la baisse de la qualité de service. Cependant il s'agit d'indicateurs sensibles suivis individuellement par les entreprises même si des recherches de corrélation et de co-variances puissent être entreprises à posteriori.

Puis nous définissons des variables d'action[35] ***commandées par des variables de contrôle***[6]**.**

Dans le cadre de notre vision globale des systèmes de production axée sur une problématique «comportementale», nous nous limitons à identifier deux variables macroscopiques d'action dans les systèmes opérants. Ce sont les capacités et les délais de production, qui permettent d'assurer l'efficacité de l'outil productif par rapport aux exigences commerciales. Le rapport entre la capacité brute et la charge nette de production permet de quantifier globalement la productivité. Il a été constaté dans l'enquête précédente que cette variable était la plus contrôlée car elle agit 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 dans le système socio-technique de la production ne se contrôle pas directement. Il influence la qualité de service de l'entreprise et dépend souvent de décisions prises en amont.

3.2. PERTURBATIONS ET INCERTITUDE

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

1. Les entrées extérieures comme les demandes commerciales sont les plus influentes et souvent les plus imprévisibles. Leur incertitude est propre à chaque classe de systèmes de production. Les produits s'élaborent spécifiquement à la commande pour les classes 1, 4 et 7. Les entreprises des classes 2, 5 et 8 constituent des stocks de sous-ensembles standardisés qui sont assemblés par la suite à la commande. Pour les classes 3, 6 et 9, des stocks de produits finis sont constitués sur programme prévisionnel de production anticipant ainsi les ordres clients. Pour le long terme, le marché peut amener l'entreprise à réduire progressivement ses délais de livraison pour rester compétitive.

[35] au sens de B. WALLISER [WAL 77].

2. De manière interne, les variables les plus fluctuantes sont les suivantes:
- la capacité nette de production évoluant 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,
- la difficulté de transmission des ordres et des informations en qualité et en délai,
- 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,...).

3.3. BOUCLES CYBERNETIQUES DE DECISION

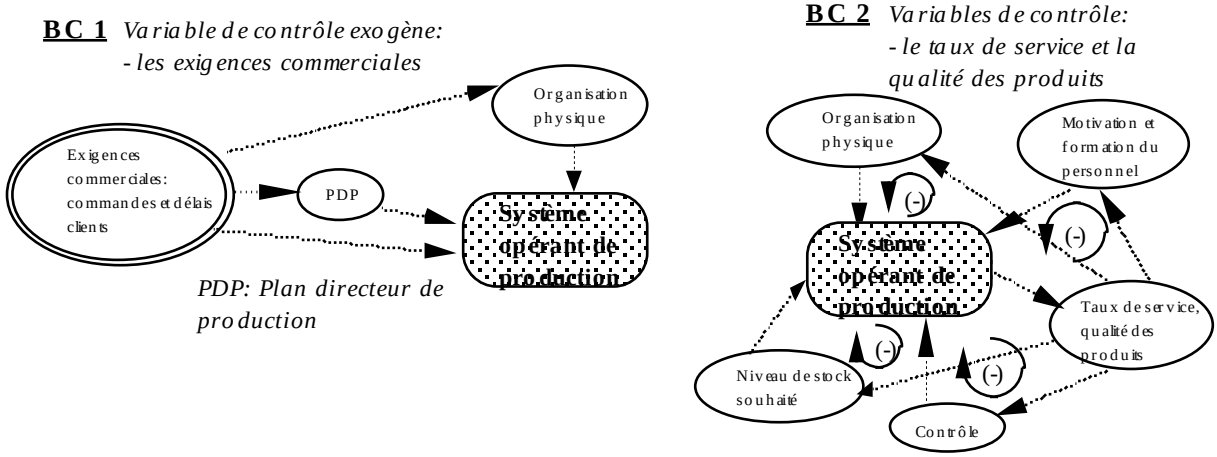
En partant du paradigme énonçant que toute décision est prise à l'intérieur d'une boucle de *feedback* (cf. [FOR 84]), nous associons aux principaux indicateurs de contrôle de l'activité, les mécanismes de décision dans les systèmes de production. Ceci nous permet de conceptualiser huit types de boucles de *feedback* élémentaires et couplées.

Les schémas suivants représentent les chaînes causales associées à ces boucles. Ces représentations sont simplifiées, une description plus détaillée en sera donnée au chapitre VIII.

Les figures 4 décrivent les mécanismes de commande du sous-système opérant par des variables de contrôle. Dans ces schémas, les boucles ne tiennent pas compte de l'horizon de la décision. Les macromodèles seront par la suite spécifiques aux différentes classes de systèmes de production et à l'horizon décisionnel.

FIG 4 Huit types de boucles élémentaires de feedback dans les systèmes de production

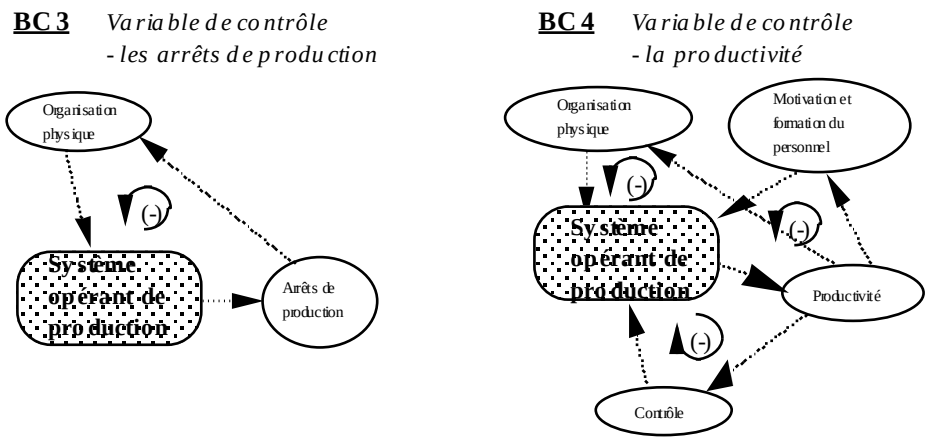
FIG 4-1 Boucles BC1 et BC2



La boucle BC1[36] modélise les mécanismes de décision face à de nouvelles exigences commerciales. Ces indications entraînent une action sur le plan de production et la capacité productive. Elles peuvent également remettre en cause l'organisation physique des ateliers par des actions ponctuelles ou engendrer leur remise en cause totale.

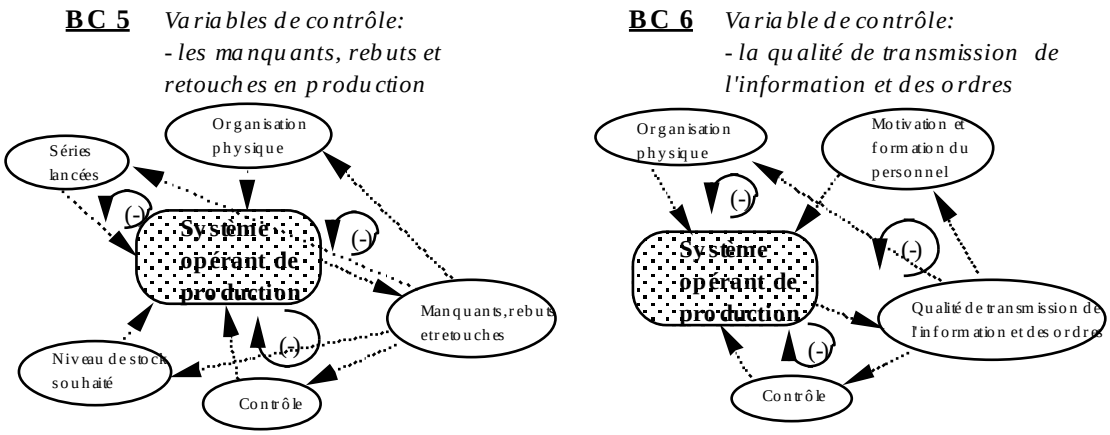
La boucle BC2 représente les fonctions du système de pilotage devant une dégradation de la qualité du service. En cas de mauvaises livraisons en quantité, qualité et délai, une action rapide s'effectue en augmentant les contrôles ou en modifiant les plannings. Il est également observé une remise en cause des méthodes de travail ou une tentative d'amélioration de la motivation du personnel.

FIG 4-2 Boucles BC3 et BC4



Les boucles BC3 et BC4 modélisent le processus de décision en cas de baisse de la productivité et en cas d'arrêts de production. Dans ces circonstances, il est fréquemment observé des augmentations de la capacité de production, des actions progressives de formation du personnel ou encore une modification de la topologie des ateliers. Beaucoup d'entreprises intensifient également leurs contrôles en cas de baisse de productivité.

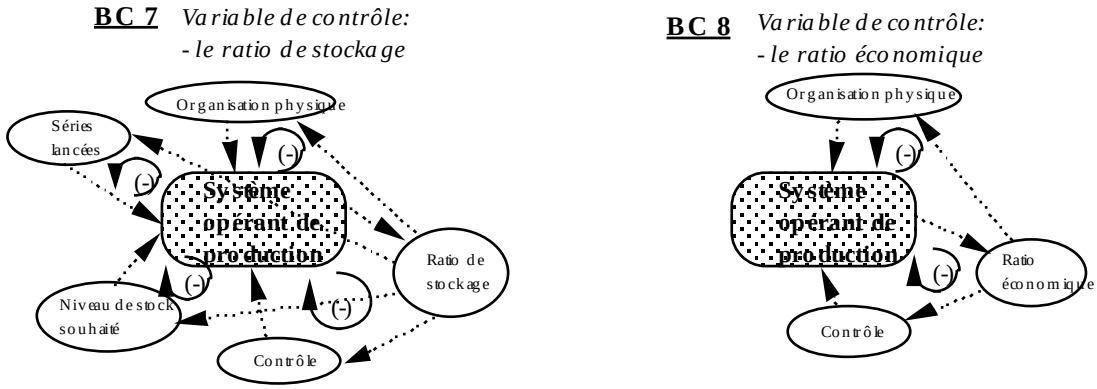
FIG 4-3 Boucles BC5 et BC6



[36] on remarque que le mécanisme BC1 est en boucle ouverte.

Les boucles BC5 et BC6 représentent le comportement des entreprises face à des problèmes de qualité et face à des dysfonctionnements internes liés à l'augmentation des manquants et à la mauvaise circulation des informations et des ordres. Dans ces cas, des contrôles ou des modifications de l'organisation de leur système opérant sont effectués. Des actions éventuelles sur la politique de lancement et sur le niveau de stock sont également observées (BC5).

FIG 4-4 Boucles BC7 et BC8



En cas de variation significative du niveau de stock par rapport à un seuil déterminé, les entreprises intensifient leur contrôle de gestion ou remettent globalement en cause leur logique de planification (BC7). Dans les boucles BC8, en cas de variation des coûts réels de production par rapport à un coût budgétisé, 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.

Types de contrôle dans les boucles

Le contrôle par *feed-forward* permet de réguler un système par une action par l'aval, par exemple en ajustant l'effectif de production à partir d'un plan de ventes. 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 pas encore transmis jusqu'à elle.

Compte tenu de ces remarques, BC1 est une boucle ouverte de régulation par *feed-forward* ou par anticipation.

Le contrôle par *feedback* permet de renvoyer l'information en direction des variables de contrôle qui influent directement sur la variable contrôlée, origine et cause de la modification. C'est le cas des autres boucles élémentaires présentées (BC2 à BC8).

Un contrôle par *feedback* positif conduit à écarter en permanence une variable d'une valeur de référence alors qu'un contrôle par une boucle négative permet de ramener perpétuellement cette variable vers une valeur de référence. Les boucles fermées des figures 4 prises séparément, sont toutes des boucles homéostatiques de polarité négative. Elles ont un gain global négatif et sont autorégulatrices. Leur ordre est fonction du nombre de niveaux de chaque sous-système opérant.

En réalité, le nombre de boucles des modèles génériques complets est nettement plus important puisque ces boucles élémentaires agissent pour la plupart sur les mêmes variables, ce qui crée d'autres boucles de contrôle.

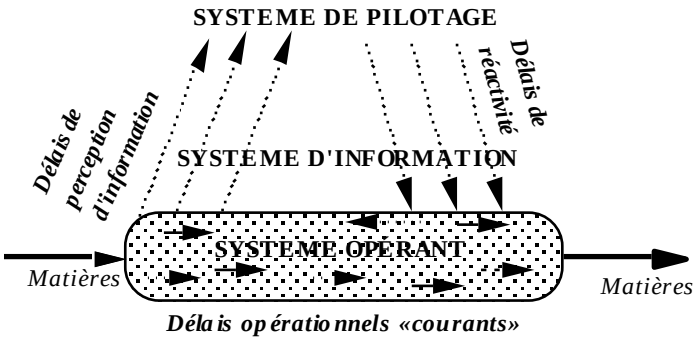
3.4. VARIABLES AGISSANT SUR LE SOUS-SYSTEME OPERANT

La réorganisation physique du système opérant améliore les délais de production et agit également sur leur réactivité globale.
Le plan de production PDP des boucles de types BC1, BC2, BC3 et BC4 indique les dates prévisionnelles de début et de fin des ordres et détermine la capacité de production des différents postes.
La motivation agit sur l'efficience et la productivité. La formation 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 d'élaborer une politique de lancement en fixant la taille des séries de production.

3.5. HYPOTHESES SUR LES DELAIS

Comme le montre la figure 5, nous distinguons trois types de délais dans les modèles:
1. Les délais opérationnels «courants» observés dans l'écoulement des flux physiques de production,
2. les délais de perception et de prise d'informations dans les variables de contrôle qui assurent le pilotage du système opérant,
3. et les délais de réactivité de l'organisation industrielle correspondant aux durées de «réajustement» de l'activité suite à des perturbations internes ou externes.

FIG 5 Trois types de délais dans les systèmes de production



4. AGREGATION DES MODELES

Les figures 6-1, 6-2 et 6-3 représentent les modèles génériques de pilotage des systèmes de production. Ces schémas s'élaborent à partir d'une agrégation des boucles de décision précédentes sur trois horizons de décision, les court, moyen et long termes.

FIG 6-1 Macromodèle de pilotage du système de production

COURT TERME

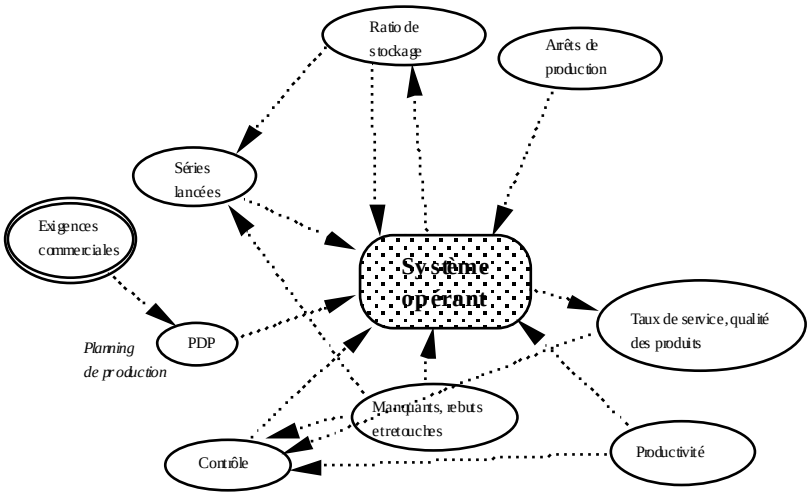


FIG 6-2 Macromodèle de pilotage du système de production

MOYEN TERME

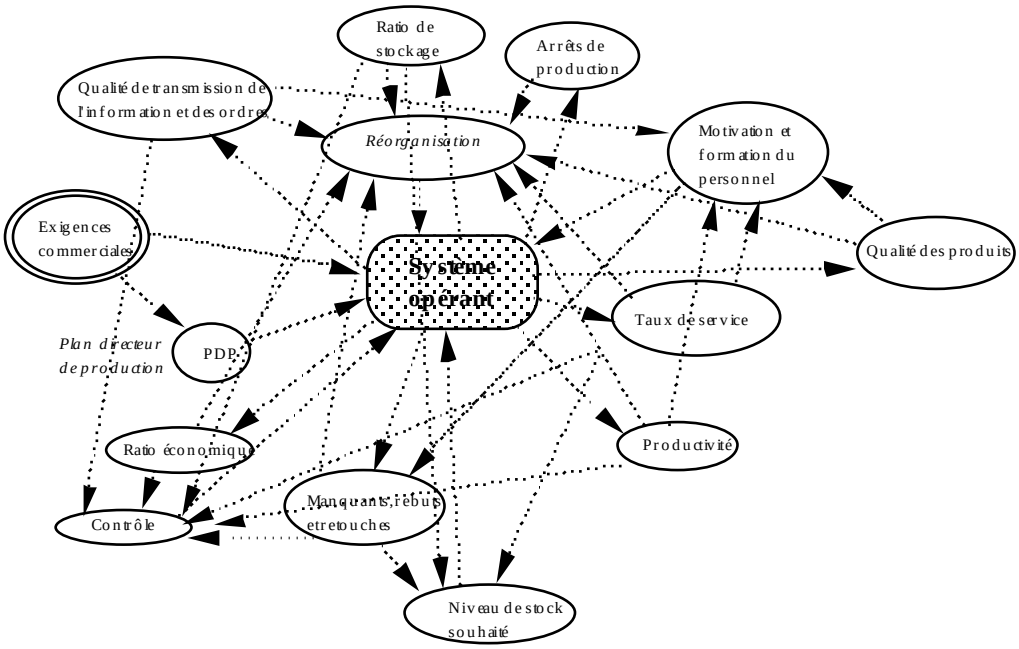
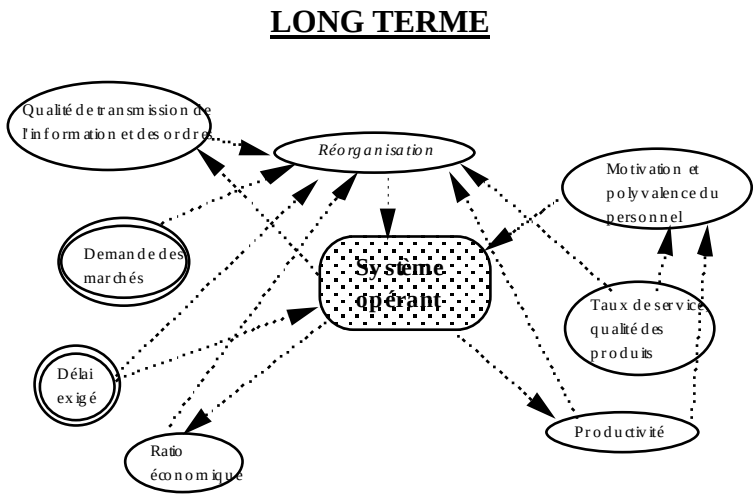
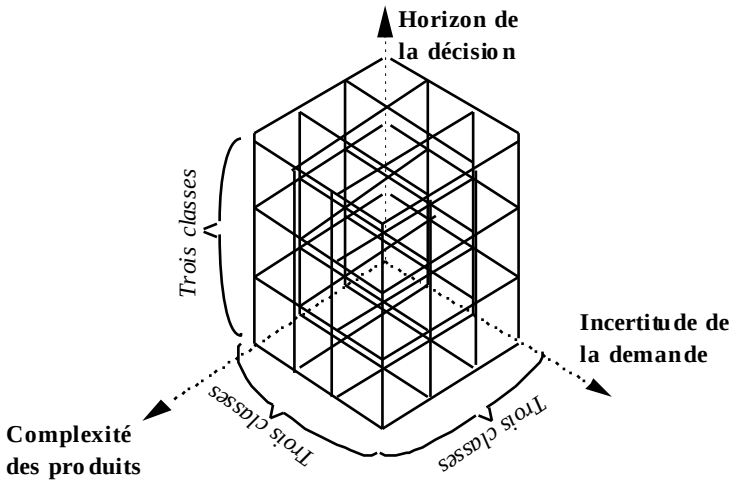


FIG 6-3 Macromodèle de pilotage du système de production



Les modèles de pilotage sont complétés par des modèles de systèmes opérants[37] pour constituer les macromodèles complets.
En théorie, il est donc possible de concevoir 27 types de modèles de production (neuf classes multipliées par trois horizons, voir figure 7).

FIG 7 Les vingt-sept modèles génériques



Il faut remarquer qu'aucune liaison n'est assurée entre les différents strates de ces modèles hiérarchiques. Ceci s'explique par la complexité de mise en oeuvre d'un transfert automatique de valeurs de variables entre des modèles fonctionnant avec des bases de temps différentes[38].

[37] correspondant respectivement aux neuf classes définies au chapitre II § 2.

[38] se référer par exemple, à la thèse de C. MERCE [MER 87] vérifiant la cohérence des décisions en planification hiérarchisée.

5. VALIDATION DES MODELES[39]

Au niveau méthodologique, nous nous référons aux conseils de [WAL 77] sur le processus de généralisation des modèles qui consiste à élargir le champ de validité par rapport aux quatre paramètres suivants, l'objectivité, l'universalité, la permanence et la globalité[41] des modèles. Le processus d'induction a consisté à remplacer un ensemble de «modèles» et de conjectures issus de l'analyse qualitative des systèmes de production, par un modèle qui soit plus universel.
Nos modèles basés sur certaines mesures subjectives, ont subi un premier test qui a consisté à vérifier si les comportements observés étaient plausibles[42], tout en soulignant les limitations éventuelles qu'elles peuvent impliquer pour l'usage que l'on fera du modèle.
La démarche globale de validation de nos modèles est schématisée dans la figure 1 du chapitre I.
D'après J. LEROUDIER, les modèles doivent être validés structurellement, fonctionnellement et doivent être robustes [LER 80]. La structure de ces modèles a été conçue à l'aide d'une approche qualitative des systèmes de production qui a permis une compréhension partielle de mécanismes de décision par un audit systémique suivie d'une enquête intensive. Une conceptualisation de ces connaissances a conduit à des schémas cybernétiques de décision et des modèles génériques. Ces modèles seront simulés et leurs comportements analysés à partir d'un scénario basé sur les valeurs "nominales" des variables de contrôle essentielles (faiblement perturbé). Cette démarche nous permet de tester d'une part, le fonctionnement des modèles et d'autre part, leur robustesse.
Enfin, nous retenons également comme jugement de validité de nos modèles, un référentiel basé sur nos expériences professionnelles, les résultats de l'enquête auprès des entreprises ainsi que l'examen critique de différents experts[43]. Les conseils de validation des modèles de dynamique des systèmes proposés par G. P. RICHARDSON [RIC 81], nous ont aussi été utiles.

6. HYPOTHESES DE SIMULATION

6.1. TYPES DE SIMULATION

Pour éviter toute mauvaise interprétation, il est nécessaire de souligner à nouveau que ne nous nous intéressons qu'aux seuls mécanismes décisionnels de régulation dans des systèmes de production perturbés en univers incertain. Comme l'illustre la figure 8, nous proposons deux approches possibles de la simulation de ces modèles.

---

[39] Le problème de la validité d'un modèle cognitif est d'ordre épistémologique. En effet, la validité du modèle est chose relative, et doit être associée à la validité de ses objectifs. Le jugement sur cette validité reste néanmoins subjectif.

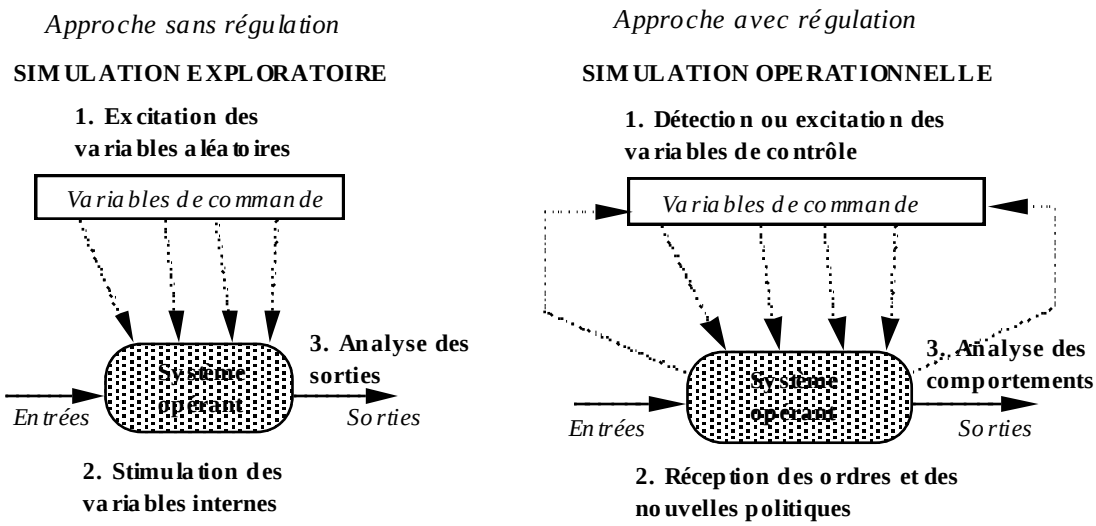
[40] Le problème de la validité d'un modèle cognitif est d'ordre épistémologique. En effet, la validité du modèle est chose relative, et doit être associée à la validité de ses objectifs. Le jugement sur cette validité reste néanmoins subjectif.

[41] «la notion de globalité postule que le tout est autre chose et quelque chose de plus que la somme de ses parties», d'après P. GUILLAUME [GUI 79].

[42] J. POPPER note que «de telles mesures ne sont pas absurdes si elles sont faites avec honnêteté et rigueur».[POP 73].

[43] comités scientifiques de congrès, comités de lecture de revues qui ont acceptés nos articles et membres de groupe de travail AFCET.

FIG 8 Deux approches de la simulation



Remarque: Les trois étapes du déroulement de la simulation sont numérotées.

Avant de les décrire plus précisément, rappelons les notions de commande dans les automatismes. La partie commande d'un système automatisé fournit des ordres à la partie opérative laquelle fournit à la partie commande les informations relatives à l'état d'avancement des opérations commandées. Un système automatique est donc un système bouclé [CET 82]. La commande en boucle ouverte se limite à transmettre une consigne à la partie opérative sans retour d'information de sa part.

· ***Simulation exploratoire***

L'approche sans régulation considère le système opérant comme passif[44] et l'«excite» simultanément de façon aléatoire à partir des huit variables de commande que nous avons définies comme indicateurs sensibles dans les systèmes de production (voir ch. VII § 3.1.). Le système opérant est considéré comme une boîte noire avec des entrées de matières, de commandes clients et des informations de pilotage qui guident la politique de production. Les sorties sont des flux de produits finis et d'informations qui n'agissent pas sur les politiques et qui sont analysées pour évaluer par exemple, la dégradation du nombre de commandes non livrées. Dans ce type de modèle, la charge de travail n'est pas considérée comme une variable de contrôle. L'objectif de nos modèles n'étant pas la planification optimale des capacités, nous supposons disposer de moyens suffisants[45] correspondant aux besoins planifiés. Cette remarque conduit à considérer dans ces modèles, que le degré de polyvalence du personnel n'agit pas sur les capacités des différents postes de charge par transferts internes de personnels. L'intérêt de cette approche est de simuler différentes politiques de production sans boucle de *feedback* au niveau décisionnel. Cette démarche permet d'étudier les comportements de modèles passifs, soit pour apporter une aide à la conception de nouveaux systèmes de production, soit pour améliorer des systèmes existants.

· ***Simulation opérationnelle***

[44] au sens décisionnel.

[45] capacité considérée comme infinie.

La deuxième approche avec régulation est plus représentative des systèmes réels. Les indicateurs de contrôle perçoivent de façon continue des informations du système physique ou des ordres ou informations extérieurs telles que les commandes des clients par exemple. Un certain nombre de variables directement commandées modifient en permanence les politiques de production. Le système opérant reçoit donc des informations ou des ordres, en émet vers les indicateurs de contrôle qui agiront à nouveau sur la politique.

· ***Conclusion***
Le problème posé est de savoir quelle approche utiliser. Plutôt que de tenter de justifier analytiquement ce choix, il est nécessaire de se rapprocher de la réalité objective des systèmes.
A court terme, a-t-on vraiment la possibilité de réagir ? Il s'agit d'une question de vitesse de réaction d'une organisation devant un événement soudain. Le temps nécessaire pour agir sur la variable contrôlée avant l'apparition d'un nouvel aléa est souvent trop long. Par exemple en cas de croissance du nombre de livraisons non livrées à temps, les contrôleurs de production[46] accélèrent leurs actions sur le système opérant, mais le délai nécessaire à l'action est supérieur au temps de génération d'un nouveau retard de livraison. Cette remarque permet de déduire qu'il est difficile de parler réellement de régulation à court terme des systèmes de production soumis à des événements imprévus. Une régulation efficace ne peut être atteinte que par une très grande réactivité (encore difficile à mettre en oeuvre dans nos entreprises).
Suite à ces remarques, nous avons retenu comme hypothèse que les modèles à court terme ne comportent pas de régulation homéostatique. Nous analyserons donc l'effet des variables de commande sur le système opérant sans pouvoir réagir par rétroaction sur les causes. Les modèles court terme sont donc de type exploratoire et les valeurs des variables de commande seront activées par les résultats de tirages de nombres au hasard suivant leur distribution statistique la plus probable. Ces modèles ne sont donc pas des modèles à *feedback* mais des modèles à «boucles ouvertes».

A moyen et à long terme, les systèmes remettent en cause leur politique et agissent continuellement sur les variables de contrôle. Ces variables ont des tendances qui évoluent fréquemment de manière monotone. Les variables de commande dans ces modèles contrairement au court terme, sont considérées comme dépendantes d'autres variables internes du système. Les mécanismes de décision sont donc «bouclés»..

Notons enfin que nous n'aurons pas ici de démarche étiologique, les liens de causalité observés entre les différentes variables résulteront de nos observations sur le terrain[47].

6.2. HYPOTHESES SUR LES VARIABLES DE COMMANDE

A moyen et à long terme, plusieurs variables de commande ne dépendent pas directement d'autres variables du modèle de production. La raison en est qu'elles font partie d'autres (sous-) systèmes de l'entreprise industrielle. Elles sont donc en quelque sorte endogènes au système "global" et en partie exogènes au système de production (donc indépendantes).

[46] souvent dénommés «suiveurs de pièces».
[47] approche expérimentalo-inductive.

C'est le cas du taux de qualité de transmission de l'information et des ordres qui s'intègre dans les différents systèmes d'informations de l'entreprise. Nous estimons que le taux d'arrêts de production dépend essentiellement du comportement humain et du style de management social, de la fiabilité des équipements et de leur «degré» de maintenance, ainsi que des attentes diverses causées par des manquants ou des «trous» de charge par exemple. Le taux de manquants est fonction du système logistique des approvisionnements et de la qualité. Le ratio coût réel sur coût prévu provient du système de gestion comptable et en particulier des coûts de structure de l'entreprise.

En conséquence, les valeurs de ces différentes variables seront générées par des tables de nombres au hasard.

CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les choix effectués pour modéliser les systèmes de production en se fondant sur l'objectif cognitif que nous sommes fixés. Cet objectif consiste à bâtir différents modèles génériques de manière à pouvoir réaliser des études comparatives entre les différents comportements simulés. Pour cela en nous situant à un niveau d'agrégation élevé[48], les systèmes opérants ont été caractérisés physiquement par leurs types de flux et de produits, la taille de leurs séries, leur type d'organisation (en lignes, en sections, ...).
Par rapport à notre problématique de recherche, nous avons plus particulièrement développé la modélisation des systèmes d'information et de pilotage. Des boucles de *feedback* ont été conceptualisées à partir de huit indicateurs les plus sensibles dégagés de l'enquête préalable. Ces huit variables commandent individuellement ces différentes boucles de régulation.
Trois horizons de décision ont également permis de hiérarchiser les modèles.

Enfin, nous avons insisté sur la difficulté de validation de tels modèles. Rappelons que nous ne disposons pas de lois de comportements de ces systèmes complexes, ce qui rend le processus de validation beaucoup moins «rationnel» (cf. conseils de J.W. FORRESTER). La validation structurelle et fonctionnelle des modèles sera effectuée durant la phase de simulation et la robustesse sera vérifiée en se basant sur une étendue de variabilité réaliste des données des systèmes.

[48] conforme à nos objectifs.

Chapitre VIII

VIII. PARTICULARITES DE MISE EN OEUVRE DE MODELES GENERIQUES

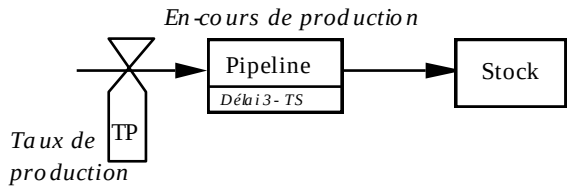
INTRODUCTION

Ce chapitre expose tout d'abord le principe de la modélisation «continue» des systèmes opérants. Puis il explicite précisément les relations de causalité entre les variables de pilotage et ceci sur les trois horizons de décision.
L'annexe 4a présente à titre d'exemple, le modèle générique détaillé des systèmes d'assemblage à la commande (classes 2 et 5) à court terme.

1. MODELES DE SYSTEMES OPERANTS

Dans les modèles de la dynamique des systèmes, l'espace des états est continu dans un espace temporel continu (discrétisé lors de la simulation). Nous retenons la représentation de la figure 1 pour modéliser le processus "production-stock" de certaines classes de systèmes opérants.

FIG 1 Modélisation du processus production-stock



Variables

TP = taux de production
TS = taux d'alimentation du stock
PIPELINE = niveau des encours
STOCK = niveau de stock
DELAI3 = délai de production conservatif exponentiel d'ordre 3

Equations caractéristiques

Niveau

$$PIPE(t+dt) = PIPE(t) + (TP - TS)\,dt$$

Taux

$$TS = DELAI3(TP, délai\ moyen)$$

Le pipeline représente l'encours de production qui se "vide" dans le stock suivant un délai exponentiel d'ordre 3. Nous utilisons les symboles de FORRESTER pour cette représentation (voir les annexes 4b, 4c et 4d).

1.1. MODELES COURT TERME

Les systèmes opérants organisés en sections (classes 7 et 8), de façon anarchique (classe 4) ainsi que les systèmes de la classe 1 (entreprises d'ingénierie par exemple) se modélisent sur la base de flux discrets. Dans notre cas de modélisation continue, le

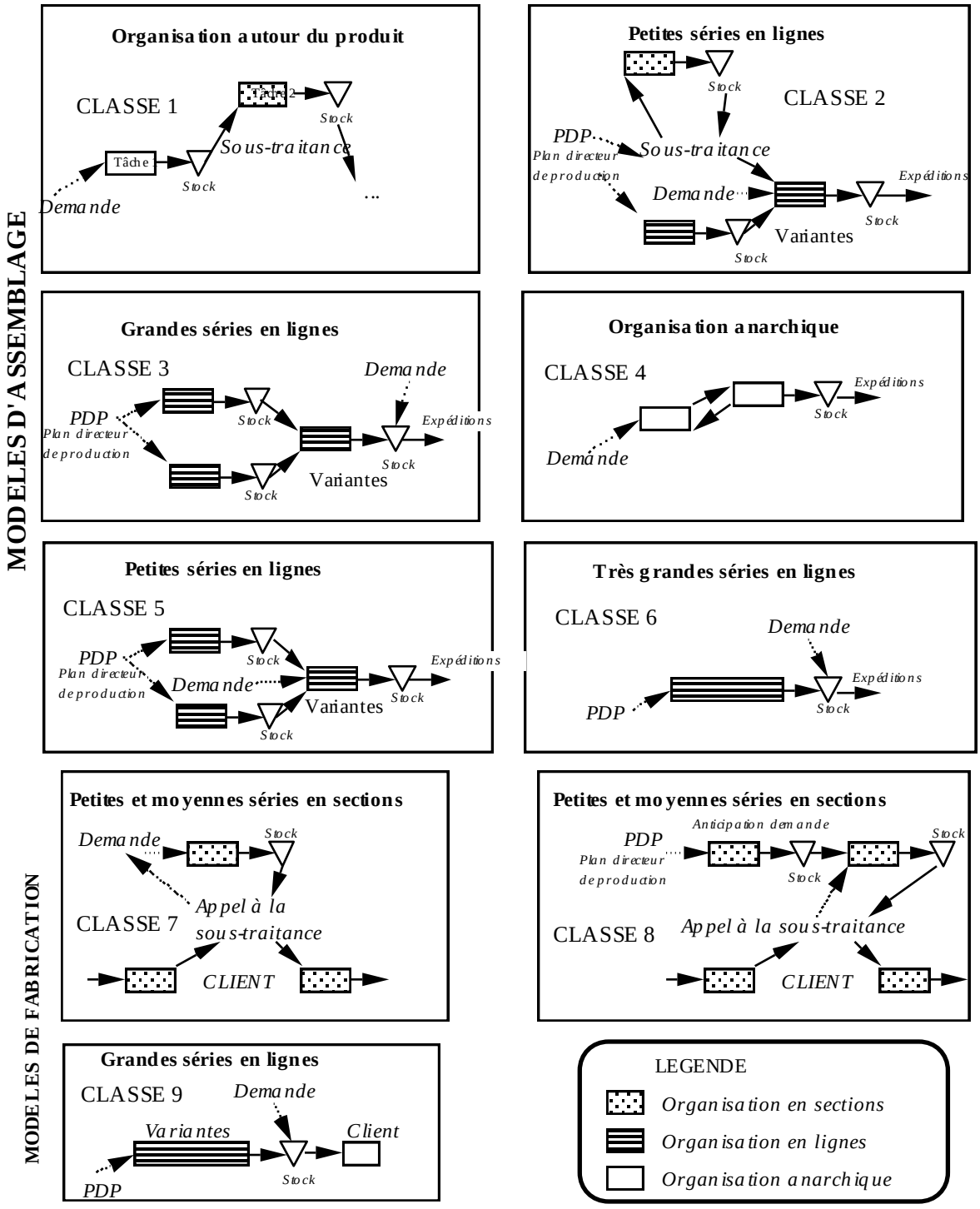
flux est rendu discontinu par des méthodes lourdes à mettre en oeuvre (tests logiques, boucles de retour, divisions par dt, ...).
Ceci explique la difficulté de modéliser un flux discret avec un logiciel de simulation continue (en simulation discrète, un poste de travail traversé par un flux discontinu se définit simplement par sa capacité).

Les organisations en lignes continues des classes 2, 3, 5, 6 et 9 se représentent par des modèles à flux continus.

La figure 2 représente les premiers modèles que nous avons élaborés. Seules les caractéristiques essentielles des systèmes opérants sont modélisées. Par rapport à notre objectif de recherche, cette représentation est suffisante pour déterminer des relations entre la structure de ces sous-systèmes et les comportements observés au niveau global du système de production.

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

FIG 2 Modèles court terme des différentes classes de systèmes opérants



1.2. MODELES MOYEN ET LONG TERMES

Dans une optique de planification à moyen terme, les modèles élaborés intègrent l'ensemble des postes de charge et des caractéristiques des produits de l'entreprise (nomenclatures et gammes). A long terme, il en est de même pour l'élaboration d'un

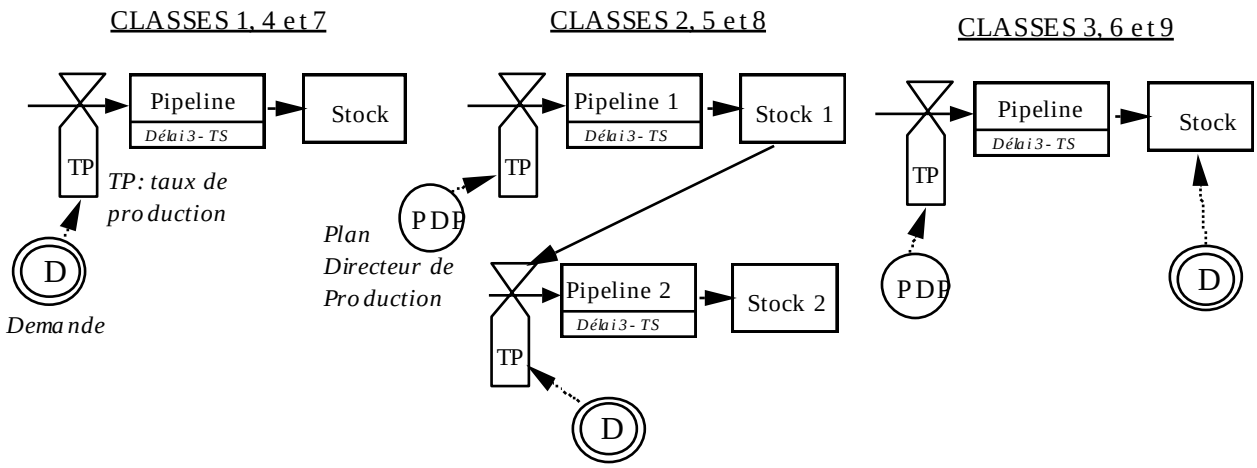
plan industriel se basant sur des macro-produits, macro-nomenclatures et macro-gammes.

Rappelons que notre recherche s'intéresse à la compréhension des mécanismes décisionnels, ce qui nécessite toutefois la représentation complète du système de production avec ses trois composantes, le système opérant et les systèmes d'information et de pilotage. Le système opérant est nécessaire à la «fermeture» des boucles cybernétiques par des mesures continues de terrain (délais, stocks et charges réelles par exemple).

A moyen et à long terme, nous représentons le modèle opérant comme une boîte noire avec comme intrants et extrants des flux de matières. A ces niveaux hiérarchiques de décision, le caractère discret et précis des événements n'a plus d'intérêt dans la mesure où les caractéristiques globales du système de production évoluent de façon continue dans le temps. Le système opérant se représente donc par un modèle unique à flux continu. Ce modèle de base suffit à répondre à l'objectif du système consistant, après valeur ajoutée, à constituer un stock de produits ouvrés ou semi-ouvrés. Comme dans la plupart des entreprises industrielles que nous avons observées, la base de temps est le mois pour le moyen terme et l'année pour le long terme. La variable exogène du système est la demande commerciale.

A moyen terme, comme le montre la figure 3, les systèmes opérants se distinguent par le mode de réponse au marché[49] de chacune des classes.

FIG 3 Modèles des systèmes opérants à moyen terme



A long terme, la production s'organise à partir d'un plan d'entreprise basé sur les prévisions d'évolution des différents marchés. Le système opérant est donc piloté «directement» par les variables exogènes. La figure 3 correspondant aux classes 1, 4 et 7 à moyen terme, symbolise le modèle opérant que nous retenons pour un horizon long terme.

[49] au sens défini par l'AFGI [RFG 89] (voir première page du questionnaire en annexe 1). La dimension «incertitude» caractérise le mode de réponse au marché dans la typologie des systèmes de production proposée par J-P. KIEFFER et Y. GOUSTY [KIE 88].

Nous remarquons que la spécificité de chacune des classes à moyen et à long terme se situe essentiellement au niveau du système de pilotage et des différentes caractéristiques des *inputs* (demandes fluctuante et saisonnière, plan directeur de production,...).

2. MODELES DE SYSTEMES DE PILOTAGE

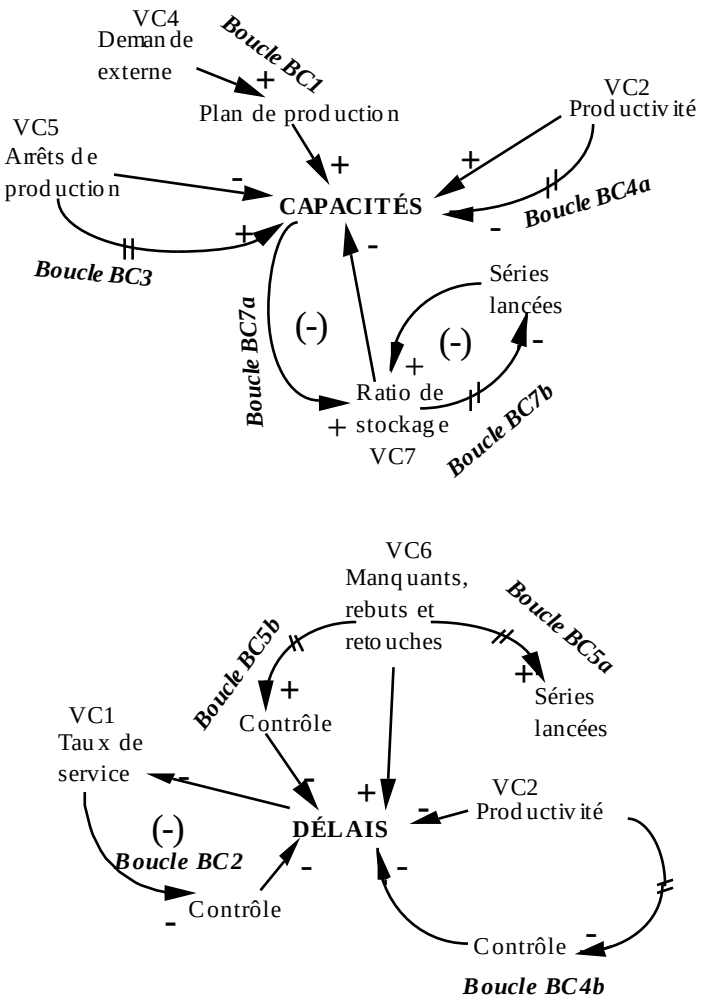
2.1. MODELES COURT TERME

Dans ces modèles, les seules variables de commande qui font l'objet d'une mesure continue, sont le taux de service VC1 et le ratio de stockage VC7. La mesure du taux de service s'effectue en divisant le quantités de produits livrées par rapport aux quantités prévues sur plan. Le ratio de stockage représente le rapport entre le volume du stock réel sur le volume du stock objectif. Comme nous l'avions présenté au chapitre VII dans la figure 4-1, les boucles BC2 sont commandées par le taux de service et agissent au travers de ces boucles, sur les délais de production. Dans la figure 4-4 (ch. VII), il s'agit du ratio de stockage qui influence les capacités de production, par les actions de ces boucles de régulation BC7.

Les autres valeurs des variables de contrôle se génèrent durant la simulation par un tirage au sort de nombres au hasard. Chaque variable se décrit par sa distribution de probabilité subjective découlant de l'enquête préalable complétée par des choix «heuristiques». Il ne s'agit pas d'une simulation stochastique de type MONTE CARLO. En effet, les différents tirages aléatoires initialisent certaines variables aléatoires pour résoudre les équations temporelles aux différences finies. Il ne s'agit donc pas de mises à jour successives de variables comme en simulation discrète. Les différentes valeurs des variables de contrôle ne dépendent que des résultats de tirages au sort, ce qui signifie qu'aucune autre variable du modèle ne les influe directement ou indirectement. D'après cette hypothèse, ces variables de contrôle à court terme sont analogues à des variables extérieures aux systèmes assurant la commande dans les modèles élaborés. Comme nous l'avions observé lors de l'enquête préalable ainsi que dans nos expériences professionnelles, la plupart de ces indicateurs de contrôle suivent une distribution de probabilité normale (avec une moyenne et un écart-type connus) ou une distribution de Poisson pour les phénomènes aléatoires. En ce qui concerne les mécanismes de régulation mis en oeuvre par des variations des valeurs de ces variables de commande, ils ont été décrits dans les figures 4-1 à 4-4 du chapitre VII.

La figure 4 décrit précisément les relations causales entre les différentes variables du modèle générique, d'après les hypothèses d'ensemble établies au chapitre précédent, notamment:
- les boucles de *feedback* avec leur variable de commande,
- les variables agrégées d'actions sur les systèmes opérants qui sont les capacités et les délais de production.

FIG 4 Diagramme causal à court terme



Les relations de causalité représentées par des arcs, sont «polarisées» et représentent le sens algébrique de la relation. En cas de lissage de la variable causant un effet, l'arc est barré par deux traits. Les graphiques de l'annexe 3a présentent les fonctions de transfert dans les modèles. Elles définissent les relations non-linéaires entre différentes variables.

Sorties objectifs des différentes classes de système de production

Classes 1 et 4. L'objectif essentiel consiste à respecter les délais des différentes tâches sur tout le cycle de fabrication (respect du PERT).

Classes 2 et 5. Il s'agit de constituer suffisamment de stock de sous-ensembles et de composants pour permettre de les assembler à la commande. En fin de cycle, l'objectif est de respecter les délais.

Classe 3. L'objectif est de posséder un stock suffisant pour satisfaire les demandes des clients.

Classe 7. Le respect des délais est impératif pour cette classe de sous-traitance à la commande.

Classe 8. L'objectif de cette classe est de respecter les délais courts des commandes en constituant un stock d'anticipation de produits standards.

Classe 9. Cette classe a les mêmes objectifs que les classes 3 et 6, les stocks de produits finis devant être disponibles à tout moment. Les sous-traitants de cette classe ont tendance à disposer d'un stock de sécurité plus élevé pour éviter la rupture.

A ce niveau de détail, contrairement aux modèles décrits au chapitre précédent, il est tenu compte de la spécificité de chaque classe. Les boucles sont donc modifiées en conséquence.

2.2. MODELES MOYEN TERME

Les mécanismes assurant le pilotage dans les systèmes de production sont décrits par les boucles cybernétiques de la figure 4 du chapitre VII. La figure 5 suivante présente les relations causales dans les modèles génériques de moyen terme.

FIG 5 Diagramme causal à moyen terme

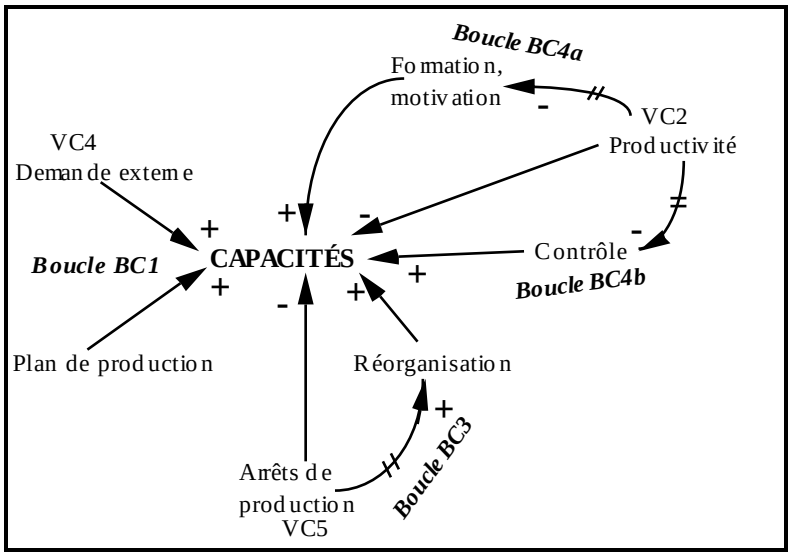
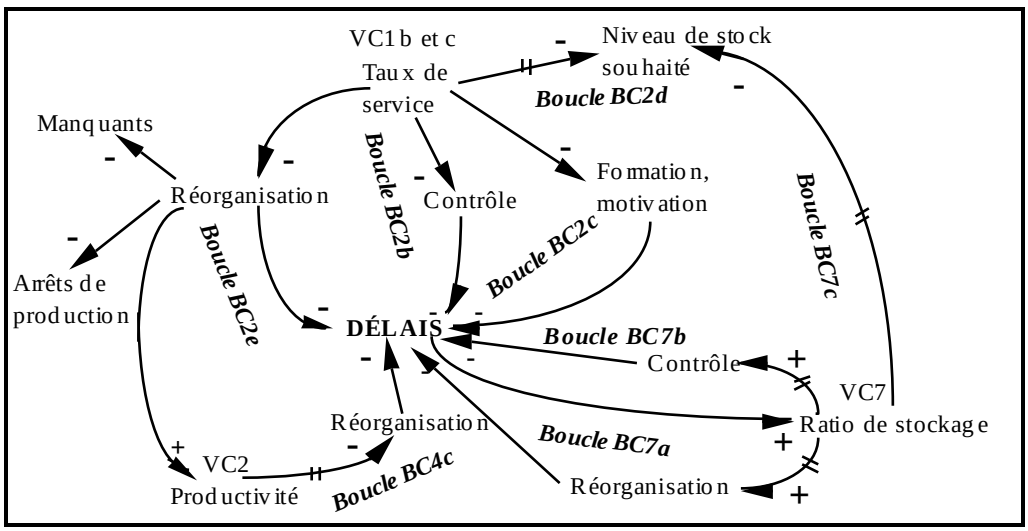
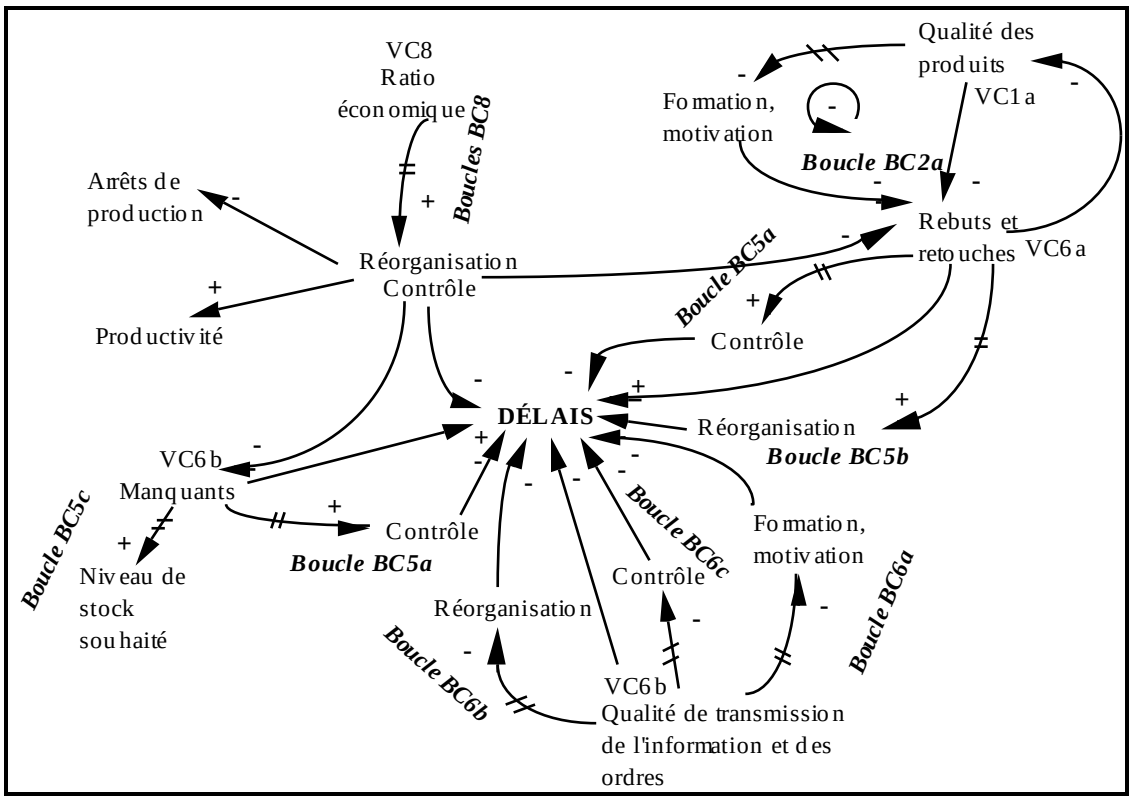


FIG 5 Diagramme causal à moyen terme (suite)



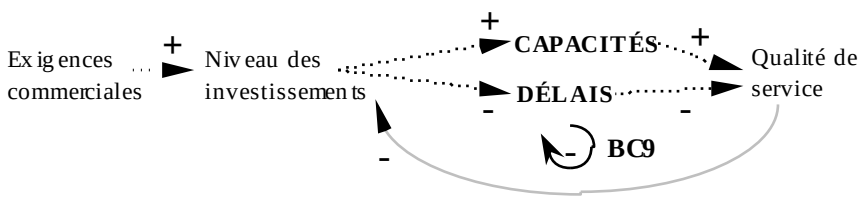


2.3. MODELES LONG TERME

A long terme, les divers comportements des industries dépendent des ressources intrinsèques des entreprises et de leur capacité de financement ainsi que des risques pris par leur dirigeant. En effet, les décisions essentielles en production portent sur l'investissement et de ce fait, concernent l'ensemble de l'entreprise. La spécificité des différentes classes de systèmes de production n'est pas liée aux caractéristiques propres des divers systèmes opérants mais à la manière d'agir à long terme devant des aléas et des dysfonctionnements divers. Ces actions essentiellement financières, portent sur des investissements productifs en équipements et en réorganisation industrielle.

Le principe de l'investissement à long terme est représenté par le schéma causal ci-dessous (fig. 6). Les variables exogènes sont les exigences des marchés en volume et en délai.

FIG. 6 "Contrôle" des investissements à long terme



On constate l'apparition d'une nouvelle boucle homéostatique (négative) BC9 dont le rôle est d'adapter l'investissement à la qualité de service.

La figure 7 présente en détail les modèles de long terme et leurs différentes boucles de régulation.

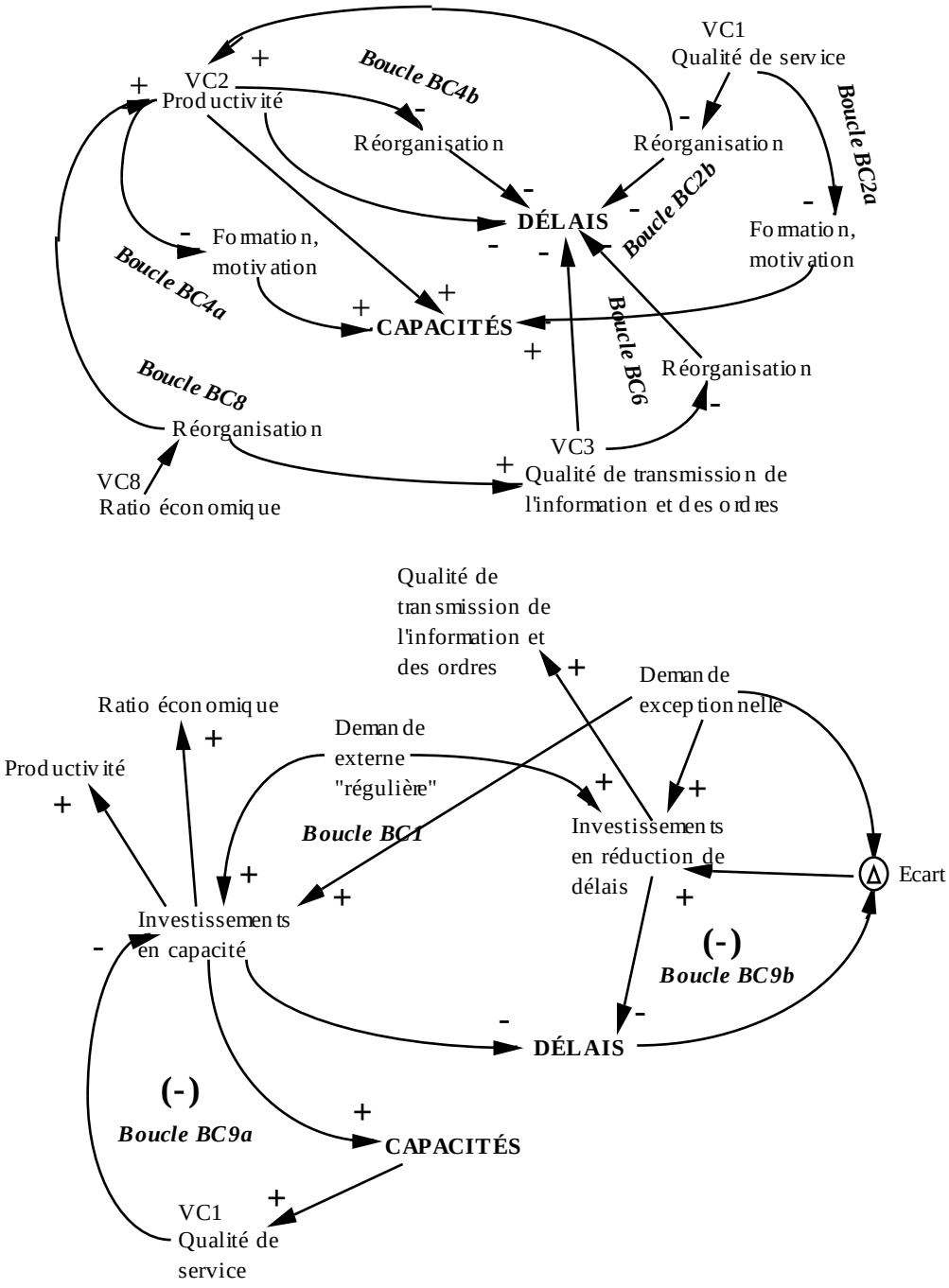
Les modèles seront simulés à partir de choix de politiques industrielles permettant de répondre à l'exigence des marchés. Nous retenons trois comportements en matière d'investissement à long terme. Ce choix a été justifié par ailleurs dans [THI 90].

· *Politique 1 d'évolution continue à faible risque* qui est la plus fréquente dans les classes 1, 2, 4 et 5.

· *Politique 2 d'évolutions discontinue et répétitive* observée dans les classes 7 et 8.

· *Politique 3 à risque financier important* est plus courante dans les classes 3, 6 et 9.

FIG 7 Diagramme causal à long terme



CONCLUSION

Nous avons exposé dans ce chapitre les particularités de conception des modèles génériques dans les trois horizons de décision.

Les modèles court terme ont exigé une représentation précise du système opérant. A ce niveau, il a donc été nécessaire de recourir à des artifices de modélisation pour représenter le caractère discret du phénomène physique au moyen d'outils de simulation continue. Ceci n'a pas été nécessaire à moyen et à long termes où les modèles continus se sont avérés plus adaptés à la représentation des flux physiques.

C'est essentiellement au niveau du système de pilotage et des caractéristiques des entrées, que se différencient les divers modèles. Malgré la structure générique présentée au chapitre VII, chaque classe de système de production se comporte différemment face à des perturbations, ce que nous avons pris en compte dans nos modèles définitifs.

Chapitre IX

IX. PLAN D'EXPERIENCES

INTRODUCTION

La simulation des modèles a pour objectif d'analyser les comportements de systèmes de production perturbés.
Pour parvenir à cette expérimentation, il faut en premier lieu définir des données numériques de base permettant de «caler» les modèles et de les rendre robustes.
L'enquête préalable menée sur le terrain fournit les bases d'un plan d'expériences. Les types et les niveaux de perturbations des variables de contrôle se définissent aussi bien d'après les observations réelles que d'après des choix à priori intéressants et jugés réalistes (c'est-à-dire observables dans la réalité).
Il est nécessaire de préciser qu'une multitude de choix aurait pu être effectuée pour simuler ces modèles génériques. Outre la relative importance des valeurs moyennes des indicateurs de contrôle (productivité, arrêts de production,...) qui peuvent avoir des valeurs très différentes dans la réalité pour une même classe de système de production, les types de perturbations que nous retenons se limitent à trois scénarios. Nous choisissons donc de traiter trois cas qui traduisent une perturbation faible (correspondant souvent à un régime nominal), une perturbation «moyenne» et enfin une perturbation forte et généralisée (dans une limite raisonnable et observable dans les «mauvaises» périodes des entreprises). Dans chacun de ces scénarios, toutes les variables suivent simultanément les «tendances» faible, moyenne ou forte. Aucun croisement n'est effectué, la combinatoire étant trop importante.

1. PRINCIPE DES SIMULATIONS ET DE L'ANALYSE DES RESULTATS

L'objectif de ces travaux consiste à simuler des comportements de manière à mieux comprendre et expliquer la dynamique des systèmes de production complexes. La non-linéarité de leurs mécanismes couplés[50] nous a conduit à développer des modèles génériques. Leurs simulations pourront améliorer notre connaissance du comportement global de ces systèmes, en tentant de dégager des boucles de *feedback* prééminentes ou encore inutiles. Nous effectuerons également une étude comparative entre les comportements de chacune des différentes classes de systèmes de production. En effet, malgré la spécificité des différentes industries[51], il est fortement probable que certains mécanismes soient mis en oeuvre indépendamment de leur structure propre. Cette dernière remarque justifie l'élaboration de ces modèles génériques, différents au niveau de leur système opérant et de leurs boucles de pilotage.
Pour provoquer différentes réactions des modèles, nous les soumettrons à trois scénarios réalistes correspondant à des activités plausibles en entreprises :
- une activité faiblement perturbée,
- une activité fortement perturbée,

[50] mécanismes identifiés individuellement dans l'enquête préalable.
[51] du point de vue technologique ou encore social.

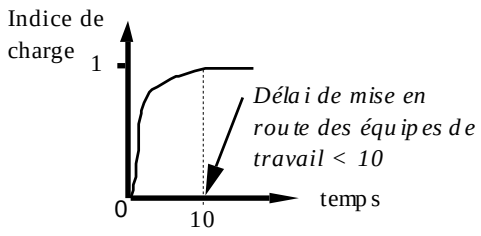
- une activité moyennement perturbée.
Ce choix nous permettra de faire en sorte de déclencher l'ensemble des mécanismes des modèles. En effet, certains mécanismes sont mis en oeuvre en entreprise qu'en cas de force majeure (par exemple, le licenciement) et souvent dans des circonstances internes ou externes très négatives (climat social déplorable, ventes en régression, ...).
Au préalable, les différentes boucles sont testées individuellement pour valider les modèles avec les systèmes opérants de la figure 2 du chapitre VIII (uniquement à court terme).
Après assemblage de ces boucles, les modèles «complets» sont simulés en activant certaines variables de commande de façon aléatoire.

La démarche d'analyse des résultats des simulations se décompose en trois parties:
1. Analyse des résultats de simulations pour trois scénarios perturbant uniquement les variables de commande internes.
2. Analyse après perturbations des ventes suivant les classes de systèmes de production.
3. Etude de sensibilité des différentes boucles et dégagement de mécanismes prééminents par inhibition successive de chacune des boucles de contrôle. L'analyse différentielle[52] des réponses des modèles a permis d'identifier les boucles inefficaces ou peu efficaces et les boucles essentielles.

Comme nous l'avons déjà précisé en introduction, nous aurions pu effectuer bien d'autres simulations en croisant différents paramètres. Nous avons retenu cette démarche[53] en se basant tout d'abord sur une perturbation généralisée et graduelle des modèles correspondant à différents états du système de production en difficulté.

Pour toutes ces simulations, une phase transitoire est observée pour la mise en régime permanent des modèles. Les modèles sont lancés à partir de t=0 et atteignent un indice de charge de 1 (rapport charge sur capacité de production) avant le temps t=10. Ils seront analysés à partir de t≥10 pour toutes les simulations.

FIG 1 Phase transitoire



2. PLAN D'EXPERIENCES

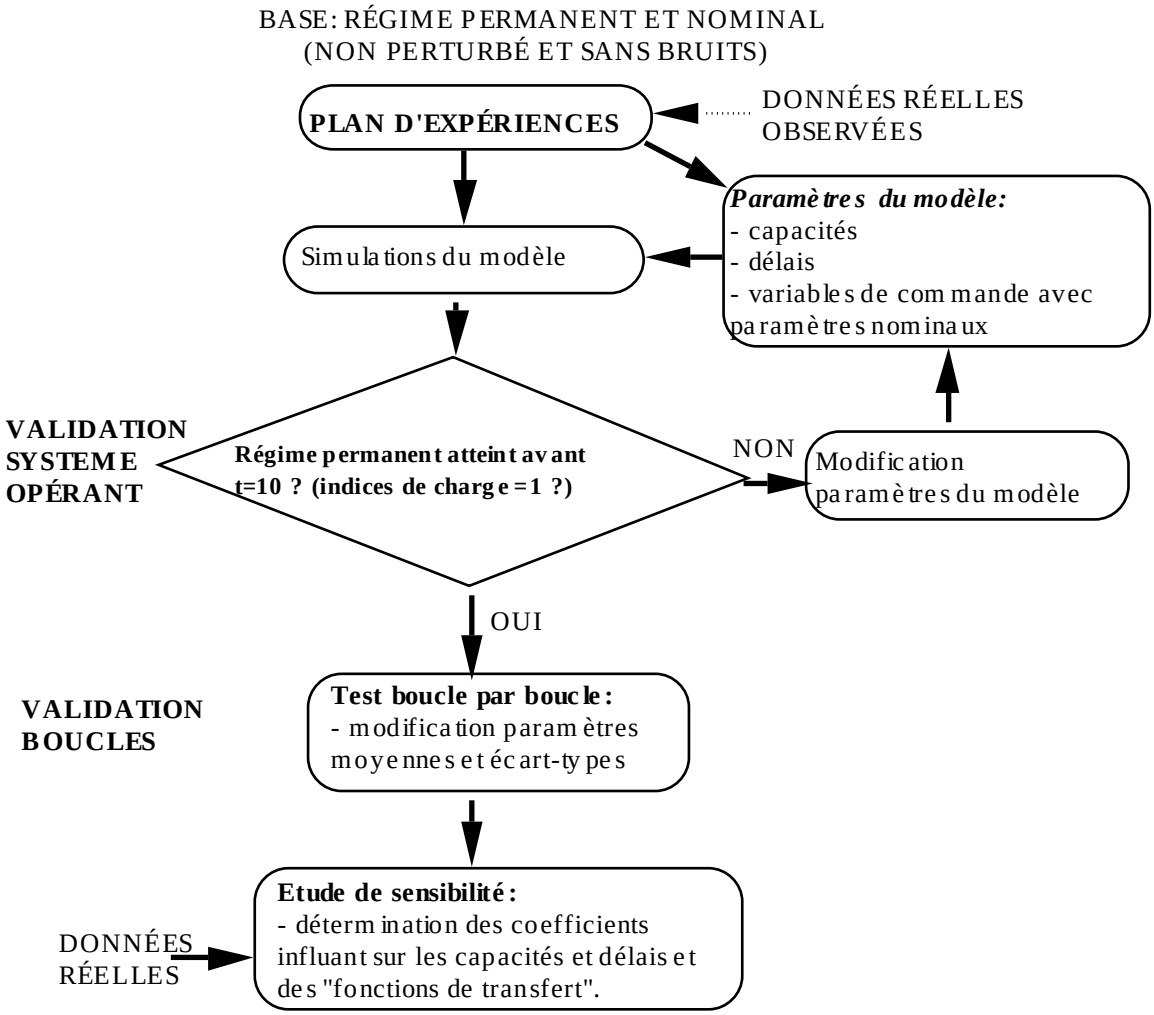
2.1. DONNEES NUMERIQUES DE BASE ET CALAGE DES MODELES

Les modèles sont testés à partir d'hypothèses «centrales» sur les ventes de manière à rechercher la stabilité. Les données de base ayant permis le calage des modèles sont répertoriées dans les tableaux de l'annexe 3b.

[52] comparaison des réponses avec et sans boucle de régulation.
[53] devant une combinatoire importante.

La procédure de calage est présentée dans la figure 2.

FIG 2 Procédure de validation des modèles



Les comportements observés par la simulation, sont comparés aux comportements réels connus, de manière élémentaire, boucle par boucle et de manière globale par une recherche de stabilité, ce qui permet de valider empiriquement les modèles. Dans le cadre de nos travaux futurs[54], nous prévoyons aussi une post-validation de ces modèles «in-vivo» (voir ch. XIII §3).

Les hypothèses d'expériences à court et à moyen termes sont identiques pour des raisons de commodité de calage des modèles. L'unité de mesure est différente, seule une conversion d'unité est nécessaire pour exploiter les résultats chiffrés.
Dans la réalité, les flux d'information sont irréguliers et contiennent une multitude de «micro-informations» d'importance souvent mineure. Ceci s'explique par toutes sortes d'aléas divers comme par exemple la perception et l'interprétation humaine de l'information, les outils de mesure, les moyens de communication,... Pour prendre des décisions, nous sommes donc souvent contraints de lisser un certain nombre d'informations. Dans nos modèles, ces flux d'information proviennent de la mesure des variables et sont à l'origine de la prise de décision dans le système de pilotage.

[54] travail en cours pour l'un des modèles génériques.

Nous avons choisi le lissage exponentiel de ces flux plutôt que la technique de la moyenne mobile. L'avantage en est que les informations enregistrées peuvent être pondérées à l'aide d'un coefficient de lissage qui prend en compte leur «âge» respectif (voir annexe 4e).

2.2. PERTURBATIONS DES VARIABLES DE COMMANDE INTERNES

Les trois scénarios «perturbants» choisis pour les investigations, se basent sur des valeurs moyennes de variables de commande (en régime nominal pour le scénario 1, fortement perturbant pour le scénario 2 et moyennement perturbant pour le scénario 3), auxquelles sont rajoutées de légères perturbations variant "normalement" à +/- deux écart-types environ. Le scénario 1 correspond a une perturbation légère de modèles équilibrés à l'origine. Les scénarios 2 et 3 sont plus sévères et traduisent des perturbations fortes pour le scénario 2 et moyennes pour le scénario 3. Par exemple pour une productivité moyenne de 95% pour le scénario 1, le scénario 2 la fait passer à 70% et le scénario 3 à 80%. Les choix effectués pour les scénarios 2 et 3 correspondent à des cas réalistes plutôt pessimistes qui permettront de mieux observer l'activité des mécanismes de régulation.

Ces choix sont justifiés de manière empirique et leurs limites seront décrites au chapitre XII.

Les variables de commande activées aléatoirement sont répertoriées dans les figures 3, 4 et 5 respectivement pour le court, moyen et long termes.

FIG 3 Bases quantitatives pour la simulation à court terme

Valeurs nominales

	Productivité VC 2	Arrêts de production VC 5	Manquants, rebuts et retouches VC 6
Moyenne	95%	5%	1%

SCENARIOS 1-2-3

Moyennes	95%-70%-80%	5%-20%-10%	1%-20%-10%
Ecart-types	2,5%-5%-2,5%	(Loi de Poisson)	0,5%-5%-1%

FIG 4 Bases quantitatives pour la simulation à moyen terme

Valeurs nominales

	Qualité des produits VC 1a	Qualité de transmission de l'information et des ordres VC 3	Arrêts de production VC 5	Manquants VC 6a	Rebuts, retouches VC 6b	Ratio économique VC 8
Moyenne	95%	95%	5%	5%	5%	1,05

SCENARIOS 1-2-3

Moyennes	95%-70%-80%	5%-20%-10%	5%-20%-10%	1,05-1,3-1,2
Ecart-types	2,5%-5%-2,5%	(Loi de Poisson)	0,5%-5%-1%	0,025-0,05-0,025

FIG 5 Bases quantitatives pour la simulation à long terme

Valeurs nominales

	Productivité VC2	Qualité de transmission de l'information et des ordres VC3	Ratio économique VC 8
Moyenne	95%	95%	1,05

SCENARIOS 1-2-3

Moyennes	95%-70%-80%	95%-70%-80%	1,05-1,3-1,2
Ecart-types	2,5%-5%-2,5%	2,5%-5%-2,5%	0,025-0,05-0,025

Une étude sera également réalisée pour évaluer la sensibilité des modèles aux variations de certains coefficients de lissage de l'information, de seuils de contrôle et «consignes» (par exemple le stock maximal) et des durées de modification des capacités et des délais de production.

Spécificité des modèles long terme

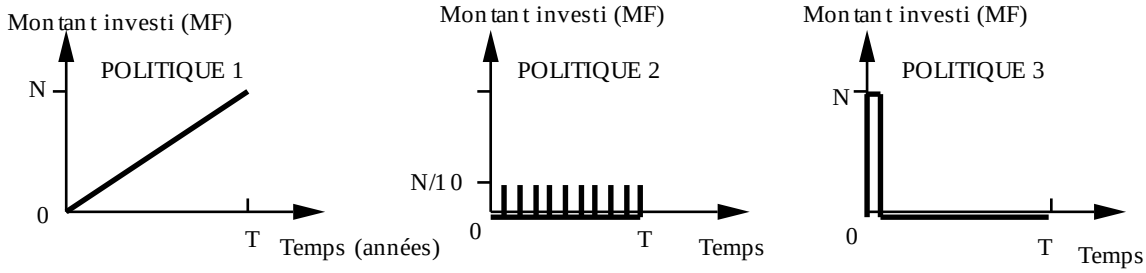
Rappelons que dans ces modèles, une boucle essentielle a été rajoutée (BC9). Elle contrôle le niveau de service pour agir par *feedback* sur la politique d'investissement. Les mécanismes de décisions à long terme ne peuvent être représentés par un seul modèle de production. **Ils intègrent nécessairement d'autres composantes du système «entreprise».** Se baser uniquement sur le système de production comme il est défini dans cette thèse, serait en fait simplifier le comportement des entreprises à long terme.

Aussi, **nous avons limité ces modèles à la simulation de politiques d'investissement** permettant l'augmentation de la capacité de production ou la diminution des délais (voir nos hypothèses au ch. VIII § 2.3).

Pour cela, notre investigation se base à **titre d'exemple**, sur des données numériques que nous avons relevées dans une industrie textile. Rappelons que nous avons retenu trois comportements en matière d'investissement à long terme. Ce choix ainsi que les valeurs de variables, sont issus d'une de ces expériences professionnelles ([THI 90] et [THI 93a]). Les trois politiques sont les suivantes : politique 1 d'évolution continue à faible risque, politique 2 d'évolutions discontinue et répétitive et politique 3 à risque financier important.

La figure 6 schématise les trois scénarios d'investissement retenus par rapport à un montant de N (les valeurs numériques utilisées sont présentées en annexe 3b).

FIG 6 Scénarios d'évolution des investissements



2.3. PERTURBATIONS DES VENTES EXOGENES

Les variables stimulant les modèles de l'extérieur sont les demandes commerciales et les marchés fluctuants.

· ***Evolution des ventes à court et à moyen terme***
Des études de sensibilité sont effectuées sur les bases suivantes:
1. Variation du profil des ventes par des bruits (limités à +/-10% et distribués normalement autour de la valeur moyenne). En suivant les conseils de J. FORRESTER, nous avions tout d'abord effectué une analyse exploratoire des modèles hors bruits car ils limitent les possibilités de prévisions de l'évolution du système.
2. Saisonnalisation des ventes pour certaines classes (uniquement à moyen terme avec une période d'un an et une amplitude de +/- 20% par rapport à la valeur moyenne des ventes).
3. Modification brutale des ventes par *steps* d'amplitude de +/- 10% par rapport aux ventes moyennes (à moyen terme seulement). A court terme, modification brutale des ventes par *pulses* d'amplitude de +/- 100% par rapport aux ventes moyennes.
Ces différentes conjectures ne seront simulées que pour les classes de système de production sensibles à de tels paramètres. Les choix de perturbations et d'aléas divers sont définis de façon empirique et cohérente avec les valeurs observées sur le terrain. Le tableau de la figure 7 indique les types de perturbation des ventes. C'est à partir de l'enquête précédente rappelons-le, que ce tableau a pu être élaboré.

FIG 7 Types de perturbations par classes

Classes des systèmes de production

Types de perturbations des ventes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Modification capacité VA5
Bruits	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non
	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non
	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	non	non
	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	non	oui
	oui	non	non	oui	oui	non	oui	oui	non	oui
Saisonnier	non	non	oui	non	oui	non	oui	oui	non	oui

Ces différentes perturbations des ventes n'agissent en fait qu'à court et à moyen terme. Les capacités sont augmentées ou diminuées à moyen terme de 10% en cas de *steps*. En cas de ventes saisonnières, nous considérons que la capacité de production évolue avec la même périodicité que la demande et sans décalage de phase (hypothèse de la flexibilité des moyens de production). C'est grâce à un plan de production prévisionnel que l'on peut assurer ou tenter d'assurer ce synchronisme de phase. D'autres politiques auraient pu être simulées comme l'anticipation des stocks par exemple.
Nous retenons les valeurs des variables de commande internes correspondant au scénario 1. Ce choix permet d'étudier la sensibilité des modèles aux variations aléatoires des ventes exogènes en partant d'un régime faiblement perturbant (nous aurions également pu croiser les scénarios 2 et 3 avec des perturbations dans les ventes).

CONCLUSION

Le plan d'expériences présenté a permis de fixer les variables des modèles sur lesquelles se baseront les simulations futures.
Il s'agit notamment de trois scénarios de perturbation des indicateurs les plus sensibles des systèmes de production et des valeurs des éléments fonctionnels des modèles (capacités et délais nominaux, valeurs moyennes et écart-types des variables de commande).
En ce qui concerne les modèles simulant les comportements à long terme, nous avons choisi, à titre d'exemple, des hypothèses spécifiques à une entreprise industrielle.

Chapitre X

X. RESULTATS DE SIMULATIONS DES MODELES GENERIQUES A COURT ET A MOYEN TERMES

INTRODUCTION

Ce chapitre est à l'origine d'une meilleure connaissance de la dynamique des systèmes de production, obtenue grâce aux résultats de simulations les plus significatifs[55].

Tout d'abord, nous testons une par une les différentes boucles de régulation des modèles génériques, pour en étudier séparément leur sensibilité individuelle et pour valider progressivement ces modèles.

Ensuite, **pour faciliter la lecture, nous proposons de n'exposer que les résultats essentiels de simulation à moyen terme d'un seul modèle.** Nous choisissons les classes 2 et 5 des systèmes d'assemblage aussi bien confrontés aux problèmes de la constitution de stocks de produits semi-finis sur programme, que de l'assemblage de sous-ensembles à la commande. Nous précisons également que ces classes peuvent être soumises à tout type de perturbations (notamment la classe 5, voir la figure 6 du ch. IX), ce qui les rend plus intéressantes à exposer. Les résultats sont présentés de manière condensée, scénario par scénario et boucle par boucle.

Enfin, nous développons une synthèse de l'ensemble des résultats de simulation, par classe de systèmes de production et pour chacun des horizons de décision. Les résultats exhaustifs sont consignés dans une annexe complémentaire de 292 pages.

1. TEST PRELIMINAIRE BOUCLE PAR BOUCLE

Il est nécessaire de rappeler que la dynamique d'un système complexe ne s'explique pas linéairement par la combinaison des réponses individuelles de chacune des boucles[56]. C'est pourquoi cette analyse ne s'effectue que sur un seul modèle. Résultant des circonstances de notre travail, nous n'avons effectué cette analyse que sur la première classe traitée, représentant les systèmes d'assemblage à la commande qui gèrent des projets décomposés en plusieurs tâches.

L'horizon de simulation choisi pour le court terme, est d'environ cinq mois. Cette valeur maximale observée lors des expérimentations, permet aux modèles d'atteindre un régime permanent en activité perturbée légèrement (scénario 1).

---

[55] nous nous sommes référés à cette suggestion de D. L. MEADOWS (1972), qui fait remarquer qu'il n'est pas utile qu'une simulation permette une prévision très précise de l'évolution d'une quelconque variable : «... ce qui est important ce sont les tendances globales du comportement du système» [FOR 69].

[56] cf. K. LEWIN : «le groupe est autre chose que la somme des individus qui le composent».[LEW 81].

Ce test préliminaire nous a permis par ailleurs d'identifier qu'une boucle manque d'efficacité devant des baisses de productivité importantes. Il s'agit de la boucle BC4a augmentant la capacité de production en cas de baisse de productivité. La productivité nominale étant fixée à 95%, un passage à 70% est trop significatif pour que la boucle puisse agir efficacement. Nous observons que la première tâche du projet prend quatre jours de retard et la tâche immédiatement postérieure, huit jours. Moins on lisse la productivité réelle pour agir sur la capacité ou les délais, plus le retard des tâches augmente. Cette boucle n'est donc pas assez efficace devant des baisses de productivité importantes. Elle semble constituer ainsi un «chaînon» sensible dans ce type de systèmes de production.

2. RESULTATS DE SIMULATIONS DES CLASSES 2 ET 5 A MOYEN TERME[57]

Nous avons retenu le type de système opérant présenté dans la figure 3 du chapitre VIII. Il caractérise la structure physique de la production à cet horizon de décision. Il se compose de deux sections productives. La première a pour objectif de constituer un stock de sous-ensembles et la seconde, d'assembler des produits finis à la commande à partir de ces produits semi-finis.
Les mécanismes de pilotage à moyen terme ne se préoccupent pas du contrôle précis de l'activité de la production, mais sont relatifs aux décisions d'un niveau hiérarchique plus élevé.

· *Schéma de présentation des résultats*

Seuls les résultats les plus significatifs sont analysés selon le schéma suivant:
1. Nous observons les comportements des modèles à partir de trois scénarios différents. Le scénario 1 représente une perturbation relativement faible et généralisée des variables contrôlées, alors que les scénarios 2 et 3 correspondent respectivement à de fortes et à de moyennes perturbations.
2. Nous étudions les modèles soumis à des ventes perturbées (par bruits, *pulses* ou *steps).* Seules les classes sensibles à de tels phénomènes sont traitées.
3. Nous analysons l'efficacité individuelle de chaque boucle par étude de sensibilité aux fluctuations de sa variable de commande.

2.1. ETUDE DE L'INFLUENCE DU SCENARIO SUR LE MODELE

· ***Scénario 1 faiblement perturbant***
Les capacités de production oscillent avec des périodes différentes, ce qui conduit à des déphasages entre les niveaux de stocks. Le modèle assure cependant une qualité de service parfaite dès la deuxième année. Il est également constaté que les délais se réduisent en fin de première année.

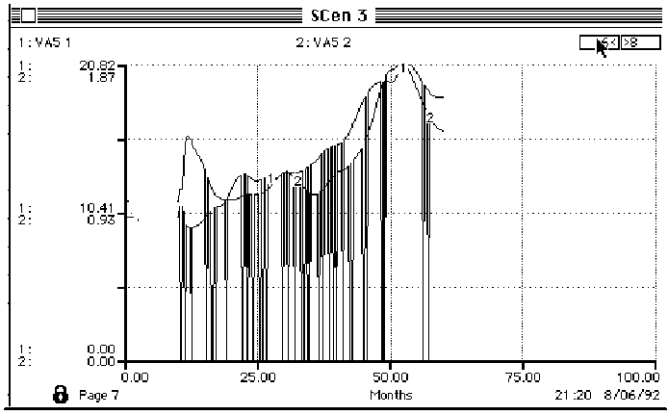
· ***Scénario 2 fortement perturbant***
Les capacités de production augmentent dès t=10[59], pour faire progresser le taux de service qui atteint près de 80%. A partir de la quatrième année, elles diminuent à

[57] il s'agit des systèmes d'assemblage à la commande à partir d'éléments standards.
[58] il s'agit des systèmes d'assemblage à la commande à partir d'éléments standards.
[59] c'est-à-dire, dès le début des perturbations (cf. fig.1 ch. IX).

nouveau. Le modèle n'exerce pas suffisamment d'actions sur les capacités et les délais, pour assurer un niveau de service correct dans ce scénario sévère.

· ***Scénario 3 moyennement perturbant***
Le modèle est capable d'assurer un service de 100% très rapidement comme le montre la croissance de la capacité en figure 1. Sur cette courbe, nous constatons les nombreux arrêts de production, qui conduisent à une capacité nulle durant un intervalle de temps donné. Leur influence est négligeable puisque certains mécanismes agissent fortement sur la capacité de production.

FIG 1 Scénario 3: Capacités(t)



2.2. ETUDE DE L'INFLUENCE DE VENTES PERTURBEES SUR LE MODELE

· ***Demande perturbée par des bruits:***
Les délais moyens restent stables dans le temps et une excellente qualité de service est assurée dès la seconde année.

· ***Demande perturbée par un step "positif" de +10% par rapport aux ventes moyennes:***
Lors d'une évolution brutale des ventes à t=10 mois, la capacité croît seulement à partir de la deuxième année. Le service reste très acceptable.

· ***Demande perturbée par un step "négatif" de -10%:***
Les tentatives d'amélioration du service (fig. 2) à partir de la deuxième année, expliquent les «bosses» de la courbe de la capacité vers t=30 puis t=40 (fig. 3). Le taux de service reste ensuite stable et excellent.

FIG 2 Step négatif: Service(t)

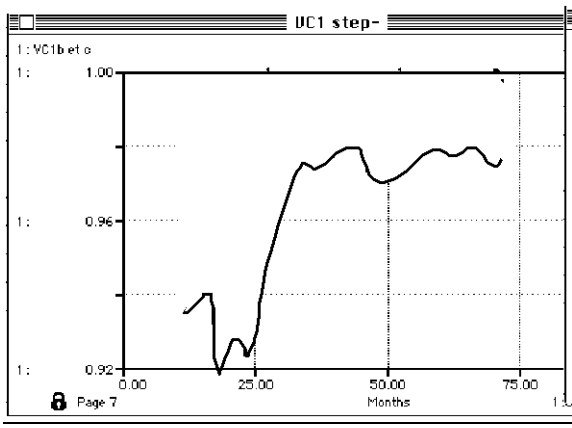
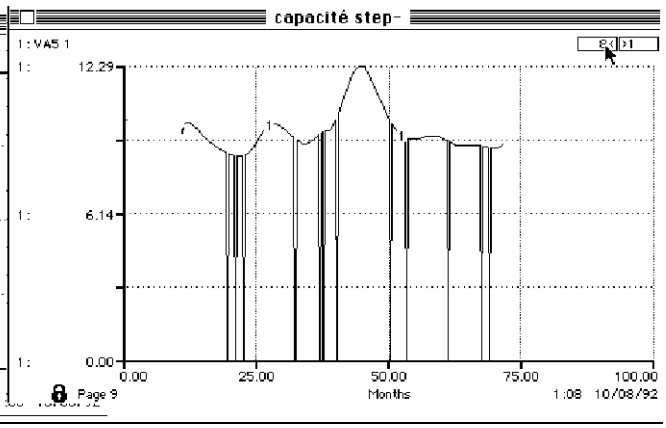


FIG 3 Step négatif: Capacité(t)



· ***Demande à évolution saisonnière pour la classe 5*** *(systèmes d'assemblage de produits simples)*

FIG 4 Saisonnalité: Demande et capacité(t)

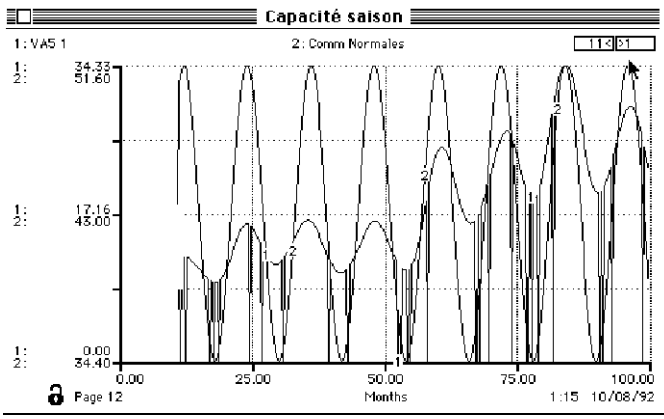
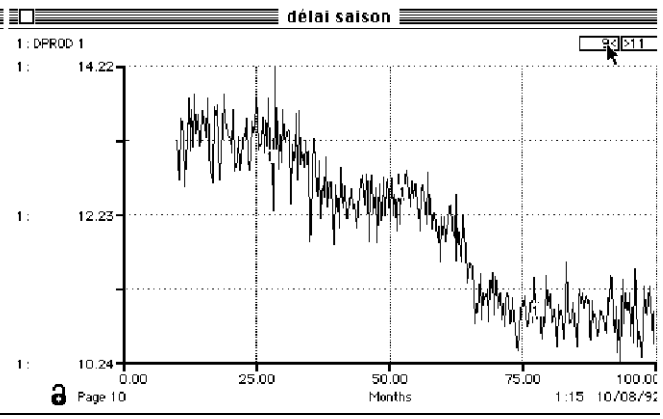


FIG 5 Saisonnalité: Délai(t)



Après une période d'«adaptation» du modèle entre le dixième et le vingtième mois, la capacité évolue sinusoïdalement en phase avec la demande jusqu'à la quatrième année environ (fig. 4). Puis l'amplitude de cette capacité progresse fortement en trois ans, pour diminuer ensuite. Ces variations s'expliquent essentiellement par la valeur du délai de modification de la capacité. Quant aux délais de production, ils diminuent par paliers sans remonter (voir fig. 5).

2.3. ETUDE DE SENSIBILITE DES DIFFERENTES BOUCLES DE REGULATION

· ***Boucles BC2*** *: réaction du système de pilotage devant une dégradation du taux de service et de la qualité des produits.*

· *Boucle BC2a agissant sur le taux de rebuts et de retouches*

Nous avons fait varier les valeurs du taux moyen de qualité des produits de 70% à 95%. Les résultats permettent de conclure que pour le scénario 1 *(faiblement perturbant)*, les boucles BC2a, BC2e et BC8 *(la boucle BC8 est mise en action en cas de variation du ratio économique)* agissant simultanément sur le taux de rebuts et de retouches, sur le délai et sur le niveau de stock désiré, ne fonctionnent pas en cas de dégradation de la qualité des produits VC1a. D'autres mécanismes internes que nous ne pouvons identifier à ce stade, réagissent efficacement devant cette variation de VC1a de 70% à 95%.

· *Boucles BC2b-c-d-e : décisions en cas de dégradation de la qualité de service*

Elles agissent sur les délais (boucles BC2b, c et d) et sur le niveau du stock désiré (BC2d). La boucle BC2e agit également sur la productivité, le taux d'arrêts de production et le taux de manquants, rebuts et retouches. Pour les valeurs du scénario 1 faiblement perturbant, ces boucles ne sont d'aucune utilité puisque le taux de service reste constant en les inhibant.

· ***Boucle BC3:*** *cette boucle modélise le processus de décision en cas d'arrêts de production, en agissant sur la capacité de production*

Nous faisons varier les valeurs du taux d'arrêts moyen de 5% à 20% et nous observons un doublement de la capacité en cas de taux d'arrêts supérieurs à 10% environ. Il apparaît également que cette boucle n'est pas utile dans ce scénario faiblement perturbant. L'effet sur la capacité provient d'une autre boucle de contrôle.

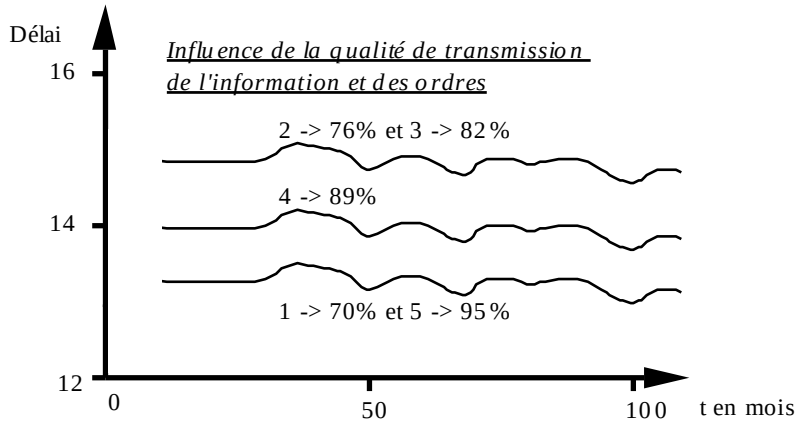
· ***Boucles BC5-a-b-c :*** *décisions face à l'augmentation des taux moyens de manquants, rebuts et retouches VC6 de 0,5% à 30%*

Ces boucles agissent sur les délais de production (BC5a et b) et sur le niveau de stock désiré (BC5c). Les délais augmentent de près de 20% pour des taux VC6 dépassant 15% environ. Il est curieux de constater que le taux de service, s'améliore en supprimant progressivement les boucles. Ces boucles sont donc inutiles pour des valeurs de taux VC6 très faibles. Elles sont par contre utiles, quand elles sont couplées pour des valeurs élevées de VC6.

· ***Boucles BC6-a-b-c***: Ces boucles représentent les comportements des entreprises constatant une mauvaise transmission des informations et des ordres. Elles sont pilotées par une variable de commande VC3 mesurant la qualité de cette transmission, dont les valeurs moyennes choisies varient de 70 à 95%. Elles agissent sur les délais (BC6 a, b et c). Ces délais sont d'autant plus élevés que les valeurs de VC3 sont faibles (voir figure 6). Une seule exception existe pour VC3 moyen=70%. Une "bifurcation" s'observe entre VC3=70% et VC3=76%, qui peut signifier que la boucle réagit fortement entre ces deux valeurs.

Ces boucles sont très efficaces pour une qualité de transmission VC3=70%, puisque leurs suppressions fait apparaître une baisse de qualité de service de près de 20%. Elles sont par contre inutiles pour les valeurs de VC3>75%.

FIG 6 Délai(t)



· ***Autres boucles:*** voir l'annexe complémentaire. Nous avons présenté ici les résultats les plus marquants.

2.4. CONCLUSION

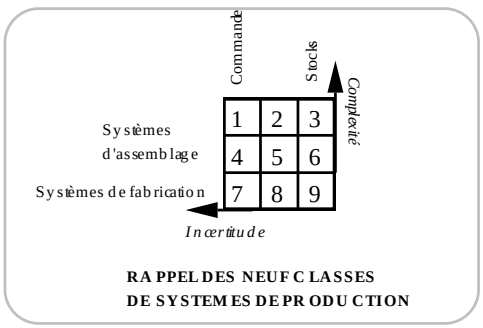
Ces classes de systèmes de production supportent mal le scénario 2 fortement perturbant, car le niveau de service reste inférieur à 80%. D'autre part, nous remarquons que certaines boucles de régulation sont inutiles pour des faibles sollicitations de leur variable de commande.

3. SYNTHESE D'ENSEMBLE DES RESULTATS DE SIMULATIONS DES MODELES GENERIQUES

3.1. COMPORTEMENTS DES MODELES EN SCENARIO FAIBLEMENT PERTURBANT

Nous faisons référence au scénario 1 (voir ch. IX), qui correspond aux valeurs nominales des variables de commande, auxquelles ont été rajoutés des aléas générés par des lois de probabilité. La plupart des modèles a bien réagi à cette légère perturbation. Les résultats observés reflètent donc un bon fonctionnement des différentes boucles cybernétiques décrites aux chapitres VII et VIII.

Nous ferons apparaître à plusieurs endroits de cette thèse, un schéma de rappel des neuf classes de systèmes de production pour faciliter la lecture.



Horizon court terme

Les systèmes d'assemblage (classes 2 et 5) ont des difficultés d'appairage de leurs stocks de sous-ensembles. Ceci est dus aux aléas différents apparaissant durant la production de chacun de leurs composants. En effet, même si les capacités de production sont suffisantes, la production maximale d'ensembles sera toujours limitée à la quantité minimale de sous-ensembles composants (à coefficient de lien identique).

La capacité de la classe 9 des systèmes de fabrication sur stocks, croît exagérément et de manière non justifiée pour ce scénario. Cette classe est donc très sensible aux différentes fluctuations de ses variables de commande. Ceci s'explique par le fait que pour ces entreprises de sous-traitance, l'objectif essentiel est d'assurer une qualité de service irréprochable.

Horizon moyen terme

· *Comportements en cas de step positif brutal dans les ventes*

Après une augmentation brutale des ventes de 10%, les capacités de production mettent plus de trois ans à croître dans les classes d'assemblage 1 et 4 travaillant à la commande.

Pour la classe 6 produisant des grandes séries répétitives, la capacité productive réagit plus rapidement en moins de deux ans[60]. Il est probable que les types d'investissements en moyens diffèrent entre les classes 1-4 et la classe 6. Ceci peut s'expliquer par le fait que les entreprises d'ingénierie habituées à de fortes variations de leur activité, réagissent moins rapidement devant une légère croissance des ventes.

· *Comportements en cas de step négatif brutal dans les ventes*

Nous observons que les classes 1, 4 et 8, maîtrisent le moins facilement la baisse de 10% des ventes. En effet, une action de réduction trop importante des capacités se constate, ce qui cause une dégradation du service par la suite. Ces classes travaillent à la commande et leur activité est donc directement liée aux fluctuations de la demande commerciale, surtout en cas de baisse.

· *Comportements en cas de saisonnalité des ventes*

D'après les hypothèses de flexibilité de la capacité (cf. ch. IX), nous constatons que les systèmes de la classe 5 (systèmes assemblant sur commande à partir d'éléments standards) et 8 (systèmes de fabrication), réagissent différemment devant ce type de sollicitation, tout en garantissant un service à 100%. La classe 5 a tendance à amplifier à partir de la quatrième année, la capacité qui oscille sinusoïdalement en phase avec la demande. La classe 8 quant à elle, ajuste sa capacité à la demande. C'est le cas également pour les délais, qui se régulent correctement en fonction de la demande de la classe 8, alors qu'ils diminuent par paliers réguliers pour la classe 5. Les systèmes d'assemblage ne s'adaptent pas facilement à une saisonnalité des ventes et «rétroagissent» trop sévèrement sur leurs moyens de production.

3.2. COMPORTEMENTS DES MODELES EN SCENARIOS FORTEMENT ET MOYENNEMENT PERTURBANTS

Il s'agissait ici d'étudier la sensibilité des modèles à une sollicitation simultanée de la totalité des variables de commande, d'après les hypothèses du plan d'expériences (cf. scénarios 2 et 3 du ch. IX).

[60] rappelons à nouveau que ces valeurs n'ont qu'un intérêt relatif en tant qu'éléments de comparaison entre différentes classes.

Horizon court terme
Tous les modèles se comportent bien face à ces deux scénarios sévères. Ceci signifie qu'ils sont capables de réagir à des dégradations généralisées de tous leurs indicateurs (dans les limites définies).

Horizon moyen terme
· Pour le scénario 2 le plus défavorable, les systèmes des classes 3, 8 et 9 organisées en lignes, ne réagissent pas suffisamment pour assurer un service correct et stable (le taux de service se dégrade progressivement). Ces classes sont sensibles à des perturbations fortes et sont dans l'incapacité de se «récupérer».
· Pour le scénario 3 moyennement perturbant, tous les modèles arrivent à rétablir un niveau de service acceptable (> 95%). Les classes 3, 6, 8 et 9 prennent le plus de temps pour atteindre ce niveau (respectivement 75, 100, 30 et 80 mois).
Ces classes 3, 6, 8 et 9 sont des systèmes produisant des grandes séries avec des équipements peu flexibles, ce qui explique probablement leur lenteur à réagir.

3.3. ETUDE DE SENSIBILITE DES DIFFERENTES BOUCLES DE REGULATION

Une étude de sensibilité des mécanismes de décision à leur variable de commande, a permis de vérifier l'efficience individuelle de chacune des boucles. L'inhibition de certaines d'entre elles, a permis également de mesurer leur efficacité et d'expliquer leur contribution au comportement global des systèmes.

Horizon court terme
· *Boucle BC3 contrôlant le taux d'arrêts de production*
Dans les classes 3 (systèmes d'assemblage sur stocks) et 7 (systèmes de fabrication à la commande), cette boucle BC3 conduit à une dégradation du service quand elle est présente et que le taux d'arrêts moyen est supérieur à 20% pour la classe 3 et à 10% pour la classe 7. Elle se montre par contre utile pour des valeurs inférieures. A partir d'un taux critique d'arrêts de production, il serait nécessaire de supprimer le contrôle direct par cette boucle dans les systèmes de classes 3 et 7.
Dans la classe 8, la boucle BC3 n'est pas utile.
· *Boucles BC4 contrôlant la productivité*
Dans les classes 1 et 4 (systèmes d'assemblage sur commande), pour des valeurs faibles de la productivité, la boucle BC4b agissant essentiellement sur les délais, est prééminente.
Dans les classes 1-4 et la classe 3 assemblant sur stocks, la boucle BC4a agissant sur les capacités, pourrait être supprimée. Dans la classe 7 des système de fabrication à la commande, l'inverse est constaté, car la boucle BC4a est prééminente et la boucle BC4b inutile.
Les systèmes d'assemblage sont plus sensibles à des effets sur les délais (causés par la boucle BC4b) que sur les capacités (boucle BC4a).
Dans la classe 7, la capacité est immédiatement augmentée en cas de baisse sensible de la productivité, ce qui évite les retards de livraisons pour ce type d'entreprise travaillant fréquemment en sous-traitance.
· *Boucles BC5 contrôlant les taux de manquants, rebuts et retouches*
La boucle BC5a agissant sur la taille des séries lancées, est prééminente dans la classe 3, pour des valeurs de taux de manquants, rebuts et retouches VC6 supérieures à 20%.

C'est le cas également dans la classe 6 (quelle que soit la valeur de VC6), où cette boucle agit efficacement sur les quantités lancées.

Horizon moyen terme

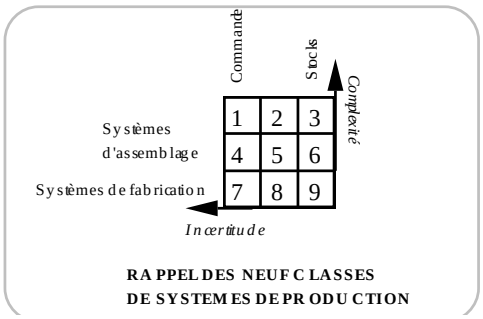
Chaque boucle a été étudiée séparément en faisant évoluer les valeurs des variables de commande dans l'étendue des valeurs des scénarios 1, 3 et 2. Les autres variables ont conservé les valeurs du scénario 1, sauf la boucle BC7 contrôlant les stocks, qui a nécessité une étude basée sur le scénario 3.

Le tableau de la figure 7 présente les principaux résultats d'une analyse qualitative par classe de systèmes de production. Nous avons croisé les classes de systèmes de production avec les types de boucles de décision. Ce tableau fait ressortir pour chaque couple *classe-boucle*, l'influence de chacune de ces boucles de régulation sur le service client.

RAPPEL des fonctions des boucles

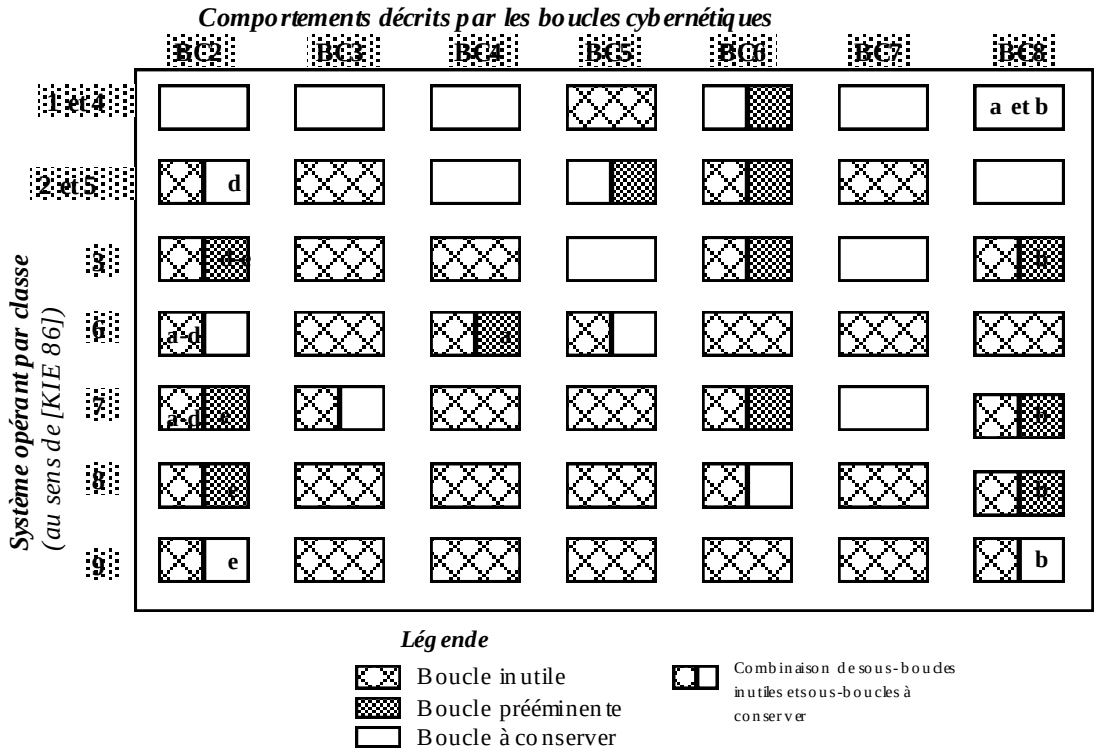
BC1:	la variable de contrôle est l'exigence commerciale qui agit sur la capacité de production
BC2a:	la variable de contrôle est le taux de qualité des produits qui agit sur le taux de rebuts et de retouches
BC2b et c:	le taux de service agit sur les délais de production
BC2d:	le taux de service agit sur le niveau de stock désiré
BC2e:	le taux de service agit sur la productivité, les délais de production, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts.
BC3:	le taux d'arrêts de production agit sur la capacité de production
BC4a, b:	le taux de productivité agit sur la capacité de production
BC4c:	le taux de productivité sur les délais de production
BC5a:	la variable de contrôle est le taux de manquants, rebuts et retouches qui agit sur les délais de production
BC5b:	le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur les délais.
BC5c:	il agit également sur le niveau de stock désiré
BC6a, b et c:	la variable de contrôle est la qualité de transmission de l'information et des ordres qui agit pour les trois boucles sur les délais
BC7a:	la variable de contrôle est le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) agit sur les délais de production
BC7b:	le ratio de stockage agit sur les délais de production
BC7c:	le ratio de stockage agit sur le niveau de stock désiré
BC8a et b:	la variable de contrôle est le ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés) agit sur la productivité, les délais, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts de production.

RAPPEL des classes de systèmes de production



RAPPEL DES NEUF CLASSES DE SYSTEMES DE PRODUCTION

FIG 7 Efficacité des boucles par classe à moyen terme



Remarque: *Les lettres figurant dans les rectangles représentent les codes des sous-boucles de chaque boucle.*

Différents cas sont possibles, soit la boucle est utile et éventuellement prééminente, ou bien elle est inutile (voir la légende dans le bas du tableau 1). Il faut noter que ce tableau ne s'intéresse qu'à l'efficacité des boucles sur le service client. Or les boucles BC7 et BC8 jugées inutiles dans ce tableau, sont par contre d'un grand intérêt pour ajuster le niveau de stock en cas de variation par rapport à une consigne (BC7) et pour diminuer les coûts en cas de dépassement budgétaire (BC8).
D'après la légende de la figure 7, par exemple dans la classe 7, la boucle BC2 se décompose en quatre sous-boucles BC2a à BC2d inutiles et d'une sous-boucle BC2e prééminente.

Il est utile de compléter la description du tableau de la figure 7.
Classes 1 et 4 (systèmes d'assemblage réalisant des travaux sur-mesure): Les boucles BC6 contrôlant la qualité de transmission de l'information et des ordres, sont prééminentes dès que cet indicateur VC3 est inférieur à 70%. Ces boucles agissent sur les délais de production. Il est également nécessaire de coupler les deux boucles BC8a et b contrôlant le ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés).
Classes 2 et 5 (systèmes d'assemblage à partir d'éléments standards): Parmi les boucles BC2 contrôlant le taux de service et la qualité des produits, seule BC2d réajustant le niveau de stock désiré est utile. La boucle BC5 contrôlant le taux de manquants, rebuts et retouches est prééminente quand ce taux VC6 est supérieur à 10%. Les boucles BC6 contrôlant la qualité de transmission de l'information et des ordres, sont inutiles pour VC3>75% et prééminentes pour VC3=70%.

Classe 3 (systèmes d'assemblage de biens complexes): La boucle BC2d redéfinissant un niveau de stock objectif après dégradation de la qualité de service, est prééminente. Les boucles BC2e (actionnée en cas de baisse du taux de service) et BC8 (BC8 est actionnée en cas d'augmentation des coûts) agissant sur la productivité, les délais, les taux d'arrêts, de manquants, rebuts et retouches, sont également utiles quand VC6>15%. Les boucles BC6 contrôlant la qualité de transmission des informations et agissant sur les délais de production, sont prééminentes quand VC3>70%. Les boucles BC8 couplées sont inutiles quand VC8 = 1,4 (coût réel de 40% supérieur au coût prévu au budget).
Classe 6 (systèmes d'assemblage de produits simples): La boucle BC4 contrôlant la productivité et agissant sur la capacité et le délai de production, est prééminente. La boucle BC5 pilotée par le taux de manquants, rebuts et retouches, est à supprimer pour un taux VC6=30%.
Classe 7 (systèmes de fabrication travaillant à la commande): La boucle BC3 actionnée par une variation des taux d'arrêts de production, est inutile si VC5<13%. Les boucles BC2e et BC8b sont prééminentes quand VC6>15%. Les boucles BC6b et BC6c sont prééminentes pour VC3=70% et inutiles si VC6=95%.
Classe 8 (systèmes de fabrication a la commande à partir d'éléments standard): Les boucles BC2e (actionnée en cas de baisse du taux de service) et BC8 (BC8 est actionnée en cas d'augmentation des coûts) agissant sur la productivité, les délais, les taux d'arrêts et de manquants, sont prééminentes quand VC6>15%. Les boucles BC6 agissant sur les délais de production en cas de baisse de la qualité de transmission des informations et des ordres, sont à supprimer quand VC6>75%.
Classe 9 (systèmes de fabrication constituant des stocks de produits finis):
Comme pour la classe 8, les boucles BC2e et BC8b prouvent leur utilité. La boucle BC7 contrôlant le niveau réel de stock et agissant sur le délai de production, est à supprimer car elle dégrade la qualité de service.

A ce stade, nous pouvons noter que la typologie des systèmes opérants n'explique pas les comportements des systèmes de production (voir également l'étape 2 de l'analyse statistique du ch. IV §.2.2). Ce qui signifie que les modes comportementaux (dynamiques) de ces systèmes complexes, ne sont pas spécifiques à leur structure interne (cinématique).

Les classes à délais de production courts, nécessitent moins de contrôles que les classes à délais plus longs comme les systèmes d'assemblage (1 à 6).
Les classes de fabrication (7, 8 et 9) contrôlent essentiellement le niveau de service et les coûts réels. Les deux mécanismes prééminents observés sont représentés par les boucles BC2e et BC8b. En effet, ces deux boucles agissent chacune sur la productivité, les délais, les taux de manquants, rebuts et retouches ainsi que sur les taux d'arrêts.
Dans ces classes de systèmes de fabrication, l'essentiel du pilotage à moyen terme, s'effectue par un contrôle de gestion rigoureux et par une réorganisation de la production.
Les boucles BC6 contrôlant la qualité de transmission de l'information et des ordres, ne sont réellement utiles que dans le cas où cette variable est très défavorable et ceci dans les classes 1 à 5 (systèmes d'assemblage) et la classe 7.
La classe 6 agit rapidement sur la capacité de production en cas de baisse de la productivité à moyen terme, par l'intermédiaire de la boucle BC4a. Cette classe de systèmes lance de très grandes séries dans un objectif de constitution de stocks de produits finis.

Les classes 2 et 5 d'assemblage à la commande de produits standards, sont très sensibles dès que les taux de manquants, rebuts et retouches dépassent 10%. Elles agissent dans ce cas sur les délais par l'intermédiaire de la boucle BC5.

3.4. INFLUENCE DE DIVERS PARAMETRES DES MODELES

Des études de sensibilité des modèles à différents paramètres internes de pilotage, ont également été effectuées. Il s'agit d'analyser l'influence des délais de modification des capacités ou des délais de production, des coefficients de lissage (voir annexe 4e) et de certaines consignes, tel que le seuil maximal de stockage par exemple.

· *Influence des délais de modification de la capacité*
Ces délais présents dans tous nos modèles, retardent de «manière exponentielle d'ordre 3», une modification souhaitée de la capacité de production (voir annexe 4d).
Les classes 1 et 4 sont sensibles à court terme à ce délai de modification.
Les classes représentant les entreprises d'ingénierie, ont à réagir fréquemment devant des aléas divers, ce qui explique des oscillations de leur capacité de production, qui se stabilise au bout de 60 jours pour un délai de modification très court. Pour des délais plus longs, leur capacité évolue plus lentement.
Les classes 3 constituant des stocks de produits finis, sont peu sensibles à ce délai de modification, que ce soit à court ou à moyen terme.
Pour les classes 2 et 5 d'assemblage à la commande à partir de stocks de sous-ensembles, en régime nominal et à court terme, le service se dégrade quand les délais de modification augmentent.
Pour la classe 8 des systèmes de fabrication, les résultats obtenus sont surprenants car le service se dégrade quand les valeurs de ce délai de modification de la capacité sont comprises entre cinq et vingt jours. Il est par contre excellent quand les valeurs de ce délai sont à l'extérieur de cet intervalle.

· *Influence du lissage des valeurs des variables de contrôle*
Les faibles coefficients de lissage (voir annexe 4e) du taux d'arrêts de travail, ont une forte influence à court terme.
Pour éviter de perturber trop fréquemment l'organisation de la production notamment en agissant sur la capacité, il est souhaitable de ne pas réagir de manière instantanée devant des perturbations aléatoires. Ce qui signifie qu'il est plus intéressant de lisser fortement les relevés de mesure, pour préparer une action corrective.

CONCLUSION

A court terme, nous constatons que les modèles des différentes classes de systèmes de production sont capables de réagir devant les trois scénarios perturbants précisés dans le plan d'expériences. Les difficultés se situent au niveau de l'efficacité des différentes boucles en cas de variation significative des variables qu'elles contrôlent. En effet, les huit boucles de régulation sont couplées dans les modèles (et dans les systèmes qu'ils représentent) ce qui produit dans certains cas des effets «négatifs» sur une même variable commandée. Nous l'avons constaté notamment pour la boucle BC3

contrôlant le taux d'arrêts de production et les boucles BC4 et BC5 contrôlant respectivement la productivité et le taux de manquants, rebuts et de retouches.

A moyen terme, seule la classe 6 des systèmes d'assemblage de produits simples (lançant de grandes séries de production), n'éprouve pas de difficultés face au scénario 2 perturbant fortement l'ensemble des variables de commande. Les classes 1 et 4 des systèmes d'assemblage réalisant des travaux sur-mesure, réagissent insuffisamment à moyen terme devant des scénarios moyennement perturbants (scénario 3). Nous notons également que la classe 8 des systèmes de fabrication à la commande à partir d'éléments standards, est également sensible (et vulnérable) aux «bruits» perturbant les ventes, ainsi qu'à une baisse brutale de 10%. D'autre part, nous remarquons que certaines boucles de régulation sont inutiles pour des faibles sollicitations de leur variable de commande.

En conclusion, cette analyse s'est intéressée aux comportements induits par des mécanismes prééminents dans les systèmes de production. Il a également été constaté l'inefficacité de certaines boucles de contrôle[61].

Rappelons enfin que l'objectif de notre recherche ne consistait pas à analyser les résultats de simulation d'un modèle de production particulier, mais à rechercher des relations entre différentes structures industrielles et des comportements types. Comme nous l'avions déjà indiqué, les résultats numériques de simulation n'ont eu qu'une valeur relative de comparaison entre les modèles élaborés.

[61] ces observations permettent d'ouvrir un champ d'application vers l'ingénierie des systèmes de pilotage de production à court et à moyen termes.

Chapitre XI

XI. RESULTATS DE SIMULATIONS D'INVESTISSEMENTS A LONG TERME

INTRODUCTION

Comme nous l'avions déjà précisé, les modèles de production à long terme ont pour objectif de simuler différents types d'investissements. Ces investissements agissent sur les caractéristiques essentielles du système opérant que sont les capacités et les délais de production.

Rappelons que le modèle que nous présentons dans ce chapitre, a été conçu à titre d'exemple, en se basant sur des données spécifiques à une entreprise industrielle du secteur de la confection. Trois politiques d'investissement sont simulées d'après différentes hypothèses de comportement de décideurs[62] (voir ch. VIII § 2.3).

1. POLITIQUE 1 D'EVOLUTION CONTINUE A FAIBLE RISQUE

1.1. COMPORTEMENTS DU MODELE PAR SCENARIO

Nous reprenons les trois scénarios définis au plan d'expériences qui simulent des régimes de fonctionnement des systèmes de production plus ou moins perturbés.

· ***Scénario 1 faiblement perturbant***

Suite au plan d'investissement prévu initialement (cf. données en l'annexe 3b), un excellent niveau de service VC1 (fig. 1) est assuré grâce à une bonne évolution des capacités et des délais de production.

· ***Scénarios 2 et 3 fortement et moyennement perturbants***

Le taux de service remonte de 30% environ en cinq ans (fig. 1). Les investissements VINVD permettant la réduction des délais, sont majorés de 25% par rapport au budget initial de 20 MF (fig. 2). Le modèle réagit lentement sur cinq ans avec une progression moyenne linéaire des capacités VA5 et des délais DPROD (fig. 3).

FIG 1 Scénarios 2 et 3: Indice et service(t) FIG 2 Stocks et investissements(t)

[62] cf. J. DEAN dans "*Capital Budgeting*" [DEA 65].

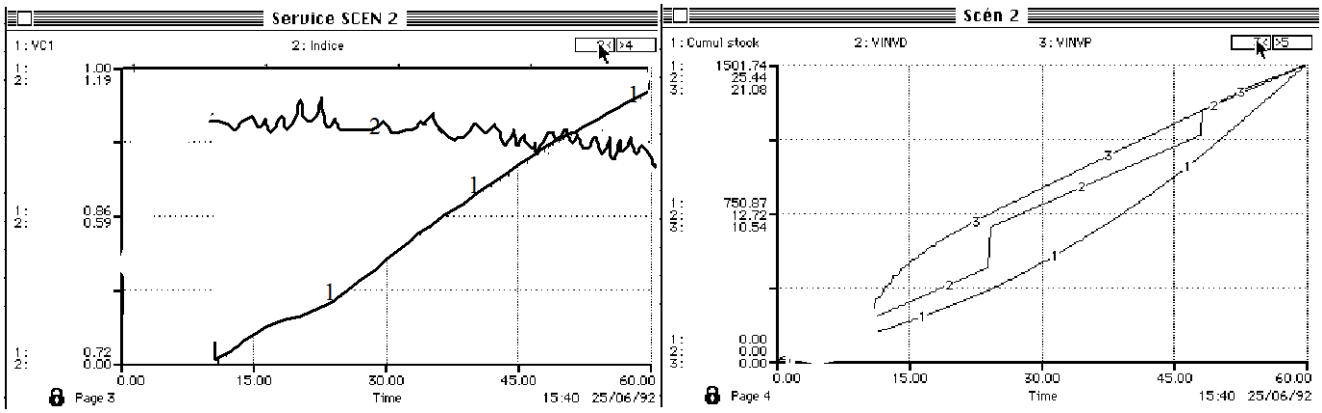
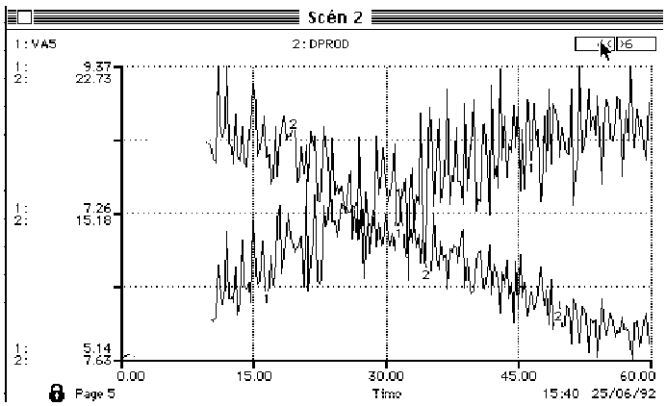


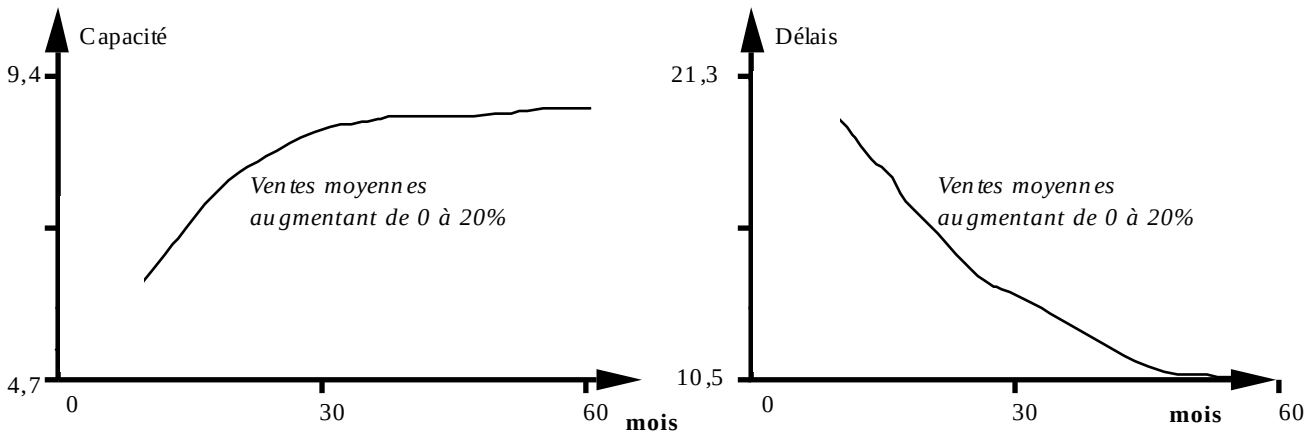
FIG 3 Scénarios 2 et 3: Capacité(t) et délai(t)



1.2. ETUDE DE SENSIBILITE DU MODELE AUX VARIABLES EXOGENES

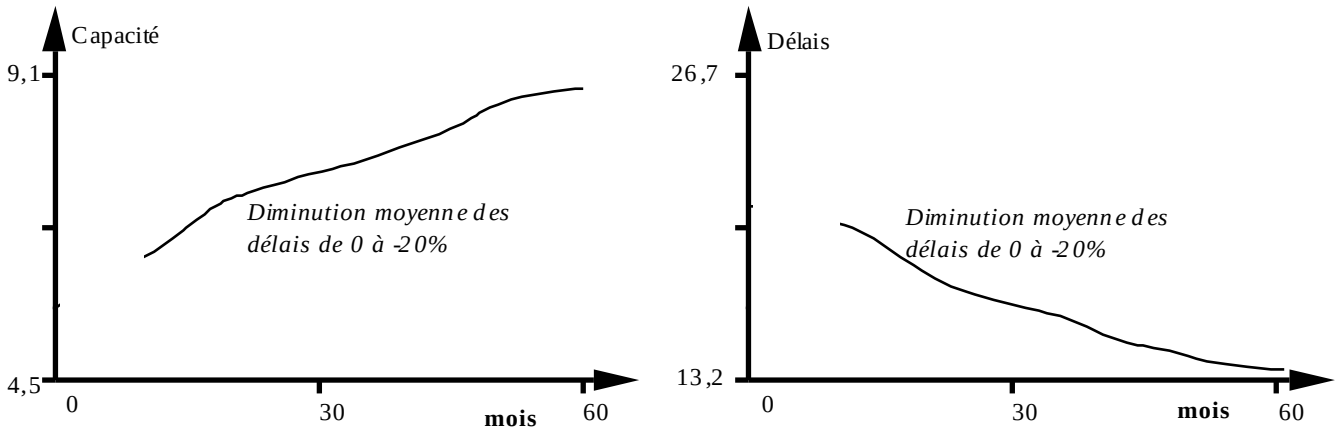
Nous nous basons sur le scénario 3 perturbant moyennement les variables de commande. En augmentant les ventes moyennes de 0% à 20%, les capacités et les délais atteignent au bout de cinq ans, le même niveau que dans un scénario 1 faiblement perturbé (voir figure 4). Les courbes d'évolution ne croissent pas de manière linéaire, comme nous l'avions constaté pour le scénario 1, ce qui conduit à une qualité de service insuffisante au bout de cinq ans.

FIG 4 Scénario 3: Capacité(t) et délai(t) en augmentant les ventes



En diminuant les délais moyens de 0% à 20%, les capacités et les délais évoluent en permettant d'atteindre une bonne qualité de service (fig. 5). La boucle BC2a qui agit sur la capacité et la boucle BC2b agissant sur les délais et la productivité, sont très utiles *(elles sont actionnées en cas de diminution de la qualité de service).*

FIG 5 Scénario 3 : Capacité(t) et délai(t) en diminuant les délais



1.3. CONCLUSION

La politique 1 d'évolution continue à faible risque ne s'adapte pas au scénario 3 moyennement perturbant. Ceci confirme d'ailleurs les résultats obtenus dans nos travaux d'ingénierie antérieurs [THI 90].

2. POLITIQUE 2 D'EVOLUTION DISCONTINUE ET REPETITIVE

2.1. COMPORTEMENTS DU MODELE PAR SCENARIO

· ***Scénario 1 faiblement perturbant***
Les résultats obtenus sont identiques à ceux de la politique d'investissement 1.
· ***Scénario 2 fortement perturbant***
Le service passe de 70% à 100% en cinq ans. Le modèle réagit donc bien, avec une progression linéaire.
· ***Scénario 3 moyennement perturbant***
Les investissements en "délais" sont augmentés de 10% par rapport au budget initial de 20 MF. Le service croît rapidement de 80% à 100%.

2.2. ETUDE DE SENSIBILITE DU MODELE AUX VARIABLES EXOGENES

Augmentation des ventes moyennes de 0% à 20% :
Le service reste très bon.

Diminution des délais moyens de 0% à -20% :

La boucle BC9 contrôlant le niveau d'investissement en fonction de la qualité de service, permet d'éviter un investissement excédentaire de +10 MF sur le niveau d'investissement VINVD, pour un résultat identique. Cette boucle est donc très utile. Nous nous basons cette fois-ci sur le scénario 3 moyennement perturbant.

Augmentation des ventes de 0% à 20% et baisses de délais de 0 à -20%:
Le modèle est peu efficace sur cinq ans, car les délais et les capacités n'évoluent pas assez rapidement. Les investissements ne sont pas suffisamment anticipés.

2.3. CONCLUSION

La politique 2 d'évolution discontinue et répétitive n'est donc pas appropriée à un scénario de type 3 moyennement perturbant.

3. POLITIQUE 3 A RISQUE FINANCIER IMPORTANT

3.1. COMPORTEMENTS DU MODELE PAR SCENARIO

Les modèles répondent très bien aux scénarios suivants, comme le montrent les courbes des figures 6 à 8.

.

Scénario 1 faiblement perturbant

FIG 6 Scénario 1: Indice et service(t)

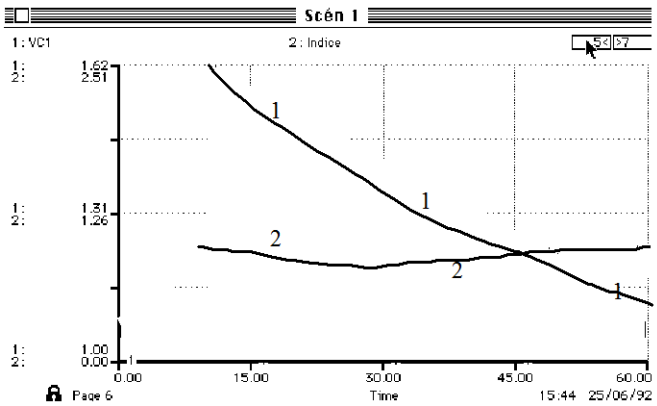
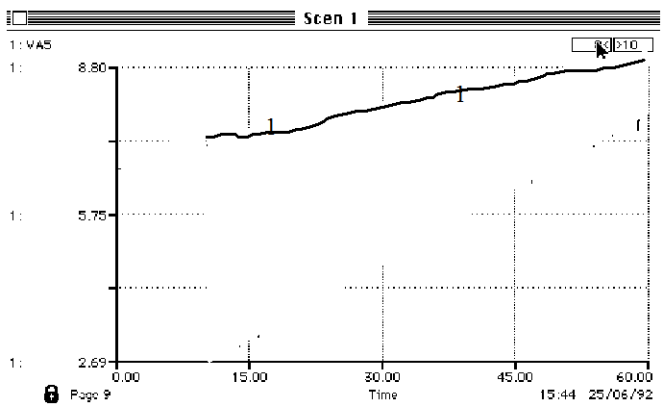


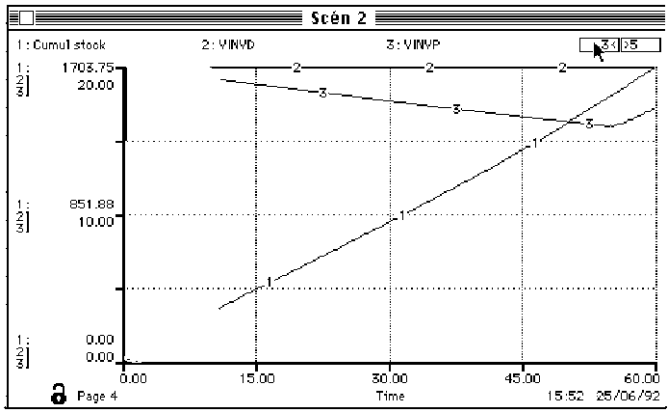
FIG 7 Scénario 1: Capacité(t)



Un taux de service VC1 supérieur à 100%, n'a bien entendu aucune signification physique. Rappelons que ce taux est calculé dans le modèle par le rapport entre le service réel et le service prévu. Les graphiques présentés font figurer des valeurs de VC1 supérieures à 1, qui correspondent à une avance de production sur le plan (sans stock excédentaire).

· ***Scénarios 2 et 3 (fortement et moyennement perturbants)***

FIG 8 Scénarios 2 et 3: Stocks et investissements(t)



3.2. ETUDE DE SENSIBILITE DU MODELE AUX VARIABLES EXOGENES

Augmentation des ventes moyennes de 0% à 20% et diminution des délais moyens de 0 à -20%: Les résultats sont excellents, quelque soit le scénario.

3.3. CONCLUSION

Cette politique de développement conduit à des résultats excellents. Mais en anticipant les investissements, elle comporte en contrepartie un risque financier important au départ, contrairement aux politiques 1 et 2.

CONCLUSION

Ces trois modèles long terme se sont limités à simuler trois politiques d'investissement et à étudier les mécanismes de décision propres aux systèmes de production.
Or dans le cadre d'une investigation à long terme, les paramètres de décision débordent le cadre de la production, ce qui explique par conséquent la limite de ces modèles.
Les modèles de simulation à long terme pourront constituer un outil d'aide à la prise de décision. Ce ne sont pas des modèles de connaissance, car ils se devraient d'intégrer d'autres sous-systèmes du système "entreprise", ce qui serait d'ailleurs prétentieux compte tenu de la complexité. Les résultats de nos investigations à long terme, ont donc un intérêt essentiellement prévisionnel (à partir d'un exemple) et non cognitif.

Chapitre XII

XII. PROPOSITIONS D'AMELIORATION DU CONTROLE DES SYSTEMES DE PRODUCTION A COURT ET A MOYEN TERMES

INTRODUCTION

Nous analysons dans ce chapitre certains mécanismes de décision dans les systèmes de production.

Dans un premier temps, des comportements particuliers et spécifiques au court et au moyen termes sont exposés. Puis nous décrivons quelques phénomènes de couplage que nous avons mis en évidence entre différents mécanismes cybernétiques.

Enfin, nous tenterons d'orienter le choix des logiciels de gestion de production par rapport aux différentes décisions prises dans ces systèmes.

1. ANALYSES COMPORTEMENTALES DES SYSTEMES DE PRODUCTION

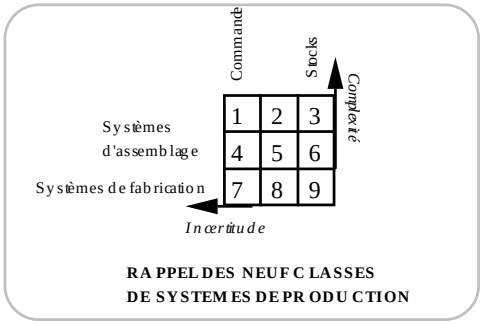
Les analyses que nous allons exposer, sont difficilement «classifiables» car, comme nous l'avions déjà remarqué, il n'existe pas de relation évidente entre les classes des différents systèmes de production (au sens de [KIE 86]) et leurs comportements. Parmi d'autres, nous avons observé des comportements identiques pour des classes assemblant à la commande des produits complexes et des classes de fabrication constituant des stocks. Dans cet exemple, nous n'avons trouvé aucun point commun au niveau de la structure du système opérant. Dans le référentiel complexité-incertitude, ces classes se trouvent dans des positions totalement opposées. Au niveau de la description cinématique[63] de leur système de pilotage, elles possèdent quelques mécanismes cybernétiques identiques, mais il serait imprudent de vouloir les comparer individuellement, à cause de phénomènes de couplage possibles entre plusieurs de ces boucles. Leurs comportements dynamiques observés grâce à la simulation, ont mis en évidence des similitudes que nous allons développer. Ce qui signifie que différentes entreprises, quelque soit leur taille, le type de produits qu'elles fabriquent et de façon générale, quelles que soient leurs caractéristiques intrinsèques, peuvent avoir des comportements identiques devant des aléas internes ou externes perturbant leur système de production.

Nous présentons donc la dynamique de différents comportements spécifiques que nous avons jugés intéressants à développer ici, dans un objectif d'amélioration du pilotage à court et à long termes de ces systèmes.

[63] au sens de R. THOM [THO 72].

1.1. COMPORTEMENTS DES SYSTEMES DE PRODUCTION A COURT TERME

Pour faciliter la lecture, nous présentons ci-dessous un rappel des différentes classes.



RAPPEL DES NEUF CLASSES DE SYSTEMES DE PRODUCTION

· ***Classes 1 et 4*** *(systèmes d'assemblage réalisant des travaux sur-mesure):*
En cas de baisse de productivité, une action importante sur les délais semble être la plus efficace dans ces entreprises de production à la commande. Leur mode d'action consiste à augmenter le contrôle de l'activité de production (par un suivi physique) pour accélérer le flux par une réduction des délais. Il est cependant utile de lisser ces variations de la productivité et d'agir rapidement comme le montre le graphique 3 de l'annexe 3. Il n'est pas nécessaire d'agir directement sur les capacités des postes de charge. Ce qui signifie que la manière la plus efficace et la moins coûteuse à court terme, consiste à «pousser» les flux de production par un contrôle intensif, suite à une baisse de productivité.

· ***Classes 2 et 5*** *(systèmes d'assemblage à la commande à partir d'éléments standards)*:
Les produits finis assemblés dans ces systèmes, se décomposent en nomenclatures à plusieurs niveaux. La difficulté apparaissant dans ces classes, consiste à ajuster les stocks de sous-ensembles à chaque niveau d'assemblage. En effet, il est couramment constaté des retards dus à des difficultés d'appairage de ces stocks. Devant les aléas fréquents dans la production des différentes pièces composantes, une planification de type MRP1 à flux poussé, ne met pas en évidence ce type de problèmes. Par contre, un flux tiré sur toute la chaîne de production (des composants de base aux produits finis), nécessitera une synchronisation des flux amonts, qui pourra être atteinte après atténuation (et même suppression totale) des dysfonctionnements. C'est par la mise en oeuvre de cette technique de production, que l'équilibrage des niveaux de stocks sera nécessaire et par conséquent, la réduction des causes de ces déséquilibres à court terme.
A défaut d'amélioration de leur organisation, nous avons constaté que les systèmes de classes 2, 5 et 8 ont intérêt à réagir rapidement en cas de dysfonctionnements à court terme. Par contre, quand leur taux d'arrêts de production est élevé (par exemple de 20%), il est préférable d'agir plus modérément.

· ***Classes 3*** *(systèmes d'assemblage constituant des stocks de biens complexes),* ***7*** *(systèmes de fabrication travaillant à la commande)* ***et 8*** *(systèmes de fabrication travaillant à la commande à partir d'éléments standards):*

Dans le cas où le taux d'arrêts de production devient important et dépasse un certain seuil, ces entreprises n'ont pas intérêt à agir immédiatement sur la capacité de production à court terme. A ce seuil, d'autres mécanismes assurent le redressement de la situation. Réagir directement constitue un frein à d'autres décisions plus efficaces prises par ailleurs, comme par exemple, la réaction de l'entreprise suite à la baisse du taux de service.

· ***Classe 6*** *(systèmes d'assemblage de produits simples constituant des stocks de produits finis):*
Les entreprises de cette classe présentent peu de difficultés à gérer l'activité physique à court terme. Ces industries de *process* automatisés sont suffisamment robustes et supportent de fortes sollicitations de leurs variables de commande. Nous l'expliquons par le peu d'interventions humaines nécessaires au pilotage de l'outil de production.

· ***Classe 7*** *(systèmes de fabrication travaillant à la commande):*
En cas de baisse de la productivité dans ces entreprises de fabrication, il est nécessaire d'augmenter la capacité de la production, ce qui est à l'opposé du comportement des systèmes d'assemblage. Ces classes ne sont donc pas si sensibles à une intensification d'un contrôle de production et nécessitent par ailleurs, pour assurer un bon service client, une croissance de la capacité par appel aux heures supplémentaires ou à la sous-traitance par exemple.

· ***Classe 9*** *(systèmes de fabrication constituant des stocks de produits finis):*
Ces entreprises sont dans l'obligation de disposer suffisamment de pièces en stock, pour répondre à la demande irrégulière de leurs clients. En cas de dysfonctionnement de leurs outil productif et de ventes aléatoires, nous avons constaté qu'elles réagissaient de manière exagérée à ces aléas. Cela peut s'expliquer à priori par un coût d'obtention relativement faible de leurs produits. Mais le risque d'une telle décision, est de constituer des stocks de produits dont l'importante couverture pourra être la cause d'obsolescence à terme.

1.2. COMPORTEMENTS DES SYSTEMES DE PRODUCTION A MOYEN TERME

· ***Classes 1 et 4*** *(systèmes d'assemblage réalisant des travaux sur-mesure):*
A moyen terme, les systèmes d'assemblage sur commande ont des difficultés à réagir devant des perturbations de moyenne intensité de leurs indicateurs (scénario 3). Ces classes doivent contrôler et éviter des dérives de ces variables de contrôle. Assurer un climat social favorable, conserver un personnel d'exécution hautement qualifié, sont quelques moyens d'y parvenir.
En cas de baisse brutale des ventes, les classes 1 et 4 ainsi que la classe 8 des systèmes de fabrication, agissent très rapidement sur leur capacité en amplifiant le phénomène. Ceci conduit à des difficultés et des retards de livraison. Elles réduisent alternativement leurs capacités, puis les redressent pour les augmenter à nouveau, ce qui entraîne des phénomènes oscillatoires et des pertes d'efficacité. Suite à une baisse imprévue des ventes, nous expliquons ce comportement par la tendance de ces entreprises à diminuer rapidement leurs coûts directs, pour permettre de financer leurs coûts fixes à moyen terme.

· ***Classes 3 et 6*** *(systèmes d'assemblage constituant des stocks de produits finis):*

En cas d'augmentation des manquants, nous avions observé sur le moyen terme, que les entreprises pouvaient, soit augmenter la taille de leurs séries, soit renforcer le contrôle de leur production. Dans les systèmes de classes 3 et 6, nous avons détecté que l'action la plus efficace dans ces circonstances, consistait à agir sur les séries de production pour augmenter leurs stocks. Cette observation est contraire aux classes à production faiblement automatisée (cf. classes 1 et 4 par exemple), dans lesquelles le renforcement des contrôles auprès de leur personnel direct, présentait le plus d'intérêt.

· ***Classes 3*** *(systèmes d'assemblage sur stock),* ***7 et 8*** *(systèmes de fabrication):*
Ces systèmes doivent veiller à ne pas laisser dégrader certains de leurs indicateurs car ils sont très sensibles à leur variation. Les simulations ont mis en évidence leur grande difficulté à réagir devant des dysfonctionnements importants (basé sur le scénario 2).

· ***Classe 5*** *(systèmes d'assemblage de produits "simples" à partir d'éléments standards)*:
Cette classe d'assemblage présente un comportement curieux en cas de ventes saisonnières. En choisissant de planifier ses capacités de production en suivant l'évolution périodique de la demande, ces entreprises réagissent par paliers devant des dysfonctionnements internes et font progresser leurs capacités et leurs délais de manière exagérée. Il est donc souhaitable pour cette classe constituant aussi bien des stocks de sous-ensembles sur plan de production, que des produits finis assemblés à la commande, d'assurer une flexibilité également pour la fabrication de ses sous-ensembles de niveaux inférieurs, par une production en flux tiré (avec la même remarque qu'à court terme).

Observations générales:
Nous constatons globalement la nécessité de conserver beaucoup de mécanismes de contrôle dans les systèmes d'assemblage travaillant à la commande. Les systèmes de fabrication quant à eux, nécessitent moins de ces contrôles, ce qui est probablement dû à leur organisation moins complexe. Rappelons que nous ne nous sommes pas intéressés dans cette thèse, aux problèmes de l'ordonnancement de la production dans ces systèmes de fabrication.
Les systèmes d'assemblage sont pour la plupart, sensibles à la qualité de transmission des informations et des ordres. Il est donc conseillé de veiller à gérer correctement l'information, par exemple avec l'assistance de moyens informatiques adéquats.
Pratiquement, tous les systèmes réagissent rapidement à une dérive de leurs coûts de production, en mettant en oeuvre un contrôle de gestion rigoureux. Nous avons cependant noté que ce contrôle s'était révélé inutile dans la classe 6 d'industries fortement automatisées.
En cas de dégradation du service client, des actions de réorganisation de l'outil productif sont nécessaires. Dans ce cas, l'objectif des systèmes de production devrait se concentrer sur la réduction des délais, des manquants, rebuts et retouches, des arrêts de production et de l'amélioration de la productivité. Il s'agit donc aussi bien de fiabiliser l'outil productif sur le plan technologique, que sur le plan logistique.

1.3. PHENOMENES DE COUPLAGE A MOYEN TERME

Dans certaines circonstances, pour assurer une efficacité globale, nous avons constaté la nécessité de coupler différents mécanismes de pilotage. L'effet inverse s'est

également observé, c'est-à-dire que la présence de mécanismes couplés, a provoqué une baisse du taux de service.

· ***Classes 2 et 5*** *(systèmes d'assemblage à la commande à partir d'éléments standards):*
Face à l'augmentation des taux de manquants, de rebuts et de retouches, ces entreprises réagissent en réduisant les délais de production (premier mécanisme) et en augmentant le niveau de stockage (second mécanisme). Il est cependant curieux de constater que la qualité de service s'améliore en supprimant progressivement ces contrôles et les actions correspondantes. En effet, ces deux mécanismes se sont avérés inutiles pour des taux très faibles et par contre très utiles quand ils étaient couplés pour des valeurs de taux élevées. Cela signifie que ces systèmes de production possèdent un seuil de sensibilité à ces indicateurs au delà duquel, des actions combinées devraient se déclencher, aussi bien sur les délais que sur le niveau de stockage (la première action influençant la seconde).

· ***Classe 3*** *(systèmes d'assemblage sur stock):*
Un couplage de plusieurs décisions est nécessaire pour faire face à une mauvaise transmission des informations et des ordres dans cette classe.
Nous avons également constaté qu'en cas de variation du ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés), le contrôle direct n'est pas utile pour agir sur les délais, la productivité, les taux d'arrêts et les taux de manquants, rebuts et retouches. Dès que le dépassement budgétaire est de l'ordre de 40% (il s'agit d'un cas pessimiste, mais réaliste), les mécanismes directs couplés ont peu d'utilité, car d'autres boucles assurent un niveau de service correct dans ce cas. Par contre, l'absence d'une des composantes de ce couplage, a provoqué une baisse de 10% du service. Ceci peut s'expliquer par un déséquilibre provoqué par la séparation d'une des boucles de régulation couplées.

· ***Classe 8*** *(systèmes de fabrication travaillant à la commande à partir d'éléments standards):*
Dans le cas d'une mauvaise transmission des informations et des ordres, le couplage des trois boucles de régulation de nos modèles, engendre une dégradation du service. Ce phénomène s'observe jusqu'à un certain seuil minimal, mais l'utilité de ces décisions est prouvée dès que la qualité de transmission devient très défavorable et se situe en dessous de ce seuil.

· ***Classe 9*** *(systèmes de fabrication constituant des stocks de produits finis):*
En cas de variation du ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock désiré), certains mécanismes couplés agissent simultanément sur les délais de production et sur le niveau de stock objectif. Nous conseillons la suppression de ce couplage dans cette classe de système de production, ce qui conduira à améliorer le service dans un scénario moyennement perturbé.

1.4. CONCLUSION

Nous avons montré que les problématiques du pilotage des systèmes de production à court et à moyen termes, n'étaient pas forcément dépendantes de la structure de leur organisation physique. D'autre part, il est difficile de classifier ces comportements dynamiques par classe de systèmes de production et/ou par horizon de décision.

Ces travaux pourront constituer une première approche vers une typologie des comportements des systèmes de production industriels.

2. APPORT DE LA RECHERCHE POUR L'AMELIORATION DE L'INGENIERIE DES SYSTEMES DE PILOTAGE ET DE LEUR CONTROLE

Nous allons tenter une «introspection[64]» de nos travaux en nous situant au niveau de l'utilisateur. Notre pratique de la gestion de production dans différents types d'entreprises, devrait nous faciliter la mise dans ces conditions.
Au premier abord, nos modèles paraissent simplifier la réalité (grise comme la qualifia un directeur d'exploitation que nous avons interviewé). Le président d'une association professionnelle a considéré que ces travaux pouvaient permettre d'approcher différemment les problèmes complexes qu'ont à résoudre les dirigeants ou les concepteurs d'unités de production.
Dans la réalité, les mécanismes que nous avons simulés, sont mis en oeuvre pour assurer un service client acceptable et nécessitent une intervention humaine (éventuellement assistée par ordinateur). Nos préconisations consistent dans certains cas, à supprimer quelques unes de ces décisions, ce qui aura pour conséquence de réduire les coûts indirects correspondants et même, d'améliorer le service (voir le chapitre XI).
Dans un objectif d'informatisation (même partielle) des systèmes de pilotage, nous présentons ci-dessous (fig. 1 et 2) une relation entre les différentes boucles de contrôle et les moyens humains et matériel nécessaires à leur fonctionnement. La première colonne liste toutes les boucles de régulation (voir la légende des codes BCi ci-après). La deuxième colonne précise la responsabilité des décisions correspondantes et la troisième, le type d'informatisation possible (en tant qu'outil d'aide à la prise de décision). Nous avons également précisé les types de décision, en faisant référence à leur classification exposée dans le tableau de la figure 1 du chapitre V.

Légende des tableaux

GMAO : Gestion de la maintenance assistée par ordinateur
GPAO : Gestion de production assistée par ordinateur
GPAO et simulation: Logiciel de simulation puisant des informations dans la base de données du logiciel de GPAO.
DG : Direction générale
DRH: : Direction des ressources humaines
Finance : Direction financière
Gest. de Prod.: Direction de la gestion de production
Produc. : Direction de la production
Qualité : Direction de la qualité
Syst. infor.: Direction des systèmes d'information
Technique: Direction technique et organisation

[64] nous empruntons ce terme précis à W. WUNDT, tout en étant opposé à son approche structuraliste [TRO 80].

Rappel des boucles des modèles court terme

BC1:	l'exigence commerciale agit sur la capacité de production
BC2:	le taux de service et la qualité des produits agissent sur les délais
BC3:	le taux d'arrêts de production agit sur la capacité de production
BC4:	le taux de productivité agit sur la capacité de production et sur les délais de production
BC5:	le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur la taille des séries lancées et sur les délais de production
BC7:	le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) agit sur les capacités et sur la taille des séries lancées

FIG 1 Aides à la décision à court terme

Décisions de régulation au sens de R.N. ANTONY [ANT 65]
et décisions programmables au sens de H.A. SIMON [SIM 60]

Décisions	**Responsabilités**	**Type d'informatisation possible**
BC1	Gest. de Prod.	GPAO
BC2	Gest. de Prod.	Logiciel de suivi de production
BC3	Gest. de Prod.	GPAO
BC4	Gest. de Prod.	GPAO
BC5	Gest. de Prod.	GPAO
BC7	Gest. de Prod.	GPAO

Rappel des boucles des modèles moyen terme

BC1:	l'exigence commerciale agit sur la capacité de production
BC2a:	le taux de qualité des produits agit sur le taux de rebuts et de retouches
BC2b et c:	le taux de service agit sur les délais de production
BC2d:	le taux de service agit sur le niveau de stock désiré
BC2e:	le taux de service agit sur la productivité, les délais, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts de production.
BC3:	le taux d'arrêts de production agit sur la capacité
BC4a, b:	le taux de productivité agit sur la capacité
BC4c:	le taux de productivité sur les délais
BC5a, b:	le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur les délais
BC5c:	ou sur le niveau de stock désiré
BC6a, b et c:	la qualité de transmission de l'information et des ordres agit pour les trois boucles sur les délais de production
BC7a, b:	le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) agit sur les délais
BC7c:	le ratio de stockage agit sur le niveau de stock désiré
BC8a et b:	le ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés) agit sur la productivité, les délais, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts de production.

FIG 2 Aides à la décision à moyen terme

ou décisions de pilotage au sens de R.N. ANTONY [ANT 65]

Décisions	**Responsabilités**	**Type d'informatisation possible**	**Types de décision** (au sens de H.A. SIMON)
BC1	Gest. de Prod.	GPAO	Programmable
BC2 a et c	Product, DRH.	*non*	Hybrides
BC2b	Gest. de Prod.	Logiciel de simulation	Structuré
BC2d	Gest. de Prod.	GPAO	Programmable
BC2e	Technique, Finance	Logiciel de simulation	Hybride
BC3	Maintenance, DRH	GMAO	Programmable et hybride
BC4a	Product, DRH.	*non*	Hybride
BC4b	Contrôle de Gest, Prod.	GPAO et simulation	Structuré
BC4c	Technique	Logiciel de simulation	Hybride
BC5a	Gest. de Prod., technique	GPAO et simulation	Structuré
BC5b	Qualité, technique	*non*	Hybride
BC5c	Gest. de Prod.	GPAO	Programmable
BC6a	DRH, Syst. infor.	*non*	Hybride
BC6b	Syst. infor, technique	Logiciel de simulation	Hybride
BC6c	Gest. de Prod.	GPAO et simulation	Hybride
BC7a	Gest. de Prod., technique	Logiciel de simulation	Hybride
BC7b	Syst. info, Gest. de Prod.	GPAO et simulation	Structuré
BC7c	Gest. de Prod., finance	Logiciel de simulation	Hybride
BC8a	DG, finance, technique	Logiciel de simulation	Hybride
BC8b	Contrôle de gestion	GPAO et simulation	Hybride

Le tableau précédent met en évidence la pluridisciplinarité des acteurs intervenant dans la prise de décision en production. Ceci confirme d'ailleurs la nécessité d'une approche systémique globale (et non spécialisée) des systèmes de production.

CONCLUSION

Certains comportements que J.W. FORRESTER qualifiait d'«anti-intuitifs» [FOR 68], ont été mis en évidence dans chacune des classes de systèmes de production.

Nous avons observé une seconde fois (voir les résultats de l'enquête au chapitre VI), la difficulté d'établir des relations entre les classes de systèmes de production et leurs comportements. Ceci signifie qu'une typologie basée sur la structure des systèmes opérants, ne suffit pas à expliquer des comportements dynamiques de systèmes de production. Nous n'avons donc pas trouvé de «corrélation» entre les caractéristiques du système opérant et celles du système de pilotage des systèmes de production.

Nous avons également étudié la structuration et la possibilité d'automatisation de certains systèmes de pilotage.

Nous souhaitons conclure en citant J-F. COUDURIER [COU 91]: «c'est parce que les méthodes de simulation substituent ou intègrent les méthodes de gestion de production MRP, Kanban, OPT, ... que les outils de simulation deviennent des outils de gestion et d'aide à la décision en production».

Chapitre XIII

XIII. EVALUATION DE LA RECHERCHE ET PERSPECTIVES

INTRODUCTION

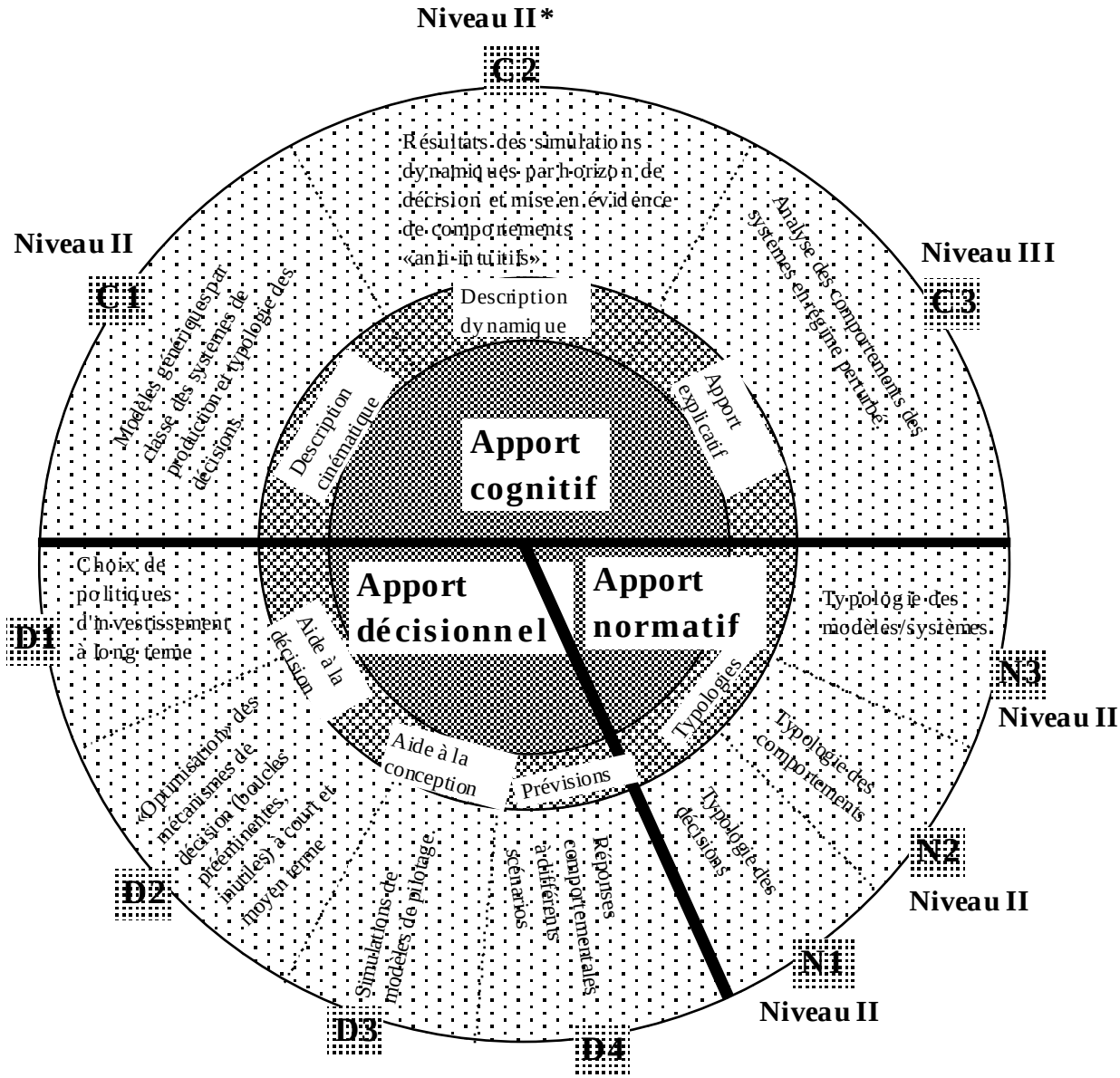
Nous présentons tout d'abord une synthèse de cette recherche. Nous exposons ensuite les limites de nos travaux, de l'approche qualitative des systèmes de production, jusqu'à la conception de modèles génériques et à leurs simulations dynamiques. A chaque étape de cette recherche et pour chacune des remarques effectuées, nous tenterons de proposer des solutions (si cela est possible) permettant d'améliorer ce travail.
Enfin, nous proposons en fin de ce chapitre, de nouvelles pistes de recherche avec les objectifs opérationnels suivants:
1. Poursuivre l'amélioration de la connaissance des comportements des systèmes complexes par une recherche intervention au sens de M-J. AVENIER [AVE 85], ou recherche action au sens de M. LIU [LIU 86] (apport cognitif)[65].
2. Elaborer un outil d'«audit systémique» des systèmes de production (apport diagnostique).
3. Améliorer la conduite et le pilotage opérationnels des systèmes de production par le développement de systèmes experts (apport décisionnel).

1. SYNTHESE DE LA RECHERCHE

Ce paragraphe présente trois apports de la thèse pour l'amélioration de la connaissance des comportements des systèmes de production et de leur contrôle. Comme nous l'avions précisé en introduction, nous situerons également ces travaux selon la hiérarchie des «*inquiry systems*» de J-P. Van GIGCH [GIG 85].
La figure 1 décompose en dix parties les trois aspects de cette recherche et se réfère aux niveaux de logique suivants: le niveau I des modèles descriptifs obtenus à partir du réel perçu, le niveau II de la science appliquée aboutissant à des modèles explicatifs et le niveau III «objet» de la science pure dont l'objectif est de définir des modèles prescriptifs. Rappelons que nous avons basé cette thèse sur un métaniveau systémique de niveau IV.

[65] «K. LEWIN assigne au chercheur un rôle d'expérimentateur qui doit modifier la réalité sociale afin de la connaître». [LIU 86].

FIG 1 Différents apports de la thèse



**** Niveaux selon J.P. Van GIGCH [GIG 85]***

Les reports codifiés (Ci, Nii et Diii) sur la circonférence du cercle extérieur, sont explicités ci-après.

i) APPORT COGNITIF DE LA RECHERCHE

Nous proposons:

C1. une description cinématique des systèmes de production basée sur:
· un système opérant qui se caractérise par deux dimensions, l'incertitude et la complexité (voir ch. II. §1.2.2),
· des modèles génériques par horizon décisionnel qui représentent les systèmes d'information et de pilotage (voir ch. VII. §.3.),
· une typologie des décisions de production (voir ch. VI. §2.3.),

C2. une description dynamique des comportements observés par simulation des modèles sous différents scénarios perturbants (voir ch. X),
C3. une explication des mécanismes de régulation sensibles à partir des résultats de simulations (chapitre XII).

ii) APPORT NORMATIF DE LA RECHERCHE

Nous exposons:

N1. une classification des décisions obtenue par une enquête intensive (voir ch. V. §3 et VI. §2.3.),
N2. une première avancée vers une classification des comportements issue des résultats de simulations des modèles (voir ch. XII),
N3. une typologie des modèles et des systèmes de production découlant des modèles génériques que nous avons conçus. Une combinaison de modèles de systèmes opérants et de boucles de régulation (voir ch. VII) permet de composer ce type de modèle.

iii) APPORT DECISIONNEL DE LA RECHERCHE

Cette recherche peut constituer:

D1. une aide à la décision pour le choix d'investissements à long terme (voir les résultats de simulations du modèle exposé au chapitre XI),

D2. une aide à la décision permettant d'améliorer le fonctionnement des boucles de régulation ou de les inhiber (voir la synthèse des résultats de simulations au ch. X),
D3. une aide à l'ingénierie des systèmes de pilotage grâce au caractère modulaire des modèles élaborés,
D4. un outil de prévision en simulant différents scénarios d'évolution des variables internes ou exogènes au système de production.

2. LIMITES DE LA RECHERCHE

2.1. PRE-ENQUETE QUALITATIVE

Rappelons que cette phase d'exploration des entreprises industrielles a été à la base de la conception de nos modèles génériques. Nous listerons ci-dessous les limites de cette démarche d'audit par interviews.

Limites de notre approche	*Solutions préconisées*
- le choix des entreprises et leur nombre insuffisant. - la qualité et l'exactitude des réponses relevées sur le terrain.	- poursuite de ce type d'enquête par interview auprès d'autres entreprises[66]

2.2. ANALYSE QUANTITATIVE DE L'ENQUETE

Les interviews que nous avons menées, ont permis d'élaborer un questionnaire qui a été envoyé à différentes entreprises. Une analyse statistique des réponses enregistrées a été réalisée.

Limites de notre approche	*Solutions préconisées*
- le faible nombre d'entreprises questionnées. - la qualité et l'exactitude des réponses au questionnaire.	- refaire une nouvelle enquête avec le même questionnaire.
- pas d'analyses statistiques évoluées (analyses typologique, hiérarchique, etc...).	- exploiter les données actuelles à partir d'autres méthodes descriptives[67].

2.3. LIMITES DES MODELES

A partir d'un référentiel théorique initial, de l'enquête préalable et de nos expériences industrielles, nous avons élaboré des modèles de simulation continue à caractère générique.

Limites de nos modèles	*Solutions préconisées*
- le caractère générique limité de nos modèles.	- élaborer des modèles différents à partir des mêmes hypothèses mais en se basant sur un nouveau référentiel de connaissances.

[66] ce travail est réalisé tous les ans par des étudiants, dans le cadre d'un enseignement à la gestion de production.

[67] un groupe d'étudiants de l'Ecole d'Ingénieurs en Informatique de Tours (E3I), a analysé nos données en se basant sur d'autres méthodes statistiques.

- les sous-systèmes opérants ont une structure simplifiée.	- concevoir de nouveaux modèles avec des systèmes opérants plus élaborés (voir notre proposition [KIE 92]).

Limites de nos modèles	*Solutions préconisées*
- le processus d'agrégation que nous avons réalisé, présente le risque de masquer certains phénomènes paraissant à priori mineurs.	- concevoir d'autres modèles génériques à partir d'une nouvelle enquête.
- les sous-systèmes opérants à court terme sont représentés par des modèles continus.	- concevoir des modèles de simulation hybrides (discret pour la partie opérante et continu pour la commande).
- la classification générique est ambitieuse et ne saurait couvrir l'ensemble des systèmes réels.	- de par la conception modulaire des modèles, il est possible de personnaliser un modèle spécifique au système opérant réel avec des boucles de décision correspondantes.
- problème de validité des modèles par manque de théorie sur les comportements de systèmes complexes.	
- pas de test de cohérence entre les décisions des différents horizons.	- créer des liens entre les modèles hiérarchiques.

Limites de nos modèles	*Solutions préconisées*
- seules certaines variables essentielles sont présentes dans les modèles.	- effectuer une nouvelle enquête.

- représentativité des décisions dans les modèles génériques long terme.	- limiter ces modèles à l'aide à la prise de décision.

2.4. LIMITES DU PLAN D'EXPERIENCES

Devant une combinatoire complexe, le plan d'expériences a été élaboré en s'inspirant de nos observations sur le terrain.

Limites du plan d'expériences	*Solutions préconisées*
- plan limité à trois scénarios, complétés par des bruits, *pulses*, *steps* et saisonnalité dans les ventes.	- créer d'autres scénarios perturbateurs intermédiaires et les croiser.
- choix des conditions d'expériences à l'aide du jugement (choix heuristiques).	- expérimenter les modèles en relation avec différents responsables industriels.

2.5. LIMITES ET CRITIQUES DES RESULTATS DE SIMULATION

Les modèles génériques ont été simulés de manière continue. Les résultats ont été analysés pour chaque classe de systèmes de production et chaque horizon de décision.

Limites et critiques des résultats	*Solutions préconisées*
- résultats basés sur des modèles de systèmes opérants simplifiés (à court terme).	- compléter les analyses à partir de modèles de systèmes opérants plus complets.
- à long terme, l'analyse s'est limitée aux choix d'investissements.	- modifier les modèles en intégrant d'autres paramètres (sociaux par exemple).
- les résultats sont difficilement classifiables.	- traiter statistiquement les données qualitatives obtenues (formes des courbes, réponses, ...).

- validité des résultats obtenus.	- appliquer sur le terrain les recommandations (travail en cours actuellement).
- limites des résultats obtenus à partir d'un seul plan d'expériences.	- enrichir les résultats par d'autres simulations sous d'autres conditions d'expériences.

3. POST-VALIDATION DE NOS RESULTATS DE SIMULATION

Sur une durée de deux ans environ, nous avons prévu de soumettre nos modèles génériques à différentes entreprises industrielles.

Nous avons d'ores et déjà consulté une entreprise de la classe 6 qui faisait partie de l'échantillon de l'enquête initiale. Nous présentons succinctement les remarques enregistrées au vu des résultats de simulation.
A court terme, nous avions vérifié qu'en cas de baisse de productivité, un contrôle agissant sur les délais (en accélérant le flux) était plus efficace qu'une augmentation directe de capacité (et moins coûteux). Cette préconisation a dorénavant été retenue systématiquement dans cette entreprise.
L'analyse à moyen terme a également confirmé la mise en oeuvre rapide de moyens nécessaires en cas d'augmentation brutale des ventes. Dans ces circonstances particulières, le directeur général de cette société nous a fait remarquer qu'une étude préalable était menée avant toute prise de décision (aspect que nous n'avons pas modélisé). Enfin, la prééminence de la boucle contrôlant la productivité à moyen terme a été validée.
Par ailleurs, nous avons planifié plusieurs demi-journées de rencontres-débats avec des responsables industriels, auprès desquels nous présenterons nos résultats de simulation. L'objectif de ces tables rondes consisteront à vérifier à posteriori la validité de ces modèles et à apporter à ces entreprises, une aide éventuelle au pilotage de leur système de production.
Par la suite, nous souhaitons mener des expérimentations sur le terrain, notamment pour inhiber ou renforcer certains mécanismes de contrôle (voir paragraphe 4.1. suivant). A ce propos, nous venons de prendre connaissance que la compagnie IBM France expérimente actuellement une nouvelle méthode de fonctionnement d'unités de production sans boucles de régulation «humaine». Cette méthode découle de travaux de recherche sur les systèmes dynamiques, entrepris par P. MASSOTE [MAS 93] et s'inspirant de la théorie du chaos déterministe.

4. NOUVELLES VOIES VERS L'AMELIORATION DE LA REGULATION ET DU PILOTAGE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Nous nous intéressons plus particulièrement aux décisions de régulation et de pilotage au sens de ANTONY [ANT 65] et aux décisions non-programmables au sens de H.

SIMON [SIM 60]. Comme nous l'avions constaté dans notre analyse des outils d'aide à la décision (voir le tableau de la figure 1 en conclusion de la partie 2), la simulation est une technique souvent utilisée pour aider à la prise de décision de ce type.

4.1. PROPOSITION D'UNE RECHERCHE INTERVENTION

A partir de cette thèse, il s'agit d'appliquer sur le terrain les résultats les plus significatifs obtenus par la simulation (voir le chapitre X et l'annexe complémentaire détaillant les modèles).

Rappelons que l'approche qualitative initiale avait permis d'élaborer les modèles génériques par induction. Au niveau méthodologique, cette nouvelle démarche permettrait de renforcer la validité de ces modèles cognitifs et dynamiques, grâce à l'applicabilité sur le terrain de leurs comportements simulés.
Au niveau décisionnel, les mécanismes jugés inutiles seraient supprimés réellement sur le terrain. Les boucles déclarées prééminentes seraient par contre renforcées, pour améliorer l'efficience globale du système de production et le «défragiliser».
La recherche proposée serait de type intervention [AVE 85], car l'attitude vis-à-vis des systèmes de production, serait transformative au sens de H. SAVALL: «...dans lequel l'observation s'effectue dans le cadre d'une transformation volontaire et structurée de certains aspects du milieu observé» [SAV 84].

Durée estimée de la recherche: 3 ans
Méthode: Conduite de plusieurs interventions en entreprise pour vérifier les hypothèses.
Objectifs: Nouvelles propositions de pilotage des systèmes de production et "renforcement" des modèles (robustesse).

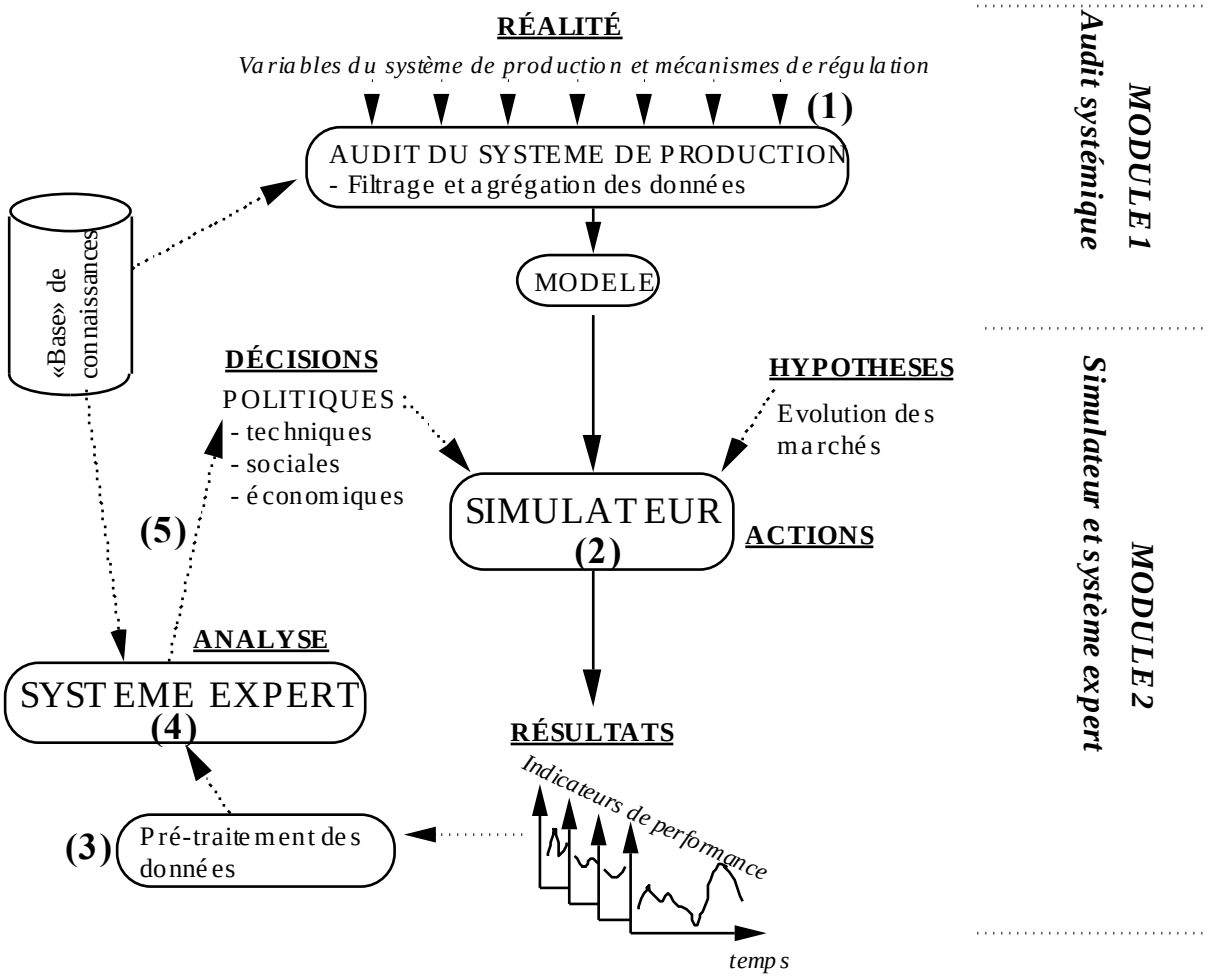
4.2. PROPOSITION DE DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE PROSPECTIVE COMPORTEMENTALE ET D'AIDE A LA DECISION

L'architecture globale de cet outil se décomposerait en deux modules (voir figure 2) :

- le premier module consisterait à effectuer un audit systémique d'un système de production particulier permettant d'en extraire des mécanismes sensibles et des variables agrégées[68],
- le second module permettrait le couplage entre un simulateur et un système expert. Ce dernier puiserait ses connaissances dans les primitives de comportements dégagées lors des simulations des modèles génériques de cette thèse.

FIG 2 Principe d'une simulation à base de connaissances

[68] le principe détaillé est exposé au paragraphe 4.3. suivant.



Principe du modèle en cinq phases *(voir les références fig. 2) :*

· *Phase (1)* : Il s'agit tout d'abord d'appréhender la structure et les mécanismes de régulation d'un système de production particulier (phase qualitative). Ensuite, il est nécessaire d'agréger et d'évaluer les différentes composantes du système, de manière à concevoir un modèle de simulation conforme à la démarche conceptuelle menée dans cette thèse.

· *Phase (2)* : Le modèle élaboré est simulé d'après des choix décisionnels heuristiques (politiques sociales, techniques et financières choisies à priori par intuition et/ou par expérience) et des hypothèses particulières et plausibles sur l'évolution des ventes.

· *Phase (3)* : Les données numériques d'évolution des principaux indicateurs sont analysées statistiquement. Les tendances générales, les maximas, minimas,... et autres caractéristiques particulières de ces variations, sont dégagées.

· *Phase (4)* : A partir de sa base de connaissances, le système expert analyse les faits observés après pré-traitement des données dans la phase précédente. Les règles de comportement découlent du bilan des simulations de nos modèles génériques.

· *Phase (5)* : L'expert agit alors sur les décisions soit en renforçant certains mécanismes, soit en les inhibant. Une nouvelle simulation permet d'observer les résultats améliorés.

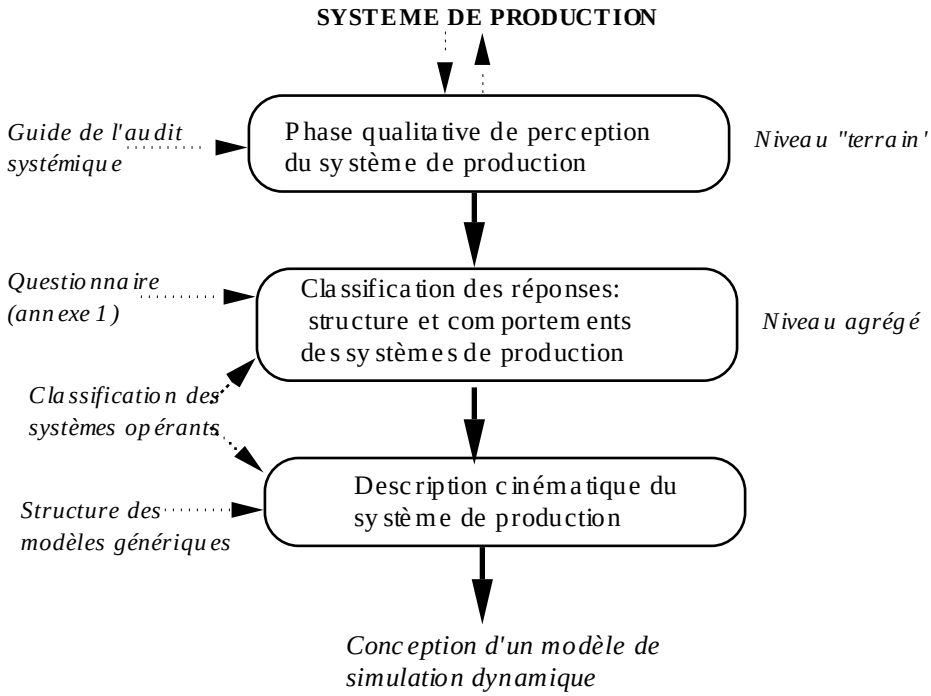
Durée estimée de conception du module 2 : 3 ans
Méthode: travail en laboratoire, développement d'un système à base de connaissances couplé à un modèle de simulation.

Cet outil informatique de régulation active se positionnerait dans la catégorie des systèmes de régulation auto-adaptatifs et auto-optimisants se situant à un niveau stratégique ou de gestion (modèle «contrôleur» au sens de B. WALLISER [WAL 77]).

4.3. PROPOSITION DE DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AUDIT SYSTEMIQUE DE PRODUCTION

Nous proposons un «audit systémique» permettant d'appréhender les mécanismes de décision en cas de dysfonctionnements et d'aléas internes et externes. Cette démarche ne se limiterait pas à une «radiographie» statique de l'entreprise et de son organisation, ses effectifs de production, son organigramme et son environnement (cf. [BOY 88]).
Ce type d'audit se fonderait sur une description cinématique[69] et cybernétique des systèmes de production en univers incertain, et non sur les caractéristiques des produits, les politiques d'approvisionnement et d'achat, ou encore les techniques d'ordonnancement.
Le schéma fonctionnel de l'application est présenté dans la figure 3.

FIG 3 Schéma fonctionnel de l'outil d'audit systémique



[69] au sens de R. THOM [THO 72].

Pour réaliser un audit de ce type, trois phases seraient nécessaires:

1. Une phase de compréhension des mécanismes de décision dans le système de production observé, basée sur le guide d'audit semi-directif [THI 93a].
2. Une classification des données concernant la structure du système opérant et les comportements, selon les neuf classes de systèmes de production (selon [KIE 86]) et les réponses proposées dans le questionnaire situé en annexe 1 de cette thèse.
3. Enfin, la description cinématique s'effectuerait d'après la structure des modèles génériques et les boucles cybernétiques de décision.

L'objectif final consisterait à élaborer un modèle de simulation dynamique du système de production "audité". Ce travail préliminaire permettrait par la suite, de mener des investigations pour l'amélioration du pilotage de ce système, quelque soit l'horizon de décision.

Durée estimée de la recherche: 3 ans
Méthode: Cette recherche pourrait être initialisée par un travail de DEA pour la partie méthodologique de l'audit et la classification automatique des réponses comportementales. Ensuite il s'agirait d'élaborer un outil graphique d'aide à la conception de modèles originaux de simulation à partir d'un logiciel standard du marché (création de bibliothèques de boucles génériques et d'un programme d'assemblage de ces sous-boucles). Cet outil pourrait aider à expliquer et à mieux comprendre les dysfonctionnements d'une entreprise (aide à la décision).

CONCLUSION

L'objectif de cette thèse étant essentiellement cognitif, nos travaux sont donc plus appropriés au contrôle des systèmes de production à court et à moyen terme.

Comme l'a observé récemment J. DESMAZES [DES 93] dans une enquête auprès de 28 PME-PMI, les principales priorités techniques et commerciales de la politique générale des petites et moyennes entreprises sont:
1. la qualité des produits,
2. l'amélioration de la capacité de réponse de la production aux fluctuations de la demande,
3. les délais de livraison.

Les propositions de recherches appliquées que nous avons présentées, s'orientent particulièrement vers l'amélioration de la réactivité des entreprises face à des dysfonctionnements et des aléas fréquents.

CONCLUSION GENERALE

La vulnérabilité des entreprises industrielles face à des aléas internes et externes, nécessite de nos jours un meilleur pilotage et une réactivité accrue de leur système de production. La complexité des produits et des mécanismes de régulation nous a donc conduit à orienter cette thèse vers l'amélioration du contrôle[70] de production.

Les apports essentiels de cette thèse sont d'une part, la mise en évidence de l'utilité et de la prééminence de certains mécanismes de régulation, et d'autre part, la formulation «rationnelle» de mécanismes de décisions non-programmables[71].

Au départ, nous nous étions inspirés de constatations empiriques issues de nos expériences professionnelles précédentes. Il s'agissait donc d'une connaissance implicite de ces systèmes industriels. Nous avons alors mené une enquête intensive qui a été analysée qualitativement et traitée quantitativement. A ce stade, nous avons constaté une insuffisance de l'analyse statistique de données incluant des aspects dynamiques de comportements. Une recherche de relations dynamiques et causales dans les systèmes de production par des méthodes d'analyse multidimensionnelle de données, n'a donc pas été concluante.

Suite à cette démarche cognitive limitée, nous avons conçu des modèles génériques de simulation correspondant à chaque classe de systèmes de production, sur trois horizons temporels de décisions. Les résultats obtenus par la simulation continue et dynamique de ces modèles, ont mis en évidence des comportements que nous n'avons pas pu observer dans l'analyse statistique précédente (même à posteriori). A cette occasion, une réflexion sur la méthodologie de conception des modèles de simulation de systèmes de production a également été menée dans un champ conceptuel donné.

Puis, c'est dans un objectif d'amélioration de la connaissance des mécanismes de pilotage, que nous avons proposé une description du fonctionnement et des comportements des systèmes de production industriels. Par ailleurs, les modèles élaborés ont servi de support pédagogique d'un enseignement systémique à la conception de systèmes de pilotage de production[72].

Enfin, cette recherche nous a conduit à proposer deux catégories d'outils logiciels pour améliorer le contrôle des unités de production :
1. Des outils de GPAO beaucoup plus modulaires et moins volumineux qu'actuellement. Nous suggérons que les entreprises installent un progiciel spécifique renforçant certains contrôles «prééminents», en concordance avec les boucles de régulation étudiées dans cette thèse et les classes de systèmes de production sensibles à ces mécanismes. Nous estimons donc qu'il n'est pas indispensable qu'elles se sur-équipent avec des modules inutiles ou lourds à maintenir.

[70] au sens cybernétique.
[71] au sens de H.A. SIMON [SIM 60].
[72] voir [THI 92b] et [THI 93d].

2. Des outils de simulation pour mener diverses investigations en production. Les modèles pourraient être conçus en se fondant sur la méthodologie de modélisation préconisée dans cette thèse et sur la structuration des modèles génériques.

Par conséquent, pour chacune des classes de systèmes de production, nous proposons de réviser la répartition des fonctions de la gestion de production, en réorganisant les tâches par rapport aux résultats de simulation que nous avons obtenus (limitation de l'intérêt de certaines décisions, renforcement de certains mécanismes, ...).

Cette thèse ouvre une voie vers d'autres recherches appliquées.

Une approche *in-vivo* permettra de confirmer sur le terrain l'efficacité et l'inefficacité de certains mécanismes de contrôle de production[73]. Elle permettra également d'améliorer la performance des boucles essentielles, en assurant ainsi une meilleure régulation des systèmes de production face à des aléas et des dysfonctionnements divers.

D'autre part, ces travaux permettront de constituer une base de connaissance sur les comportements types des systèmes de production. Cette base pourrait être intégrée dans différents systèmes experts tout particulièrement orientés vers l'aide à la décision et l'audit de production[74].

[73] ce travail a déjà été lancé.

[74] citons à ce propos les conseils de B. BRAUNSCHWEIG [BRA 91]. *«...Il est temps aujourd'hui d'effectuer un retournement de paradigme et de développer des méthodologies de simulation à base de connaissances,... Aux praticiens de la dynamique des systèmes, de contribuer à leur manière, à la meilleure compréhension des systèmes complexes en s'ouvrant sur ces techniques reposant sur une description structurale hiérarchique basée sur une représentation objet et qui englobent l'ensemble de la science de la modélisation».*

GLOSSAIRE DES MODELES GENERIQUES

1. LES CLASSES DE SYSTEMES DE PRODUCTION

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.
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 de 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 les vêtements, chaussures ou d'autres articles de grande consommation.
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. Cette classe façonne souvent des pièce pour les besoins de systèmes de types 1,2 ou 3 ou après 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 du type 8.

2. LES BOUCLES

Neuf boucles cybernétiques de décision ont été à la base de la représentation des systèmes d'information et de décision de nos modèles génériques.
Ces boucles ont été codifiées BC1 à BC9.

2.1. LES BOUCLES DES MODELES COURT TERME

BC1:	la variable de contrôle est l'exigence commerciale qui agit sur la capacité de production
BC2:	les variables de contrôle sont le taux de service et la qualité des produits qui agissent sur les délais de production
BC3:	la variable de contrôle est le taux d'arrêts de production qui agit sur la capacité de production
BC4a:	la variable de contrôle est le taux de productivité qui agit sur la capacité de production
BC4b:	le taux de productivité agit sur les délais de production
BC5a:	la variable de contrôle est le taux de manquants, rebuts et retouches qui agit sur la taille des séries lancées
BC5b:	le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur les délais de production
BC7a:	la variable de contrôle est le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) qui agit sur les capacités de production
BC7b:	le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) agit sur la taille des séries lancées

2.2. LES BOUCLES DES MODELES MOYEN TERME

BC1:	la variable de contrôle est l'exigence commerciale qui agit sur la capacité de production
BC2a:	la variable de contrôle est le taux de qualité des produits qui agit sur le taux de rebuts et de retouches
BC2b et c:	le taux de service agit sur les délais de production

BC2d: le taux de service agit sur le niveau de stock désiré
BC2e: le taux de service agit sur la productivité, les délais de production, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts de production.

BC3: la variable de contrôle est le taux d'arrêts de production qui agit sur la capacité de production

BC4a: la variable de contrôle est le taux de productivité qui agit sur la capacité de production
BC4b: le taux de productivité qui agit sur la capacité de production
BC4c: le taux de productivité sur les délais de production

BC5a: la variable de contrôle est le taux de manquants, rebuts et retouches qui agit sur les délais de production
BC5b: le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur les délais de production
BC5c: le taux de manquants, rebuts et retouches agit sur le niveau de stock désiré

BC6a, b et c: la variable de contrôle est la qualité de transmission de l'information et des ordres qui agit pour les trois boucles sur les délais de production

BC7a: la variable de contrôle est le ratio de stockage (rapport entre stock réel et stock souhaité) agit sur les délais de production
BC7b: le ratio de stockage agit sur les délais de production
BC7c: le ratio de stockage agit sur le niveau de stock désiré

BC8a et b: la variable de contrôle est le ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés) agit sur la productivité, les délais de production, les taux de manquants, rebuts et retouches et le taux d'arrêts de production.

2.3. LES BOUCLES DES MODELES LONG TERME

BC1: la variable de contrôle est l'exigence commerciale qui agit sur la capacité de production et sur les délais en faisant appel à l'investissement

BC2a: les variables de contrôle sont le taux de service et la qualité des produits qui agissent sur la capacité de production
BC2b: le taux de service et la qualité des produits agit sur les délais de production et la productivité

BC4a: la variable de contrôle est le taux de productivité qui agit sur la capacité de production
BC4b: le taux de productivité sur les délais de production

BC6: la variable de contrôle est la qualité de transmission de l'information et des ordres qui agit sur les délais de production

BC8: la variable de contrôle est le ratio économique (rapport entre coûts réels et coûts budgétisés) agit sur la productivité et sur la qualité de transmission de l'information et des ordres

BC9a: la variable de contrôle est le taux de service qui agit sur les investissements en augmentation de la capacité de production
BC9b: le taux de service qui agit également sur les investissements en diminution des délais de production

3. LES VARIABLES DES MODELES

Les variables utilisées dans les modèles génériques sont de différents types. En effet, leurs caractères relèvent d'aspects commerciaux, financiers, sociaux ou de production. Elles sont aussi bien quantitatives que qualitatives, comme par exemple l'efficacité de la circulation des ordres et des informations dans le système de production. Elles seront toutes quantifiées dans les simulations.

Ne sont recensées ici que les variables ayant une signification dans le pilotage des systèmes de production. Les variables de taux et de niveaux des modèles ne sont pas décrites *(voir pour cela l'exemple de modèle de l'annexe 4a).*

· *Variables qualitatives:*

Variables de contrôle[75]***:***

VC1a: la qualité des produits
VC2: la productivité
VC3: la qualité de transmission de l'information et des ordres

Variables d'action:

VA1a: la motivation du personnel
VA1b: le degré de formation et de polyvalence
VA2: l'efficience de l'organisation des flux physiques de production
VA3: l'intensité des contrôles et suivis de production

· *Variables quantitatives:*

Variables de contrôle:

VC1b: le taux de service
VC1c: le délai de service réel observé par les clients
VC4N: l'évolution des ventes «normales» ou des marchés
VC4U: l'évolution commerciale à caractère exceptionnelle et urgente
VC4UD: le délai exigé à long terme sur de nouveaux marchés
VC5: le taux de pannes et d'arrêts de production
VC6a: le taux de manquants
VC6b: le taux de retouches et de rebuts
VC7: le niveau de stock réel
VC8: le rapport entre coûts réels et coûts prévus

Variables d'action:

VA4: le niveau de stock désiré
VA5: la capacité de production
VA6: le plan de production en quantité et en délai
VINVP: le niveau des investissements productifs
VINVD: le niveau des investissements de réorganisation agissant sur les délais

4. LES DELAIS DES MODELES

[75] *Variables de contrôle et d'action au sens définis au chapitre VII. § 3.1.*

Nous avons retenu comme délais essentiels, les délais de production et ceux qui agissent sur le délai et la capacité de production du système opérant.

1. Délais opérationnels

A court, moyen et long termes

DPROD. atelier et	**Délais de production d'un poste de charge, d'un d'une usine**

2. Délais de réactivité de l'organisation

A court, moyen et long termes

DELAI MODIF DEL.	**Délai de modification du délai de production**
DELAI MODIF VA5.	**Délai de modification de la capacité de production**

La plupart de ces délais seront supposés exponentiels (voir annexe 4.e), sauf en production de type *process* continu à court terme.

ANNEXES

ANNEXE 1

A.1 Questionnaire

Nom de l'entreprise: .....
Nom et fonction de la personne
ayant rempli le questionnaire:.....

Activité: .....

CA: ..... Effectif en production: .....

I. Outil de production

REPETITIVITE

- O Production de masse répétitive en processus continus (industries de process, chimie,…)
- O Production de masse répétitive (par cadences) en processus discontinus (stock interm.)
- O Production en séries répétitives
- O Production unitaire ou en petites séries non répétitives (projet, artisanat,…)

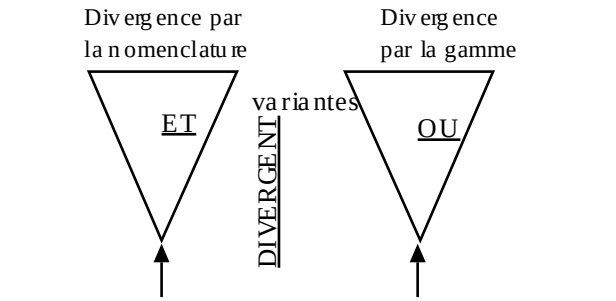
REPONSE AU MARCHE

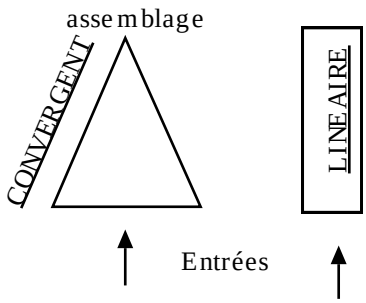
- O Conçu sur commande
  Fabriqué à la cde:
  - O à partir d'un produit sur catalogue
  - O à partir des données du client (sur mesure)
  - O à partir des données et des fournitures du client
- O Fini à la cde sur la base de sous-ensembles ou modules standards
- O Fourni à partir du stock disponible

STRUCTURE PRODUIT/PROCESS

Pourriez-vous représenter très schématiquement le principe de production de 80% de vos produits (voir formes géométriques de base ci-dessous) ?
Il est possible de combiner plusieurs formes.

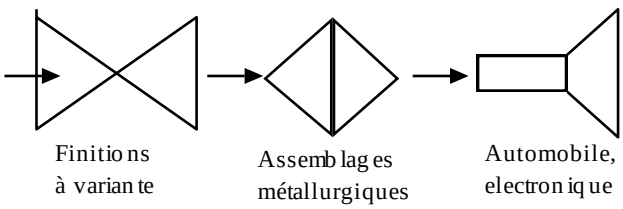
Quatre formes géométriques de base ***Votre schéma de production***





Exemples

Convergent: assemblage mécanique, électronique,...
Divergent ET: chimie de base, charcuterie,...
Divergent OU: sidérurgie, métallurgie, papeterie, textile,...
Linéaire: forge, fonderie, sous-traitance,...



Extraits de la Revue Française de gestion Industrielle, N°1, 1989.

II. Décisions dans l'incertain

Abréviations

DCT ..... *Décisions à court terme* *(journée, semaine)*
DMT..... *Décisions à moyen terme* *(mois, semestre, année)*
DLT ..... *Décisions à long terme* *(3 à 5 ans)*

1. En cas d'augmentation brutale et imprévue des ventes: deux cas

1.1.-> Commande urgente très importante *(pulse)*

SI LA PROBABILITE EST TRES FAIBLE, alors passer à la question suivante SVP.
Sinon, veuillez entourer votre décision (DCT = décision à court terme, DMT = moyen ou DLT = long terme).

1. Appel à des intérimaires ..... DCT

2. Heures supplémentaires HS ..... DCT
3. Commande urgente prioritaire..... DCT
4. Replanification des ordres en cours ..... DCT
5. Utilisation des ressources machines disponibles en cas d'urgence ..... DCT
6. Sous-traitance ..... DCT
7. PAS D'ACTION (passif)..... DCT
8. AUTRE :

1.2.-> Augmentation des ventes brutale et permanente ***(step)***

1. Appel à des intérimaires..... DCT
2. Heures supplémentaires ..... DCT
3. Embauche de contrats à durée déterminée..... DCT DMT
4. Embauche définitive..... DMT DLT
5. Sous-traitance..... DCT DMT DLT
6. Réorganisation d'usine..... DMT DLT
7. Extension de l'usine, rachats de machines, de sites ..... DLT
8. AUTRE :

2. En cas de baisse brutale et imprévue des ventes, deux cas:

2.1.-> Baisse occasionnelle très importante ***(pulse)***

1. Anticipation de la production ..... DCT
2. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT
3. AUTRE :

2.2.-> Baisse des ventes brutale et permanente ***(step)***

1. Anticipation de la production ..... DCT
2. Chômage partiel ..... DCT DMT
3. Licenciements ..... DCT DMT DLT
4. AUTRE :

3. En cas de variation très aléatoire des ventes (phénomènes non saisonniers)

1. Assurer une flexibilité totale et suivre le profil des ventes ..... DCT DMT
2. Ordonnancement par priorités ..... DCT DMT
3. Lissage des ventes (exponentiel par exemple) ..... DMT
4. Sous-traitance des «crêtes»..... DCT DMT
5. Chômage technique dans les «creux»..... DCT DMT
6. AUTRE :

4. En cas de variation saisonnière régulière des ventes (et/ou de fermeture annuelle de l'usine)

1. Assurer une flexibilité totale et suivre le profil des ventes ..... DCT DMT
2. Anticipation de la production dans les «creux» pour assurer les «pointes» ..... DMT
3. Sous-traitance des «crêtes»..... DMT
4. Chômage technique dans les «creux»..... DMT
5. AUTRE :

5. En cas de baisse des stocks chez les clients et de commandes plus fréquentes

1. Stockage plus important chez vous ..... DCT DMT
2. Diminution du cycle de fabrication ..... DMT DLT
3. Réduction de la taille des séries ..... DCT DMT DLT
4. AUTRE :

III. <u>Décisions en cas de mauvaise qualité de service</u>

6. En cas de commandes non livrées et de réclamations fréquentes des clients

1. Révision du planning ..... DCT

2. Suivi de production plus strict et plus fréquent ..... DCT
3. Gestion des ordres par priorités ..... DCT DMT
4. Négociation préalable entre commercial et ordonnancement ..... DCT DMT
5. Remise en cause totale de l'organisation ..... DMT DLT
6. AUTRE :

7. En cas de problèmes de non-qualité et de réclamations des clients

1. Formation du personnel ..... DCT DMT
2. Cercles de qualité ..... DCT DMT
3. Contrôle statistique de la qualité ..... DCT DMT
4. Motivation et responsabilisation du personnel ..... DCT DMT DLT
5. Fiabilisation de l'outil de production ..... DMT DLT
6. AUTRE :

8. En cas de délais de fabrication trop longs

1. Réduction de la taille des séries ..... DCT DMT DLT
2. Révision des gammes de fabrication ..... DCT DMT DLT
3. Réduction des encours ..... DCT DMT DLT
4. Automatisation du transport entre les opérations ..... DMT DLT
5. Réduction des niveaux de nomenclatures ..... DMT DLT
6. Organisation du travail en chaîne polyvalente (chaîne type "Toyota") ..... DMT DLT
7. Acquisition de nouveaux moyens de fabrication ..... DMT DLT
8. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT
9. AUTRE :

IV. Décisions en cas de dysfonctionnements internes

9. En cas de capacité de production fluctuante: trois cas

9.1. Baisse variable de productivité et augmentation de l'absentéisme

1. Contrôle plus strict de l'activité..... DCT DMT
2. Réorganisation des tâches ..... DCT DMT
3. Responsabilisation du personnel ..... DCT DMT
4. Mise en œuvre d'horaires flexibles ..... DMT DLT
5. Groupes de progrès ..... DMT DLT
6. AUTRE:

9.2. Arrêt de travail en cas de grève

1. Sous-traitance extérieure ..... DCT
2. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT
3. AUTRE :

9.3. Dysfonctionnements fréquents au niveau de l'outil de production; arrêts machines et temps de réglages élevés

1. Regroupement de plusieurs commandes ou ordres de fabrication ..... DCT
2. Maintenance préventive ..... DCT DMT DLT
3. Formation du personnel direct à une maintenance de «premier niveau» ..... DMT DLT
4. Recherche et développement de nouveaux procédés (SMED ou changements rapides d'outillages,...)..... DMT DLT
5. Investissement en machines, usines, automatisation ... DMT DLT
6. Spécialisation des usines par produit ..... DMT DLT
7. Spécialisation des usines par technologie ..... DMT DLT
8. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT DLT
9. AUTRE :

10. En cas de manquants fréquents en production, deux cas:

Réponses générales:

1. Mise en œuvre d'une GPAO et d'un calcul de besoins .. DCT DMT DLT
2. Mise en œuvre du Kanban ..... DCT DMT DLT

.....

10.1. par non respect des livraisons des fournisseurs

SI LA PROBABILITE EST TRES FAIBLE, alors passer à la question suivante 10.2, SVP.

1. Suivi et relances systématiques ..... DCT
2. Achats urgents ..... DCT
3. Stockage plus important ..... DCT
4. Meilleure collaboration avec les fournisseurs ..... DCT DMT DLT
5. Changement et diversification des fournisseurs ..... DMT DLT
6. Réduction du nombre des fournisseurs ..... DMT DLT
7. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT DLT
8. AUTRE :

10.2. par non respect des plannings des ateliers amont

1. Suivi et relances systématiques ..... DCT
2. Lancements urgents ..... DCT
3. Stockage plus important ..... DCT
4. Sous-traitance extérieure ..... DMT DLT
5. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT DLT
6. AUTRE :

11. En cas de dysfonctionnements fréquents au niveau de la circulation des ordres et de l'information de façon générale

1. Multiplicité des contrôles des ordres et informations.. DCT
2. Formation du personnel ..... DCT DMT
3. Révision et amélioration des procédures ..... DCT DMT DLT
4. Création de groupes de progrès. ..... DCT DMT DLT
5. Automatisation des procédures ..... DMT DLT
6. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT
7. AUTRE :

12. En cas de niveau de stock trop élevé

1. Contrôle des stocks par inventaires réguliers ..... DCT DMT
2. Gestion et suivi sur les bases de la classification ABC (loi des 20/80) ..... DCT DMT
3. Suivi temps réel de la production ..... DCT DMT DLT
4. Fonctionnement en flux tirés ..... DMT DLT
5. PAS D'ACTION (passif) ..... DCT DMT
6. AUTRE :

13. En cas de coûts réels de fabrication trop importants

1. Contrôle des coûts matières, rebuts, retouches ..... DCT DMT
2. Suivi des dépassement main d'œuvre..... DCT DMT
3. Sous-traitance d'une gamme de produit ou d'une partie de la production ..... DCT DMT
4. Automatisation et robotisation ..... DMT DLT
5. AUTRE :

PARTIE FACULTATIVE (confidentielle)

Ventes

* Tendance moyenne des ventes à long terme (+/- en % par an) ? ..... % par an.

* Ventes très aléatoires ? ..... NON OUI
  - Si oui, dispersion en % par rapport à la moyenne des ventes ? .....

* Saisonnalité ? ..... NON OUI
  - Si oui, la période la plus forte représente ..... fois la moyenne des ventes.

* Ventes exceptionnelles ?..... NON OUI
  - amplitude maximale possible en % des ventes moyennes: + ... %

* Chutes de ventes exceptionnelles ?..... NON OUI

- amplitude maximale possible en % des ventes moyennes: - ..... %

Service

* Taux de service client supérieur à 90% ? ..... NON OUI

* Délais de livraison :

maxi : ..... moyen : ..... mini possible: .....

Outil de production

* Taux moyen de pannes machines >5% ?..... NON OUI
* Taux d'absentéisme personnel direct >5% ? ..... NON OUI
* Rendement moyen >90 % ?..... NON OUI
* Existe-t-il des équipements goulots ? ..... NON OUI

Qualité

* Taux de retouches >5% ?..... NON OUI

Stocks

* Niveau des stocks > 1 mois en: - produits finis ?..... NON OUI
  - en-cours et semi-ouvrés... NON OUI
  - matières premières et composants..... NON OUI
* Nombre de références à gérer > 1000 ?..... NON OUI

Fournisseurs

* Taux de service fournisseur supérieur à 90% ? ..... NON OUI
* Délais de livraison:

maxi : ..... moyen :..... mini possible: .....

ANNEXE 2

A.2. Analyses multivariées

Etape 1. Validation de la typologie structurelle et fonctionnelle

ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES

Les variables principales notées V et sont les suivantes:
V1 à V9 : Classes 1 à 9 des systèmes de production.
V11 : Ventes aléatoires.
V13 : Ventes exceptionnelles.
V15 : Chutes exceptionnelles des ventes.
V17 : Production de masse répétititive et continue.
V19 : Production de masse répétititive et discontinue.
V21 : Production en séries répétitives.
V23 : Production unitaire ou petites séries.
V25 : Conçu à la commande.
V27 : Fabriqué à la commande sur catalogue.
V29 : Fabriqué à la commande d'après données du client
V31 : Fabriqué à la commande d'après données et fournitures du client.
V33 : Fini à la commande à partir de sous-ensembles.
V35 : Fourni sur stock.
V37 : Stock de produits finis >1 mois.
V39 : Stock sous-ensembles et encours > 1 mois.
V41 : Stock MP et composants > 1 mois.
V43 : Plus de mille références à gérer.

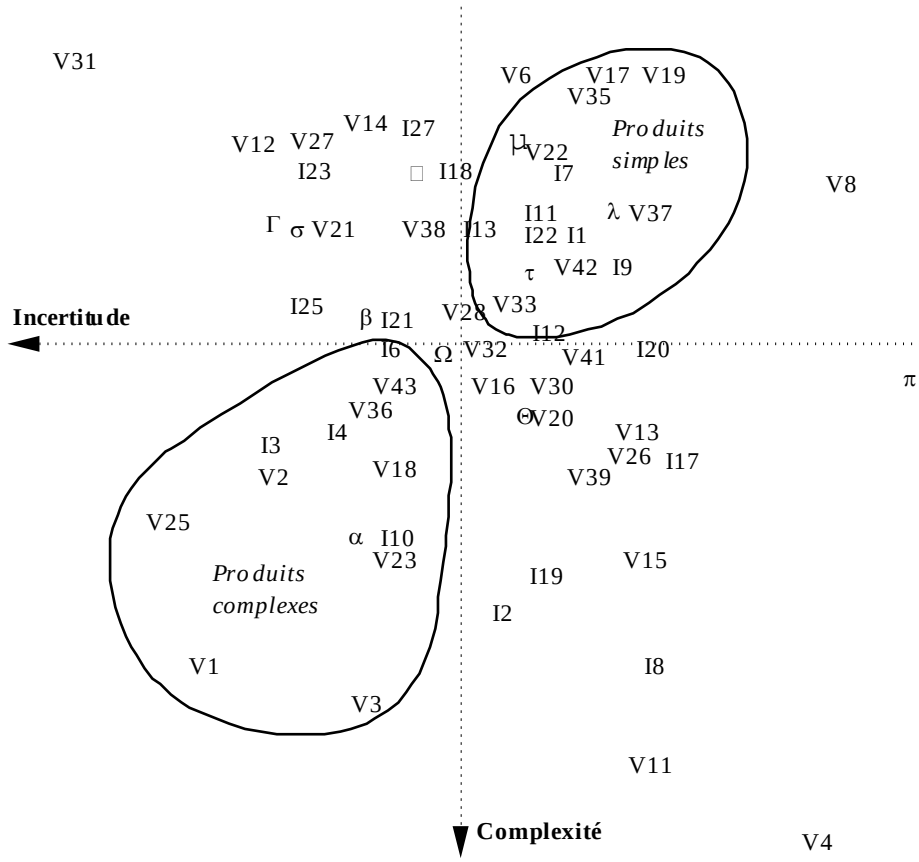
Remarque: Les variables V_i pour i>9 avec un indice i pair, représentent les modalités opposées des variables à indice i impair. Par exemple, V_{10} signifie pas de ventes aléatoires et V11 des ventes aléatoires possibles etc.

Les numéros d'individus (notés I...) et leur identificateur sont suivis d'une pré-classification approximative par classe «structurelle»:

1 Guy Degrenne (classe 6)
2 Matra Micro Systèmes (classe 2)
3 SNIAS (classe 1)
4 SNIAS (classe 3)
5 Vestil (classe 6)
6 Aeroquip (classe 9)
7 Gobel SA (classe 6)
8 Scortex (classe 4)
9 SKF (classe 8)
10 Faiveley (classe 1)
11 Tambrands (classe 6)
12 Sourdillon (classe 9)
13 Polyflex (classe 6)
14 Gault et Frémont (classe 6)
15 CGP (classe 1)
16 Clen (classe 5)

17 Bundy (classe 9)
18 Valéo Eclairage (classe 9)
19 Still Saxby (classe 2)
20 Tio (classe 7)
21 Bio (classe 6)
22 Jaeger (classe 9)
23 Joucomatic (classe 2)
24 NCR Sysmedia (classe 6)
25 Bull (classe 2)
26 Roc SA (classe 6)
27 Arjomari Wiggins (classe 6)

GRAPHIQUE 1 Etape 1. Projection des individus et des modalités des variables sur les axes



Symboles des collisions:

τ: V9	ß: I16
Γ: V5	Θ: V29
π: V7	Ω: I5
Σ: V10	λ: I14
σ: I24	

Etape 2. Relations entre décision et organisation

Les variables principales sont:
V2 : Heures supplémentaires.
V4 : Appel à des intérimaires.
V6 : Gestion par priorités.
V8 : Appel à la sous-traitance.
V10 : Réordonnancement.
V12 : Embauche CDD.
V14 : Embauche définitive.
V16 : Réorganisation des procédés.

V18 : Anticipation de la production.
V20 : Chômage partiel.
V22 : Améliorer la flexibilité.
V24 : Lissage des ventes.
V26 : Augmentions des stocks et des encours.
V28 : Réduction des cycles, séries et stocks.
V30 : Augmentation des contrôles.
V32 : Amélioration circulation de l'information interne et externe.
V34 : Formation du personnel.
V36 : Cercles de qualité et groupes de progrès.
V38 : Motiver et responsabiliser.
V40 : Maintenance préventive et fiabilisation équipements.
V42 : Mise en oeuvre du Kanban.
V44 : Mise en oeuvre d'une GPAO.
V46 : PASSIF devant dysfonctionnements.
V48 : Réduction des temps inter-opérations.
V50 : Automatisation.
V52 : Flux tirés.
V54 : Achats et lancements urgents.
V56 : Réduction nombre des fournisseurs.
V58 : Achats de nouveaux équipements.

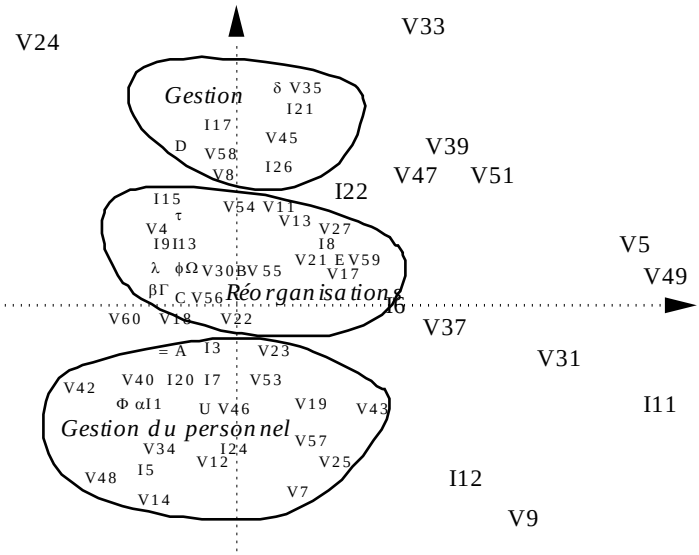
Remarque: Les variables V_i avec un indice i impair représentent les modalités opposées des variables à indice i pair. Par exemple, V_1 = pas d'heures supplémentaires et V_2 = heures supplémentaires possibles.

Les individus principaux I sont identiques à ceux de l'étape 1.

Symboles des collisions:

α: I2	Ω: I18, V32	
ß: I27	δ: I10	
Γ: I23, V6, V50	λ: I25	
π: I19	Ø: V38	
Σ: V10, V44		U: V36
μ: V2, V16		=: I28
τ: V20	A: V52	
Φ: V28		B: I14
C: I29	D: V26	
E: I16		

GRAPHIQUE 2 Etape 2

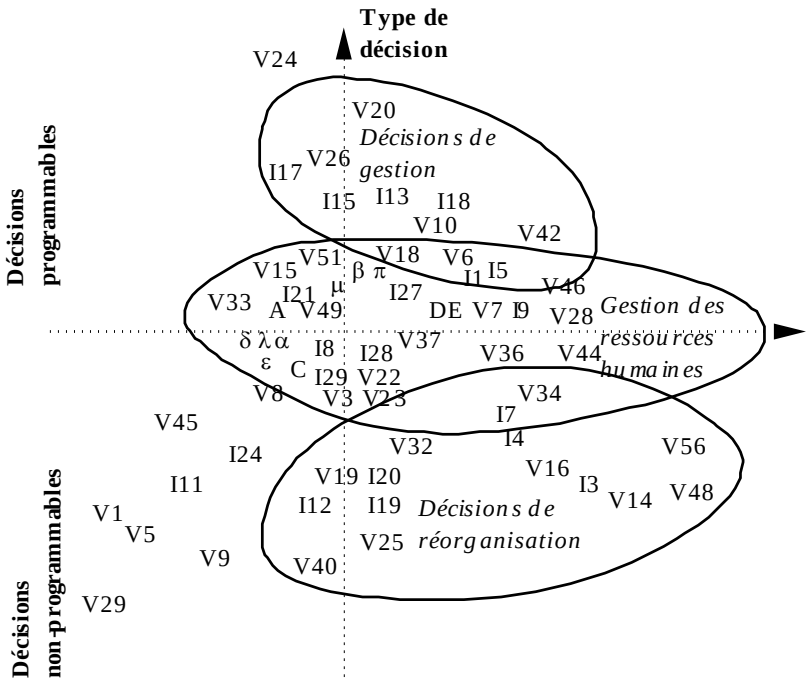


Etape 3a. Analyse des décisions à court terme

Les variables principales sont:
V2 : Heures supplémentaires.
V4 : Appel à des intérimaires.
V6 : Gestion par priorités.
V8 : Appel à la sous-traitance.
V10 : Réordonnancement.
V12 : Embauche de CDD.
V14 : Embauche définitive.
V16 : Réorganisation des procédés.
V18 : Anticipation de la production.
V20 : Chômage partiel.
V22 : Améliorer la flexibilité.
V24 : Lissage des ventes.
V26 : Augmentions des stocks et des encours.
V28 : Réduction des cycles, séries et stocks.
V30 : Augmentation des contrôles.
V32 : Amélioration circulation de l'information interne et externe.
V34 : Formation du personnel.
V36 : Cercles de qualité et groupes de progrès.
V38 : Motiver et responsabiliser.
V40 : Maintenance préventive et fiabilisation équipements.
V42 : Mise en oeuvre du Kanban.
V44 : Mise en oeuvre d'une GPAO.
V46 : PASSIF devant dysfonctionnements.
V48 : Réduction des temps inter-opérations.
V50 : Automatisation.
V52 : Flux tirés
V54 : Achats et lancements urgents.
V56 : Réduction nombre des fournisseurs.
Remarque: Les variables V_i avec un indice i impair représentent les modalités opposées des variables à indice i pair.

Les individus principaux I sont identiques à ceux de l'étape 1.

GRAPHIQUE 3 Etape 3a à court terme



Symboles des collisions:

α: I6	μ: V12
ß: I2	Γ: I25
π: I23, V4	Φ: V30
δ : I22	λ : V38
σ : I16	A: I26
B: V50	D: V2
E: V54	F: I10

Etape 3b. Analyse des décisions à moyen terme

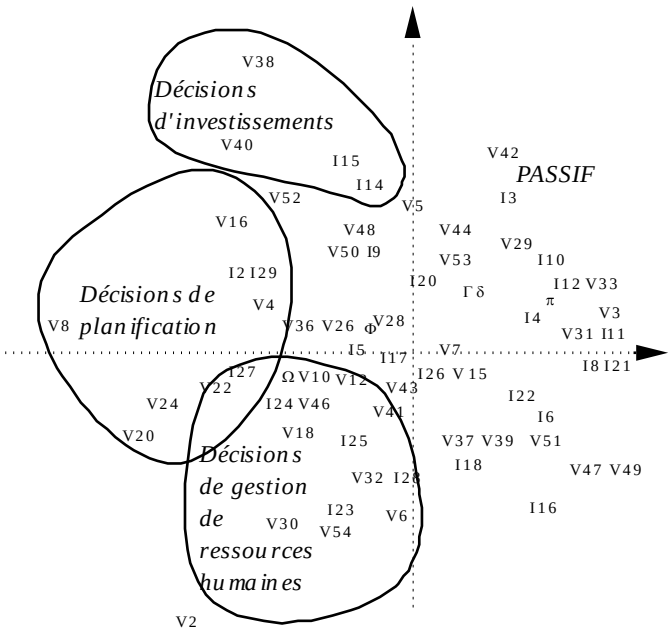
Les variables principales sont:
V2 : Appel à des intérimaires.
V4 : Gestion par priorités.
V6 : Appel à la sous-traitance.
V8 : Réordonnancement.
V10 : Embauche CDD.
V12 : Embauche définitive
V14 : Réorganisation des procédés.
V16 : Anticipation de la production.
V18 : Chômage partiel.
V20 : Améliorer la flexibilité.
V22 : Augmentions des stocks et des encours.
V24 : Réduction des cycles, séries et stocks

V26 : Augmentation des contrôles.
V28 : Amélioration circulation de l'information interne et externe.
V30 : Formation du personnel.
V32 : Cercles de qualité et groupes de progrès.
V34 : Motiver et responsabiliser.
V36 : Maintenance préventive et fiabilisation équipements.
V38 : Mise en oeuvre du Kanban.
V40 : Mise en oeuvre d'une GPAO.
V42 : PASSIF devant dysfonctionnements.
V44 : Licenciements.
V46 : Réduction des temps inter-opérations.
V48 : Automatisation.
V50 : Flux tirés.
V52 : Achats de nouveaux équipements.
V54 : Réduction nombre des fournisseurs.

Remarque: Les variables V_i avec un indice i impair représentent les modalités opposées des variables à indice i pair.

Les individus principaux I sont identiques à ceux de l'étape 1.

GRAPHIQUE 4 Etape 3b à moyen terme



Symboles des collisions:

α: V1, V9 Γ: I13 π: I19

Σ: I7 Ω: V34 □: V17

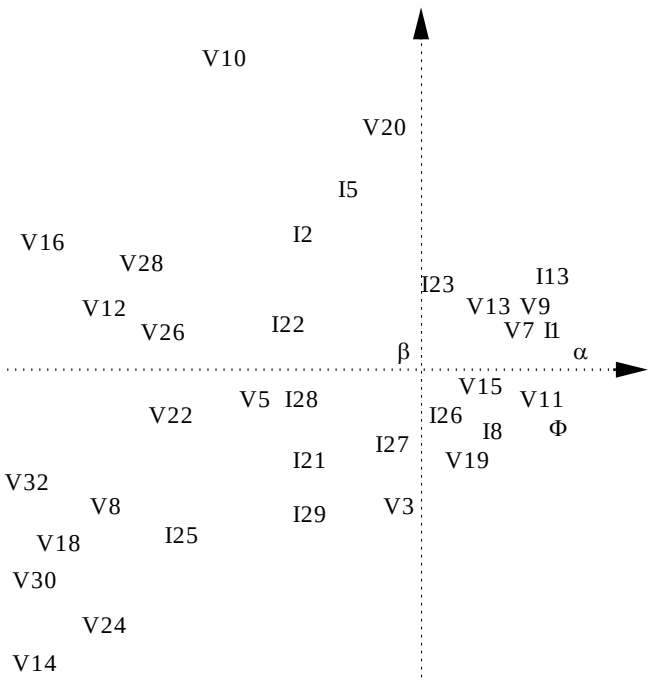
Etape 3c. Analyse des décisions à long terme

Les variables principales sont:
V1 : Gestion par priorités.
V3 : Embauche définitive.
V5 : Réorganisation des procédés.
V8 : Amélioration circulation de l'information interne et externe.
V10 : Cercles de qualité et groupes de progrès.
V12 : Motiver et responsabiliser.
V14 : Maintenance préventive et fiabilisation équipements.
V16 : Mise en oeuvre du Kanban.
V18 : Mise en oeuvre d'une GPAO.
V20 : PASSIF devant dysfonctionnements.
V22 : Licenciements.
V24 : Réduction des temps inter-opérations.
V26 : Automatisation.
V28 : Flux tirés.
V30 : Achats de nouveaux équipements.
V32 : Réduction nombre des fournisseurs.

Remarque: Les variables V_i à partir de i>2 avec un indice i impair représentent les modalités opposées des variables à indice i pair.

Les individus principaux I sont identiques à ceux de l'étape 1.

GRAPHIQUE 5 Etape 3c à long terme



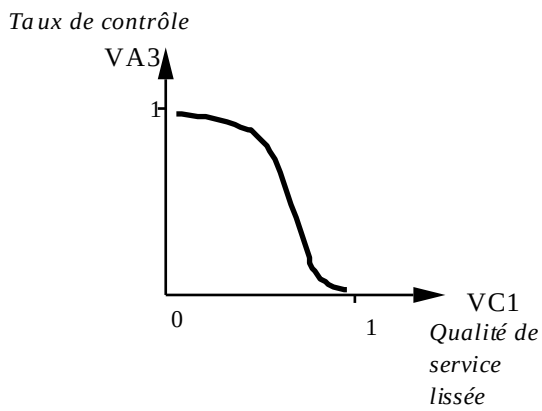
Symboles des collisions:
α: I3, I4, I6, I7, I9, I10, I11, I12, I14, I15, I16, I17, I18, I19.
ß: I24 Φ: I20

ANNEXE 3

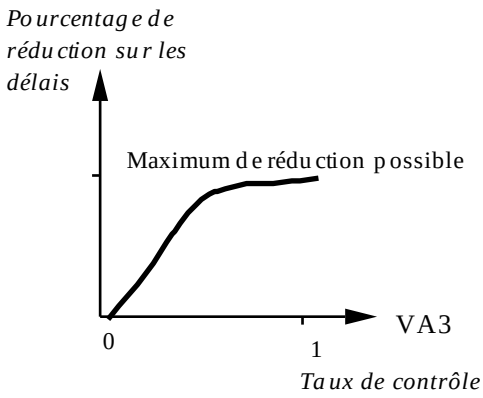
A.3a. Fonctions de transfert dans les modèles

Ces différentes fonctions permettent de décrire les relations non-linéaires entre les différentes variables des modèles. Cette description se réfère principalement aux hypothèses présentées dans le chapitre VIII.

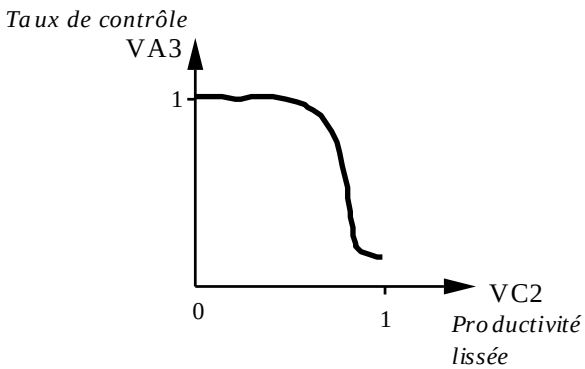
GRAPH. 1 Influence de la qualité de service sur le contrôle de production



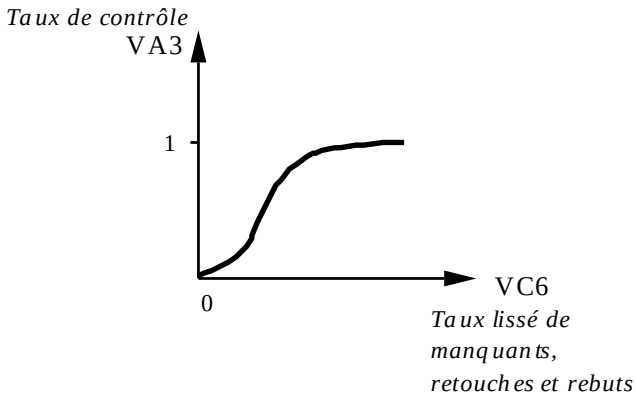
GRAPH. 2 Influence du contrôle de production sur les délais



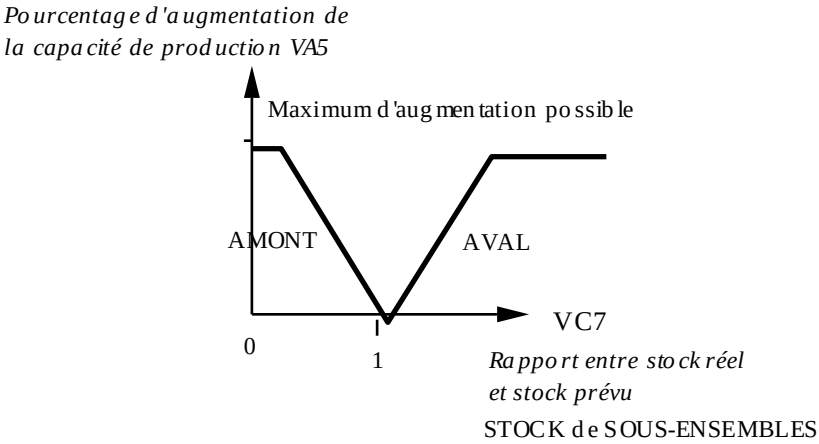
GRAPH. 3 Influence de la productivité sur le contrôle de production



GRAPH. 4 Influence du taux de manquants sur le contrôle de production

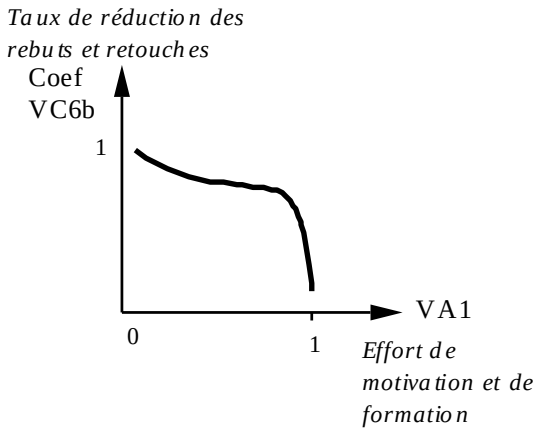


GRAPH. 5 Influence du niveau de stock sur les capacités de production



Spécifique au moyen terme

GRAPH. 6 Influence de l'effort de motivation et de formation sur les rebuts et retouches



A.3b. Données numériques des modèles

Le tableau ci-dessous (figure 1) présente les données de base ayant servi à ajuster les modèles à court et moyen termes, ainsi qu'à les rendre robustes (voir chapitre IX).

FIG 1 Valeurs des capacités, délais, tailles des séries et stocks désirés

	Classes des systèmes de production								
VALEURS NOMINALES	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capacités de production:									
VA5 1: premier poste	1	10	1000	1	10	1000	1	2	50
VA5 2: deuxième poste	1	10	1000	1	10	1000	1	2	50
VA5 3: poste d'assemblage	-	1	100	-	1	-	-	0,9	-
Délais de production:									
DPROD 1: premier poste	530	11,67	10,6	530	11,67	1,06	10,6	1,06	5,3
DPROD 2: deuxième poste	530	11,67	10,6	530	11,67	1,06	10,6	1,06	5,3
DPROD 3: poste d'assemblage	-	1,17	1,06	-	1,17	-	-	0,42	-
Taille des séries lancées	1	43	4710	1	43	75000	40	240	2000
Stocks désirés	1	43	4710	1	43	47150	40	90	471

Coefficients de lissage

Alpha 2 = 10 (lissage de la productivité VC2)
Alpha 5 = 8 (lissage du taux de production VC5)
Alpha 6 = 2 (lissage du taux de manquants, rebuts et retouches VC6)
Alpha 7 = 2 (lissage du rapport entre stock réel et stock désiré VC7)

Coefficients de lissage spécifique au moyen terme

Alpha3 = 10 (lissage de la qualité de transmission des informations VC3)
Alpha8 = 10 (lissage du rapport entre coûts réels et coûts prévus VC8)

Mesures des sorties des modèles

La qualité de service est mesurée de façon continue à partir de t=10. Elle est fixée en fonction des classes et des systèmes opérants retenus. Les hypothèses d'expériences pour le court et le moyen terme sont présentées par les équations de type f(t=temps) ou les contrôles quantitatifs suivants (voir figures 2 et 3).

FIG 2 Contrôles de la qualité de service par classe à +/- 10%
COURT TERME

	Classe 1	Classe 4	Classe 7
Date fin Tâche 1	15,4	15,4	13
Date fin Tâche 2	30,6	30,6	25,5

	Classe 2	Classe 5	Classe 8
Volume des livraisons à partir de t=10	39,8t-105	39,8t-105	90t-190

	Classe 3	Classe 6	Classe 9
Volume des encours prévu à une date donnée	18000 à t=50	350000 à t=20	17100 à t=20

FIG 3 Contrôles de la qualité de service par classe à +/- 10%
MOYEN TERME

	Classe 1	Classe 4	Classe 7
Volume des livraisons à partir de t=10	0,074t +0,08	0,074t +0,08	3,6t+2
	Classe 2	Classe 5	Classe 8
	34t+30	34t+30	94t
	Classe 3	Classe 6	Classe 9
Contrôle direct de la qualité de service VC1 b et c	VC1 est égal au rapport entre le cumul des expéditions sur le cumul des quantités demandées		

Cas particulier des modèles long terme: *données numériques relevées dans une industrie textile*

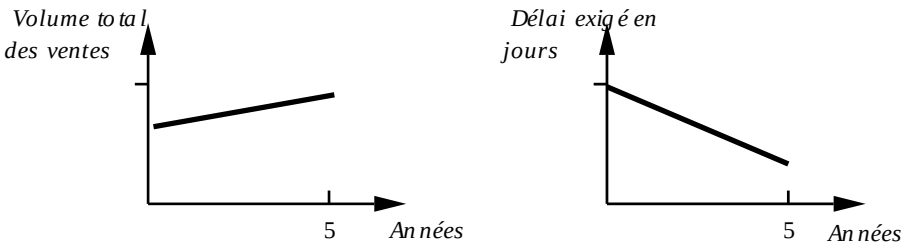
Nous avons posé initialement N = 20 MF comme montant d'investissement sur une durée de cinq ans. Cette valeur est issue d'un modèle de choix d'investissements industriels que nous avons élaboré pour une entreprise de confection (voir [THI 90]).

Dans les modèles exposés, les hypothèses d'évolution des capacités et des délais sur cinq ans sont les suivants:
- VA5 varie de 6,65 à 8,55 en 5 ans (soit une augmentation de 30%).
- DPROD varie de 18,63 à 11,03 en 5 ans (soit une diminution de 40%).
La relation entre capacité VA5 et investissement productif VINVP est de type:
VA5init = 7 + VINVP/9
La relation entre délai DPROD et investissement organisationnel VINVD est
DPRODinit = 16,9 - 6,9* VINVD/20
Le contrôle de la qualité de service est effectué à partir de l'équation
$f(t = temps) = 0,195\ t^2 + 13,8\ t + 16.$

· ***Evolution des ventes et des délais à long terme*** *(d'après les données relevées)*

Sur cinq ans, les hypothèses d'évolution des ventes et des délais exigés par le marché sont choisies linéaires (voir figure 3). Les ventes augmentent de 11% en 5 ans et les délais du marché sont réduits de 4%.

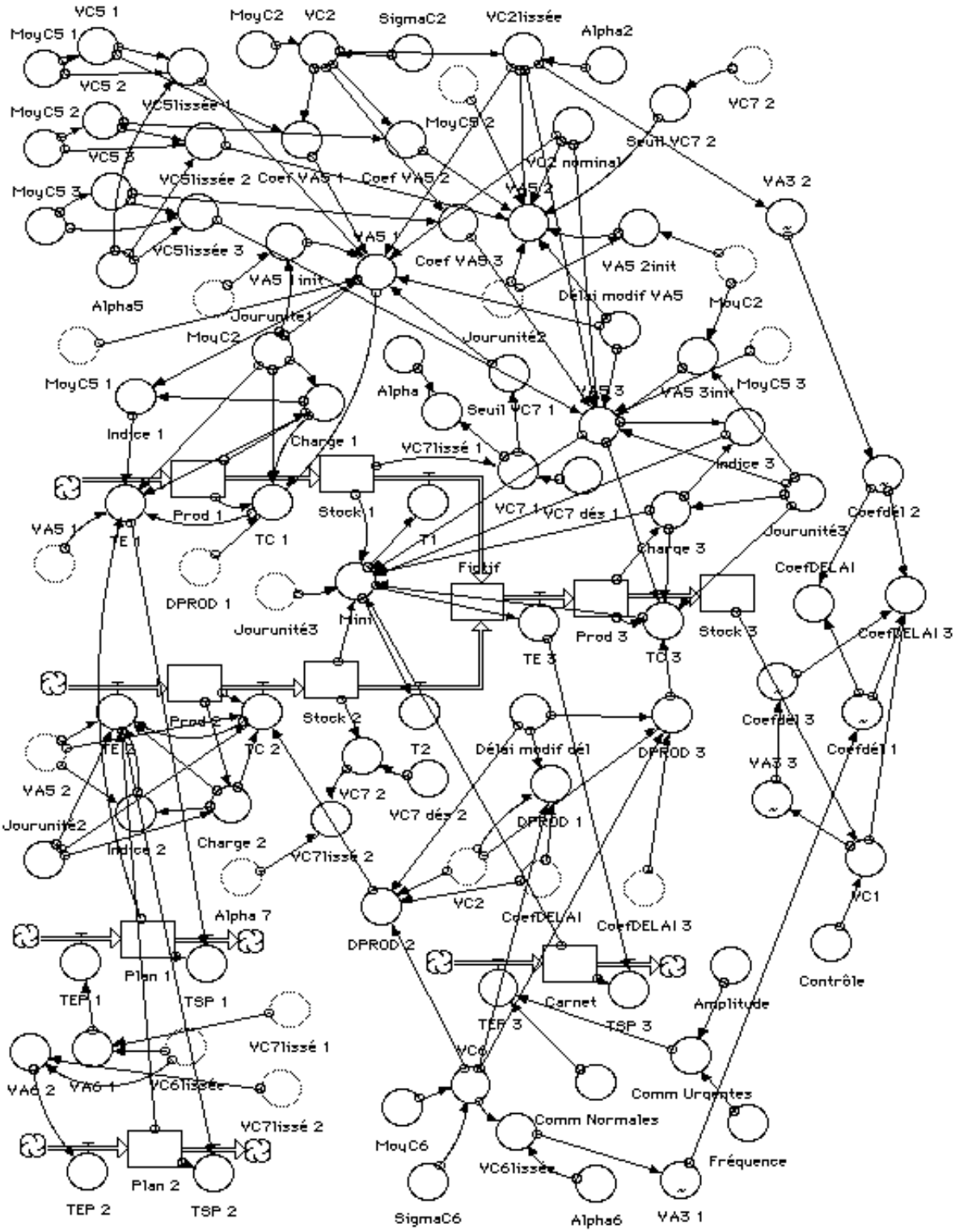
FIG 3 Evolution des ventes et des délais à long terme



VC4N = 0,374 t + 16,26 **VC4UD = -0,127 t + 18,63**

ANNEXE 4

A.4a. Modèle court terme des classes 2 et 5



Equations de FORRESTER du modèle complet des classes 2 et 5 à court terme

Réalisé avec le logiciel STELLA II distribué par KBS France

FLUX DES COMMANDES CLIENTS

Quantité de produits en commandes normales
Comm_Normales = 43
Quantité de produits commandés en urgence
Amplitude = 0
Fréquence d'apparition des commandes urgentes
Fréquence = 100
Quantité de produits urgents
Comm_Urgentes = PULSE(Amplitude,11,Fréquence)
Taux d'entrée de commandes clients (à partir de t=10)
TEP_3 = IF TIME=10 THEN Comm_Normales/DT ELSE
Comm_Normales+Comm_Urgentes
En cours de commandes clients
Carnet(t) = Carnet(t - dt) + (TEP_3 - TSP_3) * dt
INIT Carnet = 20000
Solde des commandes clients
TSP_3 = IF TIME=10 THEN Carnet/DT ELSE TE_3

FLUX DES ORDRES DE PRODUCTION

SOUS-ENSEMBLES 1
Valeurs initiales du plan de production de sous-ensembles 1
VA6_1 = IF TIME>10 THEN (IF VC7lissé_1>2 THEN 0 ELSE
(43*(1+VC6lissée)*(2-VC7lissé_1))) ELSE 43
Flux d'entrée d'ordres de production de sous-ensembles 1
TEP_1 = IF TIME=10 THEN VA6_1/DT ELSE VA6_1
Plan de production des sous-ensembles 1
Plan_1(t) = Plan_1(t - dt) + (TEP_1 - TSP_1) * dt
INIT Plan_1 = 20000
Flux de lancement d'ordres de production de sous-ensembles 1
TSP_1 = IF TIME=10 THEN Plan_1/DT ELSE TE_1

SOUS-ENSEMBLES 2
Valeurs initiales du plan de production de sous-ensembles 2
VA6_2 = IF TIME>10 THEN (IF VC7lissé_2>2 THEN 0 ELSE
(43*(1+VC6lissée)*(2-VC7lissé_2))) ELSE 43
Flux d'entrée d'ordres de production de sous-ensembles 2
TEP_2 = IF TIME=10 THEN VA6_2/DT ELSE VA6_2
Plan de production des sous-ensembles 2
Plan_2(t) = Plan_2(t - dt) + (TEP_2 - TSP_2) * dt
INIT Plan_2 = 20000
Flux de lancement d'ordres de production de sous-ensembles 2
TSP_2 = IF TIME=10 THEN Plan_2/DT ELSE TE_2

FLUX DE PRODUCTION

PRODUCTION DE SOUS-ENSEMBLES 1

Flux matières

Taux de production de sous-ensembles 1 > 0 si l'indice de charge est <= 1 (poste non saturé) et = au maximum au plan prévu
TE_1 = IF Indice_1<1.0001 THEN MIN(Plan_1,(VA5_1-Charge_1)/Jourunité1+TC_1) ELSE 0
Encours de production de sous-ensembles 1
Prod_1(t) = Prod_1(t - dt) + (TE_1 - TC_1) * dt
INIT Prod_1 = 0
Taux d'entrée en stock de produits 1 (au maximum la quantité correspondant à la capacité de production du poste 1)
TC_1 = IF Charge_1>VA5_1 THEN VA5_1/(DPROD_1*Jourunité1) ELSE Prod_1/DPROD_1
Niveau de stock de sous-ensembles 1
Stock_1(t) = Stock_1(t - dt) + (TC_1 - T1) * dt
INIT Stock_1 = 0
Taux de consommation sur stocks de produits semi-finis 1
T1 = Mini

Charge et capacité de production

Coefficient de conversion en jours par unité produite
Jourunité1 = 0.02
Charge de travail égal à la production du poste 1 exprimée en jours
Charge_1 = Prod_1*Jourunité1
Capacité de production initiale du poste 1
VA5_1init = 10/(Jourunité1*MoyC2)
Coefficient augmentant les capacités de production 1 en fonction de la productivité et du taux d'arrêts de travail
Coef_VA5_1 = IF TIME>10 THEN VC2*(1-VC5_1) ELSE VC2
Capacité de production du poste 1 (= 0 si le stock dépasse le niveau souhaité, sinon modifié en fonction des valeurs lissées des variables de commande, comme défini dans les boucles de régulation)
VA5_1 = IF TIME>10 THEN (IF Seuil_VC7_1>2 THEN 0 ELSE Coef_VA5_1*VA5_1init*Jourunité1*(2-Seuil_VC7_1)*SMTH3((2-VC2lissée/VC2_nominal),Délai_modif_VA5)*SMTH3((1-MoyC5_1+VC5lissée_1),Délai_modif_VA5)) ELSE Coef_VA5_1*VA5_1init*Jourunité1
Indices de charge (rapport charge sur capacité de production)
Indice_1 = IF VA5_1 > 0.1 THEN Charge_1/VA5_1 ELSE 99

Délais de production

Coefficient réducteur appliqué sur les délais de production des sous-ensembles 1 et 2
CoefDELAI = 1-(Coefdél_1+Coefdél_2)
Délais de production de sous-ensembles 1
DPROD_1 = 11*(1+VC6)*(2-VC2)*SMTH3(CoefDELAI,Délai_modif_dél)

PRODUCTION DE SOUS-ENSEMBLES 2

Flux matières

Taux de production de sous-ensembles 2 > 0 si l'indice de charge est <= 1 (poste non saturé) et = au maximum au plan prévu
TE_2 = IF Indice_2<1.0001 THEN MIN(Plan_2,(VA5_2-Charge_2)/Jourunité2+TC_2) ELSE 0
Encours de production de sous-ensembles 2
Prod_2(t) = Prod_2(t - dt) + (TE_2 - TC_2) * dt
INIT Prod_2 = 0
Taux d'entrée en stock de produits 2 (au maximum la quantité correspondant à la capacité de production du poste 2)
TC_2 = IF Charge_2>VA5_2 THEN VA5_2/(DPROD_2*Jourunité2) ELSE Prod_2/DPROD_2
Niveau de stock de sous-ensembles 2
Stock_2(t) = Stock_2(t - dt) + (TC_2 - T2) * dt
INIT Stock_2 = 0
Taux de consommation sur stocks de produits semi-finis 2
T2 = Mini

Charge et capacité de production
Coefficient de conversion en jours par unité produite
Jourunité2 = 0.02
Charge de travail égal à la production du poste 2 exprimée en jours
Charge_2 = Prod_2*Jourunité2
Capacité de production initiale du poste 2
VA5_2init = 10/(Jourunité2*MoyC2)
Coefficient augmentant les capacités de production 2 en fonction de la productivité et du taux d'arrêts de travail
Coef_VA5_2 = IF TIME>10 THEN VC2*(1-VC5_2) ELSE VC2
*Capacité de production du poste 2 (= 0 si le stock dépasse le niveau souhaité, sinon modifié en fonction des valeurs lissées des variables de commande, comme défini dans les boucles de régulation)*VA5_2 = IF TIME>10 THEN (IF Seuil_VC7_2>2 THEN 0 ELSE Coef_VA5_2*VA5_2init*Jourunité2*(2-Seuil_VC7_2)*SMTH3((2-VC2lissée/VC2_nominal),Délai_modif_VA5)*SMTH3((1-MoyC5_2+VC5lissée_2),Délai_modif_VA5)) ELSE Coef_VA5_2*VA5_2init*Jourunité2
Indices de charge (rapport charge sur capacité de production)
Indice_2 = IF VA5_2 > 0.1 THEN Charge_2/VA5_2 ELSE 99

Délais de production
Coefficient réducteur appliqué sur les délais de production des sous-ensembles 1 et 2
CoefDELAI = 1-(Coefdél_1+Coefdél_2)
Délais de production de sous-ensembles 2
DPROD_2 = 11*(1+VC6)*(2-VC2)*SMTH3(CoefDELAI,Délai_modif_dél)

PRODUCTION DE ENSEMBLES 3

Flux matières

Test de comparaison entre les niveaux de stocks de sous-ensembles 1 et 2 et le niveau des commandes clients pour définir la quantité d'assemblage final de produits 3
Mini = IF Indice_3<1.0001 THEN MIN(Carnet,MIN(Stock_1,Stock_2,(VA5_3-Charge_3)/Jourunité3+TC_3)) ELSE 0
Variable de niveau intermédiaire pour assurer une liaison entre les flux des deux sous-ensembles (1 et 2) et le flux de production d'ensembles 3
Fictif(t) = Fictif(t - dt) + (T1 + T2 - TE_3) * dt
INIT Fictif = 0
Taux de production d'ensembles 3 (voir Mini)
TE_3 = Mini
Encours de production d'ensembles 3
Prod_3(t) = Prod_3(t - dt) + (TE_3 - TC_3) * dt
INIT Prod_3 = 0
Taux d'entrée en stock de produits finis 3 (au maximum la quantité correspondant à la capacité de production du poste 3)
TC_3 = IF Charge_3>VA5_3 THEN VA5_3/(DPROD_3*Jourunité3) ELSE Prod_3/DPROD_3
Niveau de stock d'ensembles 3
Stock_3(t) = Stock_3(t - dt) + (TC_3) * dt
INIT Stock_3 = 0

Charge et capacité de production
Coefficient de conversion en jours par unité produite
Jourunité3 = 0.02
Charge de travail égal à la production du poste 3 exprimée en jours
Charge_3 = Prod_3*Jourunité3
Capacité de production initiale du poste 3
VA5_3init = 1/(Jourunité3*MoyC2)
Coefficient augmentant les capacités de production 3 en fonction de la productivité et du taux d'arrêts de travail
Coef_VA5_3 = IF TIME>10 THEN VC2*(1-VC5_2) ELSE VC2
*Capacité de production du poste 3 (= 0 si le stock dépasse le niveau souhaité, sinon modifié en fonction des valeurs lissées des variables de commande, comme défini dans les boucles de régulation)*VA5_3 = IF TIME>10 THEN VA5_3init*Coef_VA5_3*Jourunité3*SMTH3((2-VC2lissée/VC2_nominal),Délai_modif_VA5)*SMTH3((1-MoyC5_3+VC5lissée_3),Délai_modif_VA5) ELSE Coef_VA5_3*VA5_3init*Jourunité3
Indices de charge (rapport charge sur capacité de production)
Indice_3 = IF VA5_3 > 0.1 THEN Charge_3/VA5_3 ELSE 99
Coefficient augmentant les capacités de production 3
Coef_VA5_3 = IF TIME>10 THEN VC2*(1-VC5_3) ELSE VC2

Délais de production
Coefficient réducteur appliqué sur les délais de production des ensembles 3
CoefDELAI_3 = IF VC1>0 THEN (1-(Coefdél_1+Coefdél_2+Coefdél_3))/VC1 ELSE 1
Délais de production d'ensembles 3
DPROD_3 = 1.1*(1+VC6)*(2-VC2)*SMTH3(CoefDELAI_3,Délai_modif_dél)

VARIABLES DE COMMANDE

Productivité

Productivité nominale
VC2_nominal = 0.95
Productivité moyenne
MoyC2 = 0.7
Ecart-type sur variation normale de la productivité
SigmaC2 = 0.05
Productivité générée par une table de distribution normale
VC2 = IF TIME>10 THEN NORMAL(MoyC2,SigmaC2) ELSE MoyC2

Coefficient de lissage de la productivité
Alpha2 = 10
Productivité lissée
VC2lissée = SMTH3(VC2,Alpha2)

Arrêts de travail

Taux de pannes moyen du poste 1
MoyC5_1 = 0.2
Taux de pannes moyen du poste 2
MoyC5_2 = 0.10
Taux de pannes moyen du poste 3
MoyC5_3 = 0.10
Arrêts de production par poste 1, 2 et 3, générés par une table de nombres aléatoires
VC5_1 = IF RANDOM(0,1)<=MoyC5_1 THEN 1 ELSE 0
VC5_2 = IF RANDOM(0,1)<=MoyC5_2 THEN 1 ELSE 0
VC5_3 = IF RANDOM(0,1)<=MoyC5_3 THEN 1 ELSE 0
Coefficient de lissage du taux d'arrêts de travail
Alpha5 = 8
Taux lissés des arrêts de production par poste
VC5lissée_1 = IF TIME>10 THEN SMTH3(VC5_1,Alpha5) ELSE
SMTH3(MoyC5_1,Alpha5)
VC5lissée_2 = IF TIME>10 THEN SMTH3(VC5_2,Alpha5) ELSE
SMTH3(MoyC5_2,Alpha5)
VC5lissée_3 = IF TIME>10 THEN SMTH3(VC5_3,Alpha5) ELSE
SMTH3(MoyC5_3,Alpha5)

Manquants

Taux de manquants moyen
MoyC6 = 0.2
Ecart-type sur variation normale du taux de manquants
SigmaC6 = 0.05
Taux de manquants, rebuts, retouches générés par une table de distribution normale
VC6 = IF TIME>10 THEN NORMAL(MoyC6,SigmaC6) ELSE MoyC6
Coefficient de lissage du taux de manquants
Alpha6 = 2
Taux lissé de manquants, rebuts, retouches
VC6lissée = SMTH3(VC6,Alpha6)

Niveau du service
Contrôle du taux de service théorique
Contrôle = 39.8*TIME-105
Variable mesurant le taux de service toutes les valeurs entières de temps (comparaison du niveau cumulé de stocks de produits finis 3 assemblés sur commande, par rapport à un stock théorique déterminé par la variable Contrôle(t))
VC1 = IF TIME<=10 THEN 1 ELSE IF TIME=ROUND(TIME) THEN IF Stock_3>Contrôle THEN 1 ELSE Stock_3/Contrôle ELSE 1

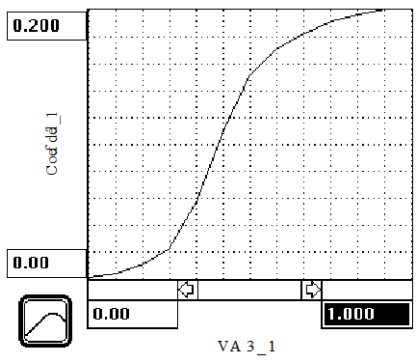
Niveau des stocks
Niveaux des stocks désirés de sous-ensembles 1 et 2, produits d'après plans
VC7_dés_1 = 43
VC7_dés_2 = 43

Niveaux des stocks réels de produits 1 et 2
VC7_1 = IF TIME>10 THEN Stock_1/VC7_dés_1 ELSE 1
VC7_2 = IF TIME>10 THEN Stock_2/VC7_dés_2 ELSE 1
Consigne de mise en service de la boucle de contrôle des stocks de sous-ensembles 1
Seuil_VC7_1 = IF VC7_1<1.5 THEN 1 ELSE VC7_1

Consigne de mise en service de la boucle de contrôle des stocks de sous-ensembles 2
Seuil_VC7_2 = IF VC7_2<1.5 THEN 1 ELSE VC7_2
Coefficient de lissage des stocks
Alpha_7 = 2
Niveaux des stocks lissés de produits 1 et 2
VC7lissé_1 = SMTH3(VC7_1,Alpha_7)
VC7lissé_2 = SMTH3(VC7_2,Alpha_7)

RELATIONS NON-LINEAIRES DANS LES BOUCLES

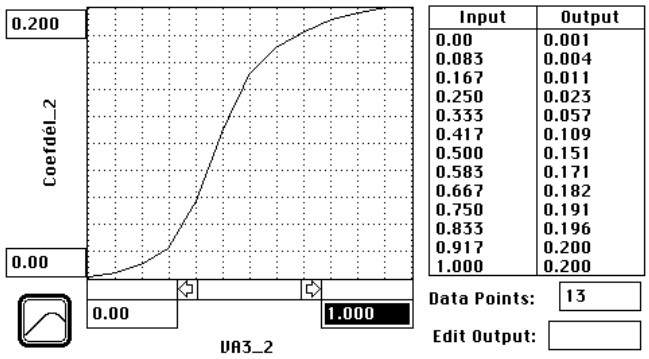
Relation non linéaire entre le taux de contrôle et le coefficient influant les délais de production de sous-ensembles 1
Coefdél_1 = GRAPH(VA3_1)



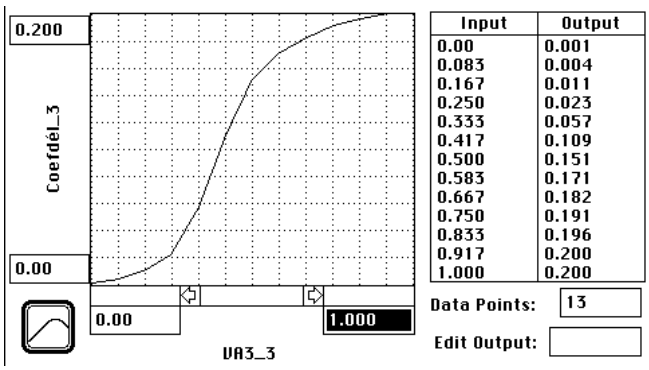
Input	Output
0.00	0.001
0.083	0.004
0.167	0.011
0.250	0.023
0.333	0.057
0.417	0.109
0.500	0.151
0.583	0.171
0.667	0.182
0.750	0.191
0.833	0.196
0.917	0.200
1.000	0.200

Data Points: 13
Edit Output:

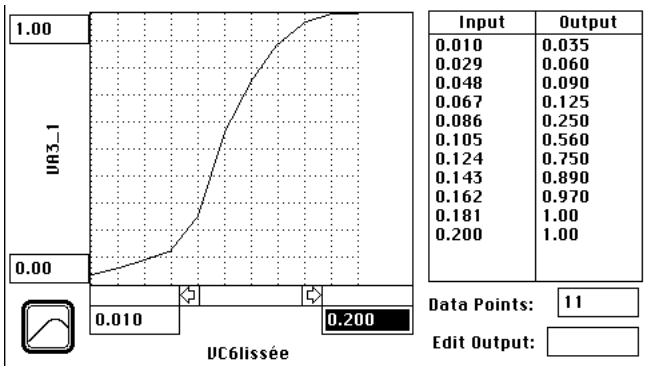
Relation non linéaire entre le taux de contrôle et le coefficient influant les délais de production de sous-ensembles 2
Coefdél_2 = GRAPH(VA3_2)



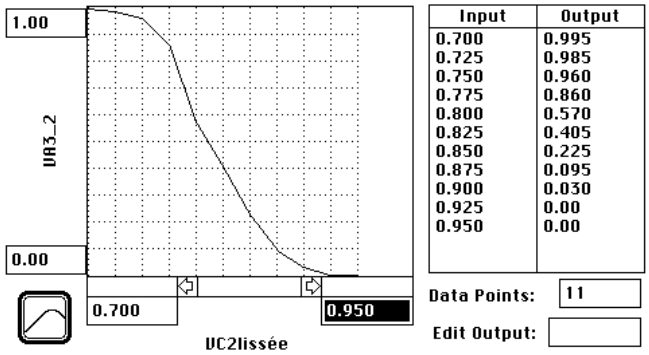
Relation non linéaire entre le taux de contrôle et le coefficient influant les délais de production d'ensembles 3
Coefdél_3 = GRAPH(VA3_3)



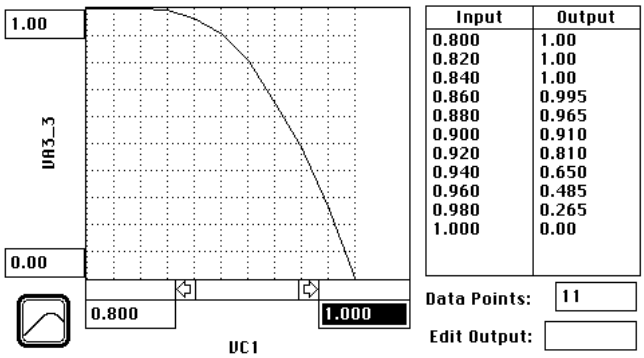
Relation non linéaire entre le taux de contrôle et le taux lissé de manquants
VA3_1 = GRAPH(VC6lissée)



Relation non linéaire entre le taux de contrôle et la productivité lissée
VA3_2 = GRAPH(VC2lissée)



Relation non linéaire entre le taux de contrôle et le taux de service
VA3_3 = GRAPH(VC1)



DELAIS

Délai exponentiel de modification des délais de production
Délai_modif_dél = 10

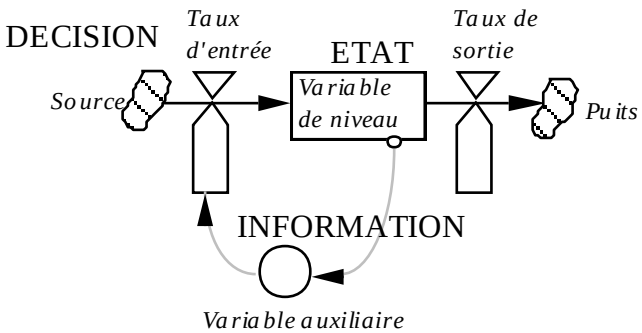
Délai exponentiel de modification des capacités de production
Délai_modif_VA5 = 10

A.4b. Représentation symbolique des modèles de la dynamique des systèmes

Les modèles composés de boucles de *feedback* sont élaborés à partir de symboles de niveaux et de taux[76]. Les variables de niveaux décrivent complètement l'état des systèmes par une intégration[77] continue des résultats de l'action dans ces systèmes. Les variables de taux expriment l'action par des débits d'entrée et de sortie dans les niveaux. Les niveaux existent en permanence même si toute activité cessait alors que les taux ou flux disparaîtraient. Les variables de niveaux sont représentées graphiquement par des rectangles et les flux par des «vannes» permettant le réglage des débits (voir figure 2).
Les équations de flux définissent les politiques de décision dans les systèmes et interagissent sur les niveaux donc sur les états dans ces systèmes. Le principe d'une équation de politique est de reconnaître en premier lieu un but local vers lequel la décision doit tendre. Puis elle compare l'état apparent à cet objectif pour détecter un éventuel écart qu'elle utilisera pour guider une nouvelle action. Des variables auxiliaires facilitent l'élaboration des modèles et sont en fait des subdivisions d'équations de taux. Elles apparaissent dans les chaînons d'information qui connectent les niveaux des taux qui les contrôlent et qui définissent les politiques dans les systèmes. Ce sont les seuls intrants des équations de taux qui peuvent influencer les décisions.

La figure 2 schématise le principe de la représentation symbolique des modèles préconisée par FORRESTER et son paradigme énonçant que toute décision est forcément prise à l'intérieur d'une boucle de *feedback* [FOR 84][78].

FIG 2 Symboles des modèles de la dynamique des systèmes



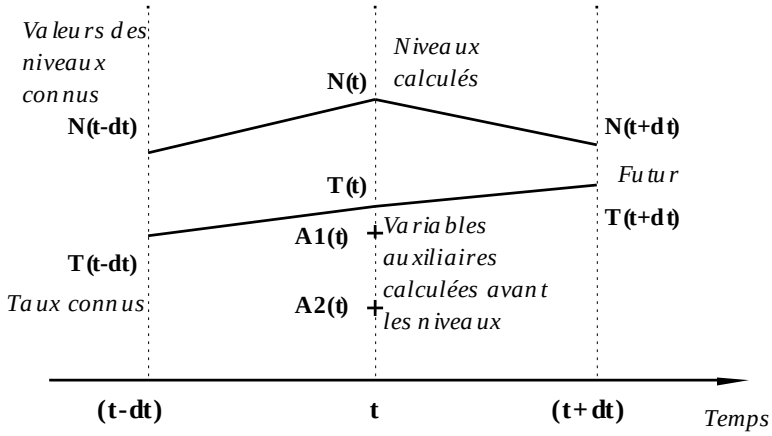
Les six types de flux dans les systèmes

[76] cf. FORRESTER [FOR 58].
[77] au sens mathématique du terme.
[78] d'après P. SENGE [SEN 90], il existe certains processus de retour d'informations dans les organisations qu'il appelle «les archétypes du système».

A.4c. Principe de résolution des équations de Forrester

Le principe de calcul de la simulation DYNAMO est décrit dans la figure suivante (fig. 3).

FIG 3 Principe de calcul DYNAMO



Une variable de niveau ou de stock à l'instant t est évaluée à partir de sa valeur précédente, c'est-à-dire à (t - dt) augmentée ou diminuée de la variation des taux d'entrée et de sortie pendant cet intervalle de temps dt. Les équations de FORRESTER exprimant ces variations de niveaux sont des équations différentielles finies de la forme suivante:

NIVEAU(t) = NIVEAU(t-1) + dt . (TAUXentrée - TAUXsortie).

L'équation intégro-différentielle du premier ordre correspondante est:
NIVEAU(t)= NIVEAU(t=0) + **Erreur !**dt)

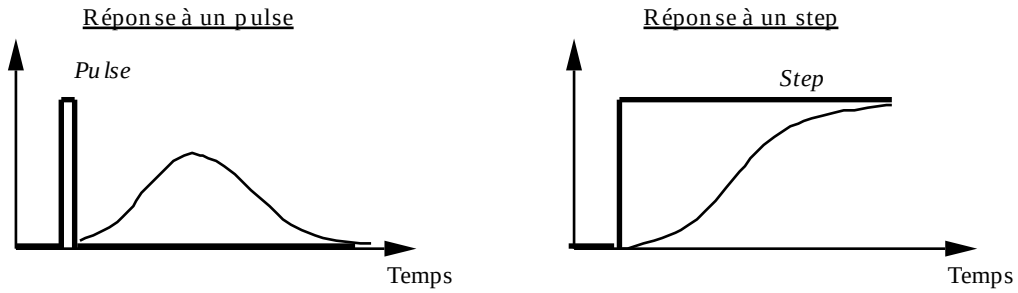
Les variables de taux dépendent de variables de niveaux ou de variables auxiliaires connues au début de la période de calcul comme le montre la figure 3. DYNAMO permet ainsi de résoudre des équations différentielles non linéaires de tout ordre (après mise sous forme canonique).

A.4d. Les types de délais dans les systèmes

Les délais dans les systèmes constituent un des éléments essentiels de leur dynamique et sont représentés par des niveaux. La figure 19 représente un délai à réponse exponentielle d'ordre 3 activé par deux types de stimulation, une impulsion (*pulse*) et

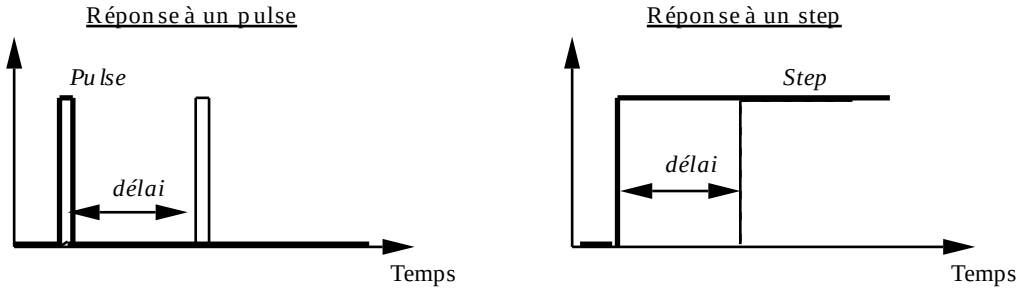
un *step*. Ce type de délai est le plus couramment observé dans les modèles car son comportement dynamique est le plus proche des comportements réels[79].

FIG 4 Délai exponentiel d'ordre 3



Il existe également des délais discrets ou *pipeline*, délais non exponentiels dits «purs» (voir figure 5) dans lesquels l'intrant est reproduit exactement en extrant au bout d'un certain délai temporel. Ils sont très représentatifs des systèmes opérants de type *process* correspondant aux industries de transformation continue en lignes.

FIG 5 Délai discret ou pipeline



Il faut distinguer également les délais conservatifs des délais de lissage. Les délais conservatifs sont insérés dans un canal de flux qui transporte une quantité qui va d'un point à l'autre. Ce qui rentre dans ce type de délai doit nécessairement en ressortir. La constante de ces délais représente en régime permanent, la durée moyenne de séjour d'un élément de flux qui y est entré.
Les délais de lissage ou délai d'information sont placés dans un canal d'information. Dans ces cas, la notion de conservation est absente du processus de traitement de l'information. Leur rôle est de lisser l'historique des informations, la constante de ces délais représentant l'âge moyen pondéré de l'information qui en sort.

A.4e. Le lissage exponentiel d'ordre 3

Le type de lissage exponentiel d'ordre 3 que nous avons utilisé dans nos modèles, se représente par une succession de trois lissages exponentiels du premier ordre.
La figure 6 montre le principe de ce lissage.

[79] lire à ce propos J.POPPER [POP 73] et J.W. FORRESTER [FOR 69].

Soient X la variable à lisser dans le temps, XL la variable correspondant à la valeur lissée de cette variable et α le coefficient de lissage.
Pour un intervalle de temps dt entre t et (t + dt), un lissage du premier ordre de X donne une valeur XL égale à:

$$XL_{t+dt} = XL_t + \left(\frac{dt}{\alpha}\right) . (X_t - XL_t),$$

qui est donc la valeur lissée de X à l'instant (t + dt).

Pour un coefficient de lissage α donné, le lissage d'ordre 3 d'une variable X est déterminé par XL3 à partir des équations suivantes:

$$XL1_{t+dt} = XL1_t + \left(\frac{dt}{\alpha}\right) . (X_t - XL1_t),$$

$$XL2_{t+dt} = XL2_t + \left(\frac{dt}{\alpha}\right) . (XL1_t - XL2_t),$$

$$XL3_{t+dt} = XL3_t + \left(\frac{dt}{\alpha}\right) . (XL2_t - XL3_t) = \text{variable X lissée.}$$

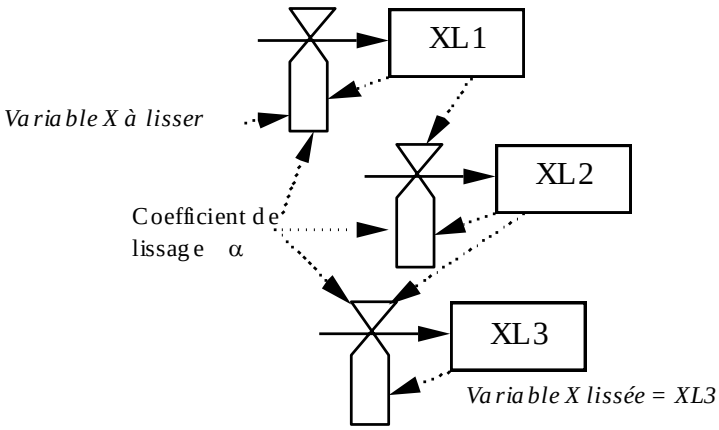



FIG 6 Principe du lissage exponentiel d'ordre 3