

N° d'ordre : 498 GI

THESE

présentée par

Mohand ESSAID

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

Spécialité : Génie Industriel

**MODELISATION ET SIMULATION DE LA CONNECTIVITE DES
FLUX LOGISTIQUES DANS LES RESEAUX MANUFACTURIERS**

Soutenue à Saint-Etienne, le 17 Novembre 2008

Membres du jury

Président :	Valérie BOTTA-GENOULAZ	Professeur, INSA, Lyon
Rapporteurs :	Caroline THIERRY	HDR, Université Toulouse 2 Le Mirail, Toulouse
	Yannick FREIN	Professeur, INP, Grenoble
Examineurs :	Vincent GIARD	Professeur, Université Paris-Dauphine, Paris
	Christophe CAUX	HDR, IFMA, Clermont-Ferrand
	Marie Agnès GIRARD	Maître Assistante, Ecole des Mines de Saint-Etienne
Directeur(s) de thèse :	Patrick BURLAT	Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne
	Frédéric GRIMAUD	Maître Assistant, Ecole des Mines de Saint-Etienne

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 1	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Sciences de l'inform. & com.	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
CARRARO	Laurent	PR 1	Mathématiques Appliquées	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	ICM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSE	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	CIS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURIOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
KLÖCKER	Helmut	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences de la Terre	SITE
THOMAS	Gérard	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 1	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 1	Professeur 1 ^{ère} catégorie
PR 2	Professeur 2 ^{ème} catégorie
MA(MDC)	Maître assistant
DR (DR1)	Directeur de recherche
Ing.	Ingénieur
MR(DR2)	Maître de recherche
CR	Chargé de recherche
EC	Enseignant-chercheur
ICM	Ingénieur en chef des mines

Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
SITE	Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
G2I	Génie Industriel et Informatique
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Madame Valérie BOTTA-GENOULAZ, Professeur à l'INSA de Lyon, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner mes travaux et de présider le jury de ma soutenance de thèse.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Madame Caroline THIERRY, Maître de conférences à l'Université Toulouse 2 Le Mirail, et Monsieur Yannick FREIN, Professeur à l'INP Grenoble, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je leur suis reconnaissant pour leur lecture attentive et leurs suggestions constructives.

Je remercie également Monsieur Vincent Giard, Professeur à l'Université de Paris-Dauphine, Monsieur Christophe CAUX, Maître de conférences à l'IFMA de Clermont-Ferrand et Madame Marie Agnès GIRARD, Maître Assistante à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, d'accepter d'examiner mes travaux.

Je remercie infiniment Monsieur Patrick BURLAT, Professeur à Ecole des Mines de Saint-Etienne et Monsieur Frédéric GRIMAUD, Maître Assistant à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne pour avoir accepté de diriger mes travaux de recherche. Leur disponibilité, leurs conseils, et leur soutien m'ont toujours redonné confiance et volonté. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse un grand merci à Saïd IZZA, Docteur de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, qui m'a beaucoup soutenu durant cette période de thèse.

Je remercie également mes collègues et amies doctorantes Natacha et Khouloud ainsi que tous les doctorants de G2I, avec qui j'ai passé trois agréables années.

Que mes chers parents, mes frères et sœurs et mes amis trouvent ici l'expression de ma grande reconnaissance et de ma profonde gratitude.

À mes chers parents

Résumé

La configuration des réseaux manufacturiers constitue de nos jours une problématique industrielle majeure, plus particulièrement dans un contexte « on demand production », caractérisé par des relations logistiques à court terme en vue de répondre rapidement à des opportunités de marché. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans cette optique et ont pour objectif d'étudier la dynamique des flux de production et l'évaluation de la performance des chaînes logistiques constituées. On s'intéresse plus précisément au potentiel d'une entreprise à se connecter à un réseau manufacturier, que nous appelons aussi la connectivité des flux. Ce potentiel dépend en grande partie de la maturité organisationnelle des entreprises impliquées dans le réseau. Cette maturité organisationnelle peut être caractérisée par un certain nombre d'attributs décrivant le système opérant et le système de pilotage de l'entreprise. Ces attributs permettent de définir des profils types d'entreprise et de modéliser de façon générique des systèmes manufacturiers.

Notre démarche de recherche consiste à évaluer la performance de chaînes logistiques constituées de différents profils d'entreprises, et ce en utilisant une simulation en laboratoire « *in vitro* ». L'objectif de cette démarche est le benchmark de différents scénarios logistiques et la détection de configurations peu performantes et la mise en œuvre de mécanismes de coordination pour améliorer leur performance. A partir des résultats expérimentaux, il est alors possible de constituer un guide méthodologique permettant une aide à la décision, sans repasser par des simulations.

A partir d'un état de l'art sur la configuration et la modélisation des chaînes logistiques, nous avons développé un modèle conceptuel d'entreprise en vue de son intégration dans un réseau manufacturier. Ce modèle est instancié selon le type de processus de production, le mode de pilotage des flux et le niveau de capacité de l'entreprise. Ce dernier est défini en se basant sur le taux de rendement synthétique des process. Les profils d'entreprises obtenus à partir du modèle sont alors incorporés dans une chaîne logistique. Le modèle logistique est ensuite implémenté sous un outil de simulation à événements discrets.

Nous avons réalisé des campagnes de simulation de chaînes logistiques en se focalisant sur les niveaux de capacité des entreprises de la chaîne et leurs stratégies de réponse à la demande. Plus précisément, nous nous sommes intéressés une stratégie de production sur stock et une stratégie d'assemblage à la commande en amont de la chaîne.

Les résultats de simulation nous ont permis de réaliser un benchmark de différentes configurations logistiques et de déduire quelques mécanismes de comportement de ces chaînes. Nous avons notamment montré l'impact de l'homogénéité des échelons, de la position de l'entreprise la moins performante sur la performance globale de la chaîne, ainsi que les gains potentiels d'une stratégie de production à la commande.

MOTS-CLÉS : Réseaux manufacturiers, Connectivité des flux, Configuration logistique, Simulation, Stratégie de réponse à la demande, Capacité, Performance.

Abstract

Manufacturing network configuration is today a major industrial problem, especially in a “on demand production” context, characterized by logistical relations in the short term to respond quickly to market opportunities. Our work fit into this and aims to study the dynamics of production flow and evaluating the performance of supply chains. There is more accurately the potential for a company to connect to a manufacturing network, we also call flow connectivity. This potential depends on the organizational maturity of the companies involved in the network. This organizational maturity can be characterized by some attributes describing the operating system and the operations management system of the company. These attributes define enterprises-profiles and help de build a generic model of manufacturing systems.

Our research approach is to assess the performance of supply chains made up of different profiles of companies by using simulation in laboratory “*in vitro simulation*”. The objective of this approach is the benchmark of different logistical scenarios, the detection of inefficient configurations and the implementation of coordination mechanisms to improve their performance. From the experimental results, it is possible to establish a methodological guide to help with the decision, without go through simulations.

From a state of the art on the supply chain configuration and modelling, we developed a conceptual model of manufacturing network. This model is instantiated depending on the type of production process, the operations management policies and the level of capability of the company. The latter is defined based on the overall performance effectiveness. The company profiles obtained from the model are then incorporated into a supply chain. The model is then implemented using discrete event simulation.

We have made simulations of supply chains by focusing on levels of capability of enterprises in the chain and their demand response strategies. Specifically, we have studied a Make To Stock strategy and an Assemble To Order strategy upstream the chain.

We have achieved a benchmark of different supply chain configurations and deduced some behavioural flow dynamics. We showed the impact of heterogeneity of capability levels of supply chain tiers on the overall performance of the system, as well as the potential gains of an Assemble To Order strategy.

KEYWORDS: Manufacturing Networks, Flow Connectivity, Supply Chain, Simulation, Capability, Demand Response Strategy.

Sommaire

REMERCIEMENTS	III
RESUME	XIII
ABSTRACT	IX
SOMMAIRE	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XV
CHAPITRE I INTRODUCTION	- 3 -
I.1. INTRODUCTION A LA PROBLEMATIQUE.....	- 3 -
I.2. OBJECTIFS ET CONTRIBUTIONS DE LA THESE	- 4 -
I.3. METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	- 5 -
I.4. ORGANISATION DU DOCUMENT	- 8 -
PARTIE 1: ETAT DE L'ART	
CHAPITRE II CHAINES LOGISTIQUES ET RESEAUX MANUFACTURIERS .-	11 -
II.1. INTRODUCTION	- 11 -
II.2. CHAINES LOGISTIQUES.....	- 12 -
II.2.1. Définitions de la chaîne logistique.....	- 12 -
II.2.2. Définitions du supply chain management	- 13 -
II.2.3. Réseaux manufacturiers.....	- 14 -
II.2.4. Le contexte « on demand production »	- 15 -
II.2.5. Discussion.....	- 16 -
II.3. PROBLEMATIQUES DE CONFIGURATION DES CHAINES LOGISTIQUES.....	- 17 -
II.3.1. Décisions logistiques.....	- 17 -
II.3.2. Choix de partenaires logistiques.....	- 21 -
II.3.3. Discussion.....	- 22 -
II.4. TYPOLOGIE D'ENTREPRISES EN VUE DE CONFIGURATION DE CHAINES LOGISTIQUES.....	- 23 -
II.4.1. Typologies des systèmes manufacturiers.....	- 23 -
II.4.1.1. Taxonomie – Typologie	- 23 -
II.4.1.2. Les grandes familles de systèmes de production.....	- 24 -
II.4.1.3. Autres typologies	- 30 -
II.4.1.4. Les grilles d'analyse des systèmes manufacturiers	- 32 -
II.4.1.5. Discussion.....	- 39 -
II.4.2. Système de pilotage d'une entreprise.....	- 42 -
II.4.2.1. La stratégie de réponse à la demande.....	- 42 -
II.4.2.2. Définition du point de pénétration de la commande client (Order Penetration Point ou customer order decoupling point)	- 42 -
II.4.2.3. Système de Planification et de contrôle.....	- 46 -

II.4.2.4. Discussion	- 47 -
II.4.3. <i>Efficacité d'un processus manufacturier</i>	- 48 -
II.4.3.1. Overall Equipment Effectiveness	- 49 -
II.4.4. <i>Discussion</i>	- 51 -
II.5. CONCLUSION	- 52 -

CHAPITRE III MODELISATION ET SIMULATION DES CHAINES LOGISTIQUES- 53 -

III.1. INTRODUCTION	- 53 -
III.2. TYPOLOGIE DES MODELES DE CHAINES LOGISTIQUES	- 53 -
III.2.1. <i>Introduction</i>	- 53 -
III.2.2. <i>Modèles d'optimisation</i>	- 54 -
III.2.3. <i>Modèles économiques</i>	- 55 -
III.2.4. <i>Modèles de simulation</i>	- 55 -
III.3. SIMULATION DES CHAINES LOGISTIQUES	- 57 -
III.3.1. <i>Introduction</i>	- 57 -
III.3.2. <i>Les méthodes de simulation</i>	- 58 -
III.3.3. <i>Les secteurs d'industries</i>	- 59 -
III.3.4. <i>L'amplification de la demande</i>	- 59 -
III.3.5. <i>La coordination et le partage d'information</i>	- 60 -
III.3.6. <i>La mise en œuvre de stratégies</i>	- 60 -
III.4. DIFFERENTS FORMALISMES DE SIMULATION	- 61 -
III.4.1.1. <i>Tableurs</i>	- 61 -
III.4.1.2. <i>Dynamique des systèmes</i>	- 62 -
III.4.1.3. <i>Jeux d'entreprises</i>	- 63 -
III.4.1.4. <i>Simulation à Evénements Discrets</i>	- 64 -
III.5. DISCUSSION	- 66 -
III.6. EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UNE CHAINE LOGISTIQUE	- 66 -
III.6.1. <i>Introduction</i>	- 66 -
III.6.2. <i>Indicateurs de performance logistique</i>	- 67 -
III.6.3. <i>Systèmes d'indicateurs de performance logistique</i>	- 69 -
III.7. CONCLUSION	- 71 -

CHAPITRE IV COORDINATION ET CONNECTIVITE DES FLUX.....- 73 -

IV.1. INTRODUCTION	- 73 -
IV.2. COORDINATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE	- 74 -
IV.2.1. <i>Définitions</i>	- 74 -
IV.2.2. <i>Modèles de coordination</i>	- 75 -
IV.2.3. <i>Typologie des mécanismes de coordination</i>	- 77 -
IV.2.3.1. <i>La coordination par les prix</i>	- 77 -
IV.2.3.2. <i>La coordination sans prix</i>	- 77 -
IV.2.3.3. <i>La coordination par les flux</i>	- 78 -
IV.3. CONNECTIVITE DES FLUX LOGISTIQUES	- 83 -
IV.3.1. <i>Concept de connectivité et ses dimensions</i>	- 83 -
IV.4. DISCUSSION	- 86 -

PARTIE 2: MODELE DE SIMULATION DE LA CONNECTIVITE DES FLUX LOGISTIQUES

CHAPITRE V METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET MODELE CONCEPTUEL - 89 -

V.1. INTRODUCTION.....	- 89 -
V.2. PERIMETRE DE L'ETUDE.....	- 90 -
V.3. CONCEPTS ET DEMARCHE.....	- 92 -
V.3.1. <i>Connectivité de profils d'entreprises</i>	- 92 -
V.3.2. <i>Les classes d'entreprises</i>	- 94 -
V.3.3. <i>Simulation générique</i>	- 95 -
V.4. MODELE D'UNE ENTREPRISE MANUFACTURIERE.....	- 96 -
V.4.1. <i>Introduction</i>	- 96 -
V.4.2. <i>Eléments de modélisation</i>	- 97 -
V.4.3. <i>Structure des flux</i>	- 99 -
V.5. CONCLUSION.....	- 100 -

CHAPITRE VI OUTIL DE CONFIGURATION ET DE SIMULATION DE CHAINES LOGISTIQUES - 101 -

VI.1. INTRODUCTION.....	- 101 -
VI.2. LE MODELE LOGISTIQUE.....	- 102 -
VI.2.1. <i>Structure de la chaîne</i>	- 102 -
VI.2.2. <i>Modèles d'activités et structures des flux</i>	- 103 -
VI.2.3. <i>Les flux de produits</i>	- 108 -
VI.3. OUTIL DE CONFIGURATION DES CHAINES LOGISTIQUES.....	- 109 -
VI.3.1. <i>Introduction</i>	- 109 -
VI.3.2. <i>Démarche de configuration</i>	- 110 -
VI.3.3. <i>Instanciaton des classes d'entreprises</i>	- 112 -
VI.4. OUTIL DE SIMULATION.....	- 117 -
VI.4.1. <i>Structure de l'outil de simulation</i>	- 117 -
VI.4.2. <i>Gestion des commandes et des ordres de production</i>	- 118 -
VI.5. CONCLUSION.....	- 122 -

PARTIE 3: CAMPAGNES DE SIMULATION

CHAPITRE VII SIMULATION DE CONFIGURATIONS DE CHAINES LOGISTIQUES - 125 -

VII.1. INTRODUCTION.....	- 125 -
VII.2. CALIBRAGE DU MODELE.....	- 126 -
VII.2.1. <i>Démarche de calibrage</i>	- 126 -
VII.2.2. <i>Plan de simulation</i>	- 128 -

VII.2.2.1. Modèle de production sur stock (MTS/MTS/MTS).....	- 129 -
VII.2.2.2. Modèle de production à la commande (ATO/ATO/MTS).....	- 131 -
VII.3. RESULTATS DE SIMULATION.....	- 133 -
VII.3.1. <i>Les configurations MTS/MTS/MTS</i>	- 133 -
VII.3.1.1. Les chaînes homogènes	- 133 -
VII.3.1.2. Les chaînes avec dégradation progressive de la performance d'un échelon	- 134 -
VII.3.1.3. Les chaînes de classes A et D	- 136 -
VII.3.1.4. Simulation de l'ensemble des configurations MTS/MTS/MTS	- 136 -
VII.3.1.5. Synthèse de simulation des chaînes MTS/MTS/MTS.....	- 147 -
VII.3.2. <i>Les configurations ATO/ATO/MTS</i>	- 150 -
VII.3.2.1. Les chaînes homogènes	- 151 -
VII.3.2.2. Les chaînes avec dégradation progressive de la performance d'un échelon	- 151 -
VII.3.2.3. Les chaînes de classes A et D	- 153 -
VII.3.2.4. Simulation de l'ensemble des configurations ATO/ATO/MTS	- 153 -
VII.3.2.5. Synthèse de simulation des chaînes ATO/ATO/MTS.....	- 160 -
VII.3.3. <i>Comparaison MTS/MTS/MTS et ATO/ATO/MTS</i>	- 163 -
VII.4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	- 165 -

CHAPITRE VIII CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES - 169 -

VIII.1. APPORTS DE NOTRE ETUDE	- 169 -
VIII.2. IMPLICATIONS MANAGERIALES DES RESULTATS DE L'ETUDE.....	- 170 -
VIII.3. PRINCIPALES CONCLUSIONS.....	- 171 -
VIII.4. PRINCIPALES PERSPECTIVES DE RECHERCHE	- 171 -
VIII.4.1. <i>Perspectives 1</i>	- 172 -
VIII.4.2. <i>Perspectives 2</i>	- 173 -
VIII.4.3. <i>Perspectives 3</i>	- 173 -

BIBLIOGRAPHIE..... - 177 -

ANNEXE A. MODELES DE GESTION DES STOCKS 197

A.1. LA GESTION DES STOCKS EN POINT DE COMMANDE ET RECOMPLETEMENT PERIODIQUE.....	197
A.2. LE SYSTEME KANBAN	200

ANNEXE B. TECHNIQUES D'ANALYSE DES DONNEES..... 203

B.1. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)	203
B.2. ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES (AFC)	204
B.3. LA CLASSIFICATION HIERARCHIQUE.....	204

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Démarche générale de recherche.....	- 6 -
Figure I.2. Positionnement et périmètre de notre étude	- 7 -
Figure II.1. Modèle de chaîne logistique selon le modèle SCOR (SCC, 2007)	- 13 -
Figure II.2. From the functional factory to the production cluster (Wiendahl et Lutz, 2002).....	- 15 -
Figure II.3. Le contexte « On Demand Production »	- 17 -
Figure II.4. Supply Strategy (Schary et Skjott-Larsen, 1995).....	- 18 -
Figure II.5. Issues in supply chain (Lambert et Cooper, 2000).....	- 19 -
Figure II.6. A conceptual approach for modelling supply chains in the delocalization context (Hamammi et al., 2008).....	- 22 -
Figure II.7. Les grandes familles des systèmes industriels	- 25 -
Figure II.8. Agencement des ateliers de production	- 27 -
Figure II.9. Analyse VAT	- 30 -
Figure II.10. The different kinds of plant layouts (Schonsleben, 2004)	- 32 -
Figure II.11. Point de pénétration de commande client et stratégie de réponse à la demande	- 43 -
Figure II.12. Choosing the right product delivery strategy and decoupling ATO into MTS and MTO (Olhager, 2003).....	- 46 -
Figure II.13. Simplified Input-Output Analysis of the Information based Control System (Berry et Naim, 1994).....	- 47 -
Figure II.14. Effectiveness and efficiency (d'après Hansen, 2001)	- 48 -
Figure II.15. Définition du taux de rendement synthétique (Afnor 60-182).....	- 49 -
Figure III.1. Démarche de simulation	- 56 -
Figure III.2. Couplage de la simulation avec l'optimisation.....	- 57 -
Figure III.3. Generic Stock Management System (Serman,1989)	- 63 -
Figure III.4. Supply chain performance system (Chan et Qi, 2003)	- 68 -
Figure III.5. Performance metrics for supply chain management (Gunasekaran et al., 2001).....	- 68 -
Figure III.6. The supply chain measurement system (Beamon, 1999).....	- 70 -
Figure IV.1. Collaboration framework (Simatupang et Sridharan, 2005).....	- 76 -
Figure IV.2. The Houlihan flywheel describing one aspect of bullwhip (Houlihan, 1987).....	- 80 -
Figure IV.3. Pipeline Segments of VBTO system (Brabazon, 2005)	- 81 -
Figure IV.4. Le principe du point de pénétration de commande chez un fournisseur (Mendy et Giard, 2006).....	- 82 -
Figure IV.5. Research model linking networkability to network performance (d'après Huisman et Smits, 2007).....	- 85 -
Figure V.1. Approche pour la construction des profils d'entreprises	- 92 -
Figure V.2. Constitution d'un maillon logistique	- 93 -
Figure V.3. Les profils d'entreprises	- 94 -
Figure V.4. Démarche d'utilisation de la simulation en laboratoire	- 96 -
Figure V.5. Eléments du modèle conceptuel d'une entreprise.....	- 98 -
Figure V.6. Les différentes structures de flux de produits	- 100 -
Figure VI.1. Modèle de la chaîne logistique	- 102 -
Figure VI.2. Modèle de classes UML de la chaîne logistique	- 103 -
Figure VI.3. Diagramme de flux du système logistique	- 104 -
Figure VI.4. Diagramme de flux du fournisseur de la chaîne	- 104 -
Figure VI.5. Diagramme de flux du client de la chaîne	- 105 -

Figure VI.6. Diagramme de flux de la chaîne logistique	105 -
Figure VI.7. Diagramme de flux de l'entreprise	106 -
Figure VI.8. Diagramme de flux du système de pilotage de l'entreprise	107 -
Figure VI.9. Diagramme de flux du système physique de l'entreprise	107 -
Figure VI.10. Les six types de chaînes selon les combinaisons du process de production	109 -
Figure VI.11. Diagramme d'activités de l'outil de configuration	110 -
Figure VI.12. Diagramme d'activités détaillé de l'outil de configuration	111 -
Figure VI.13. Configuration des flux de produits	112 -
Figure VI.14. Structure générale de l'outil de configuration-simulation	118 -
Figure VI.15. Processus de gestion des commandes	119 -
Figure VI.16. La production MTS	119 -
Figure VI.17. Production ATO	120 -
Figure VI.18. Production MTO	120 -
Figure VI.19. Règle de lancement des ordres	121 -
Figure VI.20. Paramètres de calcul des ordres de fabrication à la commande	121 -
Figure VII.1. Effet de l'extra capacité sur les performances des entreprises	127 -
Figure VII.2. Les combinaisons de classes d'entreprises	129 -
Figure VII.3. Performance des chaînes homogènes en MTS/MTS/MTS	134 -
Figure VII.4. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec dégradation du dernier échelon	134 -
Figure VII.5. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec dégradation du premier échelon	135 -
Figure VII.6. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec des échelons de type A et D	136 -
Figure VII.7. Coordonnées sur le premier plan factoriel des configurations MTS/MTS/MTS	138 -
Figure VII.8. Coordonnées sur le second plan factoriel des configurations MTS/MTS/MTS	139 -
Figure VII.9. Premier plan d'analyse des correspondances - MTS/MTS/MTS	142 -
Figure VII.10. Deuxième plan d'analyse des correspondances - MTS/MTS/MTS	143 -
Figure VII.11. Troisième plan d'analyse des correspondances - MTS/MTS/MTS	143 -
Figure VII.12. Effet de dégradation du dernier échelon d'une chaîne MTS/MTS/MTS très efficace	147 -
Figure VII.13. Performances des groupes de configurations MTS/MTS/MTS (ACP)	149 -
Figure VII.14. Performances des groupes de configurations MTS/MTS/MTS (ACM)	150 -
Figure VII.15. Performance des chaînes homogènes en ATO/ATO/MTS	151 -
Figure VII.16. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec dégradation du dernier échelon	152 -
Figure VII.17. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec dégradation du premier échelon	152 -
Figure VII.18. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec des échelons de type A et D	153 -
Figure VII.19. Coordonnées sur le premier plan factoriel des configurations ATO/ATO/MTS	154 -
Figure VII.20. Coordonnées sur le second plan factoriel des configurations ATO/ATO/MTS	154 -
Figure VII.21. Premier plan d'analyse des correspondances - ATO/ATO/MTS	156 -
Figure VII.22. Deuxième plan d'analyse des correspondances - ATO/ATO/MTS	157 -
Figure VII.23. Performances des groupes de configurations ATO/ATO/MTS (ACP)	161 -
Figure VII.24. Performances des groupes de configurations ATO/ATO/MTS (ACM)	162 -
Figure VII.25. Comparaison des performances des stratégies ATO et MTS	164 -
Figure VII.26. Effet de la variabilité de la demande sur l'efficacité de la chaîne	166 -
Figure VIII.1. Les perspectives de recherche	172 -

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Supply Chain management definitions (Croom et al., 2000).....	14 -
Tableau II.2. Supply Chain content matrix (Croom et al, 2000).....	20 -
Tableau II.3. Taxonomie et typologie (d'après Bozarth et McDermott, 1998).....	24 -
Tableau II.4. Caractérisation des systèmes de production (d'après Silver et al., 1998).....	28 -
Tableau II.5. Liens entre processus manufacturier et plan directeur de production (d'après Berry et Hill, 1992).....	34 -
Tableau II.6. Liens entre processus manufacturier et planification de la production (d'après Berry et Hill, 1992).....	34 -
Tableau II.7. Liens entre processus manufacturier et ordonnancement des opérations (d'après Berry et Hill, 1992)	35 -
Tableau II.8. Niveaux du système de planification et contrôle, décisions de gestion à chaque niveau et liens avec les process de production (d'après Olhager et Rudberg, 2002)	36 -
Tableau II.9. Modes de gestion et caractéristiques de la demande (d'après Newman et Sridharan, 1995)-	37 -
Tableau II.10. Catégories et attributs d'une typologie de chaînes logistiques (d'après, Fleischmann et Meyr, 2003)	39 -
Tableau II.11. Caractérisation et attributs d'un système manufacturier.....	41 -
Tableau II.12. Caractéristiques des stratégies de réponse la demande (d'après Dong, 2001).....	43 -
Tableau II.13. Différences entre les opérations amont et les opérations aval du point de pénétration de commande (d'après Olhager, 2003)	45 -
Tableau III.1. Simulation package evaluation scores (Tewoldeberhan et al., 2002).....	65 -
Tableau III.2. Supply chain performance metrics framework (Gunasekaran et al., 2004)	69 -
Tableau III.3. Goals of performance measure types (Beamon, 1999)	70 -
Tableau IV.1. Examples of common dependencies between activities and alternative coordination processes for managing them (Malone et Crowston, 1994)	74 -
Tableau IV.2. Examples of criteria for networkability (Alt et al., 2000).....	84 -
Tableau IV.3. Approaches for designing networkability (Alt et al, 2000).....	85 -
Tableau VI.1. Les valeurs des composantes du taux de rendement global	113 -
Tableau VI.2. Les paramètres d'entrée des classes d'entreprises	115 -
Tableau VI.3. Feuille de calcul des temps de processus	116 -
Tableau VII.1. Paramètres de simulation du modèle MTS/MTS/MTS	130 -
Tableau VII.2. Paramètres de simulation du modèle ATO/ATO/MTS	132 -
Tableau VII.3. Répartition (ACP) des configurations MTS/MTS/MTS.....	139 -
Tableau VII.4. Répartition (ACM) des configurations MTS/MTS/MTS	145 -
Tableau VII.5. Caractérisation des groupes de configurations MTS/MTS/MTS.....	146 -
Tableau VII.6. Répartition des configurations ATO/ATO/MTS	155 -
Tableau VII.7. Classification hiérarchique affinée des configurations ATO/ATO/MTS	157 -
Tableau VII.8. Caractérisation des groupes de configurations ATO/ATO/MTS.....	159 -

INTRODUCTION

Chapitre I INTRODUCTION

I.1. Introduction à la problématique

L'étude du fonctionnement des chaînes logistiques et la mise en place d'outils d'aide à leur pilotage deviennent depuis quelques années des problématiques majeures du monde industriel et de la recherche.

Les problématiques de conception d'un réseau manufacturier sont des décisions d'ordre stratégique. Elles concernent le choix des partenaires, des sources d'approvisionnement, de la localisation des sites de production et leur dimensionnement ainsi que les stratégies commerciales permettant de répondre au mieux à la demande du marché. Le pilotage de la chaîne à moyen et court termes relève plutôt des décisions tactiques et opérationnelles. Il consiste à définir les modes de gestion des flux et des ressources, le contrôle et le suivi de la production ainsi que les mécanismes de coordination et de gestion de l'information entre les différents centres décisionnels de la chaîne.

Un grand nombre d'études des chaînes logistiques s'intéressent à des réseaux établis et souvent pilotés par un acteur central. Il s'agit alors d'aligner les différents systèmes de pilotage des acteurs de la chaîne sur une démarche d'intégration et d'optimisation définie par l'entreprise porteuse du projet logistique. Ces démarches d'intégration et de gestion centralisée de la chaîne logistique sont souvent facilitées par la mise en œuvre des nouvelles technologies de l'information et de communication. Cependant, la lourdeur et la difficulté d'implémentation de ces démarches, le raccourcissement de plus en plus prononcé de la durée de vie des produits, et la recherche d'une plus grande flexibilité pour pouvoir mieux s'aligner aux besoins d'un marché volatile et exigeant, posent souvent des problèmes quant à la rentabilité des projets logistiques. En particulier, les petites et moyennes entreprises, du fait de la rigidité et de la limitation de leurs moyens financiers, ne peuvent pas toujours s'impliquer dans de grands projets de longue durée nécessitant des restructurations majeures de leurs organisations.

Par conséquent, la conception et le pilotage d'un réseau manufacturier de courte durée, dans le but de répondre efficacement à une opportunité de marché et avec le minimum de changements organisationnels et donc de coût de configuration de la chaîne est une démarche pragmatique qui permet aux entreprises d'évaluer les opportunités et les risques de travailler avec tel ou tel partenaire.

La problématique de notre étude s'inscrit précisément dans cette optique de configuration d'un réseau manufacturier suffisamment efficace et efficient constitué d'entreprises autonomes ayant des niveaux de maturité organisationnelle et des modes de gestion dissimilaires. Nous nous intéressons en particulier au potentiel d'une entreprise d'un certain profil à se connecter à un réseau manufacturier. Pour ce faire, nous avons adopté une démarche de simulation « *in vitro* » qui consiste à configurer et

simuler des chaînes logistiques à partir d'un modèle d'entreprise générique et ce afin d'étudier la dynamique des flux physiques et d'évaluer la performance globale d'une chaîne composée d'entreprises de différents profils.

I.2. Objectifs et contributions de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de modélisation et de pilotage des organisations en réseaux menées depuis quelques années au sein de notre équipe de recherche. La configuration, l'intégration et le pilotage de ces nouvelles formes organisationnelles nécessitent le développement de nouveaux outils d'aide à la décision.

Cette thèse apporte une réponse partielle mais originale à la question de la *connectivité* des processus de fabrication qui constituent une chaîne logistique. La simulation à événements discrets est utilisée comme outil d'expérimentation permettant l'évaluation des performances de différentes configurations logistiques. Ce travail d'évaluation du potentiel d'une entreprise à se connecter à un réseau manufacturier constitue selon nous une étape importante avant la mise en œuvre de stratégies d'amélioration et de coordination d'une chaîne logistique.

Notre travail a deux objectifs principaux : la constitution d'un guide méthodologique pour l'aide à la configuration de réseau manufacturier et la construction d'une plateforme de simulation pour développer à terme un outil pédagogique (jeu d'entreprise pour l'étude de la dynamique des flux et de la coopération interentreprises).

La construction d'un guide méthodologique répond au besoin d'acquisition de résultats scientifiques nouveaux sur la gestion des chaînes logistiques. En effet, les études dans ce domaine sont, soit axées sur des problématiques industrielles particulières et donc peu généralisables, soit ont un caractère qualitatif et donc difficile à utiliser comme outil de prise de décision.

L'utilisation de la simulation comme outil d'expérimentation des chaînes logistiques est très répandue mais se heurte à la difficulté de récolte et de traitement de données sur des cas d'étude réels. Pour contourner cette difficulté, une simulation en laboratoire *in vitro* de modèles génériques s'avère pertinente. Au lieu de construire des modèles au cas par cas, il s'agit de simuler différentes configurations logistiques en instanciant un modèle général suivant des variables structurelles ou de pilotage. Les résultats de simulation peuvent être alors exploités pour diagnostiquer des cas réels, sans repasser par une phase de simulation. C'est donc une démarche qui permet un gain de temps. De plus, le modèle peut être extensible. En effet, au fur et à mesure de l'exploitation du modèle, ce dernier peut être contextualisé et amélioré pour être plus adapté à de nouvelles problématiques de gestion des chaînes logistiques.

Plus précisément, notre travail se focalise sur les aspects suivants :

- la modélisation et la simulation de chaînes logistiques configurées pour la fabrication d'un produit et constituées d'entreprises de différents profils organisationnels (processus physique et système de pilotage) ;
- l'évaluation de la performance de différentes configurations logistiques en termes de flux : stock, niveau de service, utilisation des ressources de production ;
- le benchmark de ces configurations dans l'objectif de proposer des mécanismes de coordination des flux permettant d'améliorer la connectivité des configurations jugées peu performantes.

I.3. Méthodologie de travail

Notre méthodologie de travail est basée sur l'expérimentation en laboratoire d'un modèle de simulation de chaînes logistiques. Le modèle est construit sur la base d'éléments conceptuels génériques que nous avons réunis et synthétisés à partir d'une étude de l'état de l'art portant d'une part sur les systèmes manufacturiers et d'autre part sur la configuration, la modélisation et la simulation des chaînes logistiques.

La figure I.1 illustre notre démarche de recherche qui s'articule autour de six étapes :

- Modélisation conceptuelle : qui consiste à produire un modèle générique d'une entreprise manufacturière en vue de son intégration dans un réseau manufacturier.
- Instanciation du modèle : qui consiste à définir, à partir du modèle conceptuel, des attributs et des caractéristiques permettant l'instanciation de ce modèle. L'ensemble des données de caractérisation permet alors d'obtenir des profils d'entreprises-types.
- Configuration de la chaîne logistique : qui consiste à construire à l'aide d'un outil de simulation modulable, des configurations logistiques diverses, et ce en choisissant un profil d'entreprise-type pour chaque échelon de la chaîne.
- Simulation : qui consiste à soumettre à une configuration logistique donnée, une demande externe et à évaluer la performance du système en termes de flux physiques (stock et niveau de service) et de productivité des ressources de production des différents échelons de la chaîne.
- Coordination de la chaîne : qui consiste à partir des résultats de simulation, de détecter des configurations peu performantes, sur lesquelles des ajustements des variables de pilotage devront être appliqués afin de coordonner les processus. Ces mécanismes de coordination servent à améliorer la performance de la chaîne sans en modifier sa structure.
- Capitalisation des résultats : les résultats de simulation des différentes configurations sont analysés et synthétisés dans l'objectif de constituer un guide méthodologique et un ensemble d'enseignements. Ces derniers peuvent alors être mobilisés pour l'aide à la décision dans des projets de configuration de chaînes logistiques.

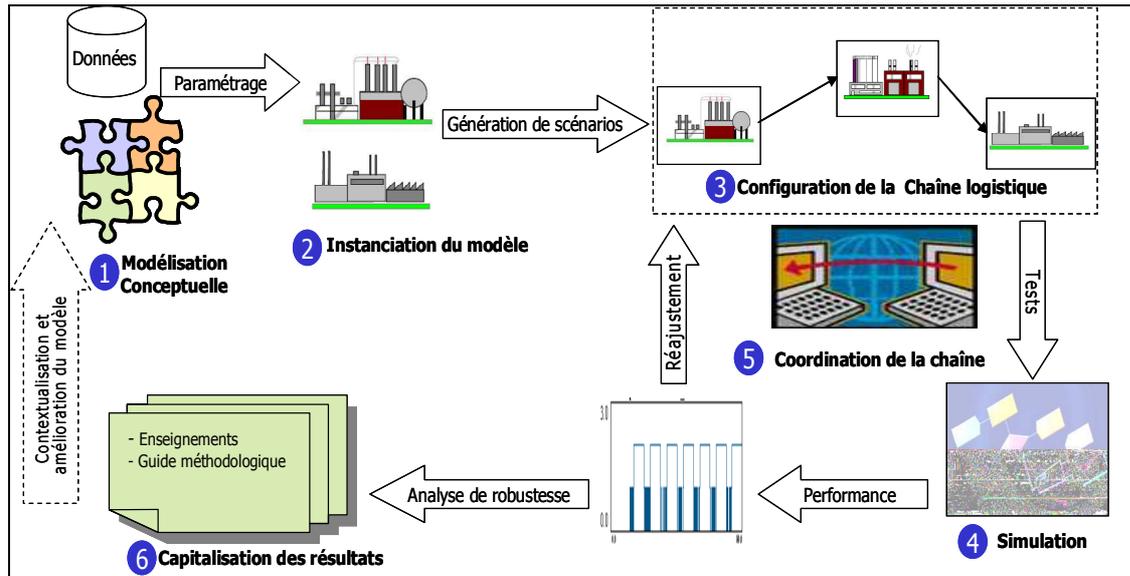


Figure I.1. Démarche générale de recherche

Notre démarche de recherche est une approche descendante, où le périmètre de chaque niveau d'analyse spécialise celui du niveau supérieur. La figure I.2, qui schématise ce processus, permet de mettre en évidence les cinq niveaux structurant notre approche et permettant ainsi d'illustrer le positionnement de notre travail :

- Contexte général : le contexte général de notre travail s'inscrit dans le cadre des problématiques de configuration, de modélisation, de simulation et de coordination des chaînes logistiques.
- Problématique : nous avons délimité le champ d'étude qui correspond à notre problématique de configuration de réseaux manufacturiers dans un contexte « *On Demand Production* ». Dans ce contexte, il s'agit d'évaluer le potentiel de différents profils d'entreprises à se connecter entre elles pour répondre à une demande d'un produit. Ces profils d'entreprises, ayant chacun leur niveau de performance local, sont appelés à constituer une chaîne pour répondre dans les meilleurs délais à la demande du marché.
- Modèle conceptuel : à partir des éléments théoriques concernant les typologies des systèmes manufacturiers ainsi que les modèles de chaînes logistiques et les variables décisionnelles de leur pilotage, nous avons conçu un modèle générique d'entreprise. Ce dernier sert de base pour configurer une chaîne logistique à trois niveaux (échelons). Un échelon de la chaîne est instancié selon : (i) Le type de processus de production (transfert, assemblage, différenciation) ; (ii) La stratégie de réponse à la demande (Make To Stock, Assemble To Order, Make To Order) ; (iii) Le mode de gestion des flux (Replenishment Order Point, Kanban, Material Requirement Planning) ; (iv) Le niveau de capacité du process (quatre niveaux A, B, C et D). Pour ce qui est de la coordination des flux logistiques, elle se fait de façon décentralisée. Au niveau de chaque entreprise, des mécanismes de partage de prévisions, de contrats, etc. sont incorporés au modèle de la chaîne.
- Modèle de simulation : à partir du modèle conceptuel, nous avons développé un modèle de simulation à événements discrets. Le modèle de simulation est associé à un outil de configuration qui permet de créer de façon automatisée divers scénarios de simulation de chaînes logistiques.

- **Expérimentation** : nous avons délimité un périmètre expérimental, à savoir la simulation de chaînes logistiques fabricant deux produits sur deux lignes de transfert. Nous avons testé deux environnements de production : une production sur stock sur la totalité de la chaîne et une production à la commande en amont de la chaîne. Le rechargement de stock à point de commande et un calcul MRP simplifié ont été utilisés comme modèles de pilotage des flux. Nous avons considéré quatre classes d'entreprises selon leur niveau de rendement global, et nous avons testé l'ensemble des combinaisons de ces profils d'entreprises.

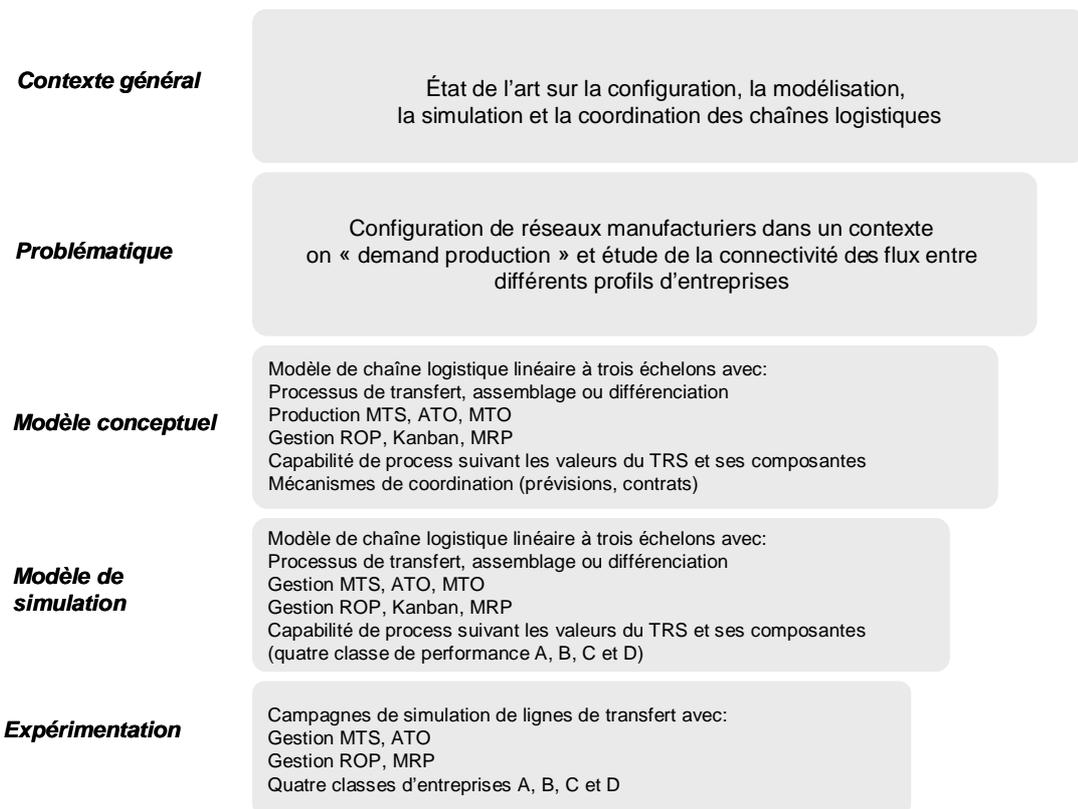


Figure I.2. Positionnement et périmètre de notre étude

I.4. Organisation du document

Le document est organisé en trois parties : un état de l'art, le modèle de simulation que nous avons conçu et les campagnes de simulation qui constituent la partie expérimentale de notre travail.

L'état de l'art est organisé en trois chapitres : le chapitre II présente des définitions et des éléments conceptuels concernant les chaînes logistiques et en particulier les réseaux manufacturiers. Il présente également certaines démarches de configuration des chaînes logistiques et des typologies de catégorisation des entreprises manufacturières. L'objectif de cette partie est de positionner le contexte « on demand production » par rapport aux méthodologies de configuration de chaînes logistiques et de caractériser les échelons de la chaîne par des attributs pertinents permettant la construction de profils d'entreprise.

Le chapitre III présente les différentes démarches de modélisation des chaînes logistiques, avec un focus sur les méthodes de simulation. Nous avons présenté quelques problématiques et champs d'application de la simulation pour l'étude des chaînes logistiques.

Le chapitre IV traite des mécanismes de coordination et de partage d'information dans les chaînes logistiques. Nous avons notamment mis l'accent sur les mécanismes de coordination des flux et leurs apports dans l'amélioration de la performance des chaînes logistiques.

La deuxième partie est composée de deux chapitres : la méthodologie de recherche et le modèle conceptuel, et l'outil de configuration et de simulation de chaînes logistiques.

Le chapitre V présente notre méthodologie de recherche et le positionnement de nos travaux. Il décrit également les éléments mobilisés pour la conception d'un modèle d'entreprise manufacturière en vue de son intégration dans une chaîne logistique.

Le chapitre VI décrit le modèle de la chaîne logistique que nous avons développé, l'outil de configuration qui permet l'instanciation de ce modèle et le simulateur qui implémente et analyse les différentes configurations logistiques.

La troisième partie comporte deux chapitres : les campagnes de simulation de chaînes logistiques, et les conclusions et perspectives de notre étude.

Le chapitre VII décrit les étapes de l'expérimentation. Il présente la démarche de paramétrage du modèle, les scénarios de simulation, les résultats de simulation, ainsi que l'analyse statistique de ces résultats et leur interprétation.

Le chapitre VIII présente les apports de notre étude, les implications managériales des résultats obtenus et propose quelques perspectives pour des travaux futurs.

PARTIE 1

ETAT DE L'ART

Chapitre II CHAINES LOGISTIQUES ET RESEAUX MANUFACTURIERS

II.1. Introduction

Depuis une trentaine d'années, du fait du contexte économique, la relation entre client et fournisseur a fortement évolué : renforcement du besoin de personnalisation des produits et services, raccourcissement des délais de livraison, multiplication des canaux de distribution, réorganisation et diversification des sources d'approvisionnement. De plus, l'internationalisation des échanges et une concurrence accrue ont entraîné les entreprises à rechercher de nouvelles voies pour améliorer leurs performances, et répondre au mieux aux attentes de leurs clients.

Face à ces enjeux, les entreprises doivent remettre en cause leurs organisations, en décloisonnant les différents services. Les notions de flux physiques et flux d'information intra et inter-entreprises prennent alors tout leur sens. La logistique n'est plus un simple service opérationnel. Elle est présente à tous les niveaux décisionnels de l'entreprise :

- opérationnel : gestion au quotidien des flux de produits et les services aux clients,
- tactique : définir les organisations et piloter les flux à moyen terme,
- stratégique : définir les grandes orientations de partenariat et de collaboration à long terme.

L'évolution du concept de la logistique a été traitée dans plusieurs revues de littérature, comme par exemple (Lummus et Vokurka, 1999), (Mentzer et al., 2001) et (Ludema, 2003).

La première définition de la logistique date de 1948 et a été introduite par le comité des définitions de l'American Marketing Association : « La logistique concerne le mouvement et la manutention de marchandises du point de production au point de consommation ou d'utilisation. ». Comme on peut le constater dans cette définition, la logistique ne concerne que les activités physiques dans la phase de distribution (Jokar et al., 2000),

Depuis le concept a évolué. En 1991, Le " Council of Logistics Management¹" définit la logistique comme : «the process of planning, implementing, and controlling the efficient, effective flow and storage of goods, services, and related information from point of origin to point of consumption».

Depuis deux décennies, la logistique est abordée de manière plus globale et le terme Supply Chain regroupe désormais l'ensemble des processus et des activités depuis les sources d'approvisionnement jusqu'au consommateur final.

II.2. Chaînes logistiques

II.2.1. Définitions de la chaîne logistique

(Christopher, 1998) a défini la chaîne logistique comme « un réseau d'organisations connectées et interdépendantes qui coopèrent et travaillent ensemble pour contrôler, gérer et améliorer les flux physiques et d'information depuis les fournisseurs jusqu'aux clients finaux ».

(Tayur et al., 1999) donnent une définition qui décrit les rôles des organisations partenaires : « un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et des flux d'information dans les deux sens ».

Ces définitions mettent l'accent sur les flux connectant les entreprises entre elles. Lorsque le concept de chaîne logistique est abordé du point de vue d'une entreprise, on considère l'ensemble des chaînes logistiques qui incluent l'entreprise en se limitant parfois aux fournisseurs et aux clients de l'entreprise, mais en considérant les différents flux de produits. (Thierry, 2003) souligne que cette vision de la chaîne logistique est pertinente quand il s'agit d'étudier des problématiques liées aux relations d'une entreprise focale (donneur d'ordre) avec ses fournisseurs et sous-traitant.

Par rapport à un flux de produit (ou famille de produit) spécifique, (Lee et Billington, 1993) donnent la définition suivante : « la chaîne logistique d'un produit fini est un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution du produit fini vers le client ». (Rota et al., 2001) décrivent la chaîne logistique comme « l'ensemble des entreprises qui interviennent dans les processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier des fournisseurs au client ultime ». Selon (Rudberg et Olhager, 2002), l'étude d'une chaîne logistique peut être abordée suivant une perspective d'entreprise étendue, ou comme un ensemble d'organisations autonomes interconnectées. Pour (Burlat et Campagne, 2001), « l'ensemble des entreprises liées par la fabrication d'un même produit constitue la chaîne logistique de ce produit ».

C'est dans ce sens que nous employons le terme chaîne logistique dans notre travail.

Quelques soit la vision que l'on a d'un réseau logistique, on peut toujours y distinguer deux sous systèmes : un réseau de production (réseau manufacturier) et un réseau de distribution.

¹ National Council of Physical Distribution Management est créé en 1962. En 1986, son nom a changé pour Council of Logistics Management (CLM).

Le réseau de production est la partie amont de la chaîne de valeur dans lequel le produit est transformé depuis des matières premières et des composants en produits finis. Le réseau de distribution comporte les installations de stockage et les transports permettant l'acheminement du produit jusqu'aux consommateurs.

Une représentation générique d'une chaîne logistique est donnée par le Supply Chain Operations Reference model (SCOR), comme décrit dans la figure II.1.

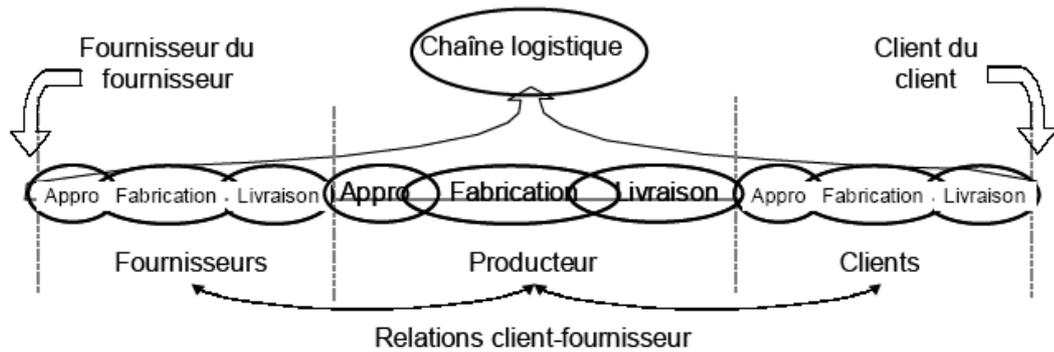


Figure II.1. Modèle de chaîne logistique selon le modèle SCOR (SCC, 2007)

II.2.2. Définitions du supply chain management

Le terme de gestion de la chaîne d'approvisionnement ou chaîne logistique a été introduit au début des années 1980. (Oliver et Webber, 1982) discutent des avantages potentiels de l'intégration des approvisionnements, de la fabrication et de la distribution. (Houlihan, 1987) reprend ce terme pour décrire la gestion des flux de produits à travers les frontières organisationnelles. Depuis, de nombreux chercheurs ont travaillé sur l'établissement de principes théoriques et de bases opérationnelles pour la gestion de la chaîne logistique. On peut citer entre autres les travaux de (Lee et Billington, 1992), (Fisher, 1997), (Lambert et al., 1998), (Lee, 2002) et (Giannakis et Groom, 2004).

Des définitions de Supply Chain Management (SCM) ont été fournies par plusieurs auteurs. (Ellram et Cooper, 1993) décrivent le SCM comme «une philosophie de l'intégration et la gestion des flux depuis les sources d'approvisionnement des fournisseurs jusqu'au client final». (Mentzer et al., 2001) décrivent la gestion de la chaîne logistique comme «la coordination systémique, sur les plans stratégiques, tactiques et opérationnels des fonctions à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne». La définition du dictionnaire APICS² est la suivante : «Le processus depuis les matières premières jusqu'à la consommation des produits finis à travers des liens fournisseur-entreprises utilisatrices» ou encore «l'ensemble des fonctions internes et externes d'une entreprise qui permettent à la chaîne de valeur de fournir des produits et des services au client».

D'autres définitions du supply chain management sont résumées dans le tableau II.1.

² APICS : "The Association for Operations Management" est l'Association Américaine de Gestion Industrielle et Logistique. Créée en 1957 pour promouvoir les bonnes pratiques de la gestion de production aux Etats Unis, elle s'est depuis imposée comme la référence mondiale en gestion industrielle et logistique de par ses publications, ses formations et ses certifications.

Authors	Definition
Tan et al. (1998)	Supply chain management encompasses materials/supply management from the supply of basic raw materials to final product (and possible recycling and re-use). Supply chain management focuses on how firms utilise their suppliers' processes, technology and capability to enhance competitive advantage. It is a management philosophy that extends traditional intra-enterprise activities by bringing trading partners together with the common goal of optimisation and efficiency.
Berry et al. (1994)	Supply chain management aims at building trust, exchanging information on market needs, developing new products, and reducing the supplier base to a particular OEM (original equipment manufacturer) so as to release management resources for developing meaningful, long term relationship.
Jones and Riley (1985)	An integrative approach to dealing with the planning and control of the materials flow from suppliers to end-users.
Saunders (1995)	External Chain is the total chain of exchange from original source of raw material, through the various firms involved in extracting and processing raw materials, manufacturing, assembling, distributing and retailing to ultimate end customers.
Ellram (1991)	A network of firms interacting to deliver product or service to the end customer, linking flows from raw material supply to final delivery.
Christopher (1992)	Network of organisations that are involved, through upstream and downstream linkages, in the different processes and activities that produce value in the form of products and services in the hands of the ultimate consumer.
Lee and Billington (1992)	Networks of manufacturing and distribution sites that procure raw materials, transform them into intermediate and finished products, and distribute the finished products to customers.
Kopczak (1997)	The set of entities, including suppliers, logistics services providers, manufacturers, distributors and resellers, through which materials, products and information flow.
Lee and Ng (1997)	A network of entities that starts with the suppliers' supplier and ends with the customers' custom the production and delivery of goods and services.

Tableau II.1. Supply Chain management definitions (Croom et al., 2000)

II.2.3. Réseaux manufacturiers

Notre travail est focalisé sur la partie amont de production et ne traite donc pas des problématiques de distribution. Nous considérons une chaîne logistique par rapport à un produit donné nécessitant une configuration d'un réseau manufacturier permettant de répondre à un besoin du marché. *La question qui se pose alors est : quelles sont les entreprises qui constitueront le réseau manufacturier qui produira efficacement et dans le meilleur délai de mise sur le marché ?* On assimilera, dans la suite du document, les termes de réseau manufacturier et de chaîne logistique.

(Wiendahl et Lutz, 2002) décrivent les concepts de réseau manufacturier (manufacturing network) comme étant des alliances d'entreprises, capables de se reconfigurer dynamiquement. Avant d'arriver à cette forme de production, les organisations ont évolué d'une organisation fonctionnelle centrée sur la concentration des moyens de production et des compétences vers des réseaux de production tournés vers l'innovation et le service au client. La figure II.2 décrit cette transformation.

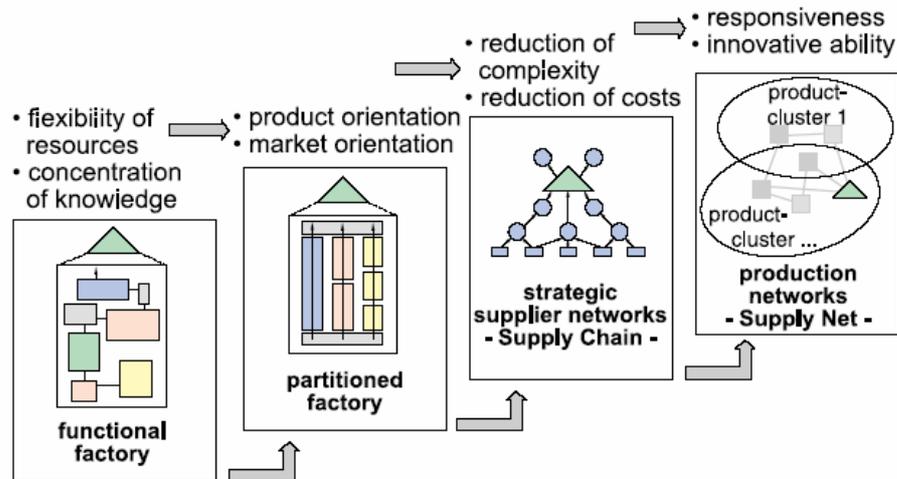


Figure II.2. From the functional factory to the production cluster (Wiendahl et Lutz, 2002)

Ce qui nous importe dans ce schéma, c'est le fait que l'organisation des entreprises en réseaux se fait autour de clusters de produits pour répondre rapidement à la demande du marché. Notre problématique sera justement l'étude de ces chaînes logistiques configurées à la demande. On parlera alors d'environnement de type « *on demand production* ».

II.2.4. Le contexte « on demand production »

(White et al, 2005) rapportent qu'en 2003, l'entreprise IBM a fait état de son intention d'augmenter l'agilité de son organisation. Elle a décrit comment elle souhaitait être en mesure de répondre à la volatilité et la turbulence dans ses marchés en devenant ce qu'elle a décrit comme « *on demand business* ». Selon ces auteurs, une telle entreprise doit avoir des processus capables de : répondre à toute demande des clients, aux opportunités de marché, aux menaces extérieures, et intégrer de bout en bout la chaîne des partenaires, fournisseurs et clients. (Boyson et Corsi, 2001) utilisent le terme *real time supply chain* et *smart network* pour décrire les nouvelles formes d'organisation logistique capables d'être reconfigurables et flexibles grâce notamment au développement des systèmes d'information transactionnels permettant une gestion intelligente des relations entre partenaires.

D'autres recherches s'inscrivent dans une démarche d'agilité de la chaîne logistique, en tant que capacité à répondre de façon rapide et efficace à la variabilité et à la variété des besoins de clients. Ainsi, pour (Naylor et al., 1999), "*Agility means using market knowledge and a virtual corporation to exploit profitable opportunities in a volatile marketplace*". A titre d'exemple, (Masson-Jones et Towill, 1999), (Christopher, 2000), (Christopher et Towill, 2001), (Agarwal et al., 2004) ont également discuté des apports et avantages de l'agilité de la chaîne logistique.

Mais il faut souligner que la plupart des entreprises, notamment les PME, sont loin d'être à ce stade de maturité. Il est en effet coûteux et risqué d'investir dans les nouvelles technologies de l'information pour atteindre un grand degré d'intégration de l'entreprise avec ses partenaires tout en assurant sa réactivité face aux aléas et changements du marché (Karkkainen et Ala- Risku, 2003).

II.2.5. Discussion

Pendant longtemps les travaux de la recherche opérationnelle et de la gestion industrielle ont considéré qu'une chaîne logistique décentralisée (acteurs autonomes et processus peu intégrés) était une réalité indésirable plutôt qu'une forme d'organisation pouvant être efficace. Cela est dû au fait que les démarches d'optimisation ont montré que dans de tels systèmes, où chaque entité vise à optimiser ses propres activités, la performance de l'ensemble de la chaîne peut être sous-optimale alors qu'une intégration totale de la chaîne (gérée par une seule entité fédératrice) conduit à un optimum global. Cependant, plusieurs travaux récents ont tenté de trouver des politiques de gestion optimale pour des réseaux décentralisés, parce que ces réseaux ont un succès dans la réalité industrielle et qu'il faut donc trouver les mécanismes adéquats à leur pilotage plutôt que de préconiser des stratégies d'intégration qui peuvent conduire à des structures complexes et peu flexibles.

Dans ce contexte, notre point de vue est qu'il est possible d'organiser une chaîne logistique pour répondre au mieux aux opportunités du marché sans pour autant remettre en cause les modes de gestion et les processus des entreprises partenaires. Cela signifie qu'en amont d'un travail d'amélioration en profondeur d'une organisation logistique, une phase d'évaluation de la connectivité des flux et des processus de production des entreprises de la chaîne est nécessaire.

Lors de la configuration d'une chaîne logistique, des entreprises de différents profils (on verra par la suite comment définir et caractériser un profil d'entreprise) sont plus ou moins capables d'intervenir efficacement sur les différentes phases de la fabrication d'un produit. Comme le décrit le schéma de la figure II.3, dans un contexte on Demand Production (*on parle aussi de Plug and Produce, c'est-à-dire connecter et produire*), une opportunité de marché va nécessiter une chaîne logistique spécifique à un produit. L'enjeu est de répondre dans un délai raisonnable à cette opportunité avec un minimum de changements organisationnels.

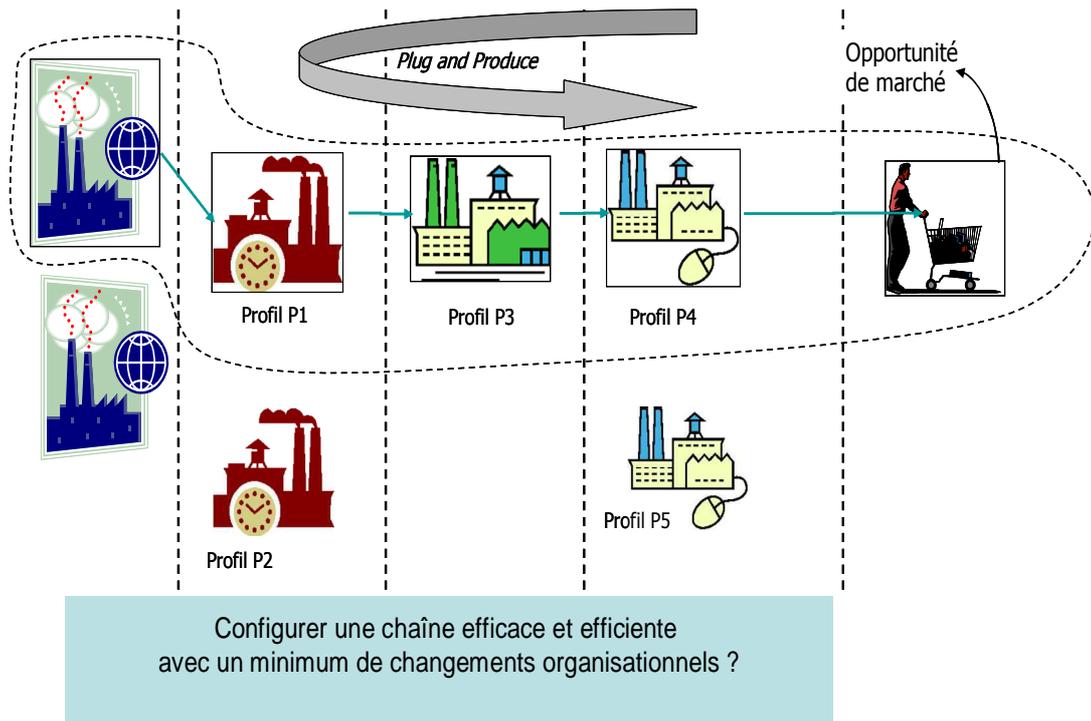


Figure II.3. Le contexte « On Demand Production »

II.3. Problématiques de configuration des chaînes logistiques

II.3.1. Décisions logistiques

Selon (Schary et Skjott-Larsen, 1995), une stratégie de gestion de chaîne logistique a trois volets principaux : la structure, l'organisation et les processus (figure II.4).

La structure consiste à localiser géographiquement les sites de production et le circuit de distribution (entrepôts, plateformes logistiques, etc.).

L'organisation définit les rôles de chaque entité et son champ décisionnel ainsi que ses relations avec les autres partenaires (entreprise focale, sous-traitance, fournisseurs, etc.).

Les processus constituent les activités de planification, de contrôle des opérations ainsi que la coordination des décisions (gestion des stocks, des opérations de production et de transport, de la demande, du service client et de la demande).

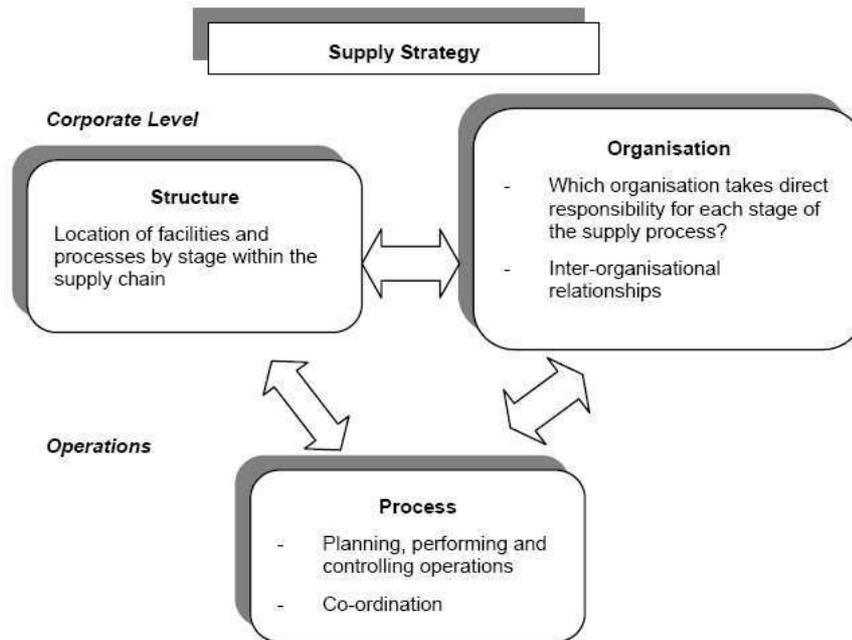


Figure II.4. Supply Strategy (Schary et Skjott-Larsen, 1995)

(Stadtler, 2002) considère que la gestion de la chaîne logistique comprend deux composantes principales : l'intégration du réseau et la coordination des différents flux. L'intégration comporte : le choix des partenaires, l'organisation, la collaboration et le pilotage du réseau. La coordination constitue l'ensemble des processus de planification et de contrôle de la chaîne ainsi que les processus de partage d'information et les technologies utilisées à cet effet.

(Lambert et Cooper, 2000) décrivent les différents processus définissant les problématiques de configuration et de gestion d'une chaîne logistique dans un modèle générique (figure II.5). Les fonctions transversales permettant la gestion des flux et l'intégration des fonctions de base d'une entreprise dans une chaîne logistique sont :

- la gestion de la relation client
- la gestion du service aux clients
- la gestion de la demande
- la gestion des commandes
- la gestion des flux de production
- la gestion des relations fournisseurs
- le développement du produit et sa commercialisation
- la gestion des flux inverses (recyclage, service après vente)

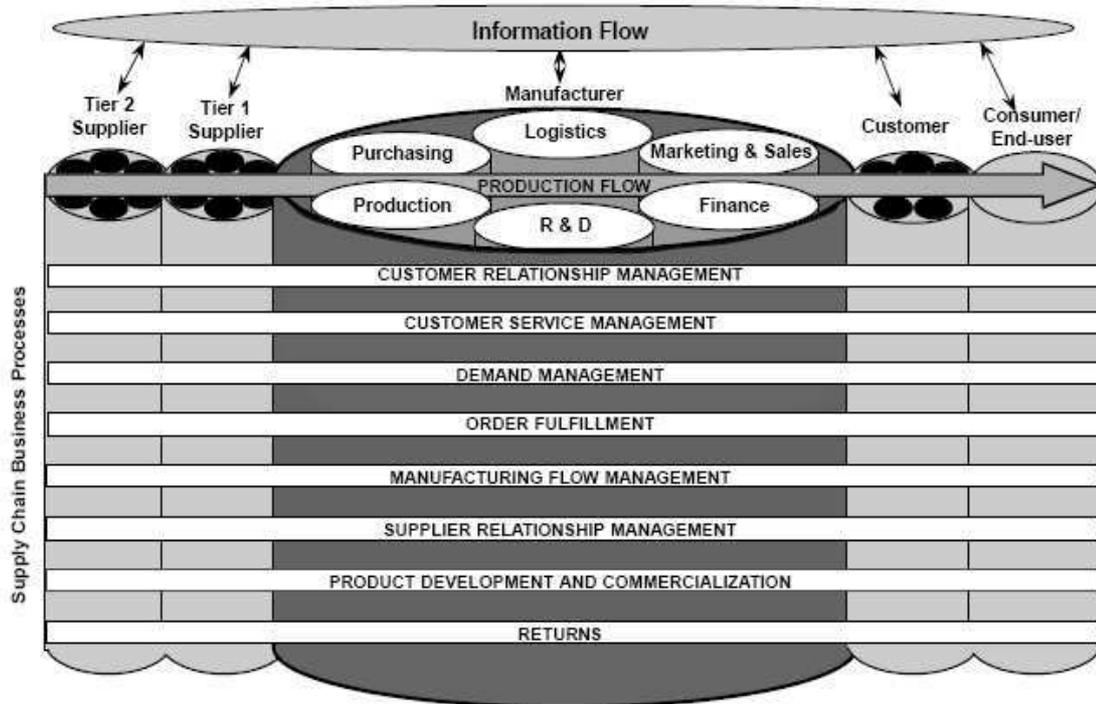


Figure II.5. Issues in supply chain (Lambert et Cooper, 2000)

(Chandra et Grabis, 2007) donnent un état de l'art assez complet des modèles et méthodologies se rapportant aux problématiques de la configuration des chaînes logistiques. Ces problématiques concernent :

- la configuration du réseau de distribution : (Ballou, 2001), (Beamon et Fernandes, 2004), (Cochran et Marquez, 2005)
- la gestion des stocks : (Sheffi, 1985), (Childerhouse et al., 2002)
- les contrats d'approvisionnement : (Fisher et al., 1997), (Cachon, 2002)
- les stratégies de distribution : (Frohlich et Westbrook, 2001), (Lee, 2003)
- l'intégration et les stratégies d'alliance : (Bramham et McCarthy, 2004), (Aviv, 2001), (Caridi et al., 2005), (Fliedner, 2003)
- la sous-traitance : (Chen et al., 2004)
- les technologies de l'information et systèmes décisionnels : (Lau et Lee, 2000), (Delen et Benjamin, 2003), (Verwijmeren, 2004), (Fiala, 2005)
- le service au client : (Baiman et al., 2004), (Beamon et Chen, 2001), (Bullinger et al., 2002)

(Croom et al., 2000) ont réalisé une revue de littérature dans laquelle ils ont classifié les travaux en gestion de chaînes logistiques selon deux grands axes :

- le niveau d'analyse : cela concerne le nombre et la nature des maillons considérés dans la chaîne (dyadique, chaîne, réseau),
- les échanges : cela concerne la nature des relations entre les partenaires et les éléments échangés (coûts, information, connaissance).

Le tableau II.2 résume l'ensemble des décisions et problématiques généralement étudiées. Les auteurs notent par ailleurs que la plupart des études de chaînes logistiques sont empiriques et descriptives (près de 70 % des études considérées), et qu'il est

important de développer davantage les approches théoriques pour l'étude du fonctionnement de ces systèmes.

Level of analysis		Element of the exchange considered			
		Assets	Information	Knowledge	Relationships
Dyadic	Suppl. Manuf.	Transaction cost (specificity of assets) Transportation routes rationalisation Exchange of technology	Information Technology support Tools for analysis of information flow Interplant planning and logistical integration (EDI)	Collaborative design Guest engineer HR development	Outsourcing/subcontracting Trust/Power/Commitment Supplier development Transaction cost approach
	Manuf. Distr.	Distribution channel redesign Facilities location (warehouses, etc.) Transportation routes rationalisation	Information Technology support Interplant planning and logistical integration (EDI) Communication processes	Product teams	Logistic partnership (with logistic services providers) Trust/Power/Commitment Outsourcing/subcontracting
Chain	Suppl. — Manuf. — Distr.	Quick Response, ECR, etc. Industrial dynamic approach Reverse supply chain management Total cost of ownership Value system analysis	Industrial dynamic approach Information Technology support Structured systems analysis and design method Modelling the information flow Communication processes	Supply chain councils	Scenarios good for supply chain management Opportunism/Trust/Power/commitment Positioning in the chain Influence of product technology on supply chain relationships
Network	Up stream	Supply network sourcing Transportation routes rationalisation Supply network structure Redesign HR organisational incentives	Information Technology support Supply network communication processes Interplant planning and logistical integration (EDI)	Suppliers meetings	Partnership sourcing Lean supply Network sourcing Supply base integration Trust/Power/Commitment
	Down stream	Transportation routes rationalisation Distribution channel redesign Facilities location (warehouses, etc.) Design for supply chain management	Information Technology support Supply network communication processes Interplant planning and logistical integration (EDI)		Logistic partnership (with logistic services providers) Trust/Power/Commitment/Opportunism Outsourcing/subcontracting
	Whole	Business network redesign approach Value system analysis Design for supply chain management Industrial dynamic approach	Information Technology support Business network redesign approach Supply network communication processes		Value system analysis Supply network partnership Trust/Power/Commitment/Opportunism

Tableau II.2. Supply Chain content matrix (Croom et al, 2000)

Notre travail s'inscrit justement dans cette optique : apporter des éléments théoriques par une approche prescriptive, en se focalisant sur les aspects de pilotage des flux physiques dans une chaîne de manufacturiers.

On voit que la problématique de configuration d'une chaîne logistique renvoie à des décisions multiples qui concernent la gestion interne de l'entreprise et la gestion des relations avec ses partenaires (clients, fournisseurs, sous-traitants,...). Cela renvoie aussi

à la mise en place de processus d'intégration de l'entreprise pour un meilleur pilotage du système logistique. Pour le design d'une chaîne logistique, se pose alors la question : *étant donnée les structures organisationnelles des différents maillons de la chaîne, quel sera le comportement et la performance du système résultant et quels mécanismes mettre en œuvre pour un pilotage efficace du réseau ?*

II.3.2. Choix de partenaires logistiques

Certains travaux de recherche traitent la problématique de configuration d'une chaîne logistique en développant des méthodologies de choix de partenaires logistiques. On peut citer par exemple (Lin et Chen, 2004) qui proposent une méthodologie basée sur les sous-ensembles flous pour la mesure de proximité entre entreprises en utilisant un grand nombre d'attributs. (Pedersen, 2001) s'appuie sur les notions de compétences d'alliance et de collaboration des entreprises. Dans la même optique, (Fisher et al., 2004) ont développé un algorithme permettant la construction de clusters de compétences et mesurent la proximité et l'excentricité entre ces clusters. (Choi et Hartley, 1999) ont réalisé une étude statistique auprès des acteurs de l'industrie automobile et soulignent que le choix des partenaires logistiques ne se limitent pas à la seule relation directe fournisseur/assembleur, mais va au-delà en impliquant les fournisseurs de second rang. (Ghodsypour et O'Brien, 1996) ont combiné un processus d'analyse hiérarchique et la programmation linéaire pour examiner à la fois les facteurs quantitatifs et qualitatifs influençant le choix des fournisseurs ainsi que la détermination des quantités optimales à commander. (Boer et al., 2001) ont fourni une revue de littérature des méthodes pour la sélection des fournisseurs. (Burlat et Benali, 2007) ont développé une méthodologie pour caractériser les liens de coopération au sein d'un réseau de PME. L'approche prend en compte les caractéristiques structurelles des entreprises, telles que la complémentarité des activités et la similitude des compétences, pour constituer un réseau d'entreprises et analyser les trajectoires d'évolution des relations de coopérations ainsi constituées.

(Hammami et al., 2008) ont étudié les facteurs qui devraient être pris en compte dans la conception des chaînes d'approvisionnement dans un contexte de délocalisation. Ils ont souligné les limites des modèles analytiques pour soutenir les décisions dans ce contexte. Ils ont alors proposé une démarche pour aider la prise de décision dans les stratégies de délocalisation en définissant les différents paramètres à prendre en compte pour le choix des partenaires logistiques. La figure II.6 illustre cette méthodologie.

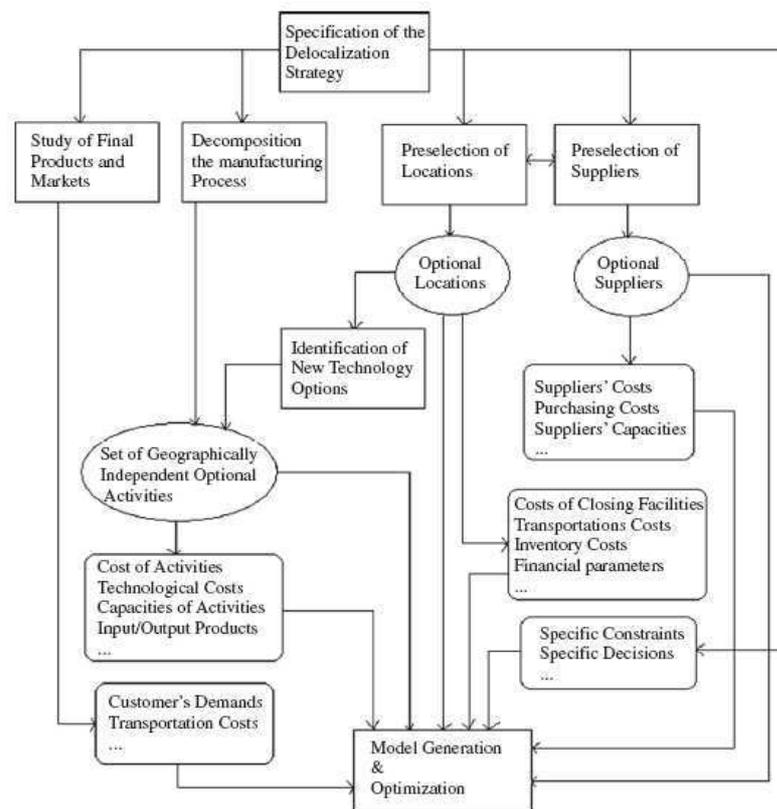


Figure II.6. A conceptual approach for modelling supply chains in the delocalization context (Hamammi et al., 2008)

II.3.3. Discussion

Parmi les travaux sur la configuration des chaînes logistiques, très peu de recherches traitent du problème de l'évaluation de la performance des réseaux logistiques constitués par différents profils organisationnels. (Smits et al., 2006) ont souligné que le niveau d'intégration dans une chaîne logistique est très lié à la notion de *connectivité* qui impacte la performance de la chaîne logistique. Pour clarifier la relation entre la connectivité, l'intégration et la performance d'un réseau logistique, les auteurs ont mobilisé ces notions dans un cas d'étude de réseau de PME. Ils ont souligné que la performance de la chaîne peut être grande sans qu'il y ait un haut niveau de connectivité en termes de technologies d'informations (interopérabilité des systèmes d'information), à condition que cela soit compensé par une connectivité des processus, des produits et des organisations. (Terzi et Cavalieri, 2004) ont réalisé une revue de littérature sur les chaînes logistiques et soulignent que la plupart des études traitent de configuration où une entreprise leader pilote l'ensemble de la chaîne. Lorsque la chaîne logistique est constituée d'entreprises appartenant à des organisations différentes, les problématiques de gestion sont différentes (mise en réseaux de systèmes de production hétérogènes avec des mécanismes de pilotage décentralisés), mais ces auteurs indiquent que des études dans ce contexte sont encore à réaliser.

Dans ce cadre, notre approche vise donc à analyser la connectivité d'une entreprise d'un point de vue des flux physiques lorsque l'on combine différents profils d'entreprises dans un réseau logistique. Ces profils d'entreprises seront définis en s'appuyant sur une revue de littérature des typologies des systèmes manufacturiers, qui seront exposées dans la section suivante.

II.4. Typologie d'entreprises en vue de configuration de chaînes logistiques

II.4.1. Typologies des systèmes manufacturiers

Cette étape de notre travail consiste à analyser des travaux de classification des systèmes manufacturiers et à dégager des axes et des attributs pertinents caractérisant une entreprise. Dans un premier temps, on présentera un certain nombre de définitions liées à la construction d'une typologie. Puis, on donnera des axes de classification des systèmes manufacturiers et les typologies qui en découlent. Cette revue bibliographique va permettre de définir un premier cadre de classification (familles de systèmes manufacturiers). Par la suite, il s'agit de revoir quelques analyses de grilles de lecture traitant des liens entre les processus de production, les modes de gestion et l'environnement (produits et marché) des entreprises.

Une synthèse de ces éléments sera ensuite faite en classifiant les différents éléments caractéristiques des systèmes de production suivant la démarche employée dans les modèles de simulation, à savoir : les ressources, les flux, les processus, les règles de gestion et les données techniques.

II.4.1.1. Taxonomie – Typologie

L'étude des systèmes nécessite souvent une démarche de classification de ses éléments afin de faciliter l'analyse et en déduire des lois de comportements. (Wilson, 1952) résume l'importance de la classification par cette phrase: « *All sciences start with the process of selection or classification. The universe is too vast and complex to be treated as a whole; so a manageable part of it must be chosen for observation and investigation. Furthermore, all scientific laws are based on classification* ». Les modèles de configuration d'un système organisationnel sont généralement divisés en taxonomies et typologies. Les deux démarches sont des visions multidimensionnelles des organisations. (Bozarth et McDermott, 1998) notent que ces deux démarches sont différentes dans leurs objectifs et leurs caractéristiques clés, comme résumé dans le tableau II.3.

	Typologies	Taxonomies
Définition	Modèles multidimensionnels d'idéaux types	Systèmes de classification qui catégorisent un phénomène en ensembles mutuellement exclusifs et de manière exhaustive
Caractéristiques souhaitées	Produit une théorie généraliste applicable à différents niveaux aux idéaux types Spécifie les dimensions qui définissent un type Empiriquement testable	Classifie des variables bien choisies par des analyses théoriques ou empiriques Groupes non altérés par les techniques de classification et d'échantillonnage Génère des connaissances et prédit le comportement d'un système
Validation empirique	Est-ce qu'une grande similitude entre une organisation et un idéal type correspond à une meilleure performance organisationnelle ?	Est-ce que les groupes sont stables par rapport aux techniques de classification et aux données

Tableau II.3. Taxonomie et typologie (d'après Bozarth et McDermott, 1998)

Il est pertinent, dans une classification des systèmes manufacturiers, de faire apparaître dans un premier temps un certain nombre de *caractéristiques* qui permettront de réaliser une première classification (familles de systèmes manufacturiers). Cette dernière sera alors affinée par des attributs sur des niveaux d'analyse plus détaillés.

Notre démarche vise à mettre en œuvre une typologie d'entreprises. Le but est évidemment de faire ressortir les caractéristiques essentielles qui peuvent être mobilisées dans la modélisation d'une entreprise, puis mobilisées dans une démarche de configuration et de simulation du fonctionnement d'une chaîne logistique construite à partir de ces entreprises types.

II.4.1.2. Les grandes familles de systèmes de production

Afin de faciliter l'étude des systèmes manufacturiers, plusieurs approches de classification ont été proposées. On peut citer les travaux de (Woodward, 1980), (Wild, 1971), (Johnson et Montgomery, 1974). Selon (Constable et New, 1976), un système manufacturier peut être défini par 3 grandes caractéristiques :

- structure du produit
- structure organisationnelle
- nature de la demande client

(McCarthy, 1995) considère d'une manière assez proche, les 3 axes suivants : les caractéristiques opérationnelles, les objectifs opérationnels et la structure des flux.

A. Les caractéristiques opérationnelles (organisation du système de production)

Cet axe renvoie à l'organisation des moyens de production (agencement des ressources, implantation d'ateliers,...). La classification la plus utilisée est celle représentée dans la figure II.7.

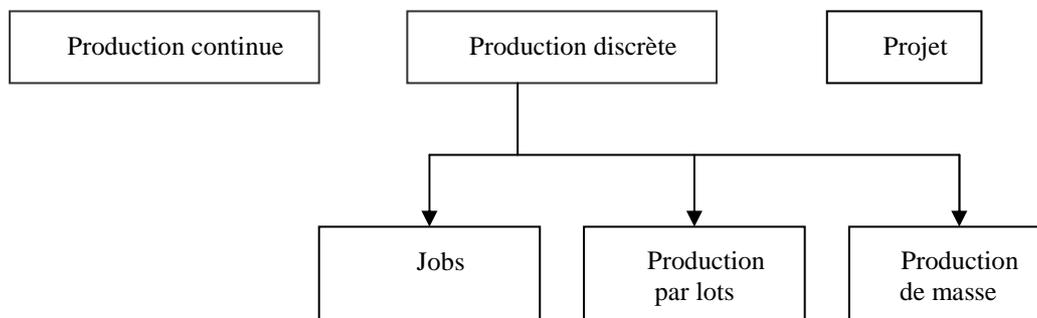


Figure II.7. Les grandes familles des systèmes industriels

(Giard, 2003) reprend cette classification en utilisant la terminologie et les définitions suivantes :

a. Production unitaire (projet) : c'est la mobilisation de toutes les ressources de l'entreprise pour la réalisation d'un projet de production et ce sur une longue période. Des exemples de ce type de production sont : les travaux publics, la construction navale,...

b. Industries de process (continu) : ce type se caractérise par un flux important et régulier de matières premières arrivant dans le système productif. Les industries lourdes (sidérurgie, pétrochimie, certaines industries agroalimentaires,...) sont des exemples de process.

c. Ateliers spécialisés :

C'est le type d'organisation le plus répandu. Les équipements assurant une même fonction technique sont réunis en un même lieu (atelier). L'itinéraire emprunté pour la fabrication de deux produits différents n'est pas forcément identiques, on parle alors de **Job shop**.

Lorsque l'itinéraire est identique pour toutes les commandes utilisant un même groupe de machines, on parle de **Flow shop**. Une commande peut ne pas utiliser toutes les machines de ce groupe et les temps opératoires peuvent varier fortement sur une même machine. Si les opérations à exécuter sur un ensemble de centres de production différents peuvent l'être dans un ordre quelconque on parle alors d'**Open shop**. Un flow shop est donc un cas particulier de job shop qui est lui même un cas particulier d'un open shop. Dans ce type d'organisation, la main d'œuvre est qualifiée et les équipements sont polyvalents. Un des problèmes majeurs dans cette organisation est la gestion des approvisionnements, ce qui induit des coûts de manutention importants.

d. Ligne de production ou d'assemblage

Les équipements sont agencés pour permettre à un flux de transiter systématiquement par la même séquence de postes de travail (stations), afin que soit réalisé un ensemble d'opérations de fabrication ou d'assemblage conduisant à la création d'une gamme de produits manufacturés. On peut retrouver des postes de travail assurant la même fonction à des endroits différents (ce qu'exclut l'organisation en ateliers spécialisés).

Un flow shop se distingue d'une ligne de production par :

- le fait qu'une tâche peut ne pas faire appel à tous les centres de production,
- la dispersion importante des temps opératoires des opérations exécutées sur un même poste de travail (équipements non spécialisés),
- l'existence de files d'attente en amont des postes de travail.

La ligne de production est une structure assez rigide, elle est de ce fait réservée à une production de masse de produits standardisés.

Les équipements utilisés sont spécialisés pour diminuer les temps opératoires unitaires. Les stocks tampons sont faibles entre stations du fait de la régularité des flux et d'une bonne utilisation des ressources si la chaîne est bien équilibrée.

D'un point de vue agencement des ressources (*layout*) ; la littérature distingue généralement 3 grands types de systèmes (Dolgui et Proth, 2006) :

- agencement linéaire : il s'applique à une production peu diversifiée et relativement stable en volume. C'est le cas général des lignes de transfert ou d'assemblage.
- agencement en cellules fonctionnelles : c'est une organisation autour des métiers et donc des ressources qui sont regroupées suivant leur fonction (jobs).
- agencement en îlots : l'ensemble du système est composé de sous systèmes dédiés à des types de fabrication bien définis (familles de produits par exemple). Cette organisation sert à améliorer la productivité d'une organisation en cellules fonctionnelles en structurant les flux par ce qu'on appelle technologie de groupe. Avec un certain niveau d'agrégation des produits, on peut voir cet agencement comme un ensemble de flow shops (puisque dans chaque îlot, les gammes des produits sont assez identiques).

Même si un flow shop n'est qu'un cas particulier d'un job shop ; il semble raisonnable de traiter un flow shop comme un système intermédiaire entre un job et une ligne ; on peut prendre pour cela un système composé de plusieurs flow shop selon le nombre de familles de produits considéré par exemple et considérer cela comme étant un agencement en îlots. La figure II.8 illustre ces différents agencements d'ateliers.

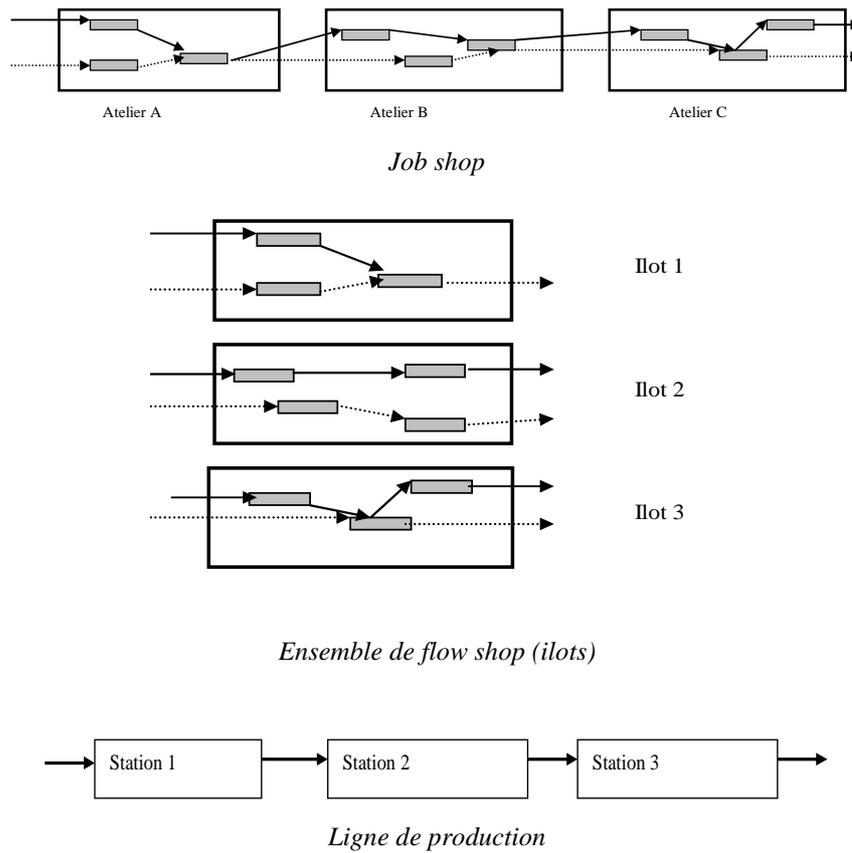


Figure II.8. Agencement des ateliers de production

Les principales caractéristiques de différenciation entre les trois familles de systèmes manufacturiers : job shop (agencement fonctionnel), flow shop (agencement en îlots), ligne (agencement linéaire) sont résumées dans le tableau II.4 (Silver et al., 1998).

Ce tableau n'est pas exhaustif et les caractéristiques qui peuvent nous intéresser sont celles qui sont quantifiables en vue de la modélisation du système.

Caractéristiques	Job shop	Flow shop	Ligne
Nombre clients	++++	+++	++
Nombre produits	++++	+++	++
Différenciation produits	customisé	moins customisé	standardisé
Besoins matériels	prévision difficile	plus prévisible	prévisible
Contrôle fournisseurs	+	++	++++
Intégration verticale	-	peu	peu en amont, plus aval
Stocks MP	faible	moyen	varié, appros fréquents
WIP	+++	++	+
PF	faible	variable	grand
Ordonnancement	incertain , changements fréquents	changements rapides fréquents	établi
Objectifs production	Augmentation de taux d'utilisation, gestion goulets	Optimisation processus, réponse à divers besoins	Amélioration de la productivité des lignes
Travail / matériel /capital	Travail	Travail et matériel	Matériel et travail
Taille usine	+	++	++++
Niveau automatisation	+	++	++++
Nombre MP	+	++	++++
Goulets	changeant	peu changeant, prédictible	stable
Cadence	+	++	+++
Process flow	flexible	quelques configurations dominantes	configuration rigide
Type equipments	polyvalents	polyvalents+ spécialisés	spécialisés (+ - sophistiqués)
Flexibilité output	+++	++	+(ATO)
Taille des séries	+	++	++++
Définition capacité	floue	variable	claire, en terme d'output
Augmentation capacité	incrémentale	variable	nécessité re-engineering
Changements process pour nouveaux produits	incrémental	souvent incrémental	incrémental ou radical
Nature de la maintenance	curative	curative ou préventive	préventive

Tableau II.4. Caractérisation des systèmes de production (d'après Silver et al., 1998).

B. Les objectifs opérationnels (production sur stock ou à la commande)

Un système manufacturier est conçu pour une finalité. Ce qui lui procure un fonctionnement tributaire de cette finalité. Cette dernière est affectée fortement par des variables issues de l'environnement du système et particulièrement du marché. D'où un deuxième axe de caractérisation qui traduit les objectifs de production par les stratégies de réponse à la demande des clients.

- Fabrication à la commande (MTO) : la fabrication se déclenche par la commande ferme d'un client.
- Assemblage à la commande (ATO) : lorsqu'on utilise des composants existants (fabriqués pour stock) pour exécuter un produit en réponse à une commande client, on parle d'assemblage à la commande.
- Ingénierie à la commande (ETO) : on parle d'ingénierie à la commande lorsque, en réponse à une demande, il faut effectuer un travail de conception du produit.
- Production sur stock (MTS) : la fabrication est déclenchée par l'anticipation d'une demande solvable d'un produit dont les caractéristiques sont définies par le fabricant.

Pour produire sur stock, deux conditions sont nécessaires :

- l'éventail des produits finis doit être restreint,
- la demande de chaque produit doit être suffisamment importante et prévisible.

En terme économique, une production sur stock est justifiée si :

- le cycle de production est long par rapport au délai commercial admissible (délai séparant la prise de commande de la livraison) ; ou
- la saisonnalité de la demande est trop forte pour justifier un excédent capacitaire (hommes, machine) sur une longue période.

Il faut noter également que le choix d'une stratégie de réponse à la demande dépend des exigences des clients en termes de délais de livraison et de leur accommodation à la longueur des cycles de production. On verra par la suite, comment le rapport entre les cycles de production et de livraison peut déterminer le choix de l'une ou l'autre des stratégies.

C. La structure des flux :

La structure du produit conditionne également la typologie de l'entreprise. Pour caractériser la structure, on utilise généralement la nomenclature du produit (arbre des composants entrant dans la fabrication du produit). On distingue en gros, 4 structures :

- convergente
- divergente
- mixte (à point de regroupement)
- linéaire (en parallèle)

Une façon de décrire ces structures consiste à spécifier le nombre de niveaux dans la nomenclature et le nombre de composants de chaque niveau. L'analyse VAT classe la structure des produits en structure : I (linéaire), V (divergente), A (convergente) et T (hybride) comme illustré sur la figure II.9.

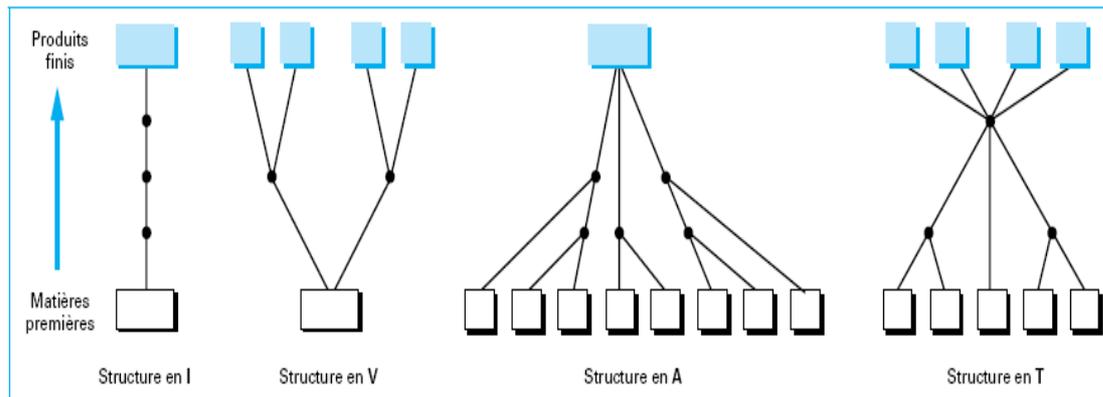


Figure II.9. Analyse VAT

En plus de ces axes de classification, (Courtois et Pillet, 1989) considèrent un autre élément : L'autonomie de commande et de conception

Cet axe distingue trois degrés d'autonomie des entreprises :

- Le concepteur-fabriquateur : l'entreprise assure elle-même la conception, la fabrication et la distribution des produits
- Le sous-traitant : il réalise des opérations de production en fonction d'un cahier des charges remis par un donneur d'ordre.
- Le façonnier : comme un sous-traitant, il produit selon un cahier des charges d'un donneur d'ordre, mais il n'a pas l'autonomie des commandes des matières premières qui lui sont fournies par le donneur d'ordre. Les machines sont aussi parfois fournies.

Ce dernier axe peut sembler être pertinent, puisqu'il traduit d'une certaine façon les liens entre l'entreprise et ses partenaires logistiques, et les processus qu'entreprend la firme. Cependant, il donne plutôt le statut de l'entreprise que son fonctionnement et sa manière d'organiser et de piloter les flux de production qui est le point focal de notre typologie.

II.4.1.3. Autres typologies

(Melcher et al., 2002) ont construit une typologie en partant d'un modèle conceptuel des éléments principaux d'une théorie de la production.

Dans leur article, les auteurs réalisent une typologie des systèmes de production basée sur deux axes :

- Le niveau technologique (systèmes opérant et système d'information)
- L'interdépendance des work flows (niveau de spécialisation et groupement des équipements et des personnes)

Cette typologie est assez technique et ne prend en compte que les attributs structurels du système de production. Nous pensons a contrario que les facteurs contingents à l'environnement du système et ses méthodes de gestion sont très importants et constituent des facteurs de différenciation dont il faut tenir compte dans une démarche axée sur la conception de chaînes logistiques.

Dans un article traitant des liens entre les environnements industriels et les méthodes de planification et de contrôle de la production, (Jonsson et Mattson, 2003) ont analysé quatre types de systèmes manufacturiers en fonction des éléments suivants :

- les produits
- la demande
- le processus de production

Voici les caractéristiques de ces familles de systèmes manufacturiers :

1. *Complex customer order production* : que l'on peut traduire par production à la commande de produits complexes. C'est une production de faibles volumes d'une grande variété de produits customisés. La production est de type ingénierie à la commande. Les lots de fabrication sont petits (équivalents aux lots des commandes clients). Les produits sont complexes (nomenclature profonde et étendue). Les temps de cycles de production et de livraison sont longs. L'agencement est de type cellules fonctionnelles. Ce type de système correspond à des organisations en projet voire certains jobs shop.

2. *Configure to order products* : les produits sont fabriqués ou assemblés à la commande (MTO, ATO). Les produits sont moins complexes et sont assemblés en petits lots à partir de quelques composants standards. Le nombre d'ordres clients est grand ; les délais de livraison sont moins longs que dans le premier type. Les temps d'assemblage et opération de finition sont courts. L'agencement des ressources est de types cellules fonctionnelles ou îlots. Ce type correspond aux jobs et flow shops.

3. *Batch production of standardized products* (production en lots de produits standardisés) : c'est la production sur stock de produits standardisés en moyennes et grandes séries. Le nombre d'ordres clients est large, avec des petites quantités demandées comparées aux gros lots de fabrication. Les temps de cycle sont longs (mais moindre que les temps de cycle des systèmes 1 et 4). Ce type de système correspond typiquement aux lignes de production.

4. *Repetitive mass production* : c'est la production en grands volumes avec des processus plus au moins continus. La structure des produits est simple. La production est sur stock. Les ordres clients sont petits et fréquents. Les temps de cycle sont généralement courts. Ce type correspond aux processus continus organisés en lignes.

Cette typologie est assez proche de la typologie classique présentée plus haut. On remarque par contre que la stratégie de réponse à la demande est incorporée au type d'organisation. Cette typologie montre que s'agissant d'attributs quantitatifs continus, comme les quantités produites, les temps de cycles, définir des limites séparant des types d'entreprises peut conduire à différentes classifications (le premier type par exemple inclut les projets et les jobs shops, de même le type 2 inclut des jobs et des organisations en îlots). Par conséquent, on ne peut prétendre qu'il existe une typologie universelle. La typologie à construire dépend de son objectif qui influe sur la manière de définir les limites qui séparent un type d'entreprise d'un autre pour un attribut donné.

II.4.1.4. Les grilles d'analyse des systèmes manufacturiers

Une des premières grilles d'analyse des caractéristiques des systèmes manufacturiers est donnée par (Hayes et Wheelwright, 1979). Cette matrice produit/process lie l'organisation du process aux caractéristiques des produits. La figure II.10 (Schonsleben, 2004) illustre les quatre grandes familles de systèmes, à savoir :

- one of kind production (production unitaire)
- mass customization (customisation de masse)
- batch production (production par lots)
- repetitive manufacturing (production répétitive)
- mass production (production de masse)

Les deux derniers types correspondent à la production en ligne (assemblage ou process). La customisation de masse renvoie à la notion d'îlots de production permettant une production en moyenne et grande série sur des lignes dédiées à des familles de produits.

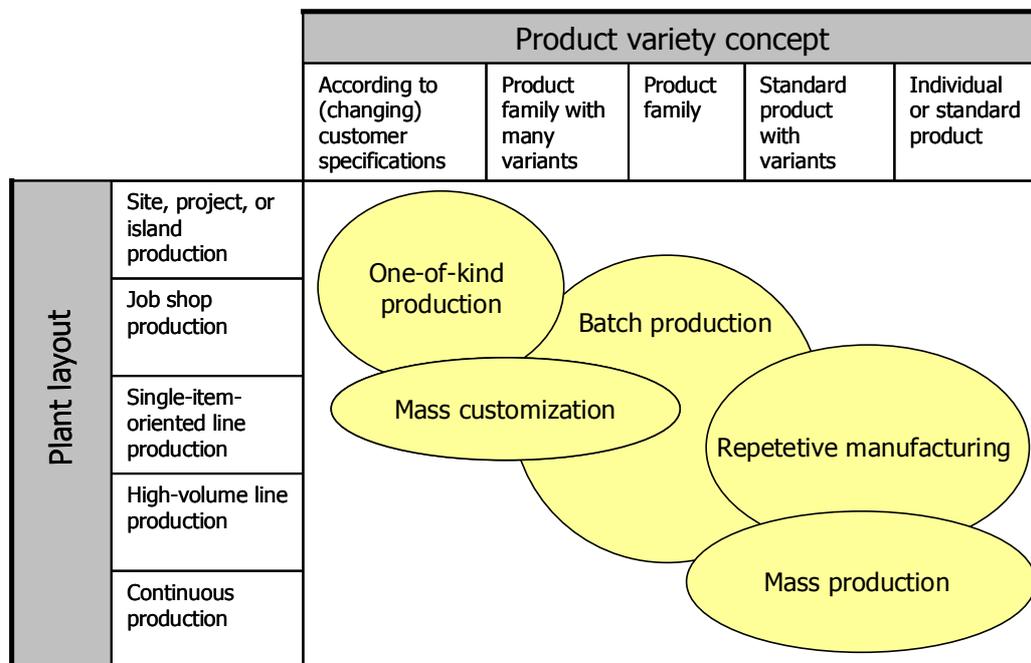


Figure II.10. The different kinds of plant layouts (Schonsleben, 2004)

(Miltenburg, 1989) introduit une grille d'analyse pour le design des systèmes manufacturiers, qui en plus de la matrice produit/process, incorpore d'autres éléments à savoir :

- *les leviers d'action* : les ressources humaines, l'organisation, le système de planification et de contrôle, les sources d'approvisionnement, la technologie, les installations ;
- *l'analyse compétitive* : éléments de marché et de la concurrence ;
- *la performance* : délai, coût, qualité, flexibilité, innovation ;
- *le niveau de capacité* : il s'agit du degré de maturité (efficience) du process ;

Ce dernier point est intéressant, car il permet la prise en compte du niveau de performance du processus de production. L'auteur distingue quatre niveaux de capacité : infant, industry average, adult et world class.

Par la suite, pour définir des classes d'entreprises, on exploitera le niveau de capacité du process présenté dans cette analyse.

Un système de planification et contrôle est défini comme étant un élément de la stratégie industrielle qui inclut la conception et le développement d'outils de planification et contrôle en relation avec les critères du marché, le process de production et les différents niveaux organisationnels de contrôle (APICS, 1998).

(Berry et Hill, 1992) ont proposé une démarche pour lier la stratégie commerciale d'une entreprise et son système de production. A partir d'exemples d'entreprises ayant adopté des changements dans leurs stratégies commerciales, les auteurs ont recherché les causes d'échec et les risques de ces stratégies en analysant l'adéquation entre le processus de production et les systèmes de planification et de contrôle (Manufacturing Planning and Control) de ces entreprises. Ils ont considéré que le système de planification et de contrôle est constitué de trois niveaux décisionnels : le programme directeur de production (PDP), la planification des besoins et le contrôle de la production et son ordonnancement.

Le premier niveau est caractérisé par la stratégie de réponse à la demande (MTO, ATO, MTS) Le second niveau est caractérisé par le type de la planification selon les deux types définis comme suit (Reeve, 2002) :

- Basée sur les taux : la planification des besoins en composants et composés est faite en définissant des taux à produire pour chacun d'eux, basé sur des prévisions (non pas pour anticiper la demande en produisant sur stocks mais pour préparer les fournisseurs aux changements éventuels des quantités des composants à approvisionner). La nomenclature est utilisée pour planifier les besoins, mais l'exécution des ordres de fabrication se fait de manière indépendante (composés et composants séparément) en se basant sur les taux à produire et non sur un calendrier de production.
- Basée sur les temps : c'est la planification classique employée en MRP, où les besoins en composants calculés grâce à la nomenclature sont traduits en OF, lancés et exécutés suivant un planning de production sur un horizon de temps défini.

Le troisième niveau est le contrôle de la fabrication qui est caractérisé par le type des flux :

- flux poussés : circulation du flux physique de l'amont vers l'aval pour produire les composants selon un programme prévisionnel s'appuyant sur un échéancier de livraison de produits finis.
- flux tiré : la production d'un composant est déclenchée par la demande effective des centres de production demandeurs de la référence.

Les grilles d'analyse des liens entre les processus manufacturiers et les différents niveaux de gestion de production sont illustrées dans les tableaux II.5, II.6 et II.7.

Variables stratégiques	PDP (master scheduling)		
	MTO	ATO	MTS
<i>Marché</i>			
Produits : type Variété	Spécialisé	→	standard
	Grande	→	faible
Volume /produit/période	petit	→	grand
Livraison : rapidité	difficile	→	facile
fiabilité	difficile	→	facile
<i>Fabrication</i>			
Choix du process	Jobbing/ petites séries	→	ligne/ grandes séries
Gestion des variations de la demande et du mix	Commandes urgentes, en retard	à partir du WIP et de stocks de PF	à partir de stocks de PF
Amélioration des délais de livraison	ré-ordonnancement des besoins	Réduction des temps d'attente	élimination des temps d'attente

Tableau II.5. Liens entre processus manufacturier et plan directeur de production (d'après Berry et Hill, 1992)

Variables stratégiques	Planification des besoins (requirements planning)	
	Basé sur les temps	Basée sur les taux (quantités)
<i>Marché</i>		
Produits : type Variété	Spécialisé	→ standard
	Grande	→ faible
Volume /produit/période	Petit	→ grand
Habilité d'adaptation aux variations du mix produits	Grand potentiel	→ limité
Livraison : changements des plannings rapidité	Difficile ré-ordonnancement / capacité	→ Facile Par les stocks
<i>Fabrication</i>		
Choix du process	Par lots	Ligne
Réduction des coûts : Fixes	Non	oui
Stocks	Non	oui

Tableau II.6. Liens entre processus manufacturier et planification de la production (d'après Berry et Hill, 1992)

Variables stratégiques	Ordonnancement et Contrôle (shop-floor control)	
	Flux poussé	Flux tiré
<i>Marché</i>		
Produits : type Variété	Spécialisé Grande	Standard Faible
Volume /produit/période	Petit	grand
Habilité d'adaptation aux variations de la demande :		
Volume total	Facile / incrémental	Difficile
Mix produits	Grande	Faible
Livraison : changements des plannings rapidité	Plus difficile ré-ordonnancement	moins difficile stocks de PF
<i>Fabrication</i>		
Choix du process	Jobbing/ petites séries	Ligne/ grandes séries
Réduction des coûts : Fixes	Faible	grande
Stocks	Faible	grande
Coût de changement de séries	Grand	faible
Contrôle organisationnel	Centralisé	décentralisé

Tableau II.7. Liens entre processus manufacturier et ordonnancement des opérations (d'après Berry et Hill, 1992)

Ces grilles d'analyse montrent les liens existants, à différents niveaux du système de planification et de contrôle, les besoins requis par le marché, la manière d'organiser la production pour y répondre et le choix du process permettant de réaliser cette production.

Ainsi, une entreprise qui produit une grande variété de produits customisés en petites séries, produit à la commande (une production sur stocks risque d'augmenter considérablement les encours du fait de la multiplicité des gammes et la complexité des opérations).

On remarque que cette analyse est beaucoup plus axée sur les liens entre le système de planification et contrôle et les caractéristiques du marché, mais les liens avec les caractéristiques du process ne sont pas très explicités. Il est donc difficile de déduire les liens entre le choix du processus manufacturier et les variables de son pilotage à partir de ces grilles d'analyse.

Notons également qu'à chaque niveau de décision, un seul attribut est retenu : stratégie de réponse à la demande pour le niveau supérieur, planification basée sur le temps ou sur les taux pour le niveau intermédiaire et flux tiré/poussé pour le dernier niveau.

(Olhager et Rudberg, 2002) ont repris la problématique ci-dessus, et ont analysé plus finement le système de planification et contrôle et comment ce dernier interagit avec le type de process et les caractéristiques des produits.

Ils ajoutent aux trois couches du système de planification (master scheduling – requirements planning – shopfloor control) une quatrième couche supérieure qu'ils appellent *Sales and Operations Planning*, et qui correspond au PIC (plan industriel et

commercial) qui comprend des éléments stratégiques (voire tactiques) de la politique commerciale de l'entreprise.

Ils remarquent que les niveaux supérieurs du système de planification sont plus liés au marché, alors que les niveaux inférieurs sont liés au process. Pour expliciter ces liens hiérarchisés, un certain nombre de décisions relatives à chaque niveau sont données, ainsi que des exemples de systèmes de production décrits à partir de ces variables décisionnelles. Le tableau II.8 illustre ces éléments.

Niveau de planification et contrôle	Catégories de décisions	Process
PIC	Agrégation des données (familles de produits) Stratégie de planification : capacité fixée ou ajustable à la demande Agrégation de la capacité (volume de production) Changements des capacités des ressources	
PDP	Mix produits Planification de la capacité des goulets (potentiels) Fixation des délais de livraison Information sur le type de la demande : MTS-ATO-MTO	
Planification des besoins	Composants Ressources (postes de charge, ou centre de fabrication) Temps et coûts de lancement Nomenclature / besoins Degré de répétitivité Complexité des routages Nombre de planning points	Agencement en cellules, courts temps de lancement et de cycle ; planification basée sur les taux Agencement fonctionnel, production par lots, routages complexes avec aléas du process ; planification basée sur les temps.
Ordonnancement et Contrôle	Composants (opérations) Ressources Temps et coûts de lancement Planification décentralisée des centre de fabrication) Nombre de planning points Exécution des ordonnancements Mesure de performance et remontée d'information	Agencement en cellules ou lignes dédiées, avec courts temps de lancement. Flux tirés. Agencement fonctionnel avec des routages complexes et flexibles, aléas importants ; flux poussé.

Tableau II.8. Niveaux du système de planification et contrôle, décisions de gestion à chaque niveau et liens avec les process de production (d'après Olhager et Rudberg, 2002)

Dans cette analyse, les auteurs utilisent le concept du *planning point*. Ils le définissent comme suit : *Un Planning Point est une ressource ou ensemble de ressources qui peuvent être considérées comme une seule entité d'un point de vue gestion de capacité et production. Il traduit la complexité du process (un système de type job shop a plusieurs planning points, alors qu'un process continu peut être vu comme un seul planning point).*

Ils soulignent également l'importance des temps de lancement, d'arrêt de production, qui ont un impact important sur la méthode d'ordonnancement des opérations et donc sur la performance du système.

La notion de *planning point* sera reprise dans notre modélisation. Nous le définissons non pas comme un groupement de ressources mais comme un point de découplage de la production (point de désynchronisation des flux). Un *planning point* est donc assimilé à un point de stockage et qui permet d'agir sur les flux en entrées des ressources de production.

(Newman et Sridharan, 1995) se sont intéressés à l'effet de la variabilité de la demande sur le choix des modes de planification. Ils considèrent que face à une demande stable et prédictible, il est préférable de gérer avec des politiques de rechargement de stock de type ROP plutôt que de mettre en place des modes de gestion complexes. Cette dépendance entre les modes de gestion et les caractéristiques de la demande est résumée comme suit :

<i>Prédictibilité de la demande</i>	<i>Variabilité de la demande</i>	
	faible	grande
faible	Kanban	OPT
grande	ROP ou tout autre	MRP

Tableau II.9. Modes de gestion et caractéristiques de la demande (d'après Newman et Sridharan, 1995)

Ces liens posés comme hypothèse, sont analysés par une étude empirique (185 entreprises) afin de caractériser les entreprises utilisatrices de chacun des modes de planification.

- Les utilisateurs du MRP (Material Requirement Planning)

Les entreprises utilisant efficacement le MRP évoluent dans des environnements variés. La plupart sont dans la production discrète. Une grande majorité a une faible variété de produits en grandes séries. Face à une demande très volatile, les taux de service se dégradent mais le *turn-over* des stocks reste élevé (dans de tels environnements certains aspects de la performance doivent être sacrifiés pour d'autres).

- Les utilisateurs du ROP (gestion par niveaux de rechargement des stocks)

La majorité des entreprises travaillant par ce mode simple de gestion des stocks opèrent face à une demande stable. Plusieurs entreprises organisées en cellules fonctionnelles, produisant un grand éventail de produits, utilisent avec succès une gestion par les stocks, mais la stabilité de la demande apparaît comme un facteur clé pour la

performance. Car ce mode de gestion ne tient pas compte de l'évolution de la demande (pas d'anticipation) et ne peut répondre aux aléas.

- Les utilisateurs du Kanban

Les facteurs conditionnant le niveau de succès d'un système kanban sont les aléas et l'implémentation du système. Une implémentation complète permet un niveau de performance élevé ; à noter que le système kanban est l'un des outils de la philosophie juste à temps, qui implique une simplification de l'environnement par la réduction des aléas de production et les gaspillages. Ainsi une implémentation complète du système induit une simplification des processus et donc une meilleure fluidité des flux, donc de faibles niveaux de stocks et des meilleurs taux de service.

La plupart des entreprises utilisant ce système opèrent en outre avec des agencements en îlots ou lignes de production (les organisations de types job shop utilisant le système ont un moindre niveau de performance).

- Les utilisateurs d'OPT (Optimized Production Technology)

Ce mode de gestion basée sur la gestion des goulets de production, est employé par des entreprises produisant en grandes séries (lignes de production), la plupart produisant une faible variété de produits. Dans ce mode de gestion, la variabilité de la demande n'affecte pas la performance. Cependant, les entreprises organisées en job shop trouvent quand à elles des difficultés à utiliser cet outil (du fait du caractère instable et multiple des goulets dans ce genre d'organisations).

En somme, le système MRP est celui le plus utilisé car adapté à différents environnements industriels. Une bonne implémentation est importante pour l'utilisation d'un système kanban ou OPT. D'autre part, d'après l'étude, les entreprises utilisant un système ROP réalisent une bonne performance, notamment dans des environnements peu perturbés.

Dans une optique de configuration de chaîne logistique, (Fleischmann et Meyr, 2003) proposent un certain nombre d'attributs qu'ils décomposent en deux grandes classes (tableau II.10) :

- des attributs fonctionnels qui caractérisent chacun des maillons de la chaîne logistique ;
- des attributs structurels qui caractérisent la structure de la chaîne (sa topographie).

La première classe d'attributs est séparée en quatre grands processus : approvisionnement, fabrication, distribution et type de la demande. Et le deuxième type comprend la topographie de la chaîne et sa coordination.

Fonctionnels	Structurels
<p>Type d'approvisionnement</p> <ul style="list-style-type: none"> - type de produits approvisionnés - type d'approvisionnement - temps d'approvisionnement - nombre de MP - cycle de vie des matériels <p>Type de production</p> <ul style="list-style-type: none"> - organisation du process de production - répétitivité des opérations - changements de séries - types de goulets - flexibilité du temps de travail <p>Type de distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> - structure du réseau de distribution <p>Type de ventes</p> <ul style="list-style-type: none"> - produits commercialisés - cycle de vie des produits - durée de vie des produits stockés - nomenclatures des produits - profil de la demande (saisonnalité) 	<p>Topographie de la chaîne</p> <ul style="list-style-type: none"> - structure du réseau - localisation du point de pénétration de la commande (decoupling point) - les contraintes majeures <p>Intégration et coordination</p> <ul style="list-style-type: none"> - statut juridique - distribution des rapports de force

Tableau II.10. Catégories et attributs d'une typologie de chaînes logistiques (d'après, Fleischmann et Meyr, 2003)

Cette représentation a le mérite de définir des caractéristiques selon les processus principaux de production (approvisionnement- transformation- distribution). Il introduit également la notion de point de pénétration de la commande comme facteur essentiel structurant la chaîne. On verra par la suite que ce concept peut être mobilisé au sein même de l'entreprise suivant sa stratégie de réponse à la demande, et sera un attribut de caractérisation primordial pour la modélisation des processus de production d'une entreprise. En effet, il constitue un lien entre l'entreprise et ses clients et traduit la manière avec laquelle l'information sur la demande est intégrée dans le système de planification de la production.

II.4.1.5. Discussion

On remarque que l'ensemble des typologies, quels que soient leurs objectifs, sont assez similaires en ce qui concerne la caractérisation des process de production. On retrouve en effet souvent les schémas généraux de job shop, flow shop, ligne, process. En conséquence, s'agissant de la structure physique du système, ces grandes familles d'organisation sont assez génériques et peu de variables de différenciation peuvent être trouvées pour construire des sous-classes à ce niveau. Cependant, il est difficile de se fixer une seule typologie, car cela dépend des objectifs de la classification envisagée.

Pour donner un récapitulatif des éléments présentés précédemment, nous utilisons la terminologie employée dans certaines démarches de modélisation et de simulation des systèmes de production. Un système peut être décrit suivant les éléments suivants :

- les ressources
- les processus
- les flux
- les règles de gestion
- les données techniques

Le tableau II.11 donne quelques attributs (non exhaustifs) concernant ces éléments.

	<i>Eléments</i>	<i>caractéristiques</i>	<i>Décomposition</i>				
Ressources	Equipements	Agencement	Fonctionnel		Ilots	Linéaire	
		Nombre (par)	Etape du processus (planning point)		Département	Ligne	
		Flexibilité	Nombre de produits dédiés	Nombre d'opérations		Adaptation capacité	
		Fiabilité /Maintenance	Fiabilité	Maintenance préventive		Maintenance curative	
		Capacité	Goulets	Non-goulets			
	Main d'œuvre	Spécialisation	Nombre d'opérations/personne				
		Nombre (par)	département		Fonction	Ligne / îlots	
		Organisation	Nombre d'équipes	Planning du travail		Hierarchie /décisions	
	Processus	Approvisionnement	Produits	Type de produits	Cycle de vie	Nombre de MP	
			Fournisseurs	Nombre de fournisseurs			Relations (contrat, occasionnel...)
Données d'approvisionnement			Fréquence	Quantités		Délais	
Fabrication		Préparation	Nombre d'opérations		Temps de lancement		
		Transformation	Nombre d'opération	Temps de changement de fabrication		cadences	Lots de fabrication
		Conditionnement	Lots de transfert	moyens de manutention		Temps des opérations de condit.	
		Stockage	MP	Encours		PF	
		Contrôle	Fréquence	Durées	Recyclage (taux de rebut...)		
Distribution		Préparation des commandes	Temps du processus		Gestion des commandes urgentes		
		chargement	Lots d'expédition		Temps de chargement		
		Transport	Temps de transport		Capacité des moyens		
		Réseau de distribution	Nombre d'échelons		Capacité/ gestion des plates formes logistiques		
Planification et Contrôle		Moyen terme (PDP)	Mix produit		Horizons de planification		Capacité (goulets)

		Calcul des besoins	Composants	Approvisionnements (Taux, calendriers)			
		Ordonnancement	Gestion des OF	Règles et critères d'ordonnancement		Charge / capacité	
Flux	Physiques	Structure	Convergenents	Divergenents	Mixtes	Poussé/tiré	
		Points de désynchronisation	Nombre de planning points	Complexité des routages		Règles d'aiguillage	
		Mécanismes de régulation	Stocks tampons	Gestion par les goulets		Autres boucles de régulation	
	Information	Type	Interne, amont, aval		Technique		Logistique
		Qualité	Rapidité		Contenu		
		Traitement	Rapidité feedback		Confiance		Mise à jour, traçabilité
Règles de gestion	Planification des besoins	ROP	Point de commande		Quantité	Stocks de sécurité	
		MRP	Horizon	Règle de lotissement		Stocks de sécurité	
		Kanban	Seuils	Nbre Kanban fabrication		Nbre Kanban transfert	
	Ordonnancement	Règles de priorité	FIFO		SPT	EDD	
		Gestion Capacité	Finie / Infinie		Méthodes de lissage de la charge		
Données techniques	Machines	Capacité	Cadence	Temps opératoires		Capacité nominale	
		Fiabilité	MTBF	MTTR		Taux de panne	
		Rebut	Taux de rebut				
	Moyens de manutention	Convoyeurs / chariots filoguidés	Capacité			Vitesse	

Tableau II.11. Caractérisation et attributs d'un système manufacturier

Nous avons présenté les différents attributs utilisés pour décrire un système manufacturier. Dans le cadre de notre démarche de modélisation d'une entreprise manufacturière en vue de son intégration dans une chaîne logistique, nous allons sélectionner un certain nombre d'attributs qui permettent de concevoir un modèle d'un niveau de granularité adéquat. En effet, une agrégation des processus, des ressources et des flux est nécessaire afin d'avoir un modèle générique et pouvoir limiter les données de son instanciation, ce qui permettra une exploitation facile de l'outil de simulation qui sera développé sur la base de ce modèle d'entreprise.

Le système de pilotage d'une entreprise est d'une grande importance dans l'étude d'une chaîne logistique. Ce sont les différents paramètres de pilotage et de contrôle des flux qui déterminent la dynamique de la chaîne. Nous allons donc accorder une grande importance aux aspects liés à la gestion de la demande et à la planification et contrôle de la production.

II.4.2. Système de pilotage d'une entreprise

II.4.2.1. La stratégie de réponse à la demande

Plusieurs facteurs conditionnent la structure de la chaîne logistique. On peut citer :

- le type d'industrie (produit et process de production) : existence de phase d'assemblage, nombre de fournisseurs...
- les volumes de production : une production en grandes séries nécessite souvent des réseaux de distribution entre les fabricants et les clients
- la multiplicité des sites de fabrication : une entreprise peut être mono ou multi-sites et les mêmes produits peuvent être fabriqués à des endroits différents et des flux entre sites peuvent se créer
- le point de pénétration de la commande client

Ce dernier point est important, car lié aux stratégies de réponse à la demande et impacte fortement les flux physiques et d'information le long de la chaîne.

II.4.2.2. Définition du point de pénétration de la commande client (*Order Penetration Point ou customer order decoupling point*)

(Sharman, 1984) définit le point de pénétration de la commande comme étant le point du processus de production à partir duquel les spécificités du produit sont figées, et comme étant le dernier point où les stocks sont maintenus. Il considère que ce point est le compromis entre la pression de la concurrence et le coût des produits et leur complexité.

(Dong, 2001) le définit comme le point physique de la chaîne de valeur qui sépare les étapes d'investissement de celles de réalisation. Dans une étape d'investissement les opérations sont exécutées en réponse aux besoins définis par l'entreprise et l'anticipation de la demande. Dans une phase de réalisation, la production est confrontée aux commandes des clients. Il détermine le minimum des temps des ordres clients. Il correspond à un stock sur la chaîne logistique du fait de l'imperfection des prévisions.

Le point de pénétration de la commande client définit les différentes stratégies de réponse à la demande (MTS, ATO, MTO, ETO) comme décrit dans la figure II.11.

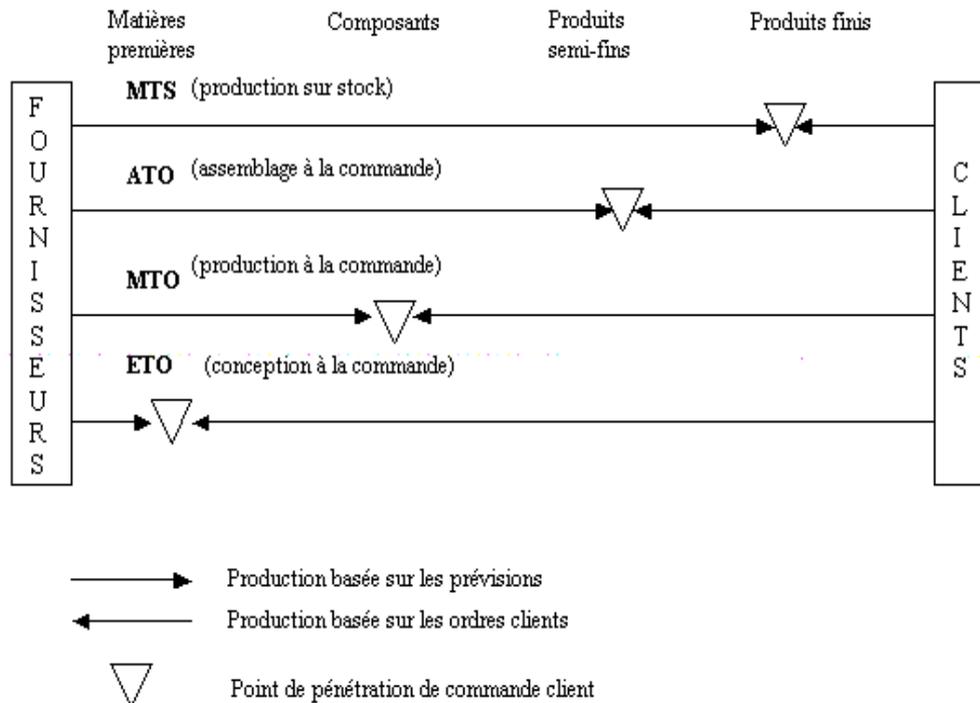


Figure II.11. Point de pénétration de commande client et stratégie de réponse à la demande

Les différentes caractéristiques de ses politiques sont résumées dans le tableau II.12.

Attributs/ politique	MTS	ATO	MTO	ETO
Délai de livraison	Court	Moyen	Long	Long
Variété des produits	Grande	Moyenne	Faible	Très faible
Livraison promise (basée sur)	Stocks de produits finis	Composants et sous-ensembles	Capacité de production	Capacité de production
Base de planification	Prévision	Prévision et backlog	Backlog et ordres clients	Ordres clients
Traitement de l'incertitude de la demande	Stocks de sécurité	Sur-planification des composants et sous-ensembles	Peu d'incertitude	Pas de contrôle nécessaire

Tableau II.12. Caractéristiques des stratégies de réponse la demande (d'après Dong, 2001)

(Olhager, 2003) définit le point de pénétration de la commande (Order Penetration Point) comme étant le point sur la chaîne de valeur où le produit est lié à un ordre client spécifié. C'est le point qui divise les étapes de production en : opérations conduites par prévisions (amont) et des opérations conduites par les ordres clients (aval).

L'auteur considère les facteurs impactant le positionnement du point de pénétration de la commande et distingue le long de la chaîne logistique, des opérations *pre-OPP* et des opérations *post-OPP*. Les caractéristiques des entreprises sont alors différentes suivant la position par rapport à OPP. Les facteurs affectant le positionnement de ce point sont :

Facteurs liés au marché

- délai de livraison requis
- volatilité de la demande du produit
- volume du produit
- gamme de produits et degré de customisation
- lots de livraison et leur fréquence

Facteurs liés au produit

- degré de modularité du produit
- opportunités de customisation
- structure du produit

Facteurs liés à la production

- temps de cycle
- nombre de *planning points* : ressources ou ensemble de ressources considérées comme une macro ressource d'un point de vue production et gestion de la capacité.
- flexibilité des processus de production (temps de changement de série,...)
- position du goulet de production : cette position peut être conflictuelle car c'est la recherche de compromis entre l'optimisation des ressources et la minimisation des pertes (gaspillages) comme principe du JIT. Un goulet peut correspondre à un OPP notamment une ressource coûteuse effectuant d'importantes opérations du processus.
- ressources ayant des temps de setup séquentiellement dépendants (peuvent se transformer en goulets)

Les caractéristiques des produits, de la demande, des processus de production, de l'organisation, de la planification et de la mesure de performance sont alors différents suivant la position du processus par rapport au point de pénétration de commande. Le tableau II.13 illustre ces différentes caractéristiques des opérations pré et post OPP.

Attributs	Opérations pré-OPP	Opérations post-OPP
<i>Produits et marché</i>		
Type de produit	Standardisé	Customisé
Eventail des produits	Prédéterminé, petit	Vaste
Demande	Grands volumes, prédictible	Petits volumes, volatile
<i>Order winners</i>	Prix	Flexibilité, rapidité de livraison
<i>Market qualifiers</i>	Qualité, livraison à temps	Prix, qualité, livraison à temps
<i>Production</i>		
Processus	Ligne, grandes séries	Job shop, petites séries
Capacité	Lag /track	Lead / track
Moyens de production	Orienté produit	Orienté process
Intégration verticale	Relations fournisseurs, OPP buffer/opérations post-OPP	Relations clients OPP buffer/ opérations pré-OPP
Qualité	Orientée process	Orientée produits
Organisation	Centralisé	Décentralisée
Planification et contrôle	Livraison promise basée sur la disponibilité des stocks Planification basée sur les taux Flux tirés	Livraison promise basée sur un calendrier, et la disponibilité des composants et de la capacité Planification basée sur les temps Flux poussés
Performance	Coût, productivité	Flexibilité, délais de livraison

Tableau II.13. Différences entre les opérations amont et les opérations aval du point de pénétration de commande (d'après Olhager, 2003)

Cette différenciation des processus pré et post OPP, permet lors de la configuration d'une chaîne logistique de bien positionner les types d'entreprises et éviter ainsi de concevoir des processus logistiques peu cohérents.

L'OPP est évidemment lié aux politiques de production : MTS, MTO, ATO. Ces dernières sont dépendantes du comportement de la demande et des temps de production et de livraison des produits. Ainsi deux variables peuvent conditionner l'adoption d'une de ces politiques :

- la volatilité relative de la demande (Relative demand volatility)
- le ratio temps de production / temps de livraison (P/D ratio)

Le positionnement des politiques de réponse à la demande est défini selon les valeurs de la variabilité et du ratio P/D. Il est possible de transformer des produits assemblés à la commande en produits sur stock ou à la commande en fonction de la position des processus par rapport à l'OPP. Ceci est illustré dans la figure II.12.

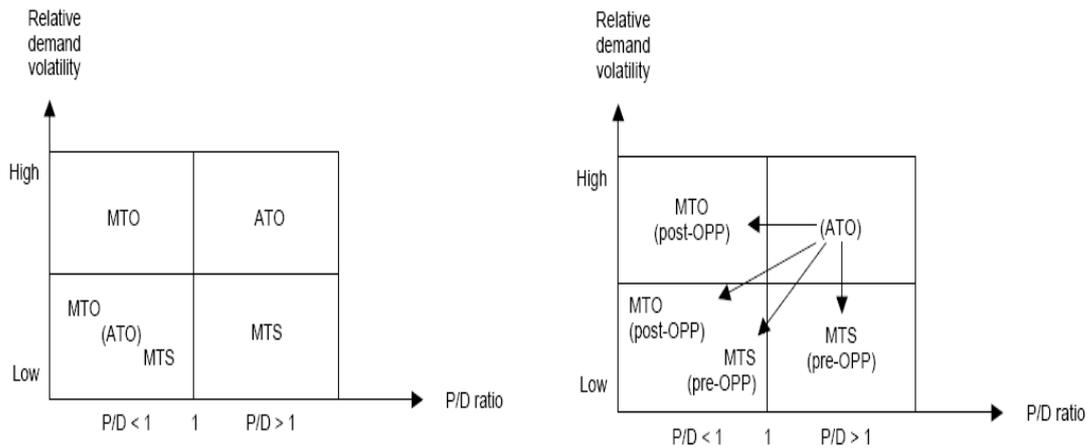


Figure II.12. Choosing the right product delivery strategy and decoupling ATO into MTS and MTO (Olhager, 2003)

Cette analyse est intéressante dans le sens où elle permet à partir de la connaissance du profil de la demande et des temps des processus de production et de livraison, de positionner les politiques de gestion des produits, et d'avoir une idée de la position du OPP. Cela permettra de bien distinguer les processus pré et post OPP, et d'avoir ainsi une bonne construction des attributs caractérisant les maillons se positionnant sur ces deux tronçons de la chaîne logistique. Dans certaines chaînes logistiques plusieurs points de découplage peuvent exister et un choix est alors nécessaire entre une livraison sur stock ou à la commande.

II.4.2.3. Système de Planification et de contrôle

La notion de pilotage de flux se limitait, au début, à la gestion de stocks. Par la suite, elle a intégré la partie production pour gérer à la fois les stocks et la production. De nos jours, cette notion s'étend de plus en plus pour englober toute la chaîne logistique (Babai et Dallery, 2004).

(Simchi-Levi et al., 2000) expliquent l'importance de la gestion des stocks dans une chaîne logistique. En effet, en plus de l'importance des informations sur les stocks qui permettent la génération des ordres de production au sein d'une entreprise, les stocks constituent des mécanismes majeurs pour synchroniser la production et la distribution dans une chaîne logistique. Le pilotage des flux de production intra et interentreprises passent inéluctablement par une recherche de meilleures politiques de gestion des différents stocks (matières premières, encours et produits finis) pour chaque entreprise de la chaîne et par un partage d'information entre partenaires pour assurer un bon compromis entre les niveaux de stocks et le service au client.

Le pilotage des flux est assuré par les systèmes de planification et de contrôle de la production. (Berry et Naim, 1994) décrivent dans le schéma de la figure II.13 un système de planification et de contrôle générique de la logistique interne d'une entreprise. Ce système est généralement celui utilisé dans les MRP. Ce dernier est un progiciel reliant des bases de données permettant de générer, lancer et suivre des ordres de fabrication, d'approvisionnement et de livraison en utilisant des informations diverses : commandes des clients, états des stocks de produits finis et d'encours, exécution des ordres en attente, etc.

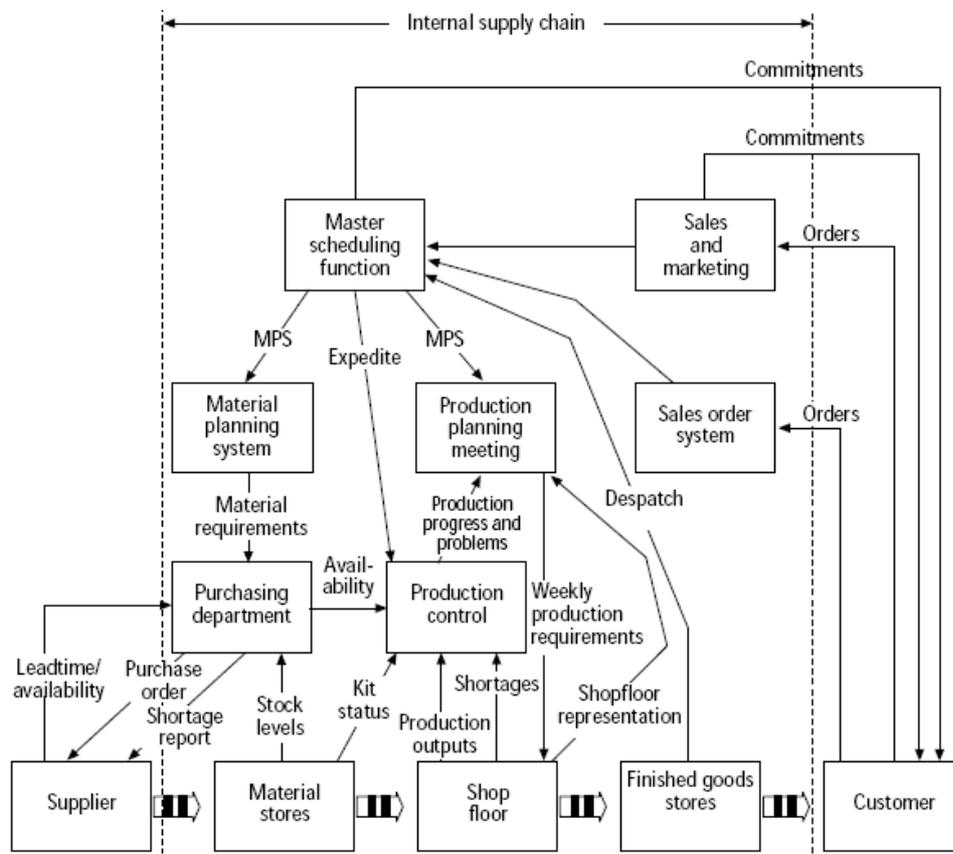


Figure II.13. Simplified Input-Output Analysis of the Information based Control System (Berry et Naim, 1994)

Les principaux modèles de gestion des stocks (ROP, reapprovisionnement périodique et Kanban) sont décrits dans l'annexe A.

II.4.2.4. Discussion

Pour (Vollmann et al., 2005), dans un contexte de configuration de chaîne logistique pour un produit donné (pas de problème d'interdépendance de demande de plusieurs produits) et sans stratégies de coordination a priori (les pilotages des flux sont découplés), les mécanismes classiques de reapprovisionnement de stocks sont suffisamment représentatifs de la dynamique des flux d'une chaîne logistique. Si l'on considère en plus les stratégies de réponse à la demande (produire à la commande ou sur stock) et le type de gestion des flux locaux (poussés ou tirés), alors on peut modéliser de façon réaliste et simple les modes de pilotage des flux des différentes entreprises de la chaîne logistique et étudier son comportement et sa dynamique. En effet, (Wanke et Zinn, 2003) stipulent que trois grandes décisions sont à considérer dans la gestion des flux logistiques :

- (1) Make to order vs make to stock
- (2) Push vs pull inventory deployment logic
- (3) Inventory centralization vs decentralization

Ces éléments sont effectivement prépondérants, mais insuffisants pour modéliser les processus logistiques. En effet, les aspects liés aux capacités de production (notamment les ressources goulets) sont très importants. La prise en compte de la capacité des processus de fabrication des entreprises de la chaîne permet de mieux expliquer la dynamique de la chaîne. C'est pour cela que l'on considère dans notre travail des systèmes de production à *capacité finie*. Les paramètres définissant les capacités des processus seront mobilisés de façon simple mais pragmatique en utilisant une métrique de mesure d'efficacité d'un processus qui est le taux de rendement.

II.4.3. Efficacité d'un processus manufacturier

La performance d'un processus peut être définie par :

- l'efficacité : rapport entre l'input réel et l'input théorique (reference input)
- l'efficacé : rapport entre l'output réel et l'output théorique (reference output)

La productivité du système est mesurée par le rapport entre l'input et l'output.

La figure II.14 explicite ces éléments.

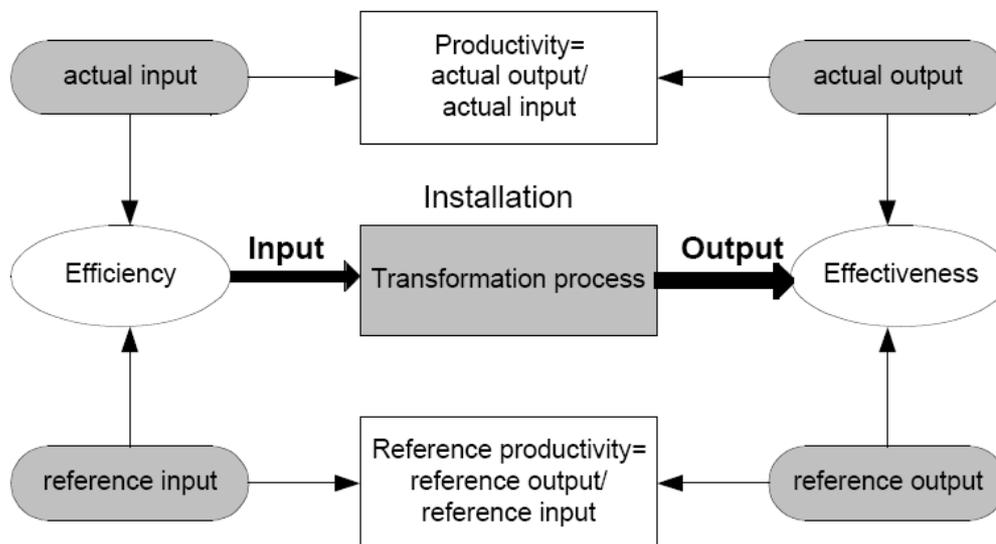


Figure II.14. Effectiveness and efficiency (d'après Hansen, 2001)

Dans notre travail, le facteur efficacité (effectiveness) sera utilisé pour caractériser la performance (ou capacité) d'un processus. Si l'on considère deux processus en série, la sortie du premier (son efficacité) sera l'entrée du second processus (son efficacité), et donc on traite d'un même concept (même si dans la réalité les deux processus sont toujours découplés).

II.4.3.1. Overall Equipment Effectiveness

Pour synthétiser et quantifier l'efficacité, le Taux de Rendement Synthétique (TRS), ou Overall Equipment Effectiveness (OEE), est un indicateur usuellement employé dans l'industrie pour la gestion de la maintenance et le suivi des équipements.

Le temps total d'ouverture d'une usine se décompose en un temps non-requis (pause, entretien préventif, temps non utilisé par absence de travail à exécuter) et un temps requis. Ce temps requis se décompose en un temps de fonctionnement, un temps d'arrêt propre (temps de panne, changements d'outils, changement de série et contrôle) et un temps d'arrêt induit (par rupture d'approvisionnement ou saturation de stock aval). Cette décomposition des temps permet une analyse plus fine de la capacité de production et peut être étendue pour l'étude d'une chaîne logistique (Camisullis et Giard, 2008).

La figure II.15 illustre la décomposition du temps de travail d'un système de production et le calcul des indicateurs de performance selon la norme *afnor 60-182*. En plus du TRS, on définit le taux de rendement global (TRG) qui prend en compte les arrêts planifiés (entretien préventif, essais, pauses) et les sous charges. Le taux de rendement économique (TRE) prend en compte le temps de fermeture de l'unité de production (week- end, jours fériés,...) et donne donc une vision plus globale du rendement d'un système de production.

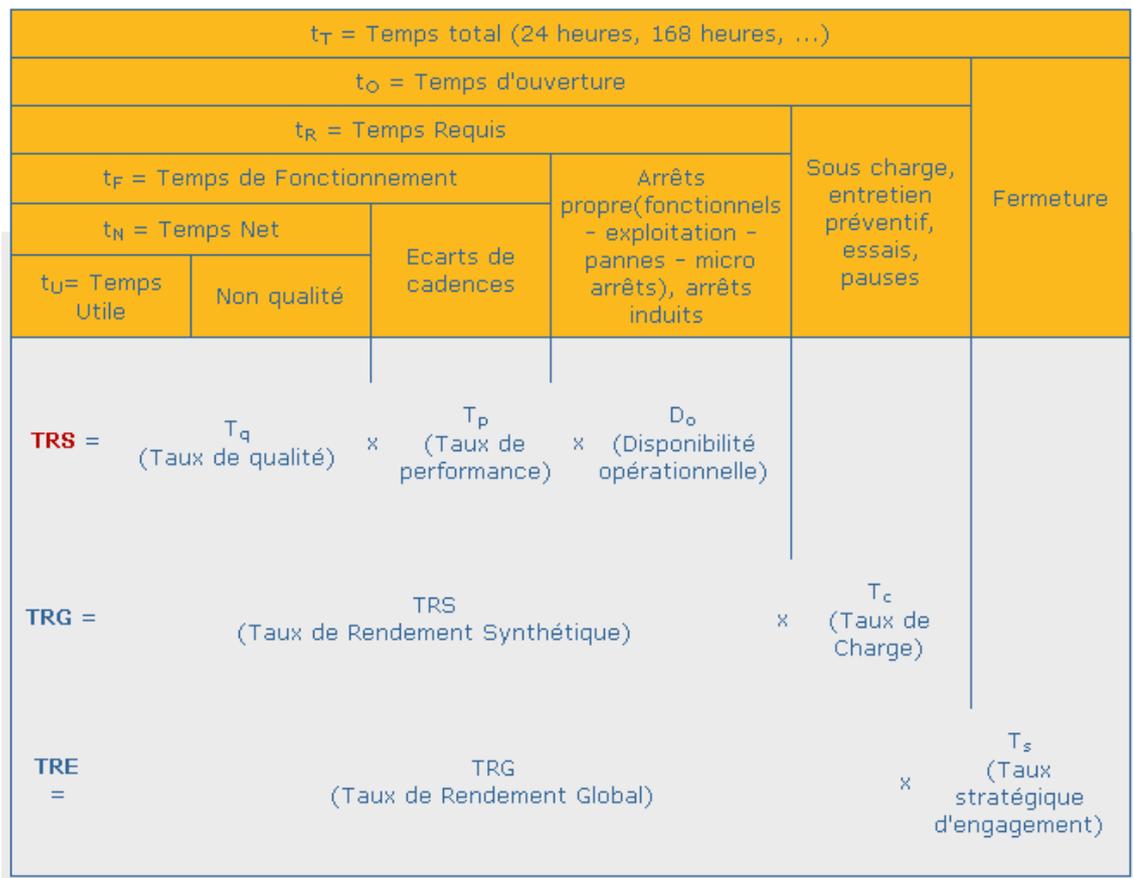


Figure II.15. Définition du taux de rendement synthétique (Afnor 60-182)

La norme décompose l'activité en temps standards, détaillés ci-dessous.

Temps total t_T : temps de référence intégrant l'ensemble des états possibles du moyen. Pour une journée, le temps total est de 24 h ; pour une semaine, le temps total est de 168 ; pour un an, le temps total est de 365 jours \times 24 h, etc.

Temps d'ouverture t_O : partie du temps total (t_T) correspondant à l'amplitude des horaires de travail du moyen de production et incluant les temps d'arrêt de désengagement du moyen de production par exemple (nettoyage, sous charge, modification, essai, formation, réunion, pause, maintenance préventive,...)

Temps requis t_R : partie du temps d'ouverture (t_O) pendant lequel l'utilisateur engage son moyen de production avec la volonté de produire comprenant les temps d'arrêt subis et programmés (par exemple pannes, changement de série, réglage, absence de personnel)

Temps d'arrêt propre t_{AP} : partie du temps requis (t_R) correspondant au temps d'arrêt imputable au moyen de production.

Temps de panne t_P : partie du temps d'arrêt propre (t_{AP}) due à un dysfonctionnement

Temps d'arrêt d'exploitation t_{AE} : partie du temps d'arrêt propre (t_{AP}) provoquée par l'utilisateur par exemple pour les arrêts de service dus à l'impossibilité du personnel de remplir sa fonction, à des problèmes de qualité,...

Temps d'arrêt fonctionnels t_{AF} : partie programmée du temps d'arrêt propre (t_{AP}) qui peut se décomposer en :

- t_{COP} : Temps de changement d'outil programmé
- t_{RF} : Temps de réglage fréquentiel
- t_{DC} : Temps de contrôle
- t_{CF} : Temps de changement de fabrication
- t_{EF} : Temps d'entretien fréquentiel

Temps de micro arrêt t_{MA} : partie du temps d'arrêt propre (t_{AP}) constituée de temps d'arrêt difficilement mesurables dont le seuil est défini par l'entreprise

Temps d'arrêt induit t_{AI} : partie du temps requis (t_R) correspondant au temps d'arrêt pendant lequel le moyen de production ne peut accomplir sa fonction pour des causes externes : défaut d'approvisionnement, saturation de pièces, manque de personnel, manque de ressources extérieures, défaut d'énergie.

Temps de fonctionnement t_F : partie du temps requis (t_R) pendant lequel le moyen de production produit des pièces bonnes et mauvaises dans le respect ou non du temps de cycle de référence (t_{CR}) et avec toutes ou parties des fonctions en service.

Temps net t_N : partie du temps de fonctionnement (t_F) pendant lequel le moyen de production aurait produit des pièces bonnes et mauvaises, dans le respect du temps de cycle de référence (t_{CR})

Temps utile t_U : partie du temps net (t_N) correspondant au temps non mesurable obtenu en multipliant le nombre de pièces bonnes par le temps de cycle de référence (t_{CR})

Au-delà de cette définition issue de la norme Afnor, l'OEE est largement présent dans la littérature scientifique traitant des systèmes manufacturiers.

(Nakajima, 1989) définit l'OEE comme le rapport entre la production maximale théorique sur la production réelle de qualité, et donne donc une évaluation pertinente du rendement d'un système de production. Selon (Chand et Shirvani, 2000), l'OEE est largement acceptée comme outil d'amélioration de la performance de l'appareil de

production dans de nombreuses industries. L'objectif principal est d'augmenter l'efficacité du matériel de sorte que chaque équipement puisse être exploité à son plein potentiel et maintenu à ce niveau.

(Jonsson et Lesshammar, 1999) indiquent que la plus grande contribution de l'OEE est qu'il est un outil simple et complet pour mesurer l'efficacité interne d'une entreprise et qu'il peut fonctionner en tant qu'un indicateur important de l'amélioration continue du process.

D'après (Willmott et McCarthy, 2001), l'OEE est considéré comme un indicateur de suivi dans les projets de maintenance productive et de *lean manufacturing*, et constitue une démarche rigoureuse pour l'évaluation et le benchmark de la performance d'un système manufacturier. Cet indicateur peut être utilisé dans une démarche d'évaluation de performance, mais aussi dans une méthodologie de classification des systèmes de production.

Plus qu'un indicateur opérationnel, l'OEE supporte une démarche organisationnelle et reflète le degré de la maturité des projets d'amélioration de la production. (Sattler et Schlueter, 1998) décrivent une étude intéressante d'une démarche de mise en place de l'indicateur pour l'amélioration des capacités de production au sein de *Texas Instruments*. Grâce à cet outil, beaucoup de problèmes organisationnels et de gestion des opérations ont été révélés et des conduites de changement ont été choisies pour l'amélioration de la performance de l'entreprise.

Plusieurs études de cas industriels portant sur l'utilisation du taux de rendement, sur les démarches organisationnelles pour son amélioration et sur le benchmark de secteurs d'industries selon les facteurs composant l'OEE ont été réalisées : (Steege, 1996), (Konopka et Trybula, 1996), (Leachman et Hodges, 1997), (Cigolini et Turco, 1997), (Waterson et al, 1999), (Ahmad et Dhafr, 2002).

Les valeurs moyennes de l'OEE dans les secteurs de l'industrie mécanique et de l'électronique sont de l'ordre de 45% à 70%. Les meilleures entreprises (*World Class*) ont un OEE d'environ 85%. Comme souligné plus haut, (Miltenburg, 1989) considère quatre classes de niveau de capabilité industrielle. En adaptant cette classification dans le cas de l'OEE, et selon les statistiques rapportées dans ces études, nous avons décidé de définir quatre classes d'efficacité. Nous reviendrons sur la définition de ses classes par la suite (*cf. section V.3.2*).

II.4.4. Discussion

Nous avons vu dans cette section que les entreprises peuvent se différencier par l'organisation de leurs processus de production, les modes et paramètres de leur système de pilotage des flux et leur niveau de capabilité (maturité) opérationnelle. Bien sûr, d'autres éléments liés à la stratégie, aux ressources humaines, à la technologie, au système d'information, etc. doivent compléter l'aspect opérationnel pour donner une image plus complète de l'entreprise. Néanmoins, dans une démarche de configuration de chaîne logistique axée principalement sur le pilotage des flux physiques, nous estimons que les trois volets : processus de production – mode de gestion des opérations – niveau de capabilité- constituent un triplet suffisamment complet et adéquat pour définir un profil d'entreprise. Bien évidemment, ces trois facteurs ne sont pas complètement indépendants, ainsi par exemple, comme on vient de le décrire, les grilles d'analyse permettent de lier le processus de production au mode de gestion. Le niveau d'efficacité mesuré par une métrique globale (OEE) permet quant à lui de quantifier les valeurs des paramètres opérationnels (temps de changement de production, temps de

pannes, autres arrêts de production, taux de rebut,...). Ces éléments permettent de définir les capacités de production pour chaque profil d'entreprise et ainsi de configurer des chaînes logistiques en tenant compte des contraintes de production (capacité finie) de chaque maillon de la chaîne. Ainsi, au lieu de modéliser une entreprise comme une boîte noire dans la chaîne logistique, des aspects concrets liés à la fabrication seront pris en compte dans notre démarche de modélisation (Essaid et al., 2008b).

II.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art sur les chaînes logistiques et les problématiques liées à leur configuration et leur pilotage. Il a permis notamment de délimiter le champ de notre étude, en l'occurrence la configuration à la demande de réseaux manufacturiers. Cette dernière se base sur un certain nombre de décisions logistiques permettant de faire des choix en termes de partenariat pour mettre en œuvre un réseau suffisamment performant sans remettre en cause les modes de pilotage de chacun des partenaires.

Pour cela, nous avons étudié différentes typologie d'entreprises ainsi que des grilles d'analyse des attributs caractérisant les systèmes manufacturiers. Cette revue de littérature nous permettra de définir par la suite des profils d'entreprises selon leurs processus de production, leurs systèmes de pilotage des flux et leurs niveaux d'efficacité opérationnelle.

Ces profils d'entreprises vont servir alors à configurer des chaînes logistiques. Afin de déterminer les éléments conceptuels qui seront mobilisés pour la conception de notre modèle de chaînes logistiques, nous allons, dans le chapitre qui suit, présenter un état de l'art sur les différentes démarches et méthodes de modélisation et de simulation des chaînes logistiques.

Chapitre III Modélisation et simulation des chaînes logistiques

III.1. Introduction

Les problématiques de configuration d'une chaîne logistique sont multidimensionnelles et nécessitent, en réalité, l'utilisation simultanée de plusieurs outils d'aide à la décision. En effet, la gestion des chaînes logistiques nécessite la prise en compte de différents éléments liés à l'organisation des processus de production des entreprises et aux modes de pilotage de leurs flux de production. L'orchestration et la synchronisation des différentes activités (production, approvisionnements, distributions, support...), gérées par différentes organisations rend la chaîne logistique assez complexe et difficile à modéliser. Une première étape de méthodologie est de définir le périmètre de l'étude (car on ne peut prétendre étudier un réseau logistique dans son intégralité), déterminer les problématiques et puis choisir la démarche de modélisation et de résolution permettant de répondre au mieux aux besoins de l'étude. De ce fait, les modèles de chaînes logistiques dépendent des objectifs de l'analyse, des secteurs d'activité, des variables de décisions utilisées, de la structure mathématique des modèles de résolution, etc. On peut distinguer les méthodes qualitatives qui s'intéressent à la représentation des processus et leur intégration et les méthodes quantitatives dont l'objectif est d'évaluer la performance ou d'étudier le comportement de la chaîne en termes de flux, stocks, service au client, flexibilité, etc. Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes approches de modélisation quantitatives, en mettant l'accent sur la simulation comme outil puissant d'étude des chaînes logistiques (Essaid et al., 2008c).

III.2. Typologie des modèles de chaînes logistiques

III.2.1. Introduction

(Harrel et Tumay 1994) classifient les modèles de chaînes logistiques en deux grandes catégories : les méthodes d'évaluation de solutions et les méthodes de génération de solution(s). La première catégorie évalue les configurations possibles de la chaîne (tester des stratégies) en répondant à la question « What...if ? ». La deuxième catégorie génère la meilleure solution pour un objectif ou un ensemble d'objectifs donné. Dans le premier

groupe, on retrouve les méthodes de simulation, tandis que l'autre groupe comprend des techniques telles que les modèles d'optimisation linéaires, dynamique, etc.

(Min et Zhou, 2002) considèrent quatre grandes classes de modèles :

- les modèles déterministes : modèles analytiques avec une ou plusieurs fonctions objectives (mono ou multi critères) utilisant des variables déterministes en vue d'optimiser les systèmes en tenant compte d'un certain nombre de contraintes sur les variables de décision.
- les modèles stochastiques : modèles analytiques en environnement stochastique. Les méthodes les plus connues sont la programmation dynamique et la théorie du contrôle optimal (Bellman, 1992), (Sethi et Thompson, 2000), (Bather, 2000).
- les modèles hybrides : ces modèles consistent à combiner des aspects déterministes et stochastiques (dynamiques) d'un système pour évaluer certains critères de performance. L'objectif n'est pas la recherche d'une solution optimale mais le test de stratégies. Parmi ces méthodes, la simulation est l'une des plus employées (nous y reviendrons dans la suite de ce chapitre).
- les modèles IT : ce sont en réalité un ensemble de méthodes de calcul intégrées dans des progiciel de gestion et qui permettent l'optimisation de l'ensemble des opérations logistiques (gestion des entrepôts, gestion des stocks, gestion des transports,...)

Une classification similaire est donnée par (Beamon, 1998) qui considère quatre types de modèles : déterministes, stochastiques, économiques et simulation. Les deux premières classes constituent ce qu'on peut appeler les modèles d'optimisation. Nous adoptons cette dernière classification et nous décrivons dans la suite de cette section quelques travaux de recherche utilisant ces modèles.

III.2.2. Modèles d'optimisation

L'objectif de ces modèles est de trouver une solution optimale pour allouer des ressources limitées afin d'atteindre un objectif donné. L'utilisation de ces techniques est très appropriée pour des problèmes de petite taille, mais devient très coûteuses et difficiles à implémenter quand il s'agit de modéliser des systèmes très complexes sujets à des aléas et incertitudes.

Parmi les nombreux travaux réalisés avec ces outils, on peut citer :

(Altıparmak et al., 2006) : modèle d'optimisation multicritère de la chaîne logistique en utilisant les algorithmes génétiques.

(Amiri, 2006) : modèle d'optimisation utilisant la relaxation lagrangienne, avec prise en compte des capacités des dépôts de stockage et des ressources de production comme variables de décisions.

(Kim et al., 2002) : modèle de sélection de fournisseurs en utilisant la programmation dynamique sous une demande stochastique.

(Camm et al., 1997) : modèle d'optimisation à variables entières et réelles couplé avec un système d'information géographique pour résoudre un problème de configuration de la chaîne logistique de Procter & Gamble.

(Cohen et Lee, 1989) : modèle de programmation linéaire pour la maximisation du profil global (taxes comprises) d'une chaîne d'assemblage d'ordinateurs.

III.2.3. Modèles économiques

Ce sont des modèles issus des théories économiques de l'utilité et des jeux de stratégies et dont l'objectif est l'évaluation de fonctions d'utilité en se basant sur des formalismes de comportement des entreprises considérées comme des agents économiques. (Christy et Grout, 1994) utilisent la théorie des jeux pour modéliser une relation de fournisseur/donneur d'ordre et qui est résolue pour déterminer sous quelles conditions des stratégies sont gagnantes. (Cachon et Lariviere, 2001) étudient des stratégies de partage de prévisions dans une chaîne d'approvisionnement avec un fabricant qui fait face à une demande stochastique. Le constructeur fournit sa prévision initiale au fournisseur avec un contrat, le fournisseur définit la capacité (s'il accepte le contrat), le fabricant reçoit une mise à jour des prévisions et fait un ordonnancement définitif. Les termes du contrat peuvent être ou pas respectés (gonfler les prévisions par exemple). Dans ce jeu, il s'agit de déterminer quelle est la stratégie à adopter par chacun des joueurs pour optimiser les gains de la chaîne.

(Viswanathan et Piplani, 2001) proposent un modèle pour étudier et analyser les bénéfices de coordonner la chaîne d'approvisionnement à travers une gestion partagée des niveaux et fréquences de reapprovisionnement des stocks. Le vendeur précise un niveau de reapprovisionnement à tous les acheteurs et exige le respect des délais. Le fournisseur offre une remise de prix pour inciter les acheteurs à accepter cette stratégie. Les remises de prix qui seront offertes par le vendeur sont déterminées par la résolution d'un jeu (Stackelberg game), qui est un jeu stratégique séquentiel où une firme leader décide en premier et des firmes suiveuses jouent ensuite. Après avoir développé une méthode pour résoudre le jeu, une étude numérique est menée pour évaluer le bénéfice de telles stratégies de coordination.

(Li et al, 2002) étudient la problématique de l'impact des promotions dans les stratégies de marketing. Un modèle de coordination de l'investissement publicitaire entre un donneur d'ordre et son fournisseur permet d'améliorer les bénéfices par rapport à une stratégie classique de leader/suiveur et ce par une meilleure coordination de la chaîne logistique (partage de risques et de gains).

(Taratynava et al., 2008) ont étudié une chaîne à deux niveaux en utilisant le formalisme de la théorie de jeux. Ils ont montré que le producteur a tendance à exagérer les prévisions de la demande afin de garantir des réserves suffisantes de produits intermédiaires. Le fournisseur prend en compte la stratégie du producteur et ne fait pas confiance à ses prévisions. L'équilibre du jeu conduit alors à une solution sous-optimale pour les deux acteurs.

III.2.4. Modèles de simulation

Selon (Shannon, 1975), la simulation est le processus de design d'un modèle d'un système réel et de conduite d'expérimentations dans l'objectif de comprendre le comportement du système ou d'évaluer des stratégies en se basant sur un certain nombre de critères. Cette définition souligne qu'un des apports de la simulation est qu'elle permet non seulement d'évaluer un système mais de voir son comportement (suivre l'évolution des états du système dans le temps).

Pour (Kim et al, 2004), la simulation est le processus de conception d'un modèle d'un système réel ou proposé (modélisé) au moyen d'objets abstraits dans l'effort de reproduire le comportement du système modélisé. Cette seconde définition apporte à la précédente le fait que la simulation n'est pas limitée à reproduire le fonctionnement

d'un système réel, mais qu'un système modélisé peut bien être utilisé comme prototype d'étude de certaines problématiques communes à des systèmes réels.

Un modèle de simulation d'une chaîne logistique devrait intégrer les processus logistiques représentant les différentes activités reliées par des flux de matière et des flux d'information (Banks et Buckley, 2002). L'apport de la simulation réside justement dans sa capacité de modélisation des processus de façon plus explicite et formalisée que les modèles analytiques et dans la prise en compte de l'aspect dynamique de la chaîne logistique. C'est un outil idéal pour l'analyse des chaînes d'approvisionnement qui sont des systèmes très complexes avec un comportement dynamique (Anderson et Morrice, 1999). Selon (Banks, 1998), la simulation permet l'exploration des procédures et modes de gestion ce qui est d'un grand intérêt pour les gestionnaires. Cette capacité à évaluer des scénarios « what...if analysis », avec la prise en compte de plusieurs facteurs rend la simulation un des plus puissants outils d'analyse des chaînes logistiques (Hellström, et Johnsson, 2002).

(Terzi et Cavalieri, 2004), (Wyland et al, 2000) expliquent que la popularité croissante de la simulation comme outil d'étude des chaînes logistiques est due à sa force dans l'évaluation des variations du système et de l'interdépendance de ses composants. Cela permet à un décideur d'évaluer les changements dans une partie de la chaîne d'approvisionnement et visualiser l'impact de ces changements sur les autres parties du système, et par conséquent avoir une idée précise sur la performance de l'ensemble de la chaîne.

Pour étudier la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble, au lieu de séparer ses différentes entités (comme dans la plupart des modèles d'optimisation), les études de simulation sont de plus en plus utilisées ces dernières années (Wyland et al., 2000). En allant plus loin, (Riddalls et al., 2002) estiment que le comportement global d'une chaîne d'approvisionnement ne peut être évaluée qu'en utilisant la simulation.

(Bel, 2008) décrit la modélisation par les méthodes de simulation (méthodes évaluatives) et distingue la simulation par avance de temps et la simulation par prochain événement (événements discrets), comme indiqué dans la figure III.1.

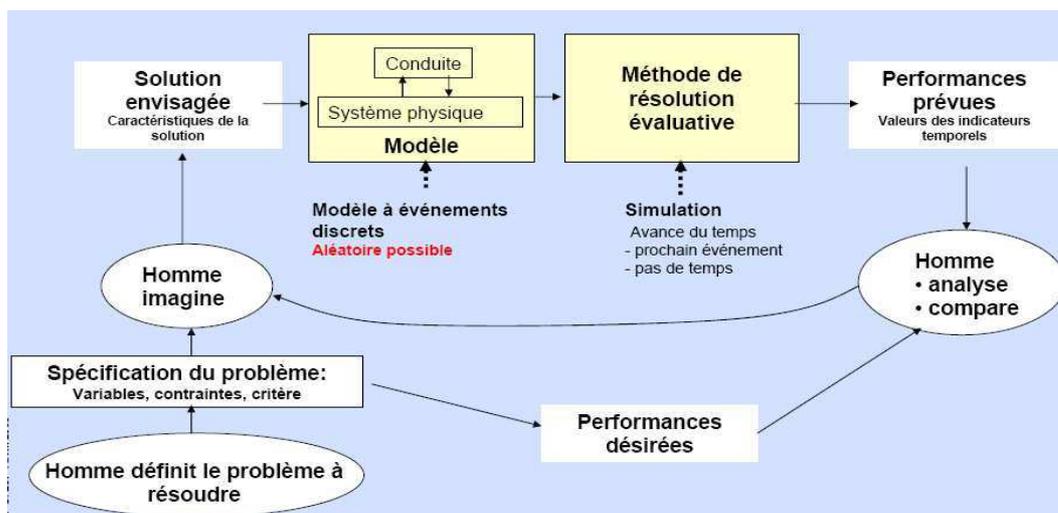


Figure III.1. Démarche de simulation (Bel, 2008)

L'auteur note également que les méthodes de simulation et d'optimisation peuvent être complémentaires. En effet, les méthodes de simulation donnent un ensemble de solutions (performance prévue) du système que l'on pourra par la suite intégrer dans un modèle d'optimisation (objectifs et contraintes) qui va permettre d'atteindre la solution optimale (figure III.2).

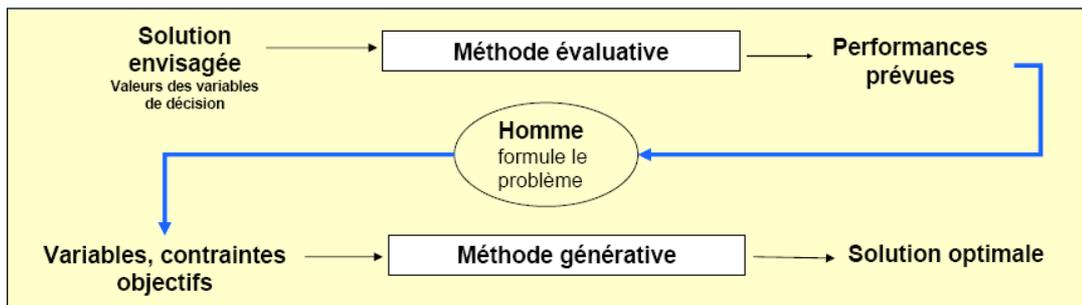


Figure III.2. Couplage de la simulation avec l'optimisation (Bel, 2008)

III.3. Simulation des chaînes logistiques

III.3.1. Introduction

(Ingalls, 1998) souligne que beaucoup de problèmes logistiques sont complexes et soumis à des variances importantes des variables de décisions et par conséquent seule une démarche de simulation permet d'analyser et de trouver des solutions robustes. Car dans un modèle d'optimisation, face à de telles variations, la fonction objectif peut tout simplement changer d'une période à une autre. En effet, le facteur temps est important dans le pilotage de tels systèmes, et malheureusement les modèles d'optimisation ne permettent pas l'intégration de ce fait de façon systématique.

La simulation permet l'évaluation de la performance d'un système avant sa mise en exploitation. Elle permet aux entreprises d'effectuer des analyses conduisant à une meilleure planification des décisions et une connaissance des différentes contraintes opérationnelles. Dans le domaine de la gestion logistique, la simulation est aujourd'hui reconnue comme un outil puissant d'aide à la décision. Une démarche de simulation permet de dimensionner un réseau logistique (capacités des ressources nécessaires), d'implémenter différentes stratégies de pilotage des flux et de mettre en place des mécanismes de collaboration. L'analyse du comportement d'une chaîne logistique est parfois plus intéressant que sa configuration optimale, car l'environnement dans lequel évoluent les entreprises ne permet pas réellement d'atteindre des solutions stables.

Un modèle de simulation d'un réseau manufacturier dépend de la structure de la chaîne, de la problématique traitée, des contraintes opérationnelles et des objectifs de performance visés. Actuellement, il n'existe pas de cadre établi de classification des études de simulation de la chaîne logistique. Par conséquent, pour faciliter la discussion

sur les résultats des études de simulation il faut au moins définir les aspects traités et les méthodes utilisées. (Chu, 2003) répartit les études de simulation de chaîne logistique selon les points suivants : les méthodes de simulation employées, les secteurs d'industries concernés, les études sur l'amplification de la demande, les études de coordination et de partage d'information et enfin les études visant la mise en œuvre de stratégies logistiques.

III.3.2. Les méthodes de simulation

Différentes approches ont été utilisées pour simuler les chaînes logistiques. Ainsi, pour faciliter la simulation de la chaîne d'approvisionnement, un cadre de modélisation générique, modulaire et réutilisable a été suggéré par (Swaminathan et al., 1995). (Petrovic, 2001) a développé un modèle de logique floue, intégré dans un simulateur pour analyser une chaîne d'approvisionnement dans un environnement incertain.

(Tzafestas et Kapsiotis, 1994) ont développé un modèle de simulation couplé à un modèle d'optimisation pour analyser la performance d'une chaîne logistique.

(Rossetti et Chan, 2003) ont développé une démarche de modélisation orientée objet pour mettre en œuvre une plate-forme de simulation des chaînes logistiques ; l'outil permet de générer, à partir de composants, des scénarios de simulation de chaîne logistique, avec également un système de bases de données relationnelles permettant une instanciation facile des modèles.

(Hung et al., 2004) ont développé une démarche de modélisation en utilisant des blocs génériques (generic nodes) et ont testé différents modes de planification de la production sur un cas d'étude de chaîne logistique dans l'industrie pharmaceutique.

(Pundoor et Herrmann, 2006) s'inscrivent dans une démarche de modélisation plus générique, orientée processus en utilisant le modèle SCOR. Partant du fait qu'il n'y a pas de composants de modélisation standards dans les modèles de simulation des chaînes logistiques, ils ont mobilisé le modèle SCOR pour mettre en œuvre un outil de simulation hiérarchisé avec des sous-modèles traduisant les différentes activités d'une chaîne logistique. Le niveau de détail choisi permet la prise en compte de différentes caractéristiques sans être spécifique à un type d'industrie.

(Ng et al., 2003) ont développé une plateforme de simulation pour analyser une chaîne logistique multi-échelons. L'outil permet l'étude de différents modes de gestion des stocks et de prévisions de la demande en échangeant des informations entre les échelons.

(Umeda et Lee, 2004) décrivent une conception d'un outil générique permettant la mise en œuvre de scénarios de simulation d'une chaîne logistique. Le modèle fonctionne sous deux stratégies de planification : planification en se basant sur les stocks ou sur les calendriers des commandes. Ils décrivent également les différentes données nécessaires pour interfacer l'outil de simulation.

(Rossetti et Chan, 2003) ont développé une démarche de modélisation orientée objet pour mettre en œuvre une plate-forme de simulation des chaînes logistiques ; l'outil permet de générer, à partir de composants, des scénarios de simulation de chaîne logistique, avec également un système de bases de données relationnelles permettant une instanciation facile des modèles.

(Labarthe et al., 2007) ont développé une démarche de modélisation en utilisant des systèmes multi-agents et qui permet de simuler le comportement des chaînes logistiques dans des environnements de production de masse customisée.

(Swaminathan, 1998) a souligné les limites de beaucoup d'outils de simulation dans le sens où ils sont dédiés à des cas et des problèmes particuliers et sont donc peu réutilisables. Il propose une approche basée sur les systèmes multi-agents avec une modélisation orientée objet afin de palier ces limites de généralité des modèles de simulation.

III.3.3. Les secteurs d'industries

Les entreprises dans diverses industries ont utilisé la simulation pour aider à la conception et l'amélioration de leur chaîne d'approvisionnement. (Berry et al, 1994) ont utilisé des simulations pour estimer les avantages qui peuvent être attendus de la réorganisation de la chaîne d'approvisionnement de l'industrie électronique au Royaume-Uni. Dans la même optique, (Berry et Naim, 1996) ont développé un modèle de simulation pour évaluer les incidences de différentes stratégies de reconfiguration d'un grand constructeur européen d'ordinateurs personnels. (Carruth et LeBel, 1997) utilisent une simulation analytique probabiliste pour étudier la variabilité dans le traitement de fibres de bois dans l'industrie du papier afin de fournir des informations pour optimiser l'utilisation de la capacité d'exploitation forestière. (Van der Vorst et al., 2000) utilisent la simulation à événements discrets pour aider la prise de décision de la refonte de la chaîne d'approvisionnement de produits alimentaires réfrigérés aux Pays-Bas. Dans la même optique, (Jansen et al., 2001) ont développé un modèle de simulation d'un système de distribution dans une chaîne de restauration. (Levy, 1997) simule une chaîne internationale d'approvisionnement d'un constructeur d'ordinateurs.

(Person et Olhager, 2002), (Kleijnen et Smits, 2003) ont simulé différentes configurations de chaînes logistiques dans l'industrie des téléphones mobiles (*Ericsson Mobile*). On peut citer également : l'industrie aérospatiale (Bilczo et al., 2003), l'industrie alimentaire (Reiner and Trcka, 2004), l'industrie de l'habillement (Al-Zubaidi et Tyler, 2004), l'industrie électronique et des semi-conducteurs (Bagchi et al., 1998), (Ingalls et Kasales, 1999) et (Sarjoughian et al., 2005) et l'industrie automobile (Mendy et Giard, 2006).

III.3.4. L'amplification de la demande

La variabilité de la demande augmente à mesure que la demande se déplace en amont dans la chaîne logistique. Cette amplification des fluctuations de la demande de l'aval vers l'amont est connue sous le nom *Bullwhip Effect* (Lee et al, 1997). Des études de simulation ont été réalisées afin d'analyser les causes et les conséquences de l'effet coup de fouet. (Bhaskaran, 1998) indique que l'instabilité des ordonnancements de production est constamment amplifiée de l'aval en amont dans la chaîne d'approvisionnement et le contrôle de cette amplification est essentielle pour une bonne gestion de la chaîne logistique.

(Kumar et al., 1993), (Feigin et al, 1996) et (Maloni et Benton, 1997) ont utilisé la simulation pour évaluer les effets de différentes stratégies logistiques sur l'amplification de la demande.

Une expérience menée par (Van Donselaar et al., 2001) montre qu'une planification plus stable peut se faire en utilisant l'information sur la demande finale au lieu de se contenter de celle fournie par le client aval immédiat. Selon (Wikner et al., 1991), supprimer un ou plusieurs échelons en regroupant les centres de distribution peut améliorer la chaîne d'approvisionnement. (Wilding, 1998) explique que les petites

modifications apportées pour optimiser un échelon de la chaîne d'approvisionnement peuvent se traduire par des changements dans d'autres parties de la chaîne et créer une instabilité dans les plannings de production et distribution. Pour réduire « ce chaos », la demande des clients devrait être communiquée le plus en amont possible. (Taylor, 1999) préconise un contrôle en interne de chaque échelon de la chaîne, car la variabilité de la demande est dû à la dynamique interne de la chaîne. (Anderson et al, 1997) indiquent que dans l'industrie mécanique, l'amplification et la volatilité de la demande réduisent considérablement la productivité. Toutefois, les entreprises qui utilisent des prévisions fines de la demande réussissent à induire une demande plus stable et par là des gains de productivité. (Towill et McCullen, 1999) montrent que l'atténuation de l'effet coup de fouet peut se réaliser en suivant quatre mécanismes, à savoir : un système de contrôle des flux, la réduction des cycles, la transparence de l'information et la réduction du nombre d'échelons dans la chaîne.

III.3.5. La coordination et le partage d'information

Beaucoup d'études ont utilisé la simulation pour déterminer les effets de partage de l'information pour réduire les délais et les retards de livraison. Des études ont démontré les avantages obtenus grâce à la collaboration entre les acteurs de la chaîne et en particulier par l'échange de l'information liée à la demande du marché (Towill et al., 1992), (Towill, 1996) et (Mason-Jones et Towill, 1999). Plus précisément, (Evans et al., 1995) affirment que l'intégration de la chaîne logistique peut être améliorée par le partage des informations et ceci permet la réduction des stocks et donc une baisse de besoin en fonds de roulement.

Une étude de simulation conduite par (Closs et al., 1998) montre la possibilité de baisse de stocks et d'amélioration du service grâce au partage de l'information. En outre, (Mason-Jones et Towill, 1998) indiquent que le partage d'information réduit l'amplification de la demande et améliore l'utilisation des capacités de production. Selon (De Souza et al., 2000), la réduction des délais de transfert d'information, plutôt que de raccourcir les cycles de production, peut amener une plus grande dynamique d'amélioration de la performance et du niveau de service.

(Swaminathan, et al., 1995) ont analysé par simulation l'effet du partage de l'information sur les ordres disponibles (available-to-promise) entre fournisseurs et clients. Ils ont montré que le partage d'information sur les capacités disponibles des fournisseurs est bénéfique pour l'ensemble de la chaîne, mais dans le cas où le coût de ce partage d'information est négligeable, le fournisseur le plus cher bénéficie peu de ce partage d'information. Lorsque le coût de l'information est élevé, le producteur a intérêt à partager l'information avec un nombre limité de fournisseurs.

Cependant, (Zhao et Xie, 2002) notent que si le partage de l'information peut apporter d'énormes avantages aux fournisseurs, les détaillants peuvent être pénalisés à cause des variations cycliques de la demande et des erreurs de prévisions qu'ils rencontrent. Ceci a une incidence importante sur le montant des économies de coûts qui profitent plus aux fournisseurs disposant d'une information sur la demande.

III.3.6. La mise en œuvre de stratégies

La simulation peut également être utilisée pour évaluer l'efficacité des différentes stratégies logistiques. (Lehtonen, 1995) indiquent que les excédents de capacité sont nécessaires pour fournir un service rapide aux clients. (Helo, 2000) recommande

d'utiliser une capacité flexible pour couvrir les fluctuations de la demande du marché. (Holmstrom, 1997) et (Johnson et Anderson, 2000) ont étudié des stratégies logistiques qui consistent à retarder les dernières opérations de gamme pour avoir des gains en délai et en réactivité. La gestion partagée des approvisionnements est aussi une stratégie efficace pour la réduction des coûts logistiques (Waller et al., 1999). (Tagaras, 1999) a analysé la minimisation des risques par le biais de transbordements internes. (Banerjee et al., 2003) ont simulé des mécanismes de gestion et de contrôle des ordres de transport pour améliorer le service à la clientèle.

(Camisullis et Giard, 2008) utilisent la simulation pour étudier les problèmes de charge des lignes d'assemblage de produits de masses fortement diversifiés. Ils analysent particulièrement l'impact des politiques de lotissement et l'utilisation de l'information transmise par le constructeur et son fournisseur.

(Ganeshan et al., 2001) ont étudié la sensibilité de la performance de la chaîne logistique à trois paramètres de gestion : l'erreur de prévisions, le mode de communication entre les échelons et la fréquence de planification.

(Enns et Suwanruji, 2006) ont comparé différentes stratégies de reconstituer des stocks sous différents profils de la demande et de niveau d'incertitude en prenant en compte les contraintes sur les capacités de production.

(Parrod et al., 2007) ont développé un outil de simulation de stratégies de coopération entre une entreprise focale et un sous-traitant qui gère une ressource critique, dans un contexte de gestion de projet logistique. Ils ont identifié les paramètres de gestion impactant la performance de la chaîne. L'outil a été testé dans un projet de coopération entre un centre d'essais aérodynamiques et des industriels, et des recommandations ont été proposées pour aider les managers à mettre en œuvre une stratégie de coopération pour mieux gérer l'impact des décisions sur les risques et les délais de livraison du projet.

III.4. Différents formalismes de simulation

(Kleijnen, 2005) a réalisé une synthèse des modèles de simulation des chaînes logistiques et a considéré quatre types de modèles de simulation : les tableurs, la dynamique des systèmes (system dynamics ou continuous simulation), les jeux d'entreprises et la simulation à événements discrets.

III.4.1.1. Tableurs

La modélisation des processus d'entreprise est devenue populaire avec la mise en place de logiciel de feuilles de calcul ou tableurs (Plane, 1997), (Powell, 1997). Un exemple simple d'une équation qui est facile à programmer grâce à une feuille de calcul est la suivante : nouveau stock = ancien stock + production – ventes.

Les tableurs ont été utilisés pour mettre en œuvre les calculateurs MRP qui sont un important outil de gestion logistique (Sounderpandian, 1989). Un modèle de feuille de calcul pour la mise en place de gestion partagée des approvisionnements (VMI) est présenté par (Disney et Towill, 2003). Toutefois, ce type de simulation est souvent trop simple et peu réaliste (Kleijnen, 2005).

Ces méthodes sont statiques. Elles sont également déterministes (ne prennent pas en compte la variabilité des paramètres). Il est possible, toutefois, d'effectuer une modélisation stochastique avec certains outils (Winston, 1996). En dépit de cette possibilité, ce type d'analyse statique n'est pas très adapté à la simulation des systèmes complexes tels que les chaînes logistiques (Chwif et Barretto, 2002).

III.4.1.2. Dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes est une approche d'analyse et de résolution de problèmes complexes. Cette approche est issue des travaux de (Forrester, 1961), dans le domaine du contrôle et de gestion des systèmes industriels. C'est un outil informatisé basé sur des boucles de rétroaction et de processus temporels permettant de comprendre la dynamique de systèmes physiques, sociaux, organisationnels, etc.

La dynamique des systèmes est: *“the study of the information feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies), and time delays (in decision and actions) interact to influence the success of the enterprise. It treats the interactions between the flows of information, money, orders, materials, personnel, and capital equipment in a company, an industry, or a national economy...”*

Parmi les études réalisées avec cette approche, on peut citer (Higuchi et Troutt, 2004), qui utilisent la dynamique des systèmes pour modéliser la chaîne logistique d'un fabricant de jouets. (Spengler et Schroter, 2003) utilisent également cette approche pour étudier une chaîne d'approvisionnement de pièces de rechange. (Ashayeri et Keij, 1998) ont modélisé un réseau de distribution.

D'un point de vue méthodologique, la dynamique des systèmes définit six types de flux en entreprise, à savoir : fournitures, marchandises, personnel, argent, commandes et information. Le principe est que la gestion de production est réalisée par le contrôle des variations de taux (par exemple, taux de production), qui modifient les flux, et donc les niveaux de stocks. Ce principe de rétroaction permet de comparer une valeur cible avec sa réalisation, et en cas de déviation, le gestionnaire doit prendre les mesures correctives. (Sterman, 1989) donne un modèle générique de gestion de stock en se basant sur des mécanismes de la dynamique des systèmes avec une heuristique de gestion des ordres (figure III.3).

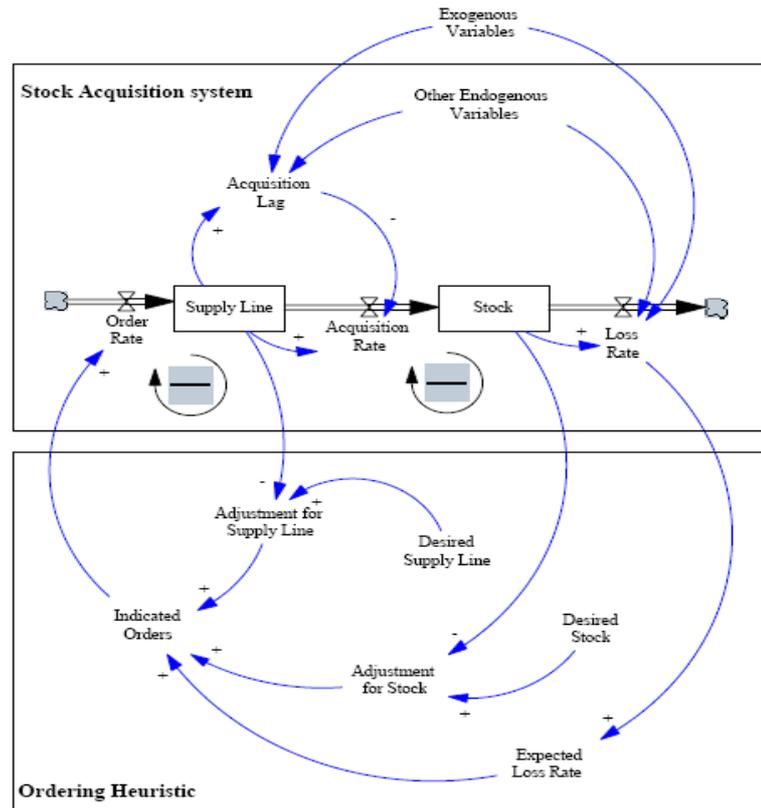


Figure III.3. Generic Stock Management System (Sterman, 1989)

Pour (Bel et al., 2007), ces modèles sont centrés sur les comportements dynamiques. Leur intérêt réside dans l'affranchissement des contingences ou des particularités par l'abstraction de modélisation ainsi que la recherche des équilibres globaux et des conditions de leur stabilité. Cependant, dans ces modèles, il est impossible de différencier les entités individuelles modélisées, et le pilotage est focalisé sur des variations de débits ce qui est une abstraction forte des politiques de gestion

Selon (Mak, 1992), ce genre de simulation est plus adapté à des aspects stratégiques de la gestion de la chaîne logistique et ne permet pas d'aborder des éléments opérationnels. Ces modèles ne permettent pas non plus la prise en compte des aspects stochastiques et restent donc inadéquats pour analyser l'impact des aléas sur le système (par exemple, les pannes, l'arrivée aléatoire de commandes, etc.).

III.4.1.3. Jeux d'entreprises

Les jeux d'entreprises répondent à la problématique de prise en compte du comportement du décideur dans la simulation du fonctionnement de système de production. C'est une simulation interactive utilisée à la fois pour des objectifs éducatifs et de recherche. Dans le premier domaine, on fait référence aux travaux de (Riis, et al., 2000) et (Ten Wolde, 2000). Pour des problématiques de recherche, (Kleijnen, 1980) utilise un jeu d'entreprise pour quantifier les effets de l'exactitude de l'information sur le retour sur investissement (ROI).

Les jeux stratégiques sont des jeux avec plusieurs équipes de joueurs qui représentent des entreprises en concurrence. Ces joueurs interagissent avec le modèle de simulation. Un exemple célèbre est le *beer game*, qui illustre l'effet coup de fouet, voir (Simchi-Levi

et Kaminsky, 2003), (Sodhi, 2001) et (Sternan, 2000). Les jeux opérationnels sont des jeux à une seule équipe composée d'un ou plusieurs joueurs, qui interagissent avec la modèle de simulation soit au cours de plusieurs cycles ou en temps réel (ce sont des jeux contre la nature). Les jeux de formation en planification de production sont des exemples de ces jeux.

III.4.1.4. Simulation à Evénements Discrets

La simulation à événements discrets est l'une des techniques de modélisation les plus utilisées pour l'étude des systèmes industriels. Depuis l'apparition de la simulation informatique dans les années 1950, le développement de cette technique n'a cessé de progresser et reste parmi les meilleurs outils d'étude des chaînes logistiques (Robinson, 2005).

L'approche par événements se base sur :

- L'identification des différents types d'événements possibles au cours de la durée de vie du système
- La description de la logique de fonctionnement entre événements : déterminer les changements d'états correspondant à chaque événement et les événements qui en résultent.

Bon nombre d'outils de simulation par événements discrets utilisent une approche par processus. Cela permet de présenter des séquences d'événements ou des activités similaires pour un type d'objet, défini sous forme de processus. La simulation permet de décrire le fonctionnement du système complet (macro-représentations) et de définir les conflits et la synchronisation entre processus qui sont gérés par des règles d'interruption et de reprise.

Un modèle de simulation discret est composé de :

- Système : ensemble de Processus traversés par des Entités
- Entités : caractéristiques uniques d'objets grâce à des Attributs
- Processus : séquence d'activités gérées par des Ressources agissant sur les entités

La simulation est une approche complexe, qui se fait en plusieurs étapes. C'est un processus itératif (Kelton, 2000). Les principales étapes d'un processus de simulation peuvent se résumer à : la modélisation conceptuelle, le modèle de codage, l'expérimentation et la mise en œuvre (Robinson, 2006). Dans chaque étape, et entre les étapes, il est essentiel de prendre les mesures appropriées de contrôle, de validation et de vérification afin de s'assurer que le système modélisé représente adéquatement le comportement du système réel ou proposé. Une fois le modèle validé, un jeu de données permet de construire des scénarios pour réaliser les campagnes de simulation. Ces dernières peuvent être définies par des plans d'expérience pour délimiter le champ d'analyse et effectuer des analyses de sensibilité du modèle aux paramètres de commande jugés prépondérants (Tannock et al., 2007).

La simulation à événements discrets est beaucoup utilisée pour explorer le potentiel d'amélioration des chaînes logistiques (reconfiguration, réduction des temps de cycle, amélioration du rendement, etc.). Contrairement à la simulation d'un atelier, à l'échelle de la chaîne logistique, les petites améliorations que l'on peut proposer grâce à la simulation peuvent être d'un grand bénéfice pour l'ensemble des acteurs.

Ces méthodes de modélisation sont très appropriées pour des systèmes caractérisés par une grande variabilité et des aléas, des relations complexes entre partenaires, un besoin d'optimisation des ressources en les adaptant à la demande du marché.

Une grande variété d'outils de simulation spécifiques ou non à la gestion de la chaîne logistique existent sur le marché (Archibald et al., 1999). Certains de ces logiciels permettent une modélisation sous la même plateforme de différentes configurations de chaînes logistiques, d'autres proposent un environnement distribué et flexible qui peut être géré par plusieurs interfaces (Banks et Buckley, 2002).

Parmi les logiciels généralistes de simulation à événements discrets, ARENA (*Rockwell Software*) est parmi les plus utilisés. Dans une étude de benchmark des outils de simulation rapportée par (Tewoldeberhan et al., 2002) une liste d'outils est évaluée selon les critères suivants :

- Vendeur : support de maintenance et documentation
- Développement du modèle et input : processus, codage, librairie de composants réutilisables, les conditions de routage, lois probabilistes disponibles, gestion des files d'attente, documentation automatique, etc.
- Exécution : les runs et leurs modes d'initialisation et d'exécution, interaction avec l'utilisateur, conversions des unités de mesure, etc.
- Couplage simulation - optimisation
- Animation : graphiques et icônes d'animation
- Tests et efficacité : outils de validation et vérification, traçabilité, rapidité de simulation et taille des modèles traités
- Output : rapports de simulation et intégration avec des interfaces graphiques
- Utilisateur : compétence requise et coût
- Design des expérimentations pour l'aide à la modélisation

Ces critères sont pondérés (weight dans le tableau III.1). Il apparaît qu'ARENA est le premier logiciel dans la liste ce qui justifie son utilisation dans beaucoup d'études de simulation.

Criteria	Weight	AnyLogic	Arena	AutoMod	Enterprise Dynamics	Extend	Flexsim	ProModel	Quest	Simul8	Witness
Vendor	5.6	1	3	2.5	2	2.67	2	2	3	2.33	3
Model develop. & input	9.5	3	2.71	2.3	2.57	2.71	2.7	2	3	2.43	2.5
Simulation & optimization engine	8	2.5	2.5	2.7	2.6	2.5	2.5	2.7	2.5	2.5	2.5
Execution	7.6	2	2	2	2.33	2.33	2	2	2.5	2	2
Animation	6.3	2.5	2.67	3	2.33	1.33	3	2.67	3	1	3
Testing & efficiency	7.6	2	2.38	2.5	2.38	2.5	1.5	2	2.5	1.75	2
Output	6.6	2.5	2.33	2	1.67	2.33	2.7	2	2	2.67	2
Experimental design	5.9	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2
User	5.6	1	2	2	1.5	2.5	1.5	2	1	3	2.5
Total		124.2	156.9	138.8	138.1	147.0	140.4	141.1	152.8	137.2	148.9
Rank			1			4		5	2		3

Tableau III.1. Simulation package evaluation scores (Tewoldeberhan et al., 2002)

III.5. Discussion

Il ressort de cet état de l'art sur les méthodes de modélisation des chaînes logistiques que les méthodes d'optimisation, malgré leur importance dans la mise en place de solutions optimales pour le pilotage et le dimensionnement des systèmes logistiques, ont des limites évidentes quant à la prise en compte de phénomènes aléatoires, et quant à la représentation de l'incertitude et de la complexité des processus logistiques. La simulation, et en particulier la simulation à événements discrets, est aujourd'hui un outil adéquat pour modéliser, étudier le comportement et évaluer les performances des chaînes logistiques. Ces deux approches ne sont pas exclusives. Il est possible de coupler la simulation à l'optimisation et les outils informatiques actuels permettent cette intégration.

Les études de modélisation et de simulation des chaînes logistiques suivent une démarche commune qui consiste à traduire un système réel, ou proposé en un modèle conceptuel et puis le modéliser sous un logiciel de simulation (dédié ou générique). Ce dernier va permettre de reproduire la dynamique du système en peu de temps, ce qui permettra d'évaluer certains critères et de déceler les problèmes potentiels inhérents au design et/ou pilotage de la chaîne logistique. Notons néanmoins, qu'une étude de simulation passe par une phase de collecte et de validation des données (input) et cette phase est très consommatrice de temps et potentiellement source d'erreurs de design de l'expérimentation. Il faut de plus collecter des données venant de différentes sources car une chaîne logistique à pilotage distribué est gérée par une multitude d'acteurs de différentes organisations. Si l'on ajoute à cela le raccourcissement de la durée des projets logistiques, il est alors préférable et judicieux d'anticiper les problèmes par des études en laboratoire (*in vitro*). La simulation sert alors à étudier les tendances globales de différentes configurations et stratégies logistiques, à déceler les leviers d'action pour l'amélioration de leurs performances et à mettre en place des feuilles de routes (guides méthodologiques).

Les résultats de simulation sont alors à contextualiser pour diagnostiquer un problème réel sans repasser par un travail de simulation ce qui va permettre un gain de temps et d'argent. Pour que des études de simulation soit parlantes aux gestionnaires, il faut évidemment qu'elles mesurent des choses concrètes, c'est-à-dire qu'elles évaluent des indicateurs de performance adéquats permettant d'avoir une image complète de ce qui se passe si telle ou telle stratégie est appliquée, de façon à agir par la suite pour améliorer la performance du système.

III.6. Evaluation de la performance d'une chaîne logistique

III.6.1. Introduction

Selon (Lambert et Pohlen, 2001), plusieurs facteurs contribuent à la spécificité des problématiques d'évaluation de la performance des chaînes logistiques. Parmi ces facteurs :

- L'absence de mesures globales qui traduisent la performance de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement

- L'obligation d'aller au-delà des indicateurs internes à l'entreprise et de passer vers une vision globale de la performance
- La nécessité de déterminer les relations entre les performances locales des entreprises et la performance résultante
- La complexité de gestion de la chaîne d'approvisionnement
- La nécessité d'aligner les systèmes de pilotage de la performance et de mettre en œuvre des stratégies de partage d'information pour atteindre des objectifs communs
- La nécessité d'un bon partage des bénéfices et des pertes entre les partenaires de la chaîne
- La nécessité de définir les leviers permettant à la chaîne d'avoir des avantages concurrentiels
- L'objectif d'encourager la coopération dans le comportement et les fonctions de chaque maillon de la chaîne

Beaucoup d'entreprises se tournent vers l'amélioration continue de leur performance en s'appuyant sur les outils de gestion de la chaîne logistique, mais peu d'entre elles ont réussi à optimiser leur chaîne d'approvisionnement du fait du manque d'un système de pilotage de la performance capable d'intégrer les éléments d'amélioration de l'efficacité et de l'efficience de la chaîne (Gunasekaran et al., 2004).

(Lee et Billington, 1992) ont souligné que les entreprises d'une chaîne logistique ne peuvent pas maximiser leurs efficacités si chacun poursuit ses objectifs de façon autonome. Ils soulignent les limites et incohérences des mesures de performance existantes. Les mesures devraient en effet être compréhensibles par tous les membres de la chaîne tout en assurant un risque minimal d'erreurs et de manipulation (Schroeder et al., 1986).

III.6.2. Indicateurs de performance logistique

(Chan et Qi, 2003) donnent un certain nombre de métriques pour évaluer la performance d'une chaîne logistique. Ils classifient ces indicateurs selon les processus suivants :

- l'approvisionnement : coûts, fiabilité et flexibilité du processus de livraison des fournisseurs
- la logistique amont : coût, productivité et flexibilité des transports
- la production : qualité, coûts de production, efficience, flexibilité et productivité des moyens de production
- logistique aval : coûts des entrepôts, turnover des stocks, capacité de stockage, taux d'utilisation des moyens de manutention
- marketing et ventes : temps de réponse aux commandes, taux de service, flexibilité des ordres de livraison, fiabilité des livraisons

La figure III.4 illustre ce système d'indicateurs de performance.

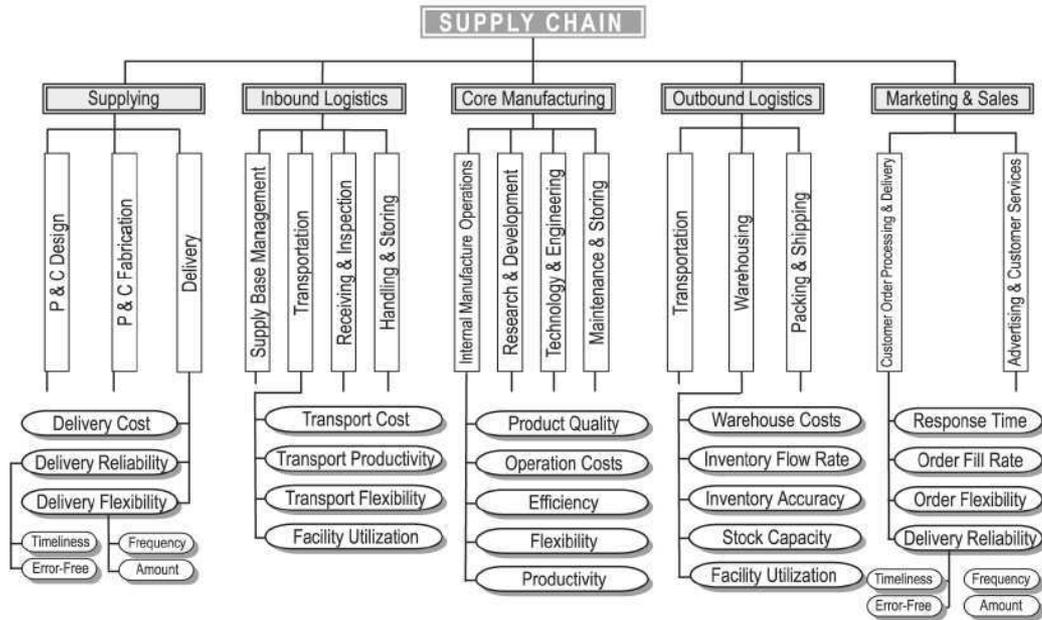


Figure III.4. Supply chain performance system (Chan et Qi, 2003)

Dans la même optique, (Gunasekaran et al., 2001) proposent une grille d’analyse de la performance logistique en distinguant les métriques à utiliser sur chacune des parties de processus à savoir : planification, approvisionnement, production, livraison et service commercial. La figure III.5 résume les différents indicateurs proposés.

<ul style="list-style-type: none"> -Product development cycle time -Order entry methods -Total cycle time -Accuracy of forecasting techniques -Total cash flow time 	<ul style="list-style-type: none"> -Supplier interest in developing relationship -Supplier delivery performance -Supplier cost saving initiatives -Supplier lead time against industry norm -Supplier prancing against market 	<ul style="list-style-type: none"> -Manufacturing cost -Capacity utilization -Economic order quantity -Effectiveness of master production schedule -Production cycle time 	<ul style="list-style-type: none"> -Delivery lead time -Number of faultless deliveries -effectiveness of delivery invoice methods -Information richness in carrying out delivery 	<ul style="list-style-type: none"> -Flexibility to meet particular customer needs -Customer query time
↓	↓	↓	↓	↓
Plan Performance	Source Performance	Production performance	Delivery performance	Customer service and satisfaction
↑	↑	↑	↑	↑
<ul style="list-style-type: none"> -Range of product and services -Net profit vs productivity ratio -Order lead time -Information carrying cost -Rate of return on investment 	<ul style="list-style-type: none"> -Supplier booking in procedures -Achievement of defect free deliveries -Mutual assistance in solving problems -Mutual ability to respond to Quality problems -Purchase order cycle time 	<ul style="list-style-type: none"> Inventory level as -Incoming stock -Work-in-progress -Finished goods -Scrap, waste -Inventory in transit 	<ul style="list-style-type: none"> -Response to number of urgent deliveries -Total distribution cost 	<ul style="list-style-type: none"> -Level of customer perceived Value of product

Figure III.5. Performance metrics for supply chain management (Gunasekaran et al., 2001)

(Gunasekaran et al., 2004) proposent un système d’évaluation de performance basé sur le modèle SCOR, et qui définit les indicateurs suivant les processus de base du modèle (Plan, Source, Make et Deliver) et les trois niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Une trentaine d’indicateurs de performance sont fournis (tableau III.2).

Supply chain activity/process	Strategic	Tactical	Operational
Plan	Level of customer perceived value of product, Variances against budget, Order lead time, Information processing cost, Net profit Vs productivity ratio, Total cycle time, Total cash flow time, Product development cycle time	Customer query time, Product development cycle time, Accuracy of forecasting techniques, Planning process cycle time, Order entry methods, Human resource productivity	Order entry methods, Human resource productivity
Source		Supplier delivery performance, supplier leadtime against industry norm, supplier pricing against market, Efficiency of purchase order cycle time, Efficiency of cash flow method, Supplier booking in procedures	Efficiency of purchase order cycle time, Supplier pricing against market
Make/Assemble	Range of products and services	Percentage of defects, Cost per operation hour, Capacity utilization, Utilization of economic order quantity	Percentage of Defects, Cost per operation hour, Human resource productivity index
Deliver	Flexibility of service system to meet customer needs, Effectiveness of enterprise distribution planning schedule	Flexibility of service system to meet customer needs, Effectiveness of enterprise distribution planning schedule, Effectiveness of delivery invoice methods, Percentage of finished goods in transit, Delivery reliability performance	Quality of delivered goods, On time delivery of goods, Effectiveness of delivery invoice methods, Number of faultless delivery notes invoiced, Percentage of urgent deliveries, Information richness in carrying out delivery, Delivery reliability performance

Tableau III.2. Supply chain performance metrics framework (Gunasekaran et al., 2004)

III.6.3. Systèmes d'indicateurs de performance logistique

(Kleijnen et Smits, 2003) ont souligné que la plupart des entreprises n'utilisent qu'un petit nombre d'indicateurs de performance. Un seul indicateur ne suffit pas, mais trop d'indicateurs rendent le pilotage de la performance difficile. Parmi les indicateurs pratiques, le niveau des stocks, le taux de service et les délais de livraison et de réponse aux commandes sont les plus utilisés.

L'un des systèmes de gestion de la performance les plus connus et celui introduit par (Kaplan et Norton, 1992) appelé *Balanced Scorecard*. C'est un tableau de bord pour piloter la performance d'une entreprise. Contrairement aux indicateurs traditionnels qui sont souvent financiers, le *Balanced Scorecard* préconise quatre dimensions de performance :

- (i) Customer : par exemple le taux de service d'une chaîne logistique
- (ii) Internal processes : encours, utilisation des ressources, ventes
- (iii) Innovation : mise au marcher de nouveaux produits
- (iv) Finance : profit, part de marché

Le modèle préconise l'utilisation d'un petit nombre d'indicateurs (pas plus de six) afin de mieux piloter les décisions et éviter les mesures redondantes.

(Beamon, 1999) a présenté certaines caractéristiques nécessaires à un système de performance, à savoir :

- Complétude : mesure des différents aspects
- Universalité : permet la comparaison sous différentes conditions opérationnelles
- Mesurabilité : données quantifiables

- Consistance : mesures adéquates avec les objectifs de l'organisation
 (Beamon, 1999) introduit un cadre d'évaluation de la performance des chaînes logistiques. Il distingue trois dimensions (figure III.6) :

- ressources
- output
- flexibilité

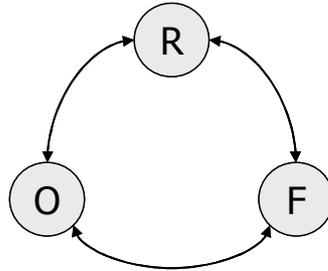


Figure III.6. The supply chain measurement system (Beamon, 1999)

Les objectifs et importance de ses dimensions sont donnés dans le tableau III.3.

Performance measure type	Goal	Purpose
Resources	High level of efficiency	Efficient resource management is critical to profitability
Output	High level of customer services	Without acceptable output customers will return to other supply chains
Flexibility	Ability to respond to a changing environment	In uncertain environment supply chains must be able to respond to change

Tableau III.3. Goals of performance measure types (Beamon, 1999)

Les ressources comprennent les stocks, le personnel, les équipements et les différentes charges d'exploitation d'une unité de production. La mesure de l'utilisation des ressources se base généralement sur des charges nominales. L'optimisation des ressources est très importante pour la bonne gestion de la chaîne logistique (peu de ressources peuvent affecter négativement le service au client et trop de ressources risquent de pénaliser la rentabilité par une augmentation des coûts de fonctionnement et d'immobilisation).

L'Output est la mesure de l'efficacité du système, c'est-à-dire sa capacité à répondre à une demande donnée dans les meilleurs délais. Cela inclut des critères telles que : nombre de produits livrés, délais de production et de livraison, taux de service (livraisons à temps sur total des commandes), satisfaction des clients, etc.

Selon (Corbett, 1992), l'efficacité ne doit pas correspondre seulement aux objectifs des entreprises mais doit tenir compte des attentes du client. Si ce dernier accorde plus d'importance à la fiabilité des livraisons, livrer vite n'apporte pas vraiment de valeur ajoutée.

La flexibilité, qui est rarement utilisée dans l'analyse de la performance des chaînes logistiques, permet de mesurer la capacité du système à tenir compte des fluctuations en termes de volume et de temps. En effet, la flexibilité est indispensable au succès de la chaîne logistique du fait des incertitudes inhérentes à son environnement. (Slack, 1991) identifie deux types de flexibilité : la flexibilité de gamme qui permet de changer rapidement d'une gamme et de volume de production à une autre et la flexibilité de réponse qui est la facilité (en termes de coût et de temps) avec laquelle les opérations peuvent être changées.

La notion de flexibilité peut être rapprochée de celle de robustesse du système. C'est-à-dire son degré de changement par rapport aux fluctuations des variables et des aléas. Les modèles de simulation permettent justement l'évaluation de cette sensibilité des modèles et sont de ce fait des outils tout à fait adaptés pour l'évaluation de la performance des chaînes logistiques et la recherche de solutions robustes (Bettonvil et al., 2003).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre ont été présentées et décrites les approches de modélisations de chaînes logistiques. Les approches d'optimisation ont des limites à cause de la non prise en considération des aspects dynamiques et aléatoires des systèmes de production et de la complexité des interdépendances des activités et processus des réseaux d'entreprises. Les démarches de simulation permettent de palier ces lacunes et proposent des outils de modélisation beaucoup plus adaptés pour l'étude du comportement d'entreprises mise en réseau.

La simulation à événements discrets est particulièrement adéquate pour ce champ d'étude. Elle permet de présenter de façon explicite les différents processus logistiques, de modéliser des événements aléatoires, de représenter les règles de pilotage et de routage et de prendre en compte différentes contraintes sur les ressources. Un outil de simulation générique (non dédié à un type de chaîne logistique) permet d'avoir un degré de liberté quant aux choix des différentes configurations et des règles de conduite du système à modéliser. Ce genre d'outil permet l'évaluation d'indicateurs de performance liés aux flux physiques, tels que les niveaux des stocks, les retards de livraison, le taux de service, l'utilisation des ressources.

Cet ensemble de caractéristiques nous a conduits au choix d'un logiciel de simulation (en l'occurrence ARENA) pour étudier différentes configurations de chaînes logistiques et évaluer leurs performances afin de déceler les dysfonctionnements éventuels et y remédier par la mise en place de mécanismes de coordination des flux.

Chapitre IV Coordination et connectivité des flux

IV.1. Introduction

Depuis les années 1980, la littérature sur la gestion de la chaîne logistique a souligné la nécessité et l'importance de la collaboration entre les acteurs de la chaîne pour satisfaire les besoins des clients dans les meilleurs délais et avec le moindre coût (Vorst et Beulens, 2002). Selon (Cooper et al., 1997), la collaboration ou coopération permet d'éviter des comportements d'optimisation locaux au détriment d'une démarche d'intégration et d'optimisation globale de l'ensemble de la chaîne.

Pour (Turban et al., 2004), la plupart des pertes de performance ont pour cause les incertitudes et aléas du système et la difficulté des partenaires à coordonner les diverses activités et processus. Ce besoin de coordination des acteurs de la chaîne logistique se décline dans la réalité par des actions plus ou moins formalisées axées sur le partage d'information, l'intégration d'applications informatiques pour piloter et orchestrer les différents processus, mais aussi par des actions purement organisationnelles de communication et de bonnes pratiques. Cependant, le besoin de coordination et de collaboration n'est pas le même selon les organisations logistiques. Cet effort de coopération a également un coût, qui peut fortement pénaliser la rentabilité d'un projet logistique.

Coordonner les flux entre deux entreprises, c'est s'assurer que l'information transite de façon fiable et rapide entre elles et que le produit sera livré dans les délais sans grande accumulation (stocks) de matières. On appellera cette capacité de l'entreprise à se connecter à ses partenaires *la connectivité des flux*. Coordonner revient alors à améliorer cette connectivité qui permet de rendre les flux plus fluides et du coup rendre le système plus performant (réduire les délais et les stocks et augmenter la réactivité de la chaîne par rapport à son marché). Ce chapitre donnera les principaux éléments de la collaboration et les types de mécanismes de coordination des chaînes logistiques. Nous définissons également le concept de connectivité et ses dimensions ainsi que le rôle de la coordination et du partage de l'information dans l'amélioration de la connectivité des flux d'un réseau logistique.

IV.2. Coordination de la chaîne logistique

IV.2.1. Définitions

Les termes coopération, collaboration et coordination sont souvent utilisés de façon interchangeable. (Monteiro et Ladet, 2001) définissent la coopération comme la coordination et la synchronisation d'opérations effectuées par différents acteurs qui ne possèdent un pouvoir de décision que sur une partie du système constitué.

Pour (Cullen, 1999), la collaboration se définit par le fait que deux entreprises partagent de l'information dans un cadre d'alliances coopératives.

Le terme coopération a également été utilisé dans différents travaux pour décrire la coordination d'activités entre les entreprises d'un réseau, comme par exemple dans (Burlat et Boucher, 2000).

Il ressort de ces définitions que les termes coopération, coordination et collaboration peuvent être vues comme des processus stratégiques de décisions communes à deux ou plusieurs organisations et qui permettent d'atteindre un objectif commun, mais aussi comme des décisions opérationnelles visant à la synchronisation d'activités à travers le partage d'information entre organisations autonomes ou centres de décisions.

(Lauras, 2004) donne une synthèse de littérature concernant les concepts de collaboration, coopération et coordination de la chaîne logistique.

(Malone et Crowston, 1994) ont développé une théorie de la coordination. Ils la définissent par "*Coordination is managing dependencies*". Pour eux, la coordination existe parce qu'il y a des dépendances entre deux organisations. Ces dépendances sont de différentes natures : partage des ressources, répartition de tâches, relation producteur/consommateur, contraintes de dépendance, transfert, utilisabilité, conception de produit, contraintes de simultanéité, tâches/sous-tâches. Le tableau IV.1 illustre ces éléments de la dépendance et donne des exemples de processus de coordination pour les gérer.

<i>Dependency</i>	<i>Examples of coordination processes for managing dependency</i>
Shared resources	"First come/first serve", priority order, budgets, managerial decision, market-like bidding
Task assignments	(same as for "Shared resources")
Producer/ consumer relationships	
Prerequisite constraints	Notification, sequencing, tracking
Transfer	Inventory management (e.g., "Just In Time", "Economic Order Quantity")
Usability	Standardization, ask users, participatory design
Design for manufacturability	Concurrent engineering
Simultaneity constraints	[Scheduling, synchronization
Task/ subtask	Goal selection, task decomposition

Tableau IV.1. *Examples of common dependencies between activities and alternative coordination processes for managing them (Malone et Crowston, 1994)*

Dans une optique de pilotage des flux de production dans une chaîne logistique, nous définissons la coordination comme étant : *la gestion des relations de dépendance entre client et fournisseur en termes de flux physiques et d'information et la synchronisation du transfert de matières entre les processus de production par le biais de points de contrôle (planning points) des flux.*

On exclut donc de notre périmètre les aspects liés aux : partage des ressources entre organisations (pas de relations d'allocation de moyens de production par une entreprise pour des tiers), affectation de tâches, design et co-conception de produits. Nous considérons également que le processus de production est complètement réparti (pas de tâches communes pour deux entreprises) sur l'ensemble des acteurs. Coordonner est dans ce sens essentiellement lié à la gestion de la relation client – fournisseur et des contraintes de synchronisation des flux de production.

IV.2.2. Modèles de coordination

(La Londe et Ginter, 2004) soulignent que s'il est bien démontré dans les travaux de recherche que le partage de l'information et la coordination des flux physiques conduisent à une meilleure performance de la chaîne logistique, les sources et le potentiel d'amélioration de la performance ainsi que la répartition des gains entre les membres de la chaîne sont des questions qui restent à étudier. (Cachon et Fisher, 2000) notent que les bénéfices de partage d'information et de coordination varient considérablement selon les études (allant de 0% à 35% du total des coûts). La disparité des résultats est liée aux différentes structures de la chaîne d'approvisionnement et aux hypothèses des problèmes étudiés. C'est pourquoi la mise en place de modèles et de démarches formalisées permettra de mieux aborder les problématiques de coordination pour pouvoir généraliser des résultats quant aux avantages de tel ou tel mécanisme de collaboration.

(Simatupang et Sridharan, 2005) considèrent que la collaboration est une démarche structurée qui consiste à mettre en œuvre des leviers d'actions de collaboration pour répondre à des objectifs stratégiques mutuellement définis par les entreprises et traduits par des indicateurs de performance. L'atteinte de ces objectifs nécessite alors la synchronisation des décisions, le partage d'information et la mise en place de mécanismes d'incitation. Ces éléments se déclinent au niveau opérationnel par des mécanismes de gestion des stocks et des opérations de production et de livraison, permettant d'atteindre une performance globale de la chaîne répondant aux objectifs prédéfinis par les partenaires. La figure IV.1 illustre ce cadre collaboratif.

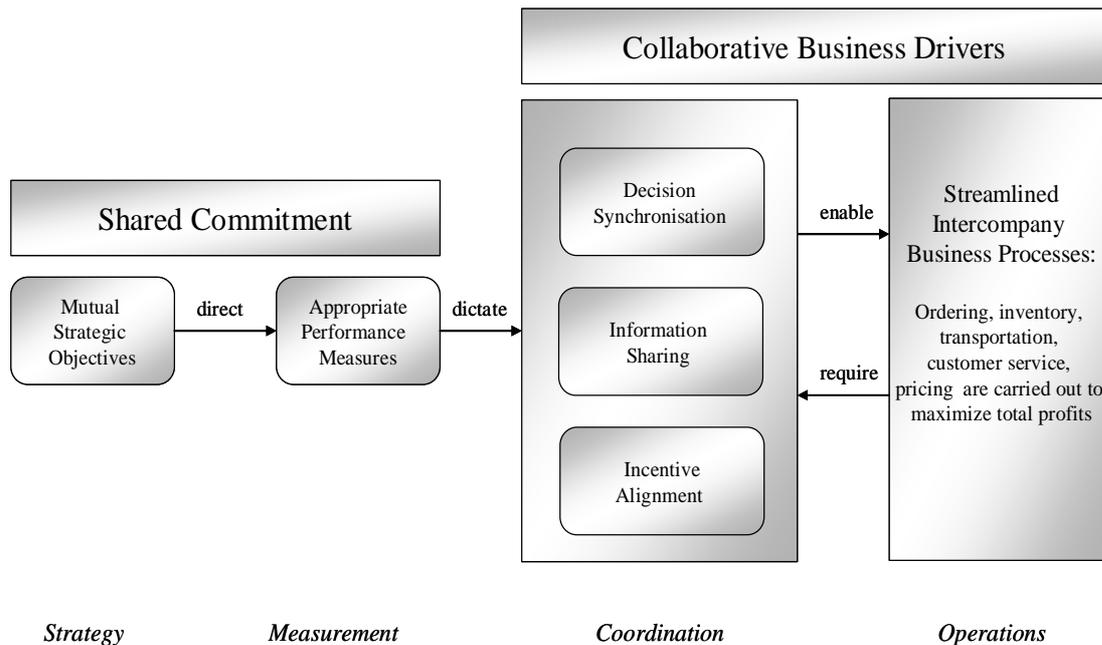


Figure IV.1. Collaboration framework (Simatupang et Sridharan, 2005)

Même si la collaboration a pour but ultime l'amélioration de la performance de la chaîne, les mécanismes de collaboration nécessaires à sa mise en œuvre sont différents selon les processus à coordonner et les acteurs impliqués. (Barratt, 2004) distingue en effet trois formes de collaboration :

- collaboration interne : organisation des processus d'approvisionnement, de production, et de livraison ;
- collaboration avec le fournisseur : planification de la production et des approvisionnements et introduction de nouveaux produits en partenariat avec les fournisseurs ;
- collaboration avec les clients : gestion de la demande, planification collaborative et distribution partagée.

Une démarche collaborative est aussi un processus d'amélioration continue et les organisations ont des degrés de maturité diverses de leur processus collaboratif. (Spekman et al., 1998) définissent un modèle de maturité de la relation client-fournisseur. Cette relation est dynamique et évolue d'une simple relation de négociation de marché basée sur les prix, vers une relation où s'effectue un choix des fournisseurs sur des contrats à long terme, puis vers une relation de coordination avec des liens informationnels établis, des échanges de données et une gestion partagée des flux et des stocks, et enfin vers une relation de collaboration qui intègre les processus de la chaîne avec un pilotage partagé via des technologies de l'information.

Un processus de collaboration est donc un ensemble d'actions ciblées (client, fournisseurs, acteurs internes, ...) qui, par un partage adéquat d'information, permet d'aligner les décisions et apporter un gain de performance par rapport à une gestion complètement décentralisée. Selon (Wacquet et al., 2001), l'ambition d'un pilotage de la chaîne logistique complètement centralisé est peu réaliste (voire utopiste) et ne peut permettre de répondre à des enjeux de flexibilité et de réactivité des organisations. La coordination doit se décliner en un ensemble de mécanismes décentralisés (définir les maillons de la chaîne sur lesquels les leviers d'action auront le plus d'efficacité). C'est

donc un compromis entre une gestion complètement décentralisée et une intégration totale du pilotage de la chaîne.

La nature des mécanismes de coordination dépend des objectifs visés, des processus à coordonner et des informations partagées entre les acteurs. Il existe de ce fait une multitude de stratégies de coordination.

IV.2.3. Typologie des mécanismes de coordination

La coordination est concrètement supportée par des mécanismes d'échange d'information, de négociation, d'ajustement de différents paramètres de gestion (prix, quantités, délais, etc.). La classification de ces mécanismes est une tâche difficile car ils dépendent fortement du contexte collaboratif et des aspects organisationnels (confiance, pouvoir de négociation, etc.). Cependant des classifications plus ou moins formalisées sont proposées. Ainsi (Sahin et Robinson, 2002) distinguent les types de coordination suivants : basés ou non sur les prix, les remises et les ristournes, les quantités flexibles et les règles d'allocation. (Fugate et al., 2006) proposent un cadre de classification plus simple en distinguant : la coordination par les prix, la coordination sans les prix et la coordination par les flux.

IV.2.3.1. La coordination par les prix

Les modèles de coordination par les prix les plus classiques sont les remises de prix sur les quantités ou rabais. Quand un client demande une plus grande quantité, des prix dégressifs sont proposés par le vendeur. Ces modèles sont utilisés notamment dans les systèmes de gestion de stocks et permettent d'éviter une sous-optimisation du système (Heide, 1994), (Gerstner et Hess, 1995), (Jorgensen et Zaccour, 2003).

Avec les travaux de (Pasternack, 1985), les politiques des ristournes sont devenues des mécanismes de coordination intéressants à étudier. Un contrat avec retour d'inventus permet à un détaillant de retourner une partie de la quantité demandée initialement à un prix préfixé et permet de gérer par exemple la saisonnalité des ventes (Sahin et Robinson, 2003). Le modèle de vendeur de journaux est très connu pour étudier ce genre de mécanismes (Zipkin, 2000).

IV.2.3.2. La coordination sans prix

Un des mécanismes simple de coordination sans prix est la politique de la quantité flexible qui permet à un vendeur d'obtenir une quantité différente que celle déjà estimée (Larivière, 1999) et cela soit en définissant une quantité minimale de commande (Bassok et Anupindi, 1997), soit en ajustant la quantité initialement demandée en fonction des prévisions de ventes (Tsay, 1999).

Un autre mécanisme consiste à allouer des quantités aux différents clients selon certaines règles, car une hausse de la demande peut rendre la capacité de production du fournisseur inférieure à la charge induite par les commandes. Par ces règles d'allocation de capacité les clients sauront quand placer leurs ordres de façon à se faire livrer dans les temps (Cachon et Larivière, 2001).

IV.2.3.3. La coordination par les flux

La coordination des flux est traitée depuis longtemps par des modèles de gestion de stocks pour la recherche de compromis entre les différentes variables de décision de la relation entre un client et son fournisseur afin de minimiser les coûts inhérents à la gestion des stocks. Cette gestion s'inscrit aujourd'hui dans des démarches collaboratives plus complexes, mais les principes de base restent les mêmes, à savoir fluidifier les flux pour réduire les stocks, tout en assurant un service au client satisfaisant. La synchronisation des processus (approvisionnement, lancement des ordres de production et de livraison) pose des problèmes de gestion et nécessite des mécanismes de régulation et l'utilisation d'une information fiable. D'où la nécessité de mettre en place des stratégies de coordination et de partage d'information pour rendre le pilotage des flux plus efficace.

Depuis les travaux de (Goyal, 1976) qui introduit la notion de modèle intégré de stocks, un grand nombre de recherches (Monahan, 1984), (Banerjee, 1986), (Lee et Rosenblatt, 1986) et (Joglekar, 1988) ont amélioré les modèles classiques de gestion de stocks en intégrant la notion de coordination entre client et fournisseur.

Les modèles de coordination s'intéressent essentiellement à la recherche de nouvelles techniques de lotissement qui permettent la réduction des coûts et des délais ou la maximisation des bénéfices pour l'ensemble des acteurs de la chaîne (Banerjee et Kim, 1995), (Aderohunmu et al., 1995), (Hill, 1997), (David et Eben-Chaime, 2003).

D'après (Banerjee et al., 2007), la réduction des coûts peut passer par l'investissement dans des technologies de l'information et l'amélioration des moyens de production et de manutention. Ces décisions sont d'ordre stratégique. Cependant, sur le moyen et court terme, des techniques de calcul de quantités de commande conjointement établies par le client et le fournisseur peuvent s'avérer tout aussi bénéfiques.

(Jammerneegg et Reiner, 2007) ont développé une étude de simulation pour comparer des configurations de chaînes logistiques en utilisant des mécanismes de coordination basés sur le positionnement de point de pénétration de commande et qui permet de gérer de différentes manières les stocks dans la chaîne. Les résultats de l'étude ont montré que le passage d'une production sur stock (MTS) à un assemblage à la commande (ATO) permet de réduire les coûts d'environ 11% avec la prise en compte des contraintes sur les capacités de production.

(Zhao et al., 2001) ont évalué l'impact des modèles de prévision de vente et des dates d'engagement de production dans une chaîne d'approvisionnement avec un fabricant à capacité finie et quatre détaillants face à une demande incertaine. La simulation a été utilisée pour étudier différents modèles de prévision de la demande et de politiques de gestion des stocks sous des contraintes de production. Cette étude a révélé que la planification avec dates d'engagement de production, utilisée comme stratégie de coordination, a une incidence significative sur les coûts totaux et les niveaux de service. Les bénéfices d'une production avec allocation de capacités sont très influencés par les modèles de prévision et par la structure de la demande. En outre, un partage d'information sur le planning et les contraintes de production est plus impactant que la transmission de prévisions de ventes.

(Boissiere et al., 2005) ont étudié les stratégies de réduction des coûts logistiques induite par la coordination des décisions lorsque deux acteurs sont impliqués dans une chaîne logistique. Une chaîne avec un producteur et un distributeur a été étudiée avec la mise en place ou pas de mécanismes de coordination dans la détermination des tailles de lot.

Ils ont alors évalué les surcoûts induits par la non coordination de la chaîne en tenant compte des coûts de stockage et de transport.

Une démarche plus élaborée de coordination des flux est le CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment). C'est un ensemble de pratiques automatisées permettant l'amélioration de la fiabilité des prévisions et un planning partagé de la production et du rechargement des stocks. Cela permet d'améliorer les performances des acteurs de la chaîne (réduction des coûts et amélioration du niveau de service).

(Boone et al., 2005) explorent les avantages du CPFR, où fabricants, distributeurs et détaillants travaillent ensemble pour planifier, prévoir et recharger les stocks. Les politiques de coordination par CPFR sont comparées à un mode de gestion classique qui est le ROP. Les auteurs ont évalué par simulation les différences de performance entre les deux modes de planification selon les critères : taux de service, temps de cycle total, niveaux des stocks et le bénéfice pour les partenaires. Les résultats ont montré que par rapport au modèle ROP, le CPFR permet d'améliorer l'ensemble de ces indicateurs de performance.

(Disney et Towill, 2003) ont comparé le comportement de l'effet coup de fouet entre une chaîne non coordonnée et une chaîne utilisant le VMI (Vendor Management Inventory). L'étude est intéressante dans le sens où l'effet coup de fouet est bien décortiqué. En effet les auteurs distinguent quatre composantes de ce phénomène :

- Demand signal processing et non-zero lead time : ce phénomène est celui connu sous le nom de "demand amplification" ou "Forrester effect". Cet effet se produit à cause des incertitudes sur la demande qui crée une sorte de demande artificielle, c'est-à-dire une vision biaisée de la demande réelle. En outre, à cause des différents délais de production et de livraison caractérisant chaque entreprise de la chaîne, la traduction de cette demande en plannings de production est faite de façon désynchronisée.
- Order batching ou "Burbidge Effect" (Burbidge, 1991) : ce phénomène est dû aux politiques de lotissement utilisées pour s'approvisionner et fabriquer. La raison de l'augmentation des tailles des lots est la recherche d'économie d'échelle pour contrer les pertes de disponibilité des ressources de production (temps de lancement et de changement de série, pannes, ...).
- Rationing and gaming ou "Houlihan Effect" (Houlihan, 1987) : à cause des ruptures d'approvisionnement, les clients ont tendance à accroître leurs commandes ou prévisions pour s'assurer d'être livrés à temps en ayant une marge de sécurité sur les quantités et les délais. Mais cela conduit à solliciter davantage la production du fournisseur, ce qui accroît les délais et donc le risque de rupture de livraison. Le client augmente alors ses stocks de sécurité et un cercle vicieux s'installe (ruptures → surdimensionnement des commandes → livraisons en retard → stocks de sécurité → demande disproportionnée → surcharge capacitaire → ruptures). Cela est décrit dans la figure IV.2.

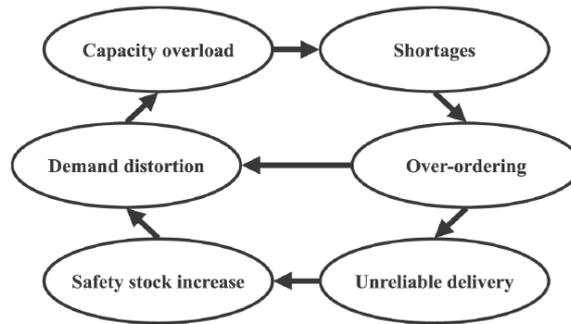


Figure IV.2. The Houlihan flywheel describing one aspect of bullwhip (Houlihan, 1987)

- La variation des prix et les promotions de vente : ces stratégies de marketing ont par fois un effet négatif sur la performance de la chaîne. En effet, l'effet des prix crée des augmentations temporaires des commandes clients. Si les prix proposés ne poussent plus à une grande consommation, la demande baisse, et cela est interprété comme un besoin d'une nouvelle promotion pour stimuler la vente. Par conséquent une fausse demande est créée et vient accentuer l'effet (Fisher et al., 1997).

Les auteurs ont analysé l'effet de la mise en place d'un mécanisme d'approvisionnement partagé (VMI) sur ces différents phénomènes. Ils ont conclu que ce mécanisme permet d'éliminer totalement les effets *Order batching* et *Rationing and gaming*. Le VMI permet également de mieux gérer les effets de prix et de promotions. Par contre l'impact du VMI sur l'effet *Forester* reste mitigé.

Quick Response (QR) se focalise sur le développement d'une collaboration entre un fournisseur et un client en réduisant le délai d'approvisionnement et en permettant au client de commander des petites quantités et en s'appuyant sur des prévisions actualisées de la demande (Lee et al., 2000).

L'ECR (Efficient Consumer Response) permet de réduire les coûts et les délais par une gestion efficace des processus de manutention, reapprovisionnement, promotions et introduction de nouveaux produits (Lohtia et al., 2004).

La stratégie de postponement (différenciation retardée) consiste à minimiser le risque et l'incertitude sur la variabilité des produits en déplaçant le point de pénétration de la commande client en aval. Assigner un ordre de fabrication ou customisation du produit à un ordre client le plus tard possible permet de réduire les encours de production et d'ajuster au mieux la production aux besoins des clients (Pagh et Cooper, 1998), (Partanen et Haapasalo, 2004).

(Brabazon, 2005) a étudié des stratégies de gestion des commandes dans un environnement de production de masse fortement diversifié, en utilisant la notion de point de pénétration de commande fluctuant conduisant à une production en VBTO (Virtual Build To Order). Cette stratégie de production, illustrée dans la figure, se caractérise par :

- Tous les produits entrent dans le pipeline (flux de produits dans la chaîne) avec des spécifications bien définies et seront donc fabriqués s'il n'y a pas de changements de spécifications par le client
- Dès qu'un produit est assigné à un client ou un distributeur, il sera disponible pour d'autres clients ou distributeurs et les ordres ne sont pas donc figés une fois pour toute
- Un client est servi soit depuis le stock de produits finis, soit en plaçant son ordre dans le pipeline ou encore en lançant un ordre à la commande (Build To Order). Le système sera alors constitué d'une partie physique (usine et dépôts) et d'une partie virtuelle (ordre planifié des commandes des clients, des distributeurs ainsi que des ordres ouverts).

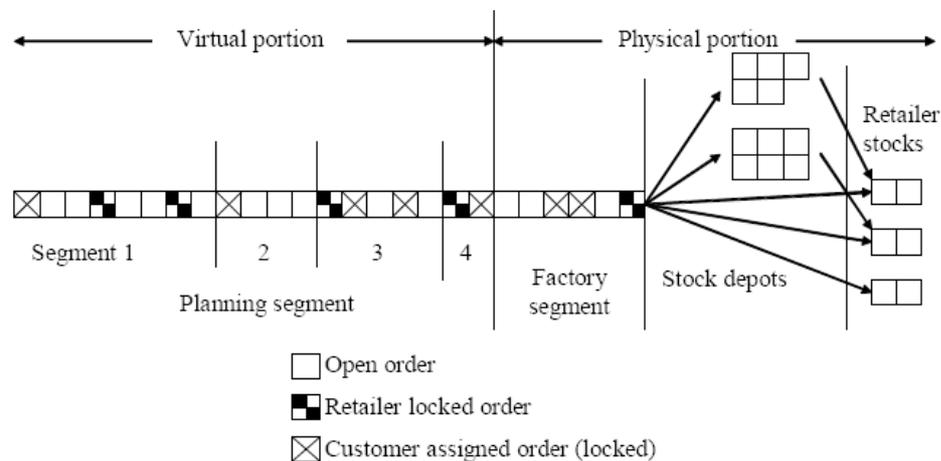


Figure IV.3. Pipeline Segments of VBTO system (Brabazon, 2005)

Des mécanismes de gestion des capacités de production des fournisseurs d'une ligne d'assemblage de produits de masse diversifiés sont également étudiés par (Mendy et Giard, 2006). Les auteurs utilisent notamment le concept du pilotage synchrone de la chaîne. Le passage à la production synchrone consiste à déplacer en amont la position du point de pénétration de commande au sein du processus de fabrication du fournisseur.

Ce point permet de tracer une frontière dans la cartographie des processus entre ceux qui peuvent travailler à la commande et ceux qui doivent produire pour stock, une frontière similaire pouvant être établie dans la nomenclature. La figure illustre cette détermination du point de pénétration de commande et le partage qu'il opère dans l'ensemble des processus et dans celui des références.

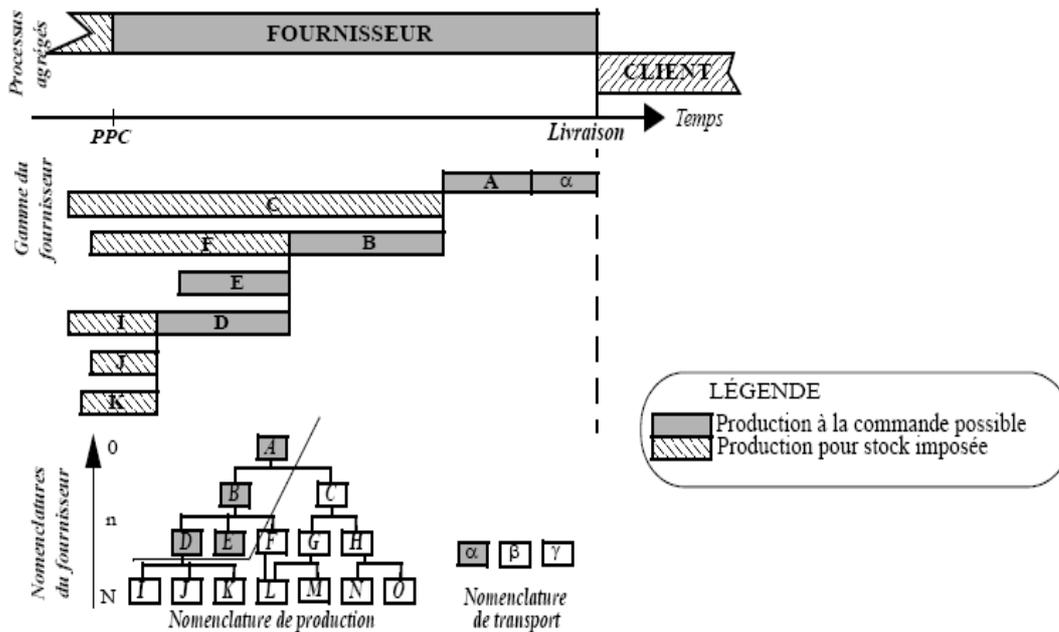


Figure IV.4. Le principe du point de pénétration de commande chez un fournisseur (Mendy et Giard, 2006)

La production synchrone se caractérise fondamentalement par une transmission de la réquisition de composants au fournisseur, plusieurs dizaines d’heures en avance au lieu de quelques heures en avance comme c’est le cas avec l’approvisionnement synchrone. Cette solution est intéressante parce que la remontée du point de pénétration de commande permet de diminuer la part de production pour stock au profit d’une production à la commande.

Les auteurs ont comparé le pilotage avec le système Kanban ou le reapprovisionnement périodique avec un algorithme de production synchrone appliqué à deux cas industriels confrontés à des problèmes de fiabilité des processus industriels. L’étude a montré qu’il était possible à la fois de réduire notablement le niveau des stocks et d’éliminer les ruptures d’approvisionnement pour le client. En outre, ces études ont montré les limites de la valeur de l’information transmise par le client : dès que la capacité de production disponible pour la période à venir est saturée, les informations relatives aux demandes postérieures à celle qui a déclenché la dernière décision de production ne présentent pas d’intérêt pour le pilotage de l’atelier.

Comme le soulignent ces études, la mise en place de mécanismes de coordination permet de gérer de façon plus efficace les flux de produits en évitant des ruptures de flux le long de la chaîne logistique. Cette capacité à garantir un transfert fluide de produits dans une chaîne (éviter des surstocks et des ruptures d’approvisionnement) est ce que nous appelons la connectivité.

IV.3. Connectivité des flux logistiques

IV.3.1. Concept de connectivité et ses dimensions

Selon (Christopher, 2000), l'une des clés de réussite de la réactivité et de l'agilité d'une chaîne logistique pour répondre aux changements rapides des marchés se situe en amont de l'organisation c'est-à-dire au niveau de la qualité des relations avec ses fournisseurs. Cet enjeu requiert trois fondamentaux : un choix d'un nombre limité de fournisseurs fiables, un partage d'information et un haut niveau de connectivité.

D'après (Wigand et al., 1997), les nouvelles stratégies logistiques comportent trois composantes : une réactivité et un alignement aux besoins du marché, une gestion du potentiel de leadership du personnel et une capacité à créer des liens en interne et avec les partenaires. Cette dernière correspond au concept de connectivité.

La connectivité peut être rapprochée du terme « *networkability* » définie par (Alt et al., 2000) comme "*networkability is the internal and external ability to cooperate as well as the ability to rapidly and efficiently establish, conduct and develop IT-supported business relationships*". La connectivité a différentes dimensions et aspects qui créent des dépendances entre les processus et activités d'une ou plusieurs organisations. Cette définition est très liée à la théorie de coordination de Crowston (*cf. § IV.2.1*).

Ainsi, pour (Alt et al., 2000), la connectivité comprend les volets suivants :

- Produits et services : changer rapidement et efficacement de produits (services) pour s'adapter aux besoins d'un partenaire et être capable d'utiliser les mêmes composants pour différentes gammes de produits ;
- Processus : coordonner et synchroniser différents processus et avoir une information rapide et fiable sur l'état des processus pour mieux les piloter ;
- Systèmes d'information : mettre en réseaux différentes applications et processus informationnel et échanger des données ;
- Personnel : travailler ensemble pour satisfaire les clients et partager des compétences ;
- Structure organisationnelle et culture de l'entreprise : être adaptable aux nouvelles exigences du marché et s'allier avec des partenaires pour réaliser des projets en partageant les mêmes objectifs dans un climat de confiance mutuelle. (Lebureau et al., 2006).

L'évaluation de la connectivité pour chacun de ses éléments peut être traduite par la mesure de l'effort (coût et temps) d'adaptation d'une entreprise. Des exemples de critères quantitatifs et qualitatifs liés à l'évaluation de la connectivité sont donnés dans le tableau IV.2.

Design object	Quantitative change criteria (time/cost)	Qualitative change criteria
Products and services	Costs and duration of combining individualized products and services or integrating additional services, e.g. payment services.	Degree of modularization with regard to products and services Degree of specificity of the adaptations Degree of multiple use of products and services
Process	Costs and duration of adapting planning or handling processes to the processes of the partners (customers/suppliers) Costs of relocating a standardized process to a specialized service Expenditure for establishing cross-company controlling	Transparency of the process for the partners Openness of information exchange Existence of a conflict management system Interorganizational monitoring of processes Coordination scenarios employed
Information system	Costs and duration of automating an IT-supported business relationship, e.g. establishing of an EDI link. Costs of data preparation or syntactical and semantical integration	Use of application and communication standards Form of IT integration (e.g. EDI, shared databases, remote log-in, ERP@Web) Security mechanisms, access rights
Employees	Costs and duration of employee replacement Time needed for building up personal basis for business relationships	Ability to look after and maintain personal networks Ability to organize oneself Degree of harmony of vision Ability to acquire information
Organizational structure	Costs and duration of a decision-making process Duration and costs of establishing new organizational structures, e.g. profit centers or a new regional company Duration and costs of establishing a new external symbiotic cooperative venture	Distribution of power Homogeneity of the organizational structures Granularity and flexibility of the organizational units Number of internal and external partners
Culture	Costs and duration of information acquisition Costs and duration of training	Distribution of benefits between the partners (reciprocity) Intensity of the exchange of knowledge and experience Lived openness Dealing with the question of trust

Tableau IV.2. Examples of criteria for networkability (Alt et al., 2000)

La théorie de la coordination est un outil utile qui peut être utilisé pour déterminer les différentes possibilités d'action des entreprises pour être mieux connectables (par exemple l'élaboration de profils de partenaires). Cette théorie a pour but la gestion des relations de dépendance entre organisations et tente d'identifier des mécanismes de régulation de ces relations. Les mécanismes de coordination sont donc des règles de gestion d'entités (ressources, produits, processus,...) afin d'améliorer leur connectivité. Le tableau IV.3 illustre cette grille de lien entre les éléments de connectivité, des mécanismes de coordination et des objectifs de connectivité. Ainsi par exemple pour atteindre des objectifs de customisation de produits, il faudra être capable d'individualiser les produits et services rapidement et au moindre coût et cela par des techniques de modularité et de standardisation des composants.

Design object	Networkability of design object	Coordination mechanisms	Objectives of networkability
Products and services	Rapid and inexpensive individualization of products or services	Modularization Standardization Digitalization	Mass customization Postponement
Process	Rapid and flexible establishment and use of appropriately coordinated processes	Process standardization Process integration	Pragmatic integration Real-time coordination Appropriate flexibility
Information system	Rapid and inexpensive establishment of an individual communications link between information systems	Communication standards and data standards System integration	Semantic integration Making information externally available High data quality Real-time data processing
Organizational structure	Flexible organizational structures which enable participation in several different networks	Virtualization Modularization Distributed responsibilities	Internal networks Stable networks Dynamic networks
Culture and employees	Cooperation-promoting company culture and employees with the capacity for internal and external cooperation	Relative openness Identification and control of goal-conflicts Trust-creating measures	Autonomy Communicative competence Information acquisition Establishing and maintaining personal networks

Tableau IV.3. Approaches for designing networkability (Alt et al, 2000)

On remarque que ce cadre d’analyse dépasse notre périmètre d’étude des liens client-fournisseur en termes de flux et propose des mécanismes de coordination plus ou moins formalisés et assez génériques. Cependant, il permet de lier la connectivité à la coordination en montrant que cette dernière constitue l’ensemble des leviers d’action visant à atteindre des objectifs de connectivité en termes de produits et processus, d’information et d’organisation.

(Huisman et Smits, 2007) proposent un modèle conceptuel dans lequel ils distinguent d’une part la connectivité a priori, et d’autre part la performance a posteriori d’un réseau constitué. Pour ces auteurs, ce sont l’échange effectif d’information et la coordination réelle qui vont compléter la connectivité a priori pour déterminer la performance finale du réseau. La figure IV.5 illustre ce modèle.

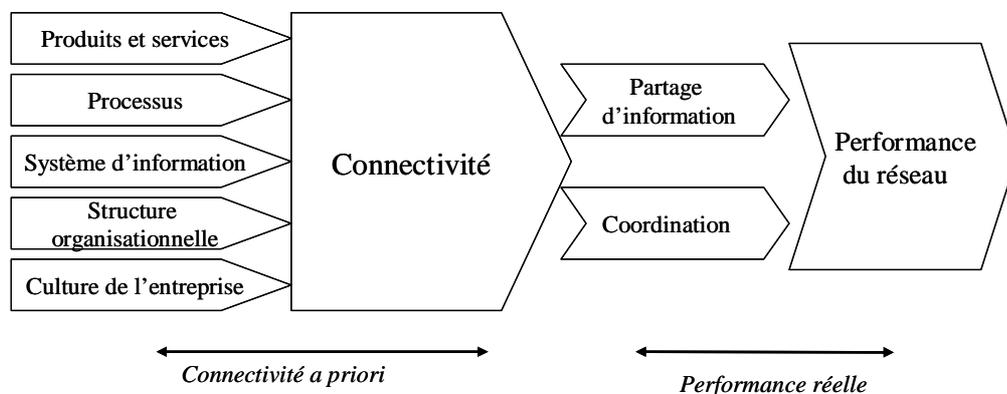


Figure IV.5. Research model linking networkability to network performance (d’après Huisman et Smits, 2007)

En nous appuyant sur ces travaux, nous considérons par la suite que la connectivité a priori d'une entreprise résulte de ses propres caractéristiques (système opérant et système de pilotage), et que la performance d'une chaîne constituée peut être améliorée par des mécanismes d'échange d'information et de coordination.

IV.4. Discussion

Dans ce chapitre, les mécanismes et stratégies de coordination de la chaîne logistique sont présentés. L'accent est notamment mis sur la possibilité de mise en place de mécanismes décentralisés (peu coûteux par rapport aux approches de collaboration et d'intégration centralisées). Un certain nombre de mécanismes peuvent être mobilisés dans une optique d'un meilleur pilotage des flux. La coordination des flux de produits passe alors par l'utilisation d'information sur la demande, les stocks, les ordres d'approvisionnement, etc. en vue d'améliorer les mécanismes de gestion des ordres de production, d'approvisionnement et de livraison. Ce pilotage amélioré des flux peut alors apporter plus de connectivité aux différents processus de la chaîne logistique. L'utilisation de prévisions sur la demande par les acteurs en amont de la chaîne, l'exploitation d'une stratégie de production ou d'assemblage à la commande, la gestion partagée des approvisionnements, sont autant de mécanismes qui peuvent améliorer la performance globale de la chaîne.

La configuration d'une chaîne dans un contexte « *on demand production* », nécessite un choix adéquat des partenaires qui vont constituer l'ensemble du processus de production. L'évaluation de l'adéquation de telle ou telle configuration logistique peut être réalisée en modélisant les processus de fabrication des entreprises et en simulant le comportement des flux de produits et cela par la mesure des niveaux de stocks, des retards éventuels de livraison au client final ainsi que l'utilisation des ressources de production.

Un maillon de la chaîne constitué de deux profils d'entreprises différents peut être une source de défaillance du fait d'une connectivité faible des flux de produits, et ce par une accumulation importante sous forme de stocks et d'encours ou par des ruptures d'approvisionnement qui peuvent causer une détérioration du taux de service perçu par le client. Coordonner la chaîne logistique revient à mettre en place des mécanismes de contrôle permettant une meilleure gestion des stocks et des processus de production afin d'accroître la connectivité des flux sans remettre totalement en cause les modes de pilotage jusque là utilisés par les entreprises de la chaîne.

PARTIE 2

MODELE DE SIMULATION DE LA CONNECTIVITE DES FLUX LOGISTIQUES

Chapitre V Méthodologie de recherche et modèle conceptuel

V.1. Introduction

Après avoir présenté et commenté l'état de l'art concernant les chaînes logistiques, leur configuration, leur modélisation et leur coordination, nous allons à présent définir notre périmètre d'étude et notre méthodologie de recherche afin de positionner nos travaux par rapport aux différentes études présentées dans les chapitres précédents.

Plusieurs études traitant de la gestion d'une chaîne logistique de production (réseau manufacturier) s'intéressent à des situations où la chaîne est pilotée par un acteur central qui est souvent une grande entreprise qui travaille avec un réseau de fournisseurs et de sous-traitants. D'autres études se situent en aval du système logistique et analysent les réseaux de distribution (détaillants, entrepôts, transporteurs). En revanche, peu d'études sont consacrées à la problématique de configuration d'un réseau manufacturier à partir d'entreprises (notamment petites et moyennes entreprises) qui, pour répondre à une opportunité du marché, doivent constituer une chaîne logistique à court et moyen terme sans changer radicalement leur processus de production et de pilotage. Dans un tel contexte, les démarches de normalisation des processus pour homogénéiser les fonctionnements des partenaires ne sont pas souhaitables. Il s'agit plutôt d'évaluer la compatibilité des différents profils d'entreprises appelées à constituer la chaîne. Cette compatibilité sera mesurée ici en termes de connectivité des flux de produits afin d'arriver à une configuration qui peut répondre à la demande du marché dans les meilleurs délais et au moindre coût.

La modélisation de ces systèmes de production se fait généralement suivant deux approches : l'approche générative et l'approche évaluative. La première approche consiste à trouver une solution optimale en se basant sur certaines variables de décisions. L'objectif étant de formaliser les relations entre ces variables (contraintes et fonction objectif) et de trouver la meilleure solution au problème d'optimisation. Cependant, devant la complexité des systèmes logistiques et la multiplicité des facteurs aléatoires, ces méthodes atteignent vite leur limite. Les méthodes évaluatives sont alors plus adaptées car elles permettent d'explorer des stratégies, de comparer des scénarios. Leur puissance réside dans le fait de permettre une modélisation plus pragmatique de la chaîne logistique en tenant compte des aléas et en modélisant de façon plus explicite les processus de production et de pilotage. La simulation est de ce fait devenue une des approches les mieux adaptées pour l'étude de la dynamique des réseaux d'entreprises.

Notre démarche de recherche est un cadre d'aide à la configuration des réseaux manufacturiers. La méthodologie consiste à modéliser un système de production en vue de son intégration dans une chaîne logistique. Le modèle, de part la généralité de ses composantes peut être instancié suivant un certain nombre d'attributs définissant un profil-type d'entreprise. Ces profils, sont ensuite mobilisés pour construire différentes configurations logistiques. Ces configurations ne se différencient pas par leur structure globale, mais par les différents processus de production (transfert, assemblage, différenciation), par le mode de gestion de chaque entreprise (produire sur stock ou à la commande, avec des flux tirés ou poussés) de la chaîne et enfin par la capacité de processus de production (modélisé par une métrique de performance opérationnelle qui est le taux de rendement synthétique). Les configurations sont ensuite mises en production pour répondre à une demande du marché. Le simulateur permet alors d'analyser le comportement et d'évaluer la performance de ces chaînes en termes de stocks, de retards de livraison et de taux d'utilisation des ressources de production. Les configurations jugées peu performantes peuvent alors être améliorées par la mise en œuvre de mécanismes de coordination des flux (Essaid et al., 2007).

Notre travail tente donc de répondre à la question : quel partenaire logistique une entreprise doit choisir de façon à créer un maillon logistique efficacement connecté (réduire les ruptures de flux et éviter des surstocks) et comment améliorer un maillon potentiellement peu connectable par des mécanismes de coordination ?

V.2. Périmètre de l'étude

Le contexte général de l'étude est celui de la gestion des flux dans les chaînes logistiques. Nous nous intéressons à la configuration d'une chaîne logistique, à sa modélisation, à l'analyse de son comportement et à sa coordination. Les aspects purement managériaux, les problématiques stratégiques du design de la chaîne (telles que localisation des sites, choix des réseaux de distribution) ainsi que les problématiques d'ordre financier (négociation et contrats basés sur les prix, gestion des risques, etc.) sortent du cadre de cette thèse.

Plus précisément, la problématique est la configuration d'un réseau manufacturier avec des partenaires de différents profils amenés à coopérer sur le moyen et court terme pour répondre à une opportunité du marché. Ce contexte fait que des changements organisationnels importants ne sont pas souhaitables. Chaque entreprise doit composer avec ses méthodes de gestion et son niveau de maturité organisationnel. L'adéquation entre les profils des maillons de la chaîne sera examinée en termes de connectivité des flux physiques. Cette propriété est considérée comme un pré requis pour établir une chaîne logistique suffisamment performante pour répondre à la demande du marché. Avant d'envisager des stratégies collaboratives et des processus d'amélioration, l'étude du comportement de la chaîne permet de détecter les maillons défaillants, de comparer sa performance à d'autres configurations et de connaître son potentiel d'amélioration et de coordination.

A partir de l'analyse de l'état de l'art sur la typologie des systèmes manufacturiers, nous avons sélectionné les éléments discriminants pour modéliser un système de production. L'ensemble des attributs caractérisant un système manufacturier sont évidemment très nombreux et interdépendants. Néanmoins, à partir des travaux de recherche pourtant sur les systèmes de production et la configuration des chaînes logistiques, nous avons pu

délimiter les critères essentiels permettant de définir un profil d'entreprise en vue de son intégration dans un réseau manufacturier.

Etant donné le choix de la simulation à événements discrets comme méthode de modélisation et d'analyse, nous avons regroupé les critères d'un profil d'entreprise suivant les axes : ressources, processus, flux, règles de gestion et données techniques, qui sont les éléments de base de la modélisation par simulation et utilisés par la plupart des logiciels génériques (en l'occurrence, nous utilisons l'outil ARENA).

Les ressources, les processus physiques et les flux physiques constituent le type du process de production. Ce dernier peut être une ligne de transfert, une ligne d'assemblage, ou un atelier de différenciation (création de variantes de produits à partir d'un composant standard).

Les règles de gestion, les processus de pilotage et les flux d'information forment le système de pilotage de l'entreprise. Un premier niveau de pilotage consiste à définir la stratégie de réponse à la demande. Le concept de point de pénétration de commande est mobilisé à ce niveau et trois stratégies sont utilisables : MTS, ATO et MTO. Le deuxième niveau de pilotage est celui de la planification des opérations. A ce niveau les flux et stocks peuvent être pilotés par des boucles de recomplètement de stocks par un modèle ROP, une gestion à flux tirés par des boucles Kanban ou encore une gestion par un ERP (simplifié) pour gérer notamment les ordres de production à la commande.

Finalement, les données techniques d'un process définissent son niveau de capacité (ou efficacité). Les données type sont les cadences, les temps de lancement et de changement de série, les taux de rebut, les fréquences et durées des pannes de machines. Une métrique très utilisée dans un grand nombre d'industrie et qui permet de synthétiser l'ensemble de ces données et le taux de rendement synthétique (Overall Equipment Effectiveness).

Nous avons défini alors quatre classes d'entreprises (A, B, C et D) selon leur niveau de capacité (valeurs du TRS et ses composantes) et avec pour chacune, un intervalle de valeurs des composantes du TRS qui correspondent à des données issues de cas industrielles dans les industries à production discrète (flow shop, job shop, semi-process). La figure V.1 illustre cette démarche de définition de profils d'entreprises.

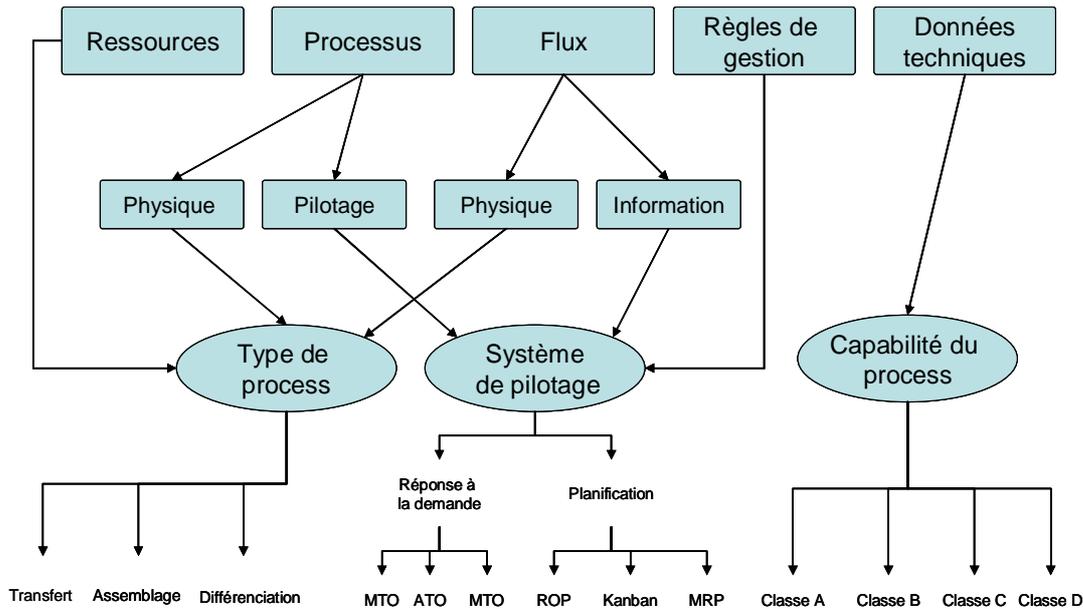


Figure V.1. Approche pour la construction des profils d'entreprises

En résumé, à partir du contexte général de recherche, nous avons délimité une problématique, à partir de celle là, un modèle conceptuel de la chaîne logistique est proposé. Ce dernier est construit à partir des profils d'entreprises décrits précédemment. Le modèle conceptuel comporte également un formalisme de mise en place de mécanismes de coordination basés sur le partage et traitement des informations logistiques remontant de l'aval de la chaîne (par exemple commandes, prévisions de la demande et contrats de type VMI).

Le modèle conceptuel est ensuite instancié par le biais d'un configurateur (feuilles Excel), lequel permet de générer des configurations de chaînes logistiques qui vont être simulées.

Le nombre de scénarios de simulation est très important vu le nombre de paramètres et de combinaisons potentielles. Nous avons donc délimité un cadre expérimental qui consiste à simuler des processus de transfert dans un environnement de production sur stock, avec une gestion en ROP en affectant à chaque échelon de la chaîne une des quatre entreprises A, B, C ou D. Un environnement d'assemblage à la commande en amont de la chaîne est également étudié (premier et deuxième échelon produisant en ATO).

V.3. Concepts et démarche

V.3.1. Connectivité de profils d'entreprises

Nous avons défini le concept de connectivité comme étant la capacité (ou potentiel) d'une entreprise à s'insérer dans une chaîne logistique avec un minimum de changements organisationnels et à constituer un maillon suffisamment "fort" dans la chaîne. Or, lorsque deux entreprises sont liées par une relation fournisseur-client, c'est la performance du couplage entre leurs systèmes opérants et leurs systèmes de pilotage qui va déterminer l'efficacité du maillon résultant :

- Premièrement, les deux processus de production des entreprises peuvent être très différents en termes d'organisation des ressources et des flux. Nous considérons de ce point de vue que la nomenclature même du produit conditionne le choix du type de processus de production et nous assurons lors de construction des profils qu'il y ait cohérence entre les deux structures. Nous limitons d'ailleurs notre expérimentation à des processus de lignes de transfert avec un ou deux flux de produits afin de simplifier les structures de produits et ne pas générer des problématiques très complexes de routage et de synchronisation de composants, ce qui n'est pas l'objet de notre étude. En revanche, nous mettons l'accent sur la différence de la capacité des process mis en configuration. Autrement dit, les deux systèmes opérants vont avoir des rendements plus ou moins différents (rendement mesuré par l'OEE).
- Deuxièmement, les deux systèmes de pilotage vont devoir échanger des flux décisionnels. La différence des règles de gestion (stocks, approvisionnement, ...) peut alors générer une désynchronisation des décisions et affecter les flux de produits et donc la connectivité du maillon. Evidemment, le niveau de capacité du process et les règles de son pilotage sont liés. Ainsi par exemple, un process avec des temps de lancement optimisés pourra travailler avec des petites quantités de commandes et peu de stocks de sécurité. Le paramétrage des différentes classes d'entreprises (*qui sera présenté au chapitre VIII*) tient compte de ces liens et assure la construction de profils d'entreprises cohérents par un calibrage adéquat de chaque classe d'entreprise. La figure V.2 illustre la configuration d'un maillon à partir de deux entreprises.

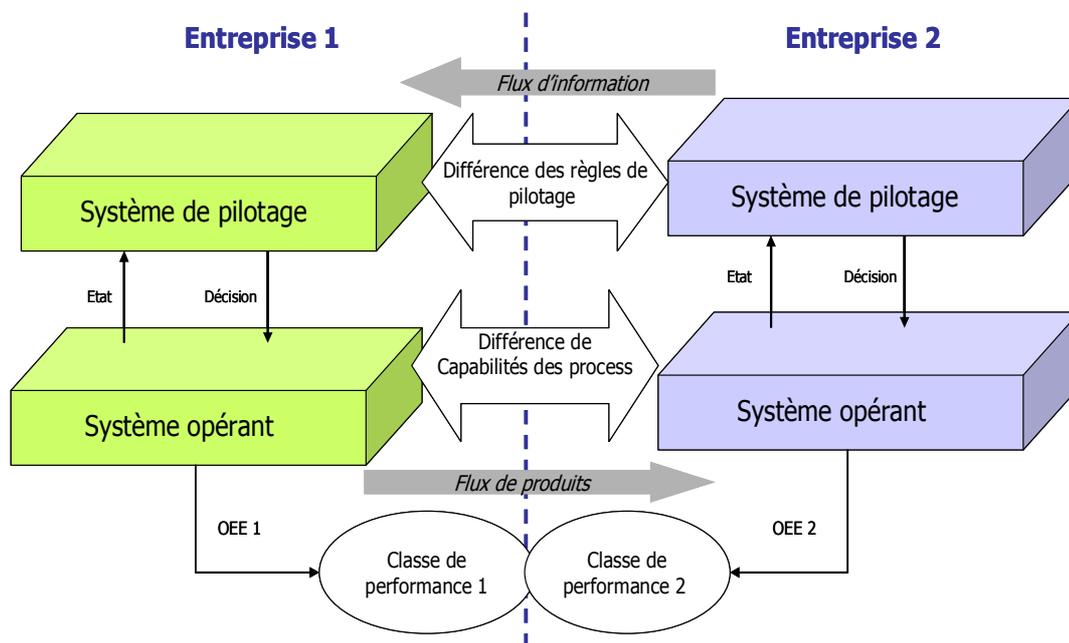


Figure V.2. Constitution d'un maillon logistique

Le modèle logistique qui sera décrit dans le prochain chapitre, est constitué de trois entreprises. Comme nous travaillons sur un modèle théorique, nous ne voulons pas le réduire à un seul maillon (deux entreprises) car la complexité de gestion d'une chaîne logistique (décisions décentralisées, mécanismes de coordination à différents niveaux,

points de pénétration de commande, etc.) oblige la prise en compte d'une structure un peu plus étendue qu'un seul maillon. En même temps, modéliser des structures beaucoup plus complexes (plusieurs entreprises à chaque échelon) ne correspond pas au contexte de cette étude qui se concentre sur une chaîne dédiée à une ligne de produit.

Pour chacun des trois échelons, est sélectionné un profil d'entreprise, c'est-à-dire, un type de processus, une stratégie de réponse à la demande, un mode de planification et un niveau de capacité de process. Une fois la configuration constituée, il s'agit d'évaluer sa connectivité par une simulation d'une demande du marché et la mesure d'indicateurs de performance (stocks, retards, utilisation des ressources). La figure V.3 illustre cette démarche.

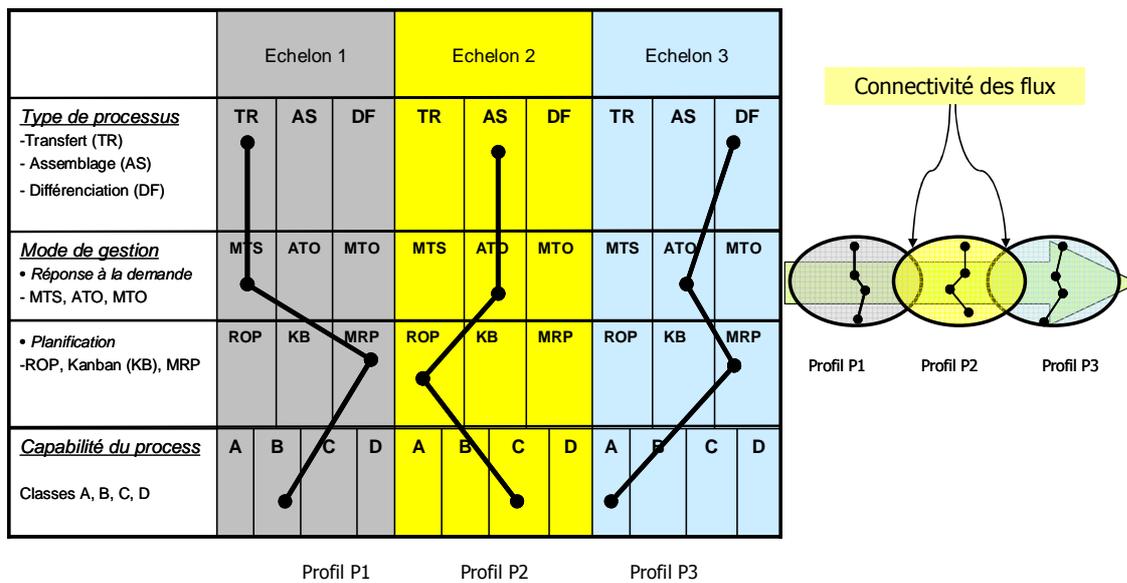


Figure V.3. Les profils d'entreprises

V.3.2. Les classes d'entreprises

Nous avons défini des classes d'entreprises suivant un indicateur de performance opérationnel, qui vient compléter le type de processus et le mode de gestion. Une classe d'entreprise correspond à un niveau de capacité des équipements de production. Le choix du taux de rendement (OEE) a pour objectifs :

- une définition claire et opérationnelle permettant de faire une classification des process sur une même base ;
- le taux de rendement est calculé sur la base des valeurs de la disponibilité (pannes, temps de lancement, arrêts induits), de la qualité (rebut) et de la performance (perte de cadence). Ces variables sont facilement identifiables dans une entreprise et permettent de ce fait une instanciation plus simple et adéquate du modèle et une application éventuelle sur un cas réel ;
- les composantes du taux de rendement permettent de calculer de façon simple l'ensemble des données techniques caractérisant le processus de fabrication. Cela permet un gain de temps quant à la récolte et traitement d'inputs de simulation, qui est en général un processus complexe et consommateur de temps.

Nous avons donc défini quatre classes de performance : A, B, C et D. Les valeurs cibles des taux composants l'OEE sont définies par rapport aux moyennes des données observées dans des cas d'études réelles. En l'occurrence nous avons les intervalles suivants :

Classe A : Entreprise très efficace : $80\% < OEE < 97\%$

Classe B : Entreprise efficace : $65\% < OEE < 79\%$

Classe C : Entreprise moyennement efficace : $50\% < OEE < 64\%$

Classe D : Entreprise peu efficace : $38\% < OEE < 49\%$

Une valeur d'OEE peut correspondre à différentes valeurs de taux de disponibilité, de qualité et de performance. Pour éviter des chevauchements entre les valeurs de ces variables pour les quatre classes, nous avons défini de la même manière que la valeur globale (OEE) des intervalles disjoints pour les trois composantes. Pour chaque classe, dix instances pour chacune des composantes sont possibles. On peut choisir aléatoirement entre ces dix instances.

Dans l'expérimentation, nous avons pris les valeurs médianes pour chaque composante. Afin d'assurer la prise en compte des variations autour de ces valeurs moyennes, nous avons utilisé des lois aléatoires (triangulaire) pour les données telles que les temps de gammes, les temps de set up et de changement de série, ...etc. Ces différents éléments de paramétrage du modèle seront décrits plus précisément dans le chapitre VII.

V.3.3. Simulation générique

L'outil de simulation est conçu pour permettre l'étude d'un grand nombre de configurations logistiques. Contrairement à certaines approches qui visent la simulation de cas réels en se focalisant sur des problématiques particulières, l'outil que nous avons développé est une démarche de simulation en laboratoire. Autrement dit, c'est un outil d'aide à la décision qui se base sur les résultats de simulation de cas génériques permettant ainsi de déduire des comportements qui peuvent constituer un guide méthodologique pour conduire des projets de configurations de chaînes logistiques réelles ou pour générer des connaissances scientifiques et pédagogiques sur la dynamique des réseaux manufacturiers.

Pour l'étude d'un cas réel, un acteur du projet logistique fournit l'ensemble des inputs pour configurer la chaîne logistique puis valide les données. Le concepteur (chercheur) compare la configuration proposée à celles déjà simulées (ou crée d'autres scénarios si nécessaire), il réalise une analyse pour bien contextualiser les résultats théoriques et restitue des recommandations que l'acteur industriel utilisera alors comme feuille de route pour son projet (voir figure V.4).

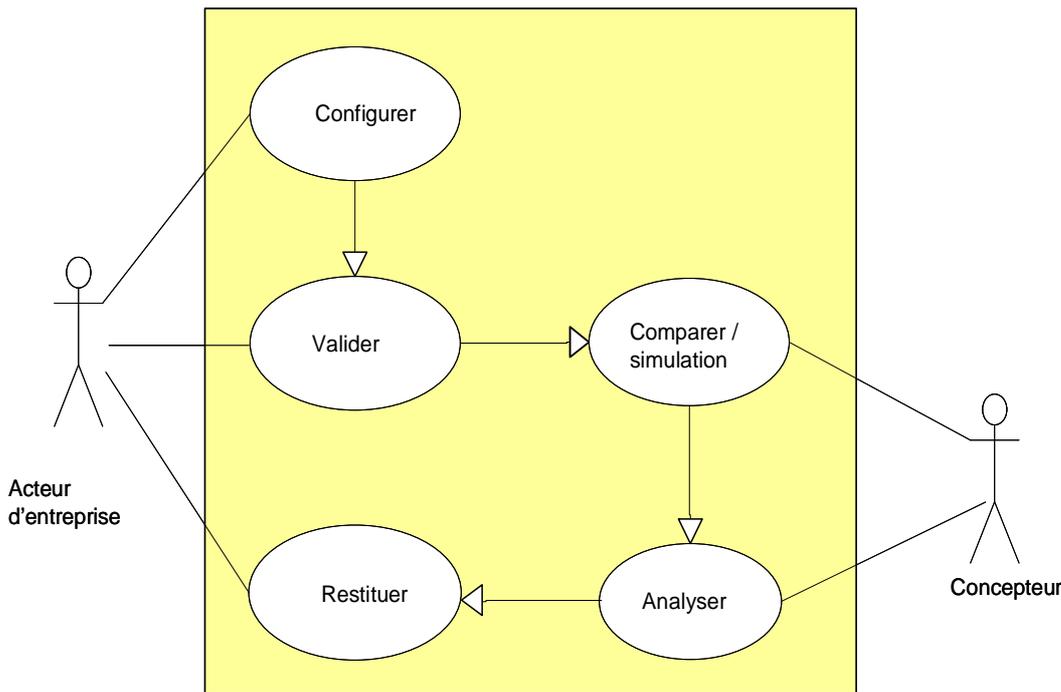


Figure V.4. Démarche d'utilisation de la simulation en laboratoire

Plus concrètement, nous avons utilisé le logiciel ARENA pour le développement du simulateur et un configurateur Excel pour la génération des scénarios. Un choix de périmètre expérimental a été choisi et une analyse statistique des résultats de simulation a été conduite. Nous expliquerons en détail l'architecture du simulateur dans les chapitres suivants.

V.4. Modèle d'une entreprise manufacturière

V.4.1. Introduction

La modélisation d'une entreprise en vue de son intégration dans une chaîne logistique nécessite le choix d'un niveau de détail de modélisation qui permet de faire un compromis entre la complexité des processus de production et de pilotage d'un côté, et la simplification qui assure la généricité et la réutilisation du modèle d'un autre côté.

L'objectif du modèle logistique que nous avons développé est de permettre la simulation de différentes configurations logistiques. Ces dernières sont définies selon : le type d'opération de production (ligne de transfert, processus d'assemblage, processus de différenciation), le niveau de capacité de ces processus (ensemble des paramètres techniques définissant le rendement du process) et enfin le système de pilotage des flux (stratégie de réponse à la demande et modes de gestion de production). En plus des aspects liés à la gestion de la chaîne (réponse à la demande, règles d'approvisionnement et livraison,...), le modèle permet la prise en compte de paramètres opérationnels (capacité des ressources, temps de lancement, pannes, niveau de qualité, ...). Ainsi, le niveau de détail choisi se situe à un degré intermédiaire entre une représentation très

macroscopique où l'ensemble du système physique est représenté par une boîte noire, et un niveau très détaillé où l'ensemble des processus et des règles de planification et d'ordonnement sont prises en compte.

La configuration de la chaîne logistique est une construction de scénarios à partir de profils d'entreprises qui constituent les échelons de la chaîne. C'est donc une démarche de modélisation flexible qui permet d'analyser un grand nombre de cas et d'évaluer leurs performances en termes de niveaux de stocks, d'utilisation des ressources et de retards de livraison.

Partant du fait que dans une entreprise, le processus de production inclut trois phases principales : l'approvisionnement, la transformation et la livraison et que la demande du client peut être gérée principalement selon les stratégies : MTO (production à la commande), ATO (assemblage à la commande) et MTS (production sur stock), alors le pilotage des flux peut s'exercer sur trois points (niveau de stockage) :

- En amont du processus de fabrication pour gérer l'approvisionnement en matières premières ;
- A un certain stade du processus de fabrication pour synchroniser les différents flux et constituer éventuellement un stock stratégique de composants appelés à être traités (différenciation, assemblage) pour répondre à une commande effective du client ;
- A la fin du processus de production pour gérer la sortie des flux de produits finis de l'entreprise vers ses clients.

Les points de pilotage des flux sont les *planning points*. Le processus de production est alors constitué de deux macro-processus séparés par un stock d'encours qui constitue un *planning point* potentiel. Les *planning points* permettent l'utilisation de la commande client à différents niveaux du processus de production et donc le choix de stratégies de production sur stocks ou à la commande.

V.4.2. Eléments de modélisation

Le modèle conceptuel comporte un système physique constitué de deux macro-processus et trois niveaux de stockage et d'un système de pilotage qui, en fonction de l'état du système (stocks, processus), et des règles de gestion, génère des décisions aux niveaux des *planning points*. La figure V.5 illustre ce modèle.

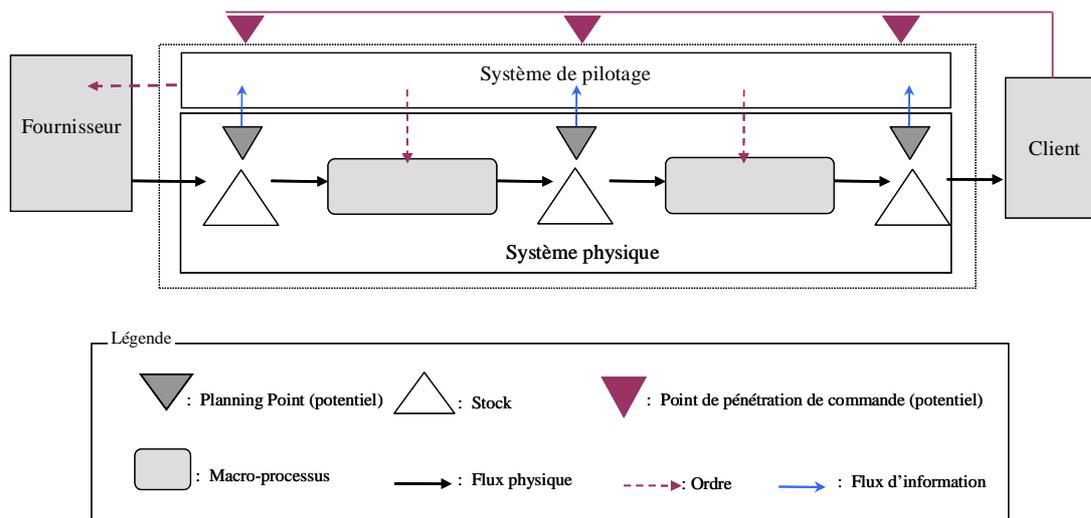


Figure V.5. Eléments du modèle conceptuel d'une entreprise

Les éléments du modèle sont définis comme suit :

- Macro-processus : c'est un ensemble de processus de transformation du flux de matières mobilisant des ressources. Dans notre modélisation, un macro-processus sera considéré comme une macro-ressource avec une certaine cadence de production.

Cette modélisation macroscopique du système physique est justifiée, d'une part par la tendance actuelle de l'industrie à s'organiser en lignes de produits, c'est-à-dire par un regroupement des ressources pour former des flow shops interconnectés, et d'autre part par le fait que le modèle n'est pas sensé représenter des ateliers en détail, mais s'inscrit dans un cadre de modélisation des relations client-fournisseur. Ce qui importe dans cette optique de gestion des flux dans une chaîne logistique, ce sont surtout les dates de disponibilité des produits à livrer. Il s'agit donc de capter les délais des différents processus. Ce cadre de modélisation obtenu par agrégation de l'information sur les processus et les produits, permet la réduction du nombre de données et donc du temps d'instanciation et de simulation des modèles ainsi construits.

La caractérisation des deux macro-processus du modèle permet la description du processus de production de l'entreprise. Cette caractérisation se fait par le type de process (transfert, différenciation, assemblage) et par des paramètres définissant le niveau de capacité du processus.

- Planning point : point de contrôle des entrées/sorties des macro-processus où le pilotage des flux est effectué en se basant sur des règles de gestion. Ces dernières constituent le système de planification et de contrôle de l'entreprise. Un planning point est donc un point de contrôle des flux depuis les différents lieux de détention de stocks, en générant une information pour l'application des règles de gestion. En se basant sur ces règles, lesancements des ordres de fabrication, d'approvisionnement et de livraison sont effectués. Un planning point peut être utilisé pour piloter les flux au niveau d'un point de désynchronisation entre deux processus, il sert, dans ce cas là, au contrôle des stocks d'encours pour synchroniser les flux. Si le stock de produits semi-finis ou produits finis est considéré comme stratégique, c'est-à-dire que des composants sont stockés pour être traités ou livrés à la commande, alors le planning point sera un point de pénétration de commande client, puisque la demande effective en produits finis est utilisée à ce stade de production. Dans notre modèle, le choix de trois planning points

potentiels répond à la nécessité de prendre en compte les trois politiques de réponse à la demande (MTO, ATO, MTS).

De part le caractère générique de notre cadre de modélisation, le modèle conceptuel peut être utilisé pour la présentation de systèmes manufacturiers divers (lignes de transfert, assemblage,...), tout en restant simple et facile à exploiter dans une démarche de simulation de différentes configurations logistiques.

- Point de pénétration de commande : l'arrivée d'une commande client dans l'entreprise peut être incorporée dans le système de planification de production à différents niveaux du processus. Le point de pénétration de commande est un planning point particulier qui sert à découpler la demande effective du client de la production par anticipation, effectuée sur la base de prévisions. Trois positions du point de pénétration de commande sont possibles, elles traduisent les trois politiques de réponse à la demande : MTO, ATO ou MTS.

- Les flux : en plus du flux physique (un ou deux flux de produit), un flux d'information et de décisions est nécessaire pour piloter le système. Au sein de l'entreprise, le flux d'information permet de faire remonter les informations depuis les plannings points pour générer un ensemble de décisions sur le système physique en appliquant des règles de gestion (niveau de rechargement des stocks, arrivée d'une commande client, ...). Le flux d'information externe modélise l'arrivée des commandes clients dans l'entreprise et des ordres d'approvisionnement partant depuis l'entreprise vers ses fournisseurs.

- Système de pilotage : c'est le système de planification et contrôle des opérations de fabrication, d'approvisionnement et de livraison. Ce système se compose de trois niveaux :

- Réponse à la demande : comme noté plus haut, on distingue trois grandes stratégies de réponse à la demande du client : MTO, ATO, MTS. Le choix d'une de ces stratégies dépend essentiellement du degré de volatilité de la demande d'une part et du temps de cycle comparé au délai commercialement admissible d'autre part. Dans le modèle, opter pour une de ces stratégies se traduit par le positionnement du point de pénétration de commande.
- Planification de la production : la gestion des flux peut être effectuée soit en flux poussés, auquel cas deux modèles de gestion sont possibles : MRP ou ROP, soit en flux tirés par un système Kanban.
- Ordonnancement : l'ordonnancement des tâches sur les processus intervient dans le cas de traitement de deux flux de produits auquel cas des règles de priorité sont à considérer (par exemple *First In First Out*, *Largest Processing Time*, *Earliest Due Date*).

V.4.3. Structure des flux

La structure des flux de produits est liée à la nature du processus de production. Nous avons défini trois types d'opérations : transfert, assemblage et différenciation. Pour une entreprise, les deux macro-processus peuvent être un de ces trois types. Une logique de cheminement des flux doit être respectée évidemment. Ainsi, par exemple, si le premier processus est une différenciation, le second ne peut être une opération d'assemblage

(puisque les produits différenciés sont deux variantes). Les différentes associations des types de processus et les structures des flux résultantes sont illustrées dans la figure V.6.

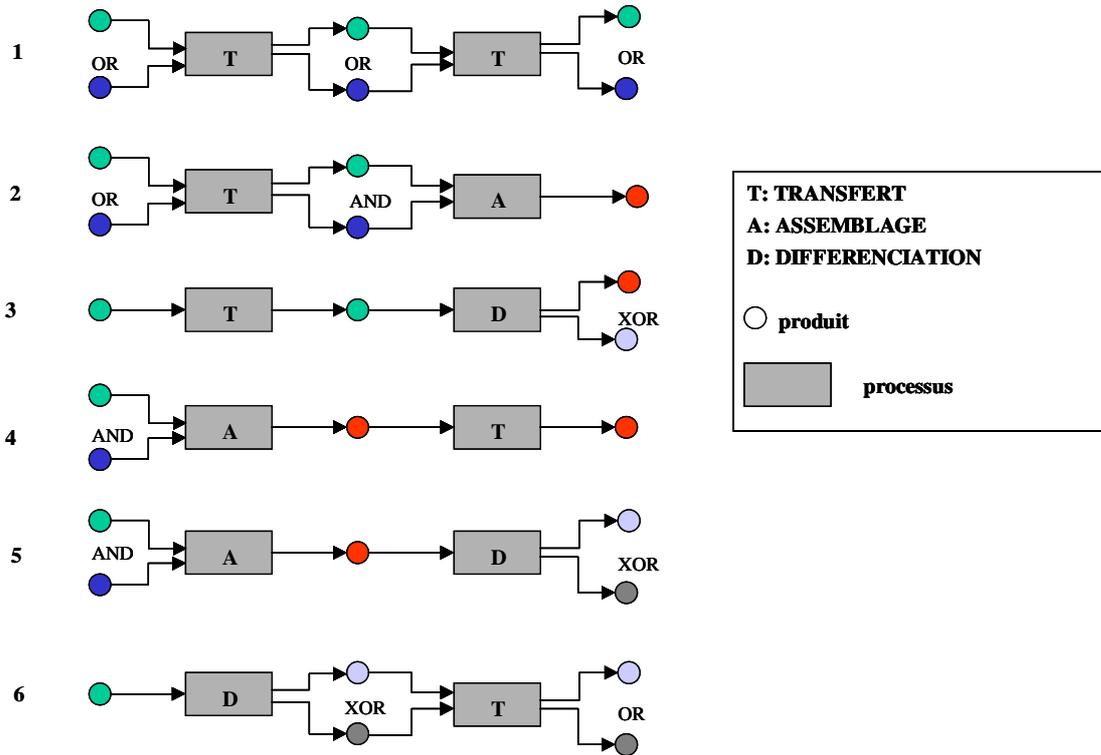


Figure V.6. Les différentes structures de flux de produits

Dans le modèle de simulation, nous avons limité l'expérimentation à des processus de type 1, c'est-à-dire, deux flux de produits en transfert.

V.5. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre notre démarche générale de recherche. La délimitation du contexte et du périmètre expérimental permet de positionner notre travail par rapport aux nombreux travaux de recherche dans le domaine. La nouveauté de l'étude est de s'intéresser à la configuration de réseaux manufacturiers dans un contexte « *on demand production* » et l'étude de la connectivité de différents profils d'entreprises avec une démarche de simulation en laboratoire. Nous avons présenté les éléments conceptuels et le modèle de l'entreprise que nous avons conçu. Dans la partie qui suit, nous allons décrire le modèle logistique, les structures des processus et des flux qui le composent ainsi que les données d'instanciation permettant la construction des scénarios de simulation.

Chapitre VI Outil de configuration et de simulation de chaînes logistiques

VI.1. Introduction

Après avoir décrit les éléments de modélisation d'une entreprise, nous allons maintenant présenter le modèle de la chaîne logistique constitué de ces entreprises.

Le modèle logistique que nous proposons est une association linéaire de trois entreprises. Le premier échelon de la chaîne est approvisionné en matières premières par un fournisseur qui a une capacité infinie (modélisée par un stock). La chaîne est configurée pour répondre à une demande du marché. A chaque échelon de la chaîne, l'entreprise envoie à son fournisseur (ou éventuellement au fournisseur du fournisseur) des informations logistiques (commandes, prévisions, termes de contrats, etc.). Le fournisseur traite et utilise cette information pour planifier et prendre des décisions de production, d'approvisionnement et de livraison selon ses propres règles de gestion. Le pilotage de la chaîne est donc décentralisé (pas d'entité de pilotage centralisée).

Le modèle de chacune des entreprises de la chaîne est basé sur le modèle conceptuel générique présenté précédemment avec en plus des processus en amont et en aval des processus de fabrication (approvisionnement et livraison), permettant de lier l'entreprise à son fournisseur et à son client.

Le modèle d'entreprise que nous avons développé constitue un bloc générique. La configuration de la chaîne logistique consiste à instancier ce modèle pour obtenir un profil d'entreprise. L'outil de configuration constitue donc une base de données de paramètres de simulation (type de processus de fabrication et paramètres caractérisant les processus de production et le système de pilotage). Il résulte de chaque instantiation trois profils d'entreprises qui constituent les échelons de la chaîne logistique. Le simulateur est modélisé de façon tout aussi générique pour faciliter la modification des paramètres de simulation et l'incorporation d'autres éléments dans le modèle.

Un run de simulation débute par la génération d'une demande du marché qui remonte de proche en proche vers l'amont de la chaîne, ce qui induit une charge de production sur les entreprises. Il en résulte un pilotage des flux de produits en fonction des profils de chaque maillon. La simulation permet alors la mesure de la performance du système en termes de niveaux de stocks, d'utilisation des ressources de production et du niveau service au client. Dans ce chapitre, nous allons décrire la démarche de configuration de la chaîne logistique ainsi que l'outil de simulation.

VI.2. Le modèle logistique

VI.2.1. Structure de la chaîne

Le modèle logistique est constitué d'un fournisseur, d'une chaîne constituant le réseau manufacturier, et d'un client générant la demande du marché.

La chaîne est constituée de trois entreprises. Chaque entreprise est modélisée selon le modèle générique décrit précédemment.

Pour connecter les entreprises de la chaîne, chaque entreprise est constituée d'un processus de réception des matières premières, deux processus de fabrication et un processus de livraison des produits finis.

Le système de pilotage de l'entreprise est connecté au reste de la chaîne via un processus de coordination. Ce dernier est constitué des mécanismes de coordination potentiellement utilisés par l'entreprise. Les informations logistiques (demande, prévisions, etc.) transmises par le client de l'entreprise sont traitées et traduites en règles de coordination et alimentent le système de pilotage de l'entreprise. Ce dernier, en fonction de l'état du système opérant, génère des décisions de production, d'approvisionnement et de livraison. Le pilotage du système physique se fait au niveau des planning points permettant ainsi de gérer les stocks et de générer les plans d'approvisionnement qui seront transmis au fournisseur. La figure VI.1 illustre ce modèle de la chaîne logistique.

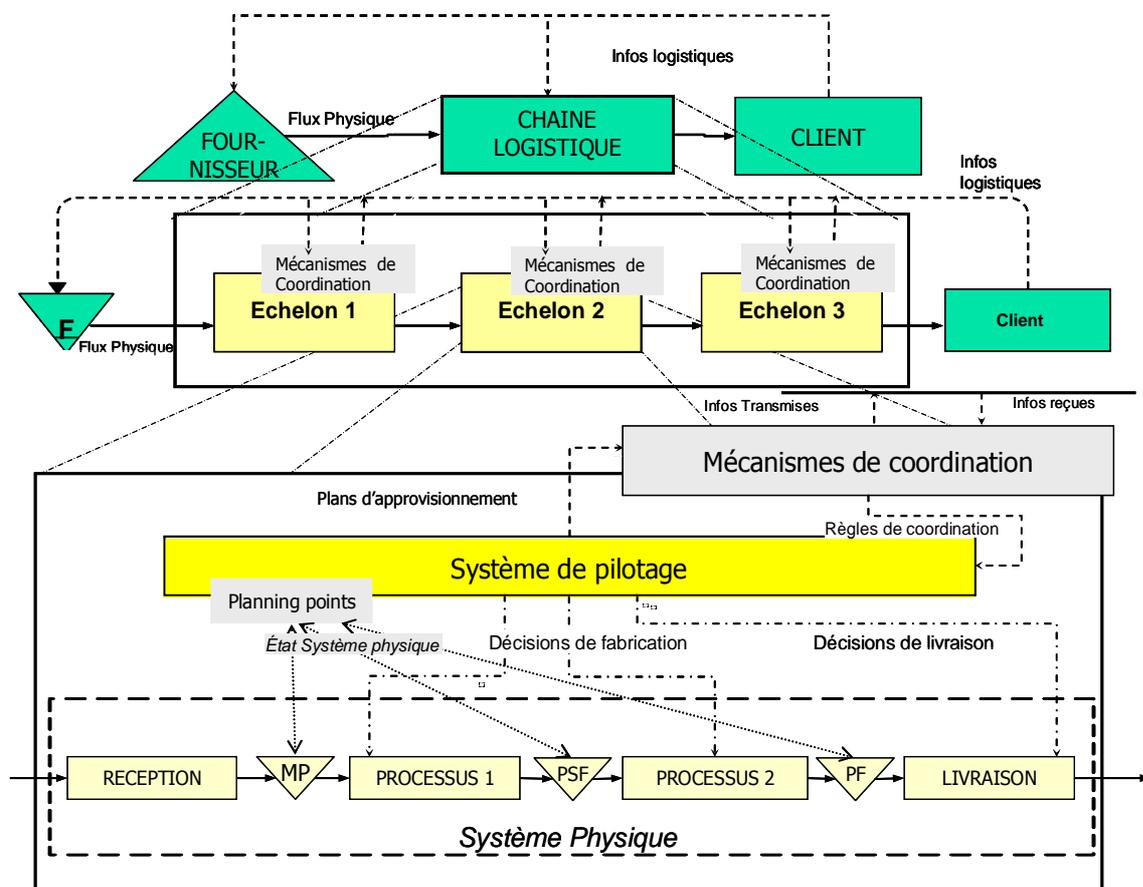


Figure VI.1. Modèle de la chaîne logistique

Afin d'implémenter le modèle sur un outil de simulation, un modèle de classes UML (Unified Model Language) traduit le modèle conceptuel de la chaîne logistique.

Comme illustré dans la figure VI.2, la chaîne logistique est associée à un fournisseur, un client et des produits. Elle comprend des entreprises liées par des mécanismes de coordination.

Lors de la configuration de la chaîne, les processus de pilotage sont associés au processus de transformation de l'entreprise de façon appropriée. Autrement dit, en fonction des caractéristiques du process, certaines règles de gestion ne seront pas autorisées car incompatibles avec le type de flux ou avec les caractéristiques opérationnelles des postes de travail.

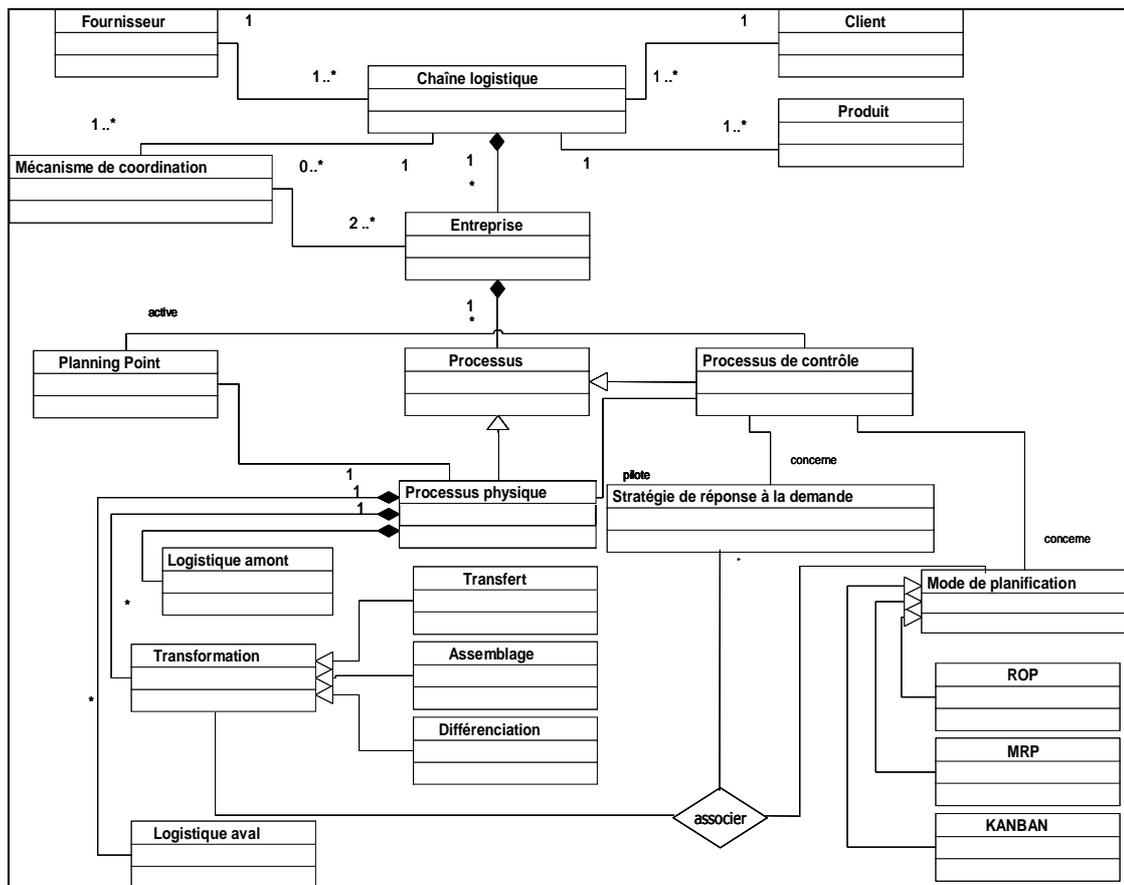


Figure VI.2. Modèle de classes UML de la chaîne logistique

VI.2.2. Modèles d'activités et structures des flux

Les modèles des flux logistiques (matières et information) sont décrits par des modèles SADT (Structured Analysis and Design Technic). Ce formalisme permet de modéliser de façon plus détaillée le modèle conceptuel en explicitant les entrées et sorties des processus composant le système. C'est aussi une représentation hiérarchisée illustrant les niveaux de granularité des modèles.

Le premier niveau de modélisation est celui du système logistique, avec les flux de matières et d'information entre le fournisseur, la chaîne et le client. La figure VI.3 illustre ce modèle.

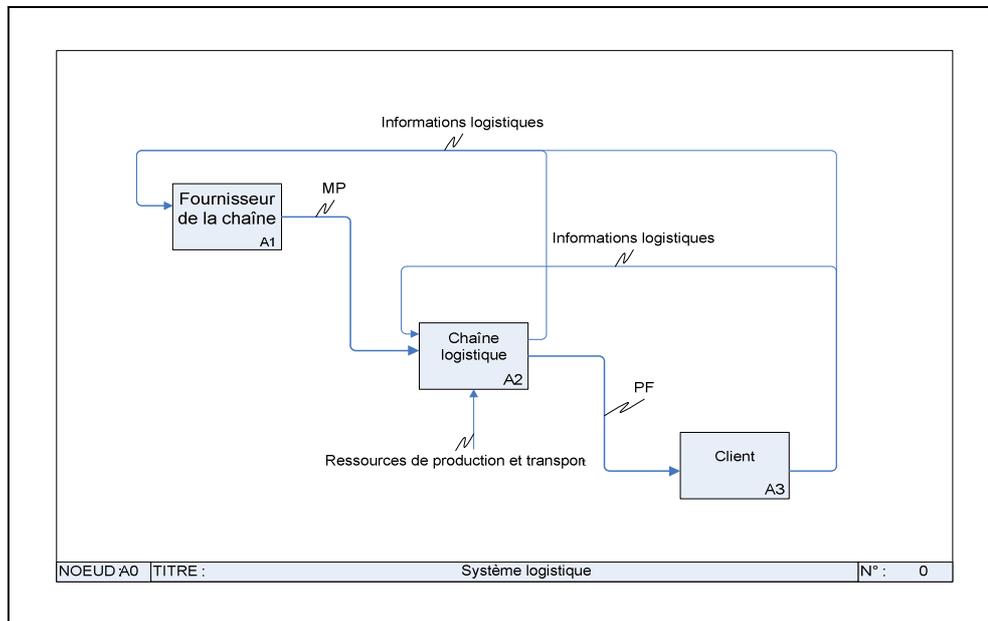


Figure VI.3. Diagramme de flux du système logistique

Le fournisseur de la chaîne est modélisé comme une capacité infinie d'approvisionnement. Il est connecté à la chaîne via un processus simple de réception des commandes. Il livre alors automatiquement (sans délai) les commandes que l'entreprise lui transmet (figure VI.4).

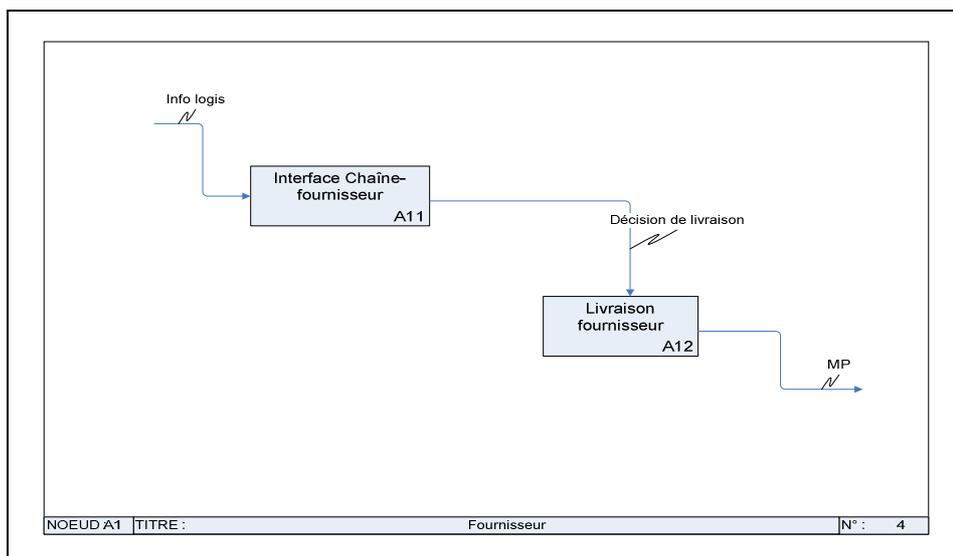


Figure VI.4. Diagramme de flux du fournisseur de la chaîne

Le client de la chaîne est modélisé par un processus de génération de la demande. Il peut aussi partager des prévisions sur cette demande. La demande générée peut être différente de la demande transmise à la chaîne et ce par un processus de filtrage (par

exemple, décider à quels échelons de la chaîne communiquer la demande). La figure VI.5 illustre ce processus de génération de la demande.

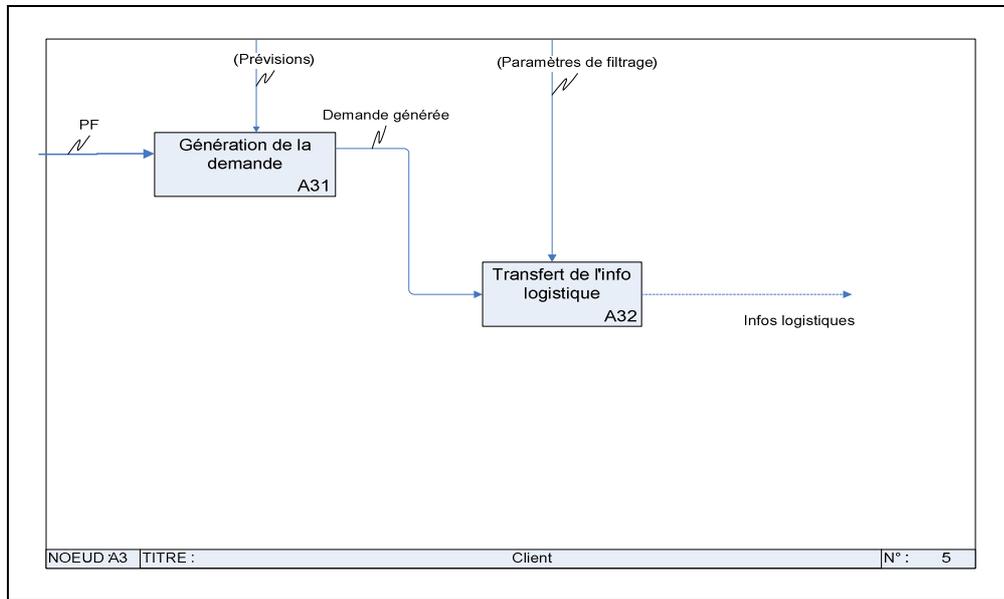


Figure VI.5. Diagramme de flux du client de la chaîne

Le réseau manufacturier est constitué de trois entreprises. Chacune des entreprises reçoit des informations (commandes, prévisions, etc.) de l'aval de la chaîne et envoie des informations en amont. L'entreprise produit et livre son client en utilisant ses ressources de production et de transport (figure VI.6).

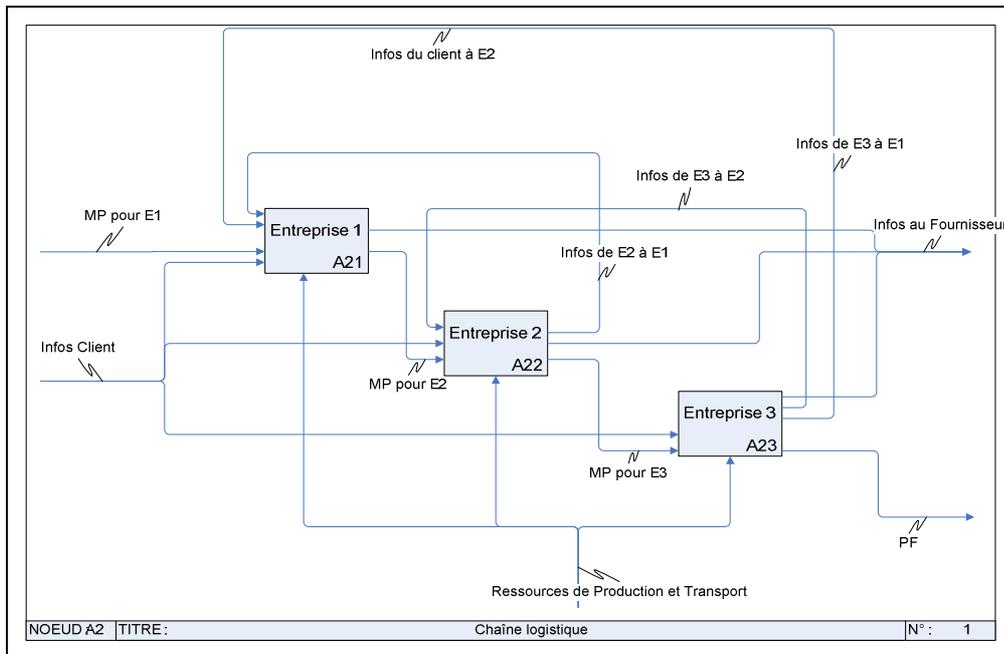


Figure VI.6. Diagramme de flux de la chaîne logistique

Au niveau d'une entreprise, nous avons modélisé le système de production en distinguant : un processus d'application des mécanismes de coordination, un système de pilotage et un système physique. Le système de pilotage reçoit des informations des entreprises aval (intra chaîne) ou des informations sur la demande finale (extra chaîne). Il est contrôlé par le modèle de planification de l'entreprise et potentiellement par les règles de coordination et de filtrage issues du système de coordination. Ce dernier est régi par les contrats établis entre l'entreprise et ses partenaires. Le système de pilotage permet la prise des décisions de fabrication, de livraison et d'approvisionnement en fonction de l'état du système opérant (stocks, ordres en attente, etc.). La figure VI.7 illustre le modèle d'activité d'une entreprise de la chaîne.

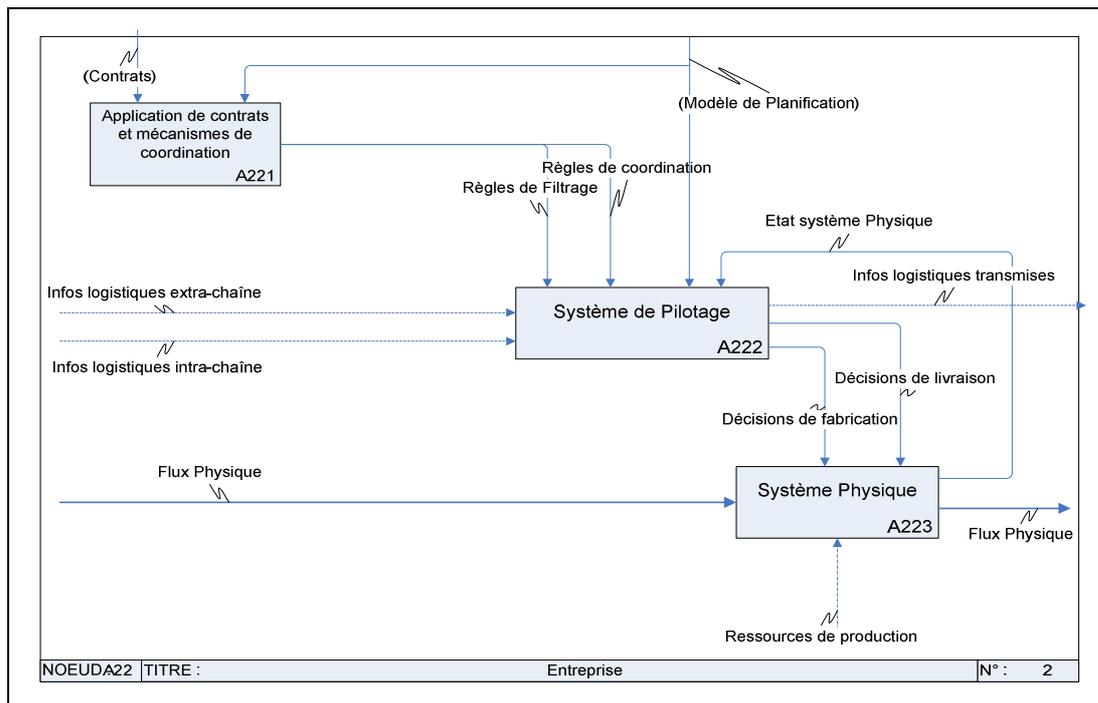


Figure VI.7. Diagramme de flux de l'entreprise

Le système de pilotage de l'entreprise est constitué d'un processus de filtrage de l'information. Ici par exemple sont traitées les prévisions sur la demande et décidées quelles parties des prévisions utiliser et quel niveau de confiance leur accorder. A l'issue de ce processus, l'entreprise dispose de ses propres prévisions en plus des commandes client. Ces informations sont alors utilisées par la planification à moyen terme (génération d'un plan de production). La planification à court terme consiste à utiliser cette planification, ainsi que les commandes fermes pour générer des ordres de production, de livraison et d'approvisionnement et ce en fonction de l'état du système opérant. La figure VI.8 illustre ce modèle de pilotage de la production.

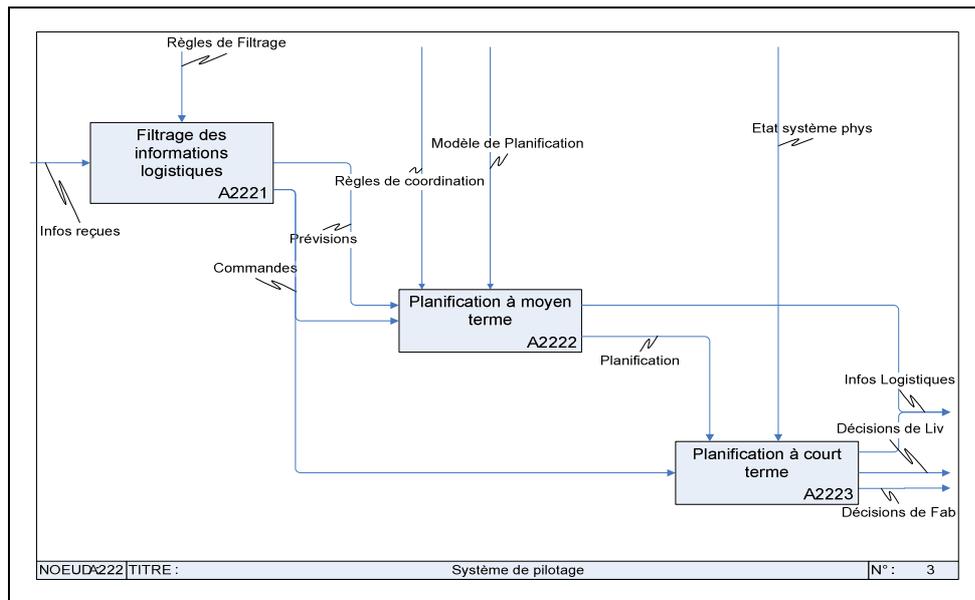


Figure VI.8. Diagramme de flux du système de pilotage de l'entreprise

Le système physique de l'entreprise débute, comme le décrit le modèle conceptuel, par un processus de réception des matières premières. A ce stade, un contrôle permet d'éliminer les produits défectueux avant leur stockage. Deux processus de fabrication permettent la transformation des matières premières en produits semi-finis puis en produits finis. Ces derniers sont transférés vers un processus de livraison où sont notamment enregistrées des informations comme les commandes servies, les commandes en retard, etc. (figure. VI.9).

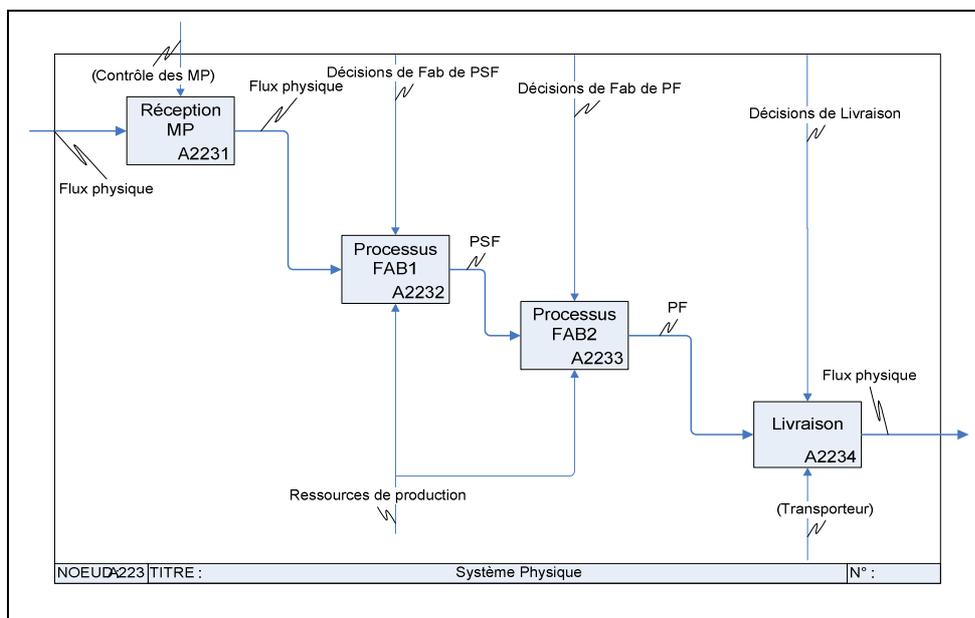


Figure VI.9. Diagramme de flux du système physique de l'entreprise

VI.2.3. Les flux de produits

Les différentes associations de types de processus (Transfert, Assemblage et Différenciation), pour une chaîne de trois entreprises, ne sont pas toutes possibles. Il faut s'assurer du nombre de produits en entrée et en sortie d'un processus, suivant qu'on est dans l'un ou l'autre des trois processus. Un produit déjà différencié ne peut pas être de nouveau assemblé, ni différencié à nouveau (pour n'avoir que deux flux au plus dans la chaîne), il ne peut donc être que transféré.

Voici donc les différentes combinaisons possibles :

{T,T} → {T,T} → {T,T}
 {T,T} → {T,T} → {T,A}
 {T,T} → {T,T} → {A,T}
 {T,T} → {T,T} → {A,D}
 {T,T} → {T,A} → {T,T}
 {T,T} → {T,A} → {T,D}
 {T,T} → {T,A} → {T,D}
 {T,T} → {A,T} → {T,T}
 {T,T} → {A,T} → {T,D}
 {T,T} → {A,T} → {D,T}
 {T,A} → {T,T} → {T,T}
 {T,A} → {T,T} → {T,D}
 {T,A} → {T,T} → {D,T}
 {T,A} → {T,D} → {T,T}
 {A,T} → {T,T} → {T,T}
 {A,T} → {T,T} → {T,D}
 {A,T} → {T,T} → {D,T}
 {A,T} → {T,D} → {T,T}
 {A,T} → {D,T} → {T,T}
 {T,D} → {T,T} → {T,T}
 {D,T} → {T,T} → {T,T}

On peut donc par cette structuration traiter 21 gammes de fabrication possibles. Toutes ces configurations ne sont pas réalistes et pertinentes à étudier. Ainsi on peut réduire le champ d'expérimentation à des configurations de type :

- chaîne de transfert : un transfert de un ou deux flux de produit ;
- chaîne d'assemblage : assemblage de deux produits au deuxième ou au troisième échelon de la chaîne ;
- chaîne de différenciation : production de deux variantes à partir d'un composant au deuxième ou au troisième échelon de la chaîne.

On a donc sélectionné les configurations suivantes (figure VI.10) :

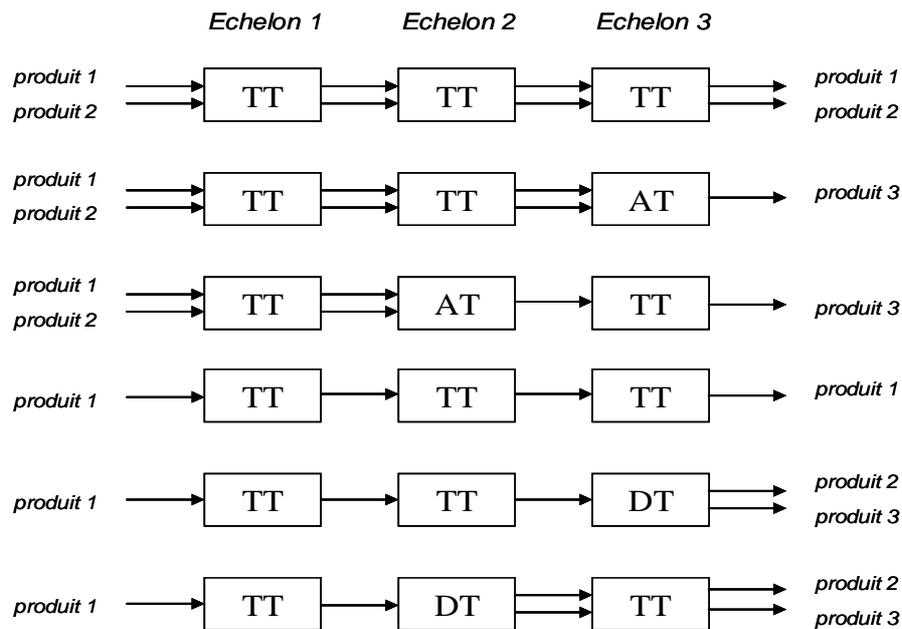


Figure VI.10. Les six types de chaînes selon les combinaisons du process de production

Toutes ces structures ne seront pas étudiées. Notre travail consiste à réaliser et tester un prototype de simulation. Nous avons opté pour des chaînes avec des processus de transfert de deux produits. Ce choix est guidé par la simplicité de ce processus qui va permettre de centrer l'analyse sur les paramètres de capacité et de pilotage des processus et d'éviter des problématiques de synchronisation et d'ordonnement de flux de produits dans des processus d'assemblage et de différenciation. Ces aspects sortent du périmètre de notre étude et constituent une des perspectives de recherche sur lesquelles nous allons revenir à la fin de ce document.

VI.3. Outil de configuration des chaînes logistiques

VI.3.1. Introduction

Pour faciliter l'instanciation du modèle et la création des scénarios de simulation, un outil de configuration a été développé en utilisant des feuilles de calcul Excel. Cet outil est aussi utilisé pour vérifier et valider la cohérence des données d'entrée. L'instanciation du modèle se fait en plusieurs étapes. À chaque étape, l'utilisateur fournit un certain nombre de paramètres. L'outil vérifie, par l'intermédiaire de règles de cohérence, la validité des données saisies. Il retourne les paramètres de configuration (ou un message d'erreur si les données ne sont pas conformes à ces règles). Ces règles concernent :

- Les flux de produits : cela consiste à s'assurer que les matières premières d'une entreprise client correspondent aux produits finis livrés par le fournisseur et ce en fonction du type de process (transfert, assemblage ou différenciation) ;
- Les méthodes de gestion : en fonction de la classe de l'entreprise (niveau de performance A, B, C ou D), l'outil vérifie que les paramètres de gestion sont adéquats.

Par exemple, les paramètres de gestion de stocks (seuil et taille de lots) doivent être cohérents avec la classe de l'entreprise.

Une fois la structure des flux de la chaîne et les stratégies de réponse à la demande fixées, l'outil de configuration génère une instance pour chaque classe d'entreprise. Il calcule les paramètres techniques et de gestion pour chacune des entreprises de la chaîne. Le scénario est alors implémenté au niveau du simulateur, lequel génère une demande finale et évalue les critères de performance de la configuration considérée.

VI.3.2. Démarche de configuration

Nous avons décrit la méthode de configuration de la chaîne sous formes de diagrammes d'activités UML. L'utilisateur renseigne les données techniques et les paramètres de gestion. Ces données sont utilisées pour calculer des paramètres (les données du TRS par exemple sont utilisées pour calculer les différents temps des processus). L'ensemble des paramètres constitue une configuration de la chaîne logistique, laquelle est validée ou pas (message d'erreur au cas où les paramètres ne sont pas cohérents). La figure VI.11 décrit ce diagramme général de configuration.

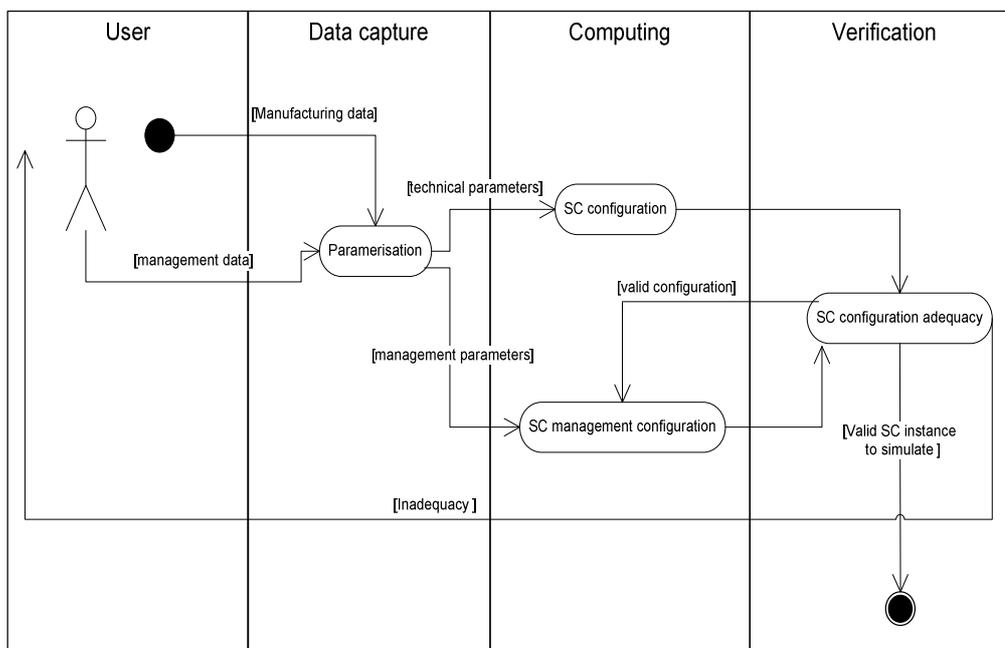


Figure VI.11. Diagramme d'activités de l'outil de configuration

Une description plus détaillée de cette démarche est illustrée par le diagramme de la figure VI.12. Premièrement, le type de process est choisi pour définir la nomenclature du produit (Bill Of Material) pour l'ensemble des processus de la chaîne. Deuxièmement, le type de mode de gestion pour chacun des échelons de la chaîne (ROP, Kanban, MRP) est choisi puis validé. La stratégie de réponse à la demande (MTS, ATO, MTO) est renseignée. Avec l'ensemble de ces attributs, une configuration de la chaîne est créée.

Troisièmement, pour chaque entreprise de la chaîne, est associée une classe (A, B, C, D) qui traduit le niveau de rendement global de l'entreprise (manufacturing efficiency

level). La configuration de la chaîne est alors complétée par le profilage de chacun de ses maillons suivant le niveau de capabilité. Finalement, en fonction de chaque profil, les paramètres de pilotage sont implémentés (seuil, stock de sécurité, taille des lots, période de scrutation, etc.). A l'arrivée, une instance de la chaîne logistique est obtenue et implémentée pour simulation.

A chacune de ces étapes, une validation des paramètres doit être faite afin de s'assurer que l'instance simulée soit une configuration cohérente, c'est-à-dire, que les types de process, les niveaux de capabilité et l'ensemble des paramètres de gestion soient adéquats et représentent un profil réaliste d'entreprise.

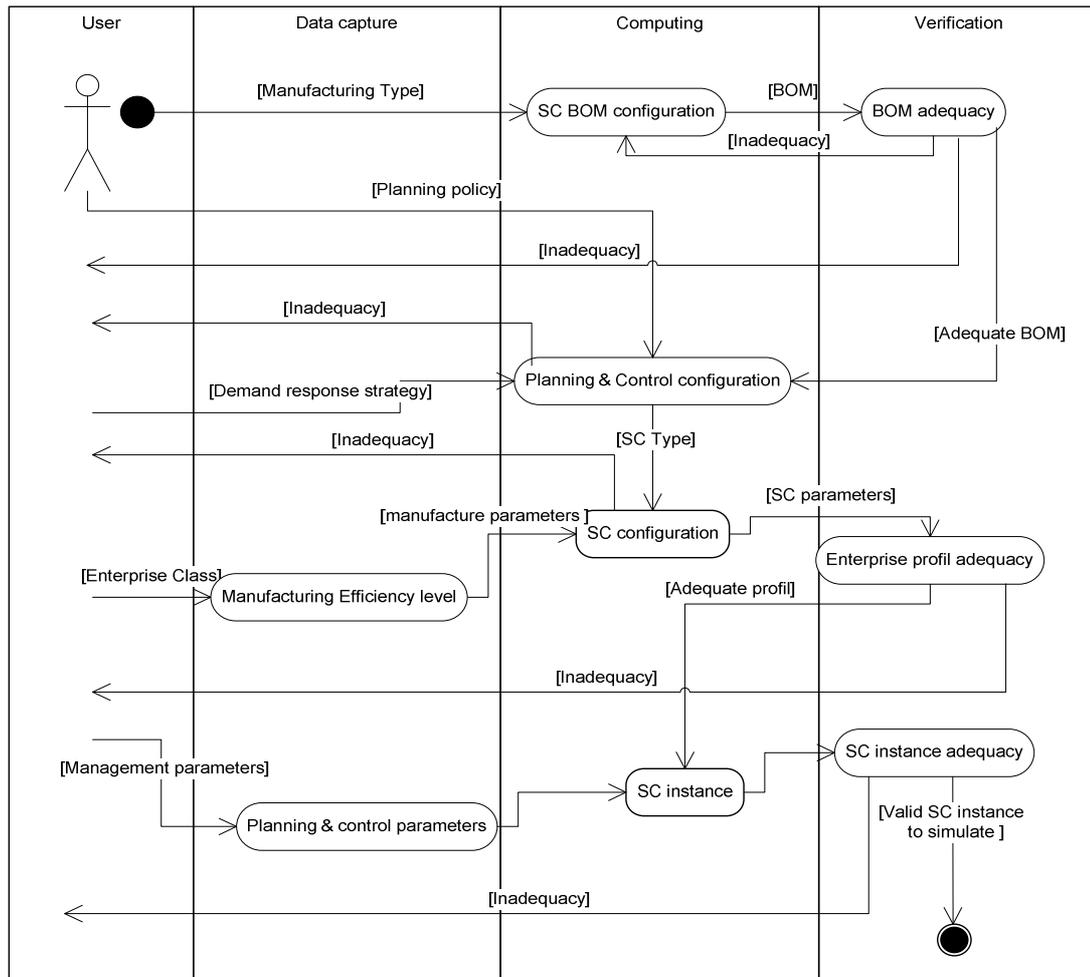


Figure VI.12. Diagramme d'activités détaillé de l'outil de configuration

La figure VI.13 illustre une des interfaces de configuration. Il s'agit de générer les numéros de produits pour chacun des points de stockage des trois entreprises en fonction du type de process (transfert, assemblage, différenciation).

configuration de la chaîne

Entreprise	Type de fabrication	
	processus 1	processus 2
E1	1	1
E2	2	1
E3	1	1

Aide mémoire pour la configuration de la chaîne
 Renseigner les champs de la première matrice puis cliquez sur le bouton "Configurer" pour lancer le calcul des numéros de produits de la chaîne.

Légende utilisée:
Entreprise: numérotation séquentielle (E1, E2, E3)
Processus: 1 = Transfert, 2 = Assemblage, 3 = Différenciation
Produits: numérotation séquentielle (1, 2, 3, ...)

	E1			E2			E3		
Stock	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Produit Flux 1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Produit Flux 2	2	2	2	2	0	0	0	0	0

Figure VI.13. Configuration des flux de produits

VI.3.3. Instanciation des classes d'entreprises

Comme nous l'avons souligné précédemment, la caractérisation de la classe d'efficience d'une entreprise est l'un des apports de notre démarche de modélisation et de simulation.

Quatre classes d'entreprises sont définies en fonction des valeurs des composantes de leur taux de rendement global. Pour chaque classe d'entreprise, dix instances sont possibles. Les valeurs de la disponibilité, performance et taux de qualité sont données dans le tableau VI.1. Une procédure de tirage aléatoire permet de choisir parmi l'une de ces instances. Cela permet d'étudier différentes valeurs d'input de simulation et pouvoir ainsi réaliser un grand panel de scénarios d'étude.

	N°	Disponibilité	Performance	Qualité
A	1	99,0%	99,0%	99,0%
	2	98,0%	98,5%	98,5%
	3	97,0%	98,0%	98,0%
	4	96,0%	97,5%	97,5%
	5	95,0%	97,0%	97,0%
	6	94,0%	96,5%	96,5%
	7	93,0%	96,0%	96,0%
	8	92,0%	95,5%	95,5%
	9	91,0%	95,0%	95,0%
	10	90,0%	94,5%	94,5%
B	11	89,0%	94,0%	94,0%
	12	88,0%	93,5%	93,5%
	13	87,0%	93,0%	93,0%
	14	86,0%	92,5%	92,5%
	15	85,0%	92,0%	92,0%
	16	84,0%	91,5%	91,5%
	17	83,0%	91,0%	91,0%
	18	82,0%	90,5%	90,5%
	19	81,0%	90,0%	90,0%
	20	80,0%	89,5%	89,5%
C	21	79,0%	89,0%	89,0%
	22	78,0%	88,5%	88,5%
	23	77,0%	88,0%	88,0%
	24	76,0%	87,5%	87,5%
	25	75,0%	87,0%	87,0%
	26	74,0%	86,5%	86,5%
	27	73,0%	86,0%	86,0%
	28	72,0%	85,5%	85,5%
	29	71,0%	85,0%	85,0%
	30	70,0%	84,5%	84,5%
D	31	69,0%	84,0%	84,0%
	32	68,0%	83,5%	83,5%
	33	67,0%	83,0%	83,0%
	34	66,0%	82,5%	82,5%
	35	65,0%	82,0%	82,0%
	36	64,0%	81,5%	81,5%
	37	63,0%	81,0%	81,0%
	38	62,0%	80,5%	80,5%
	39	61,0%	80,0%	80,0%
	40	60,0%	79,5%	79,5%

Tableau VI.1. Les valeurs des composantes du taux de rendement global

Les trois taux composant le rendement synthétique d'un process ne suffisent pas pour calculer les paramètres du process. En effet, le taux de disponibilité donne la fraction du temps consacré aux lancements, aux changements de série et les temps de non production à cause des ruptures de charge et de saturation des processus aval. Aussi, il faut déterminer les pourcentages de répartition du temps total d'indisponibilité entre ces facteurs. Pour simplifier les calculs et limiter le nombre de paramètres de simulation, nous avons défini deux taux : indisponibilité due aux pannes et indisponibilité due aux lancements. Le temps restant constitue ce qu'on appelle *idle time*.

Les pannes sont modélisées par le temps moyen entre pannes (Mean Time Between Failure) et le temps moyen de réparation (Mean Time To Repair). Ces deux temps peuvent être donnés pour caractériser le temps de pannes, mais comme nous connaissons le temps des pannes (pourcentage d'indisponibilité due aux pannes), nous pouvons fixer le MTBF par exemple et en déduire le MTTR.

Un autre facteur important est celui de la variabilité du temps de gamme. En effet, nous utilisons des lois aléatoires (triangulaires) pour modéliser la variabilité des temps de process. Nous avons donc défini un temps de gamme moyen, calculé à partir d'une cadence de production. Nous avons déterminé des valeurs minimales et maximales en utilisant un pourcentage de variance de la valeur moyenne du temps de gamme.

Les temps de gammes sont définis dans un premiers temps pour le process goulet. Un taux d'excédent de capacité est utilisé pour calculer le temps de gamme pour le process non goulet.

Le taux d'indisponibilité due au lancement des ordres de fabrication permet d'estimer le temps total des lancements. Il faut donc connaître le nombre moyen de lancement de production par jour pour obtenir le temps de lancement unitaire. Ce nombre d'ordres dépend évidemment de la classe de l'entreprise (une grande disponibilité permet de réaliser plus de lancements). Deux temps de lancement sont considérés : un temps de lancement d'OF et un temps de changement de produit. Ce dernier est déduit du premier par une augmentation d'un taux.

Les temps de manutention sont modélisés en amont (réception de matières premières) et en aval (livraison) du processus de production. Ils sont calculés en utilisant un taux égal à : temps de manutention / temps de process.

L'utilisation de ces ratios permet de réduire le nombre de paramètres de discrimination entre les classes d'entreprises et de normaliser ces données. Ainsi, pour les quatre classes d'entreprises, nous avons fixé des valeurs identiques pour les taux suivants :

- excédent de process non goulet : temps gamme process non-goulet/temps gamme process goulet ;
- variance de temps de gamme : temps gamme moyen/ temps gamme maximal (ou temps gamme minimal/ temps gamme moyen) ;
- excédent du temps de changement de produit : temps de set up unitaire/ temps de changement de produit ;
- taux du temps de manutention : temps de manutention/temps de gamme moyen.

Evidement dans la réalité, des différences plus ou moins importantes peuvent exister entre les classes d'entreprises pour ces ratios, mais pour clarifier les scénarios de simulation et éviter des effets d'interaction de plusieurs facteurs qui rendent difficile l'interprétation des résultats de simulation, nous avons normalisé ces paramètres. L'outil de simulation peut évidemment être paramétré avec différentes valeurs si l'on veut analyser l'effet de ces ratios. Ceci est l'une des perspectives d'extension de nos travaux. Le tableau VI.2 illustre l'ensemble des paramètres que calcule l'outil de configuration.

alors calculer les différents temps unitaires. Le tableau VI.3 illustre cette feuille de calcul.

(les différents temps sont exprimés en heure)

Classe d'entreprise ==>	A	B	C	D
TRS	93%	74%	61%	43%
Disponibilité	97%	86%	78%	64%
Performance	98%	93%	89%	82%
Qualité	98%	93%	89%	82%
% Indispo pannes	40%	40%	40%	40%
% Indispo set up	40%	40%	40%	40%
% Indispo autre	20%	20%	20%	20%

Cadence [ppm]	0,100	0,100	0,100	0,100
Temps d'ouverture [h]	10			

	A	B	C	D
temps productif	9,32	7,36	6,11	4,25
temps opérationnel net	9,51	7,96	6,90	5,22
temps opérationnel	9,70	8,60	7,80	6,40
temps d'indisponibilité	0,30	1,40	2,20	3,60

Temps de pannes	0,120	0,560	0,880	1,440
Temps set up	0,120	0,560	0,880	1,440
Temps indispo autre	0,060	0,280	0,440	0,720

MTBF	200,00	100,00	80,00	60,00
MTRR	1,00	2,00	4,00	6,00

Cadence corrigée [ppm]	0,10	0,12	0,13	0,18
Temps process moyen goulet [h]	0,170	0,142	0,123	0,093
Variance relative temps process	20%	20%	20%	20%
Temps process min goulet	0,136	0,114	0,099	0,075
Temps process max goulet	0,204	0,171	0,148	0,112
Excédent relatif non-goulet	20%	20%	20%	20%
Temps process moyen non-goulet	0,136	0,114	0,099	0,075
Temps process min non-goulet	0,109	0,091	0,079	0,060
Temps process max non-goulet	0,163	0,137	0,119	0,090
Nombre de lancement par jour (min)	6	4	2	1
Temps set up unitaire	0,020	0,140	0,440	1,440
Excédent relatif de temps de changement de produit	10%	10%	10%	10%
Temps de changement de produit	0,022	0,154	0,484	1,584
Rapport du temps de manutention sur le temps de process	10%	10%	10%	10%
Temps de manutention (reception, livraison)	0,017	0,014	0,012	0,009

Tableau VI.3. Feuille de calcul des temps de processus

VI.4. Outil de simulation

Le modèle de simulation est implémenté sous le logiciel ARENA. Les données de simulation sont récupérées des feuilles Excel. La configuration de la chaîne permet de constituer un ensemble de données d'entrée pour le modèle de simulation. Ce dernier est construit sous forme de processus génériques instanciables. Des conditions de routage permettent l'activation d'un processus en fonction du profil de chaque entreprise de la chaîne.

VI.4.1. Structure de l'outil de simulation

Le modèle de simulation est constitué d'un ensemble de stations interconnectées. Il comprend les sous modèles suivants :

- fournisseur : station activée à chaque approvisionnement lancé par l'entreprise en premier échelon de la chaîne ;
- client : station vers laquelle sont acheminés les produits finis de l'entreprise aval de la chaîne. A ce niveau sont enregistrées les commandes livrées au marché ;
- processus de demande : station générant la demande du client. A ce niveau sont définies les quantités et fréquence de la demande. Les quantités sont modélisées sous forme de loi normale ;
- processus physique : c'est un ensemble de stations indexées selon la position de l'entreprise de la chaîne. Il est subdivisé en trois sous processus qui sont la réception, la production et la livraison. Un processus de réception est connecté au processus de livraison de l'entreprise fournisseur et permet d'enregistrer les approvisionnements en matières premières. Un processus de production est un enchaînement de deux processus découplés par un stock de produits semi-finis. Chacun de ces deux processus de fabrication peut être choisi parmi les types de process configurant la chaîne à savoir le transfert, l'assemblage ou la différenciation. Un processus de fabrication est caractérisé par l'ensemble des paramètres techniques définissant sa propre capacité (classe d'entreprise). Le processus de livraison permet le transfert des produits finis de l'entreprise vers son client. Il permet également d'enregistrer les commandes livrées et les éventuels retards, qui seront utilisés comme indicateurs de performance ;
- processus de gestion de la production : c'est l'ensemble des processus qui implémentent les règles de pilotage de l'entreprise. Au niveau de ce processus sont générés les ordres d'approvisionnement et de fabrication. Le mode de gestion (ROP, Kanban, MRP) est choisi en fonction de la configuration de la chaîne ;
- processus de gestion des livraisons : ce processus reçoit les ordres d'approvisionnement venant de l'entreprise client (ou demande finale). En fonction de la stratégie de réponse à la demande (MTS, ATO, MTO), les commandes sont envoyées vers les processus de livraison et de gestion de production afin de planifier les ordres de fabrication et de livraison.

La figure VI.14 illustre l'ensemble de ces processus ainsi que le couplage du simulateur avec l'outil de configuration qui permet l'instanciation du modèle et donc la génération des scénarios de simulation.

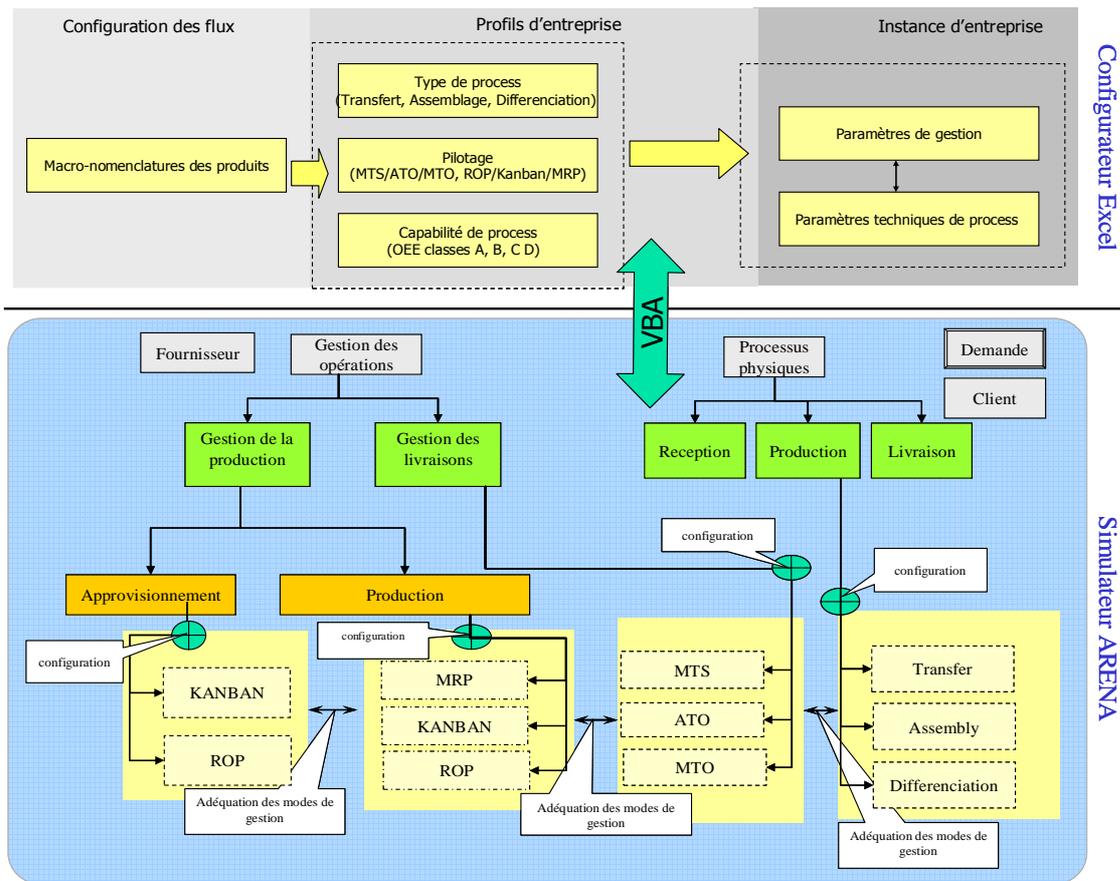


Figure VI.14. Structure générale de l'outil de configuration-simulation

VI.4.2. Gestion des commandes et des ordres de production

La gestion des commandes se fait en fonction de la stratégie de réponse à la demande et du mode de planification de l'entreprise. A l'arrivée d'une commande, le processus de gestion des livraisons génère un ordre de livraison qui est routé vers le processus de livraison de l'entreprise. Si la production est sur stock, alors la gestion des différents stocks se fait indépendamment des commandes. Les ordres de fabrication sont lancés pour reconstituer les stocks. Si la production est un assemblage à la commande, alors l'arrivée d'une commande va être transférée vers un processus de génération des ordres de fabrication des produits finis. Un système MRP simplifié génère un ordre de fabrication en se basant sur l'état du stock et la quantité de la commande avec un facteur de sécurité (taux de rebut et indisponibilité du processus fournisseur).

Une production à la commande consiste à générer de la même façon deux ordres de fabrication, un pour les produits semi-finis et un autre pour les produits finis. L'approvisionnement en matières premières se fait avec une boucle de rechargement de stock (ROP ou Kanban), et ce quelle que soit la stratégie de réponse à la demande. La figure VI.15 illustre ce processus de gestion des commandes. Les figures VI.16, VI.17 et VI.18 détaillent les processus de gestion des commandes pour les trois stratégies de réponse à la demande.

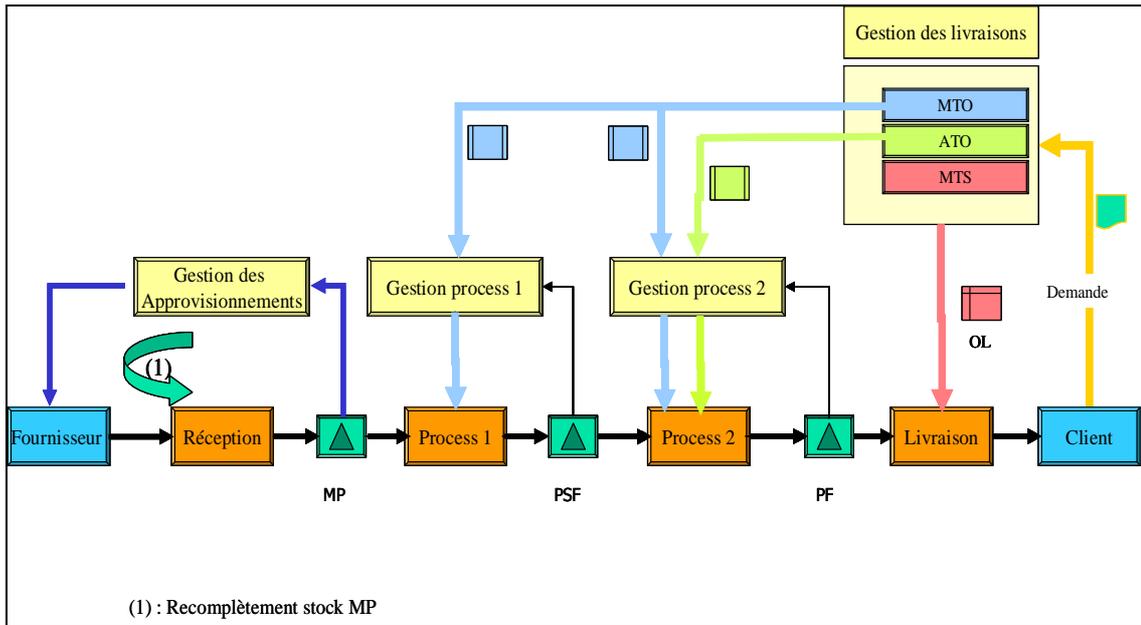


Figure VI.15. Processus de gestion des commandes

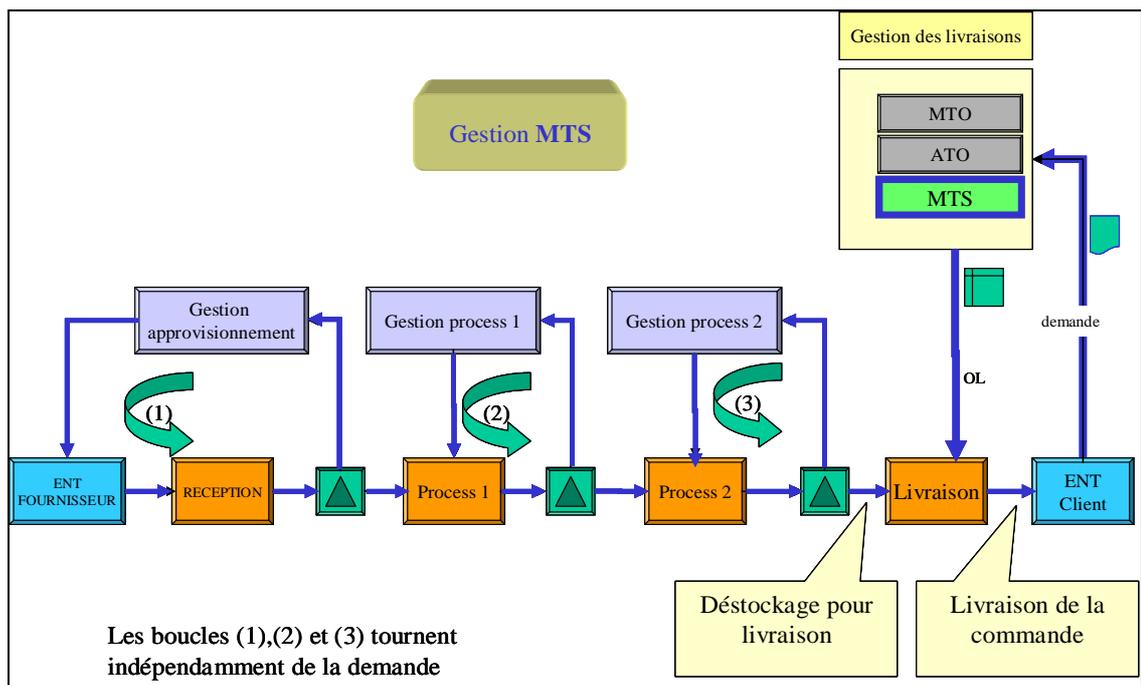


Figure VI.16. La production MTS

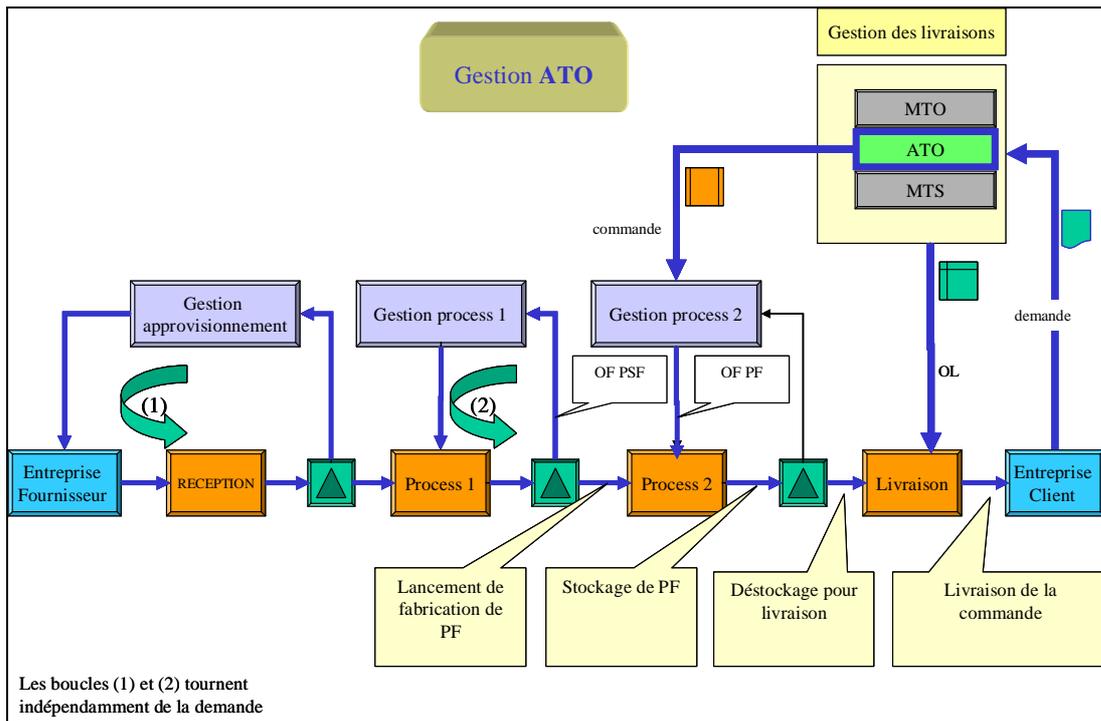


Figure VI.17. Production ATO

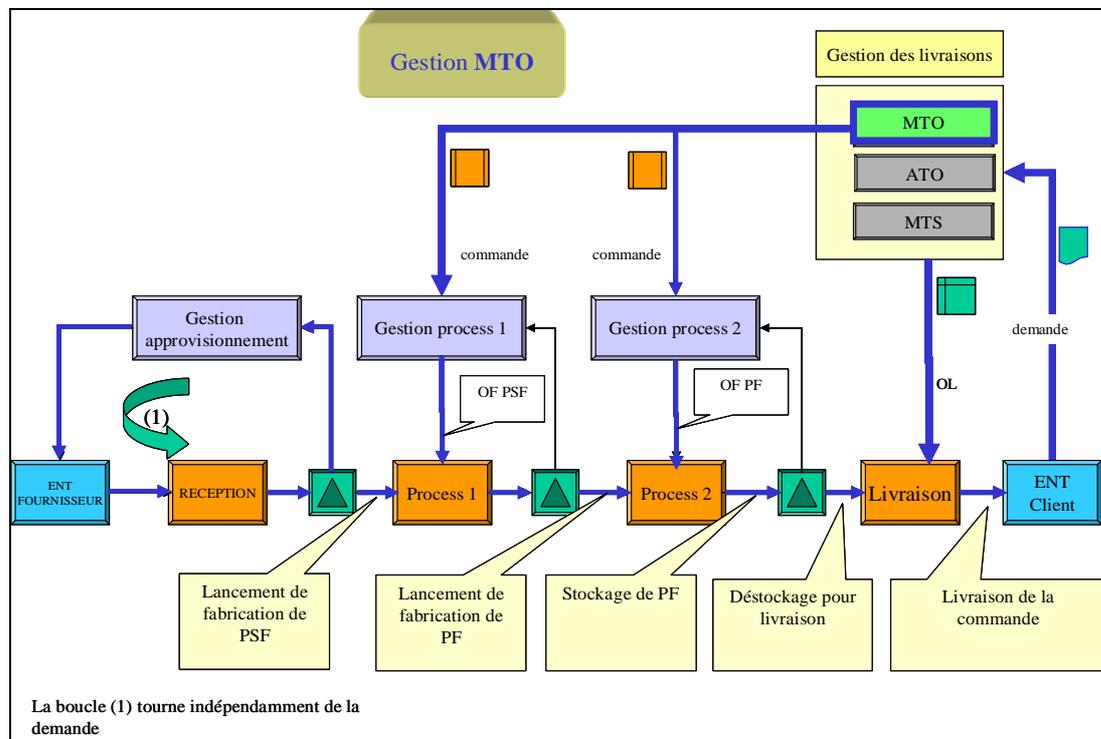


Figure VI.18. Production MTO

Les quantités à produire générées par le système de pilotage sont transmises au processus de production. L'exécution des ordres de fabrication dépend de la disponibilité des stocks de composants. Pour gérer cet aspect, nous avons fixé deux taux d'acceptation de l'OF : TAOF1 et TAOF2. Dans le cas où le stock est inférieur à la quantité à produire, si le ratio entre le stock et la quantité à produire est supérieur à TAOF2 alors l'ordre est lancé quand même. Dans l'expérimentation, ce ratio est fixé à 95%, ce qui donc permet de ne pas bloquer des ordres par manque d'au plus 5 % des pièces dans le stock. Si le ratio est inférieur au taux TAOF1 (fixé à 60 % dans l'expérimentation), alors l'ordre n'est pas lancé car le stock est considéré insuffisant. Entre ces deux taux, l'ordre est lancé, mais un OF de reliquat est généré pour compléter la quantité proposée à la production. La même règle est appliquée aux ordres de livraison (TAOF1 est fixé dans ce cas à 40% pour permettre une livraison plus flexible). La figure VI.19 montre cette procédure d'exécution des ordres de production.

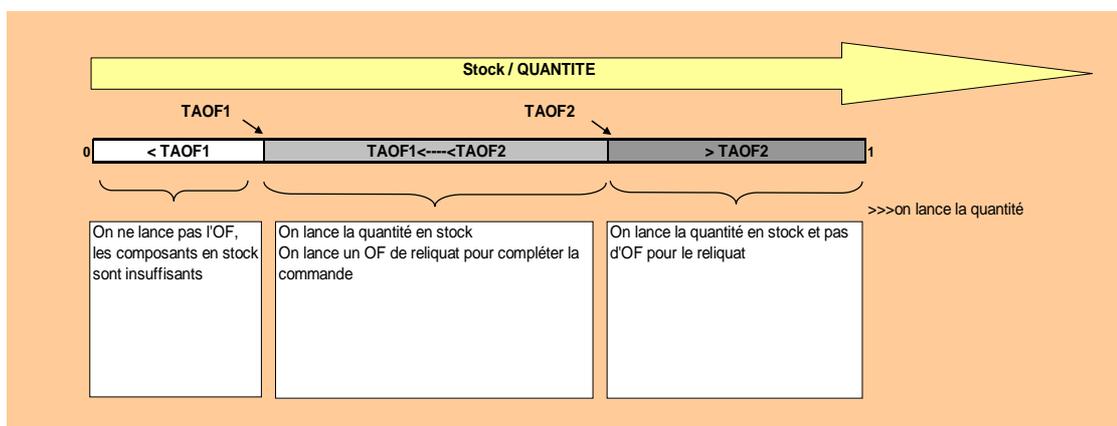


Figure VI.19. Règle de lancement des ordres

La gestion des ordres pour une production à la commande est réalisée par un calcul des besoins. Pour le lancement d'un ordre sur le second processus (produit fini), il faut tenir compte du taux de rebut du processus et du délai en mettant un stock de sécurité de produit finis. La figure VI.20 illustre ces paramètres.

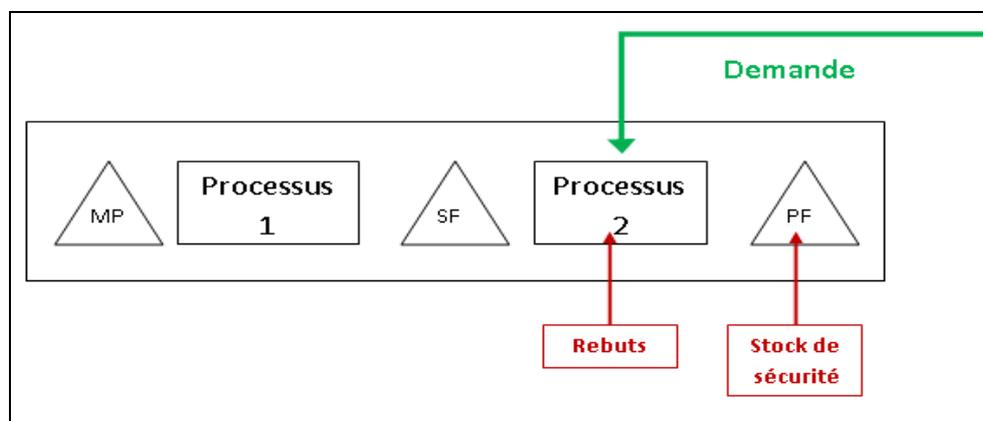


Figure VI.20. Paramètres de calcul des ordres de fabrication à la commande

La formule de calcul de la quantité à produire est la suivante :

$$\text{Ordre}(t) = \text{demande}(t) * (1/TQL) + \text{Stock de sécurité} - \text{Max}(0, \text{Stock}(t))$$

Où :

Ordre (t) : quantité à lancer à la date t

Demande (t) : quantité en commande à la date t

TQL : taux de qualité du process (1- taux de rebut)

Stock (t) : Quantité en stock à la date t

Le stock de sécurité est calculé en prenant une majoration de la demande moyenne par un facteur de sécurité tenant compte des pertes de disponibilité du processus amont. Le calcul est donc comme suit :

$$\text{Stock de sécurité} = \text{demande moyenne} * (1/ (\text{taux de performance} * \text{taux de disponibilité}) - 1)$$

Le niveau de ce stock dépend alors de la classe de l'entreprise (valeur des taux de performance et de disponibilité). La quantité à lancer est aussi fonction de la classe de l'entreprise (valeur du taux de rebut). Ainsi, le simulateur calcule à chaque arrivée de commandes, les quantités à lancer en production en fonction de la configuration de la chaîne (classes des entreprises et stratégies de réponse à la demande).

VI.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'outil de configuration et le simulateur que nous avons développés. La configuration de la chaîne logistique se fait par l'instanciation d'un modèle générique en définissant les types de process de production, leurs niveaux de capacité et les paramètres techniques et de gestion correspondant aux profils des entreprises de la chaîne. Le simulateur est constitué d'un ensemble de sous modèles représentant les différents processus de l'entreprise. Les variables de configuration permettent la création des scénarios de simulation (profils de chaque maillon de la chaîne).

Nous avons utilisé cet outil pour étudier un certain nombre de configurations logistiques. Nous avons délimité un périmètre d'expérimentation où les entreprises de la chaîne produisent deux produits sur des lignes de transfert. Nous avons étudié des environnements de production sur stock et des environnements où les entreprises en amont de la chaîne font de l'assemblage à la commande. La définition de ces scénarios de simulation et les performances des différentes configurations ainsi que l'analyse des résultats et leur interprétation feront sont l'objet des chapitres suivants.

PARTIE 3

CAMPAGNES DE SIMULATION

Chapitre VII Simulation de configurations de chaînes logistiques

VII.1. Introduction

L'étude de simulation que nous avons réalisée consiste à comparer les performances de différentes configurations de chaînes logistiques comprenant trois entreprises. Les chaînes sont constituées de profils d'entreprises différenciées par leur niveau de capacité opérationnelle et leurs paramètres de gestion de production. Nous avons simulé des chaînes logistiques constituées d'entreprises produisant sur stock et des configurations où les deux entreprises en amont de la chaîne font de l'assemblage à la commande.

Le benchmark de ces configurations est basé sur les critères de performance suivants : les niveaux de stocks, les retards de livraison au client final et le taux d'utilisation des ressources de production. Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à des configurations particulières : chaînes d'entreprises avec des taux de rendement similaires (classes d'entreprises constituant des chaînes homogènes), puis des chaînes avec un gradient plus ou moins important des taux de rendement des entreprises (chaînes hétérogènes).

Nous avons ensuite simulé la totalité des configurations (quatre classes possibles pour chacun des trois échelons de la chaîne, soit un total de 64 configurations). Nous avons alors effectué une analyse multidimensionnelle des résultats de simulation de ces chaînes afin de caractériser différents groupes de chaînes.

Nous avons par ailleurs testé des politiques de production à la commande en amont de la chaîne (ATO/ATO/MTS). Les mêmes configurations (chaînes homogènes, puis hétérogènes) sont testées sous cet environnement de production. Cela permet la comparaison des performances des deux stratégies logistiques.

Nous allons présenter dans ce chapitre la démarche de calibrage du modèle de simulation et les résultats obtenus pour les différentes configurations. Nous commenterons et analyserons les résultats de simulation afin de dégager des tendances globales sur la dynamique des chaînes et identifier les leviers d'action pour améliorer leur performance ainsi que les implications managériales qui en résultent (Essaid et al., 2008a).

VII.2. Calibrage du modèle

Avant la simulation des configurations logistiques, le modèle est calibré en simulant une demande du marché pour chaque classe d'entreprise (A, B, C et D) séparément. Ce calibrage sert à valider les valeurs des taux de rendement cibles, à dimensionner les capacités de production pour chacune des classes et enfin à fixer les paramètres de gestion : seuils de rechargement, stocks de sécurité, tailles des lots.

Une fois les paramètres des processus de production et de gestion calibrés pour chaque entreprise, les chaînes logistiques sont construites à partir des différents profils d'entreprises. La demande du marché est ajustée de la façon suivante : pour une entreprise isolée, la demande est assimilée à une loi normale $N(55; 5)$. La mise en cascade de trois entreprises génère un système dont les taux de rebut sont multipliés, il est donc nécessaire d'ajuster la demande finale afin de permettre à une chaîne étalon, en l'occurrence une chaîne constituée des entreprises de meilleure classe (A-A-A), de répondre à la demande sans retard de livraison. Cette demande ajustée est déterminée par simulations successives jusqu'à atteindre une demande cible de $N(50; 5)$. Cette dernière permet alors à la chaîne AAA de produire sans retard de livraison. Toute autre configuration constituée des classes d'entreprise A, B, C et D est alors simulée avec cette demande cible.

VII.2.1. Démarche de calibrage

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'ajustement des capacités de production se fait par rapport à l'entreprise la plus efficace, i.e. classe A. Les capacités des entreprises de classe B, C et D ont été calibrées de façon à répondre à la même demande et ce en ajoutant des extra capacités sous formes de temps supplémentaires de production. Ces capacités de production ainsi que leurs paramètres de gestion ont été fixés par des tests de calibrage, en simulant la même demande finale pour les quatre classes d'entreprises.

Nous avons calculé un ratio d'extra capacité (RE) pour analyser la sensibilité des ajouts de capacité sur les performances (trouver les différents compromis entre niveau de stock et retard de livraison).

Les paramètres de gestion et l'initialisation des niveaux de stocks sont calibrés sous une demande finale suivant une loi normale $N(55,5)$. Sans aucun ajout de capacité (cadence de production correspondant à la valeur cible du taux de rendement synthétique) RE est fixé à 1 pour la classe A. Avec cette demande, l'entreprise de classe A produit sans retard de livraison.

Pour maintenir une livraison sans retard pour répondre à la même demande, RE est ajusté à 1.2, 1.6 et 1.8 pour les classes B, C et D respectivement.

Ce ratio traduit la récupération des pertes de capacité dues aux écarts de rendement entre les quatre classes d'entreprises. Il indique l'importance des surcoûts de production (augmentation de l'excédent de capacité pour pallier la dégradation des rendements).

En outre, nous avons simulé différents niveaux d'extra capacité en variant les valeurs de RE et mesuré les niveaux de stocks pour les mêmes valeurs moyennes de retards de livraison pour chacune des classes. La figure VII.1 montre trois courbes de niveaux de

stocks correspondant à trois valeurs d'efficacité : zéro retard (courbe 1), 10 heures de retard (courbe 2) et 30 heures de retard (courbe 3).

Pour RE égal à 1, 1.2, 1.6 et 1.8 pour les entreprises A, B, C et D respectivement, les retards de livraison sont nuls.

Pour RE égal à 0.9, 1, 1.4 et 1.6 pour A, B, C et D respectivement, on a un retard moyen de livraison de 10h. Des valeurs de RE de 0.8, 0.9, 1.2 et 1.4, donnent un retard de livraison de 30h environ. Ces retards sont les valeurs moyennes obtenues à la suite de 20 runs de simulation de 10 000 heures chacun.

Cette analyse montre que le dimensionnement du modèle consiste à fixer des capacités de production pour un niveau d'efficacité (retard) et d'efficacité (stocks) donnés. Nous avons opté pour un calibrage de référence à zéro retard de livraison. Ce choix permet d'avoir un niveau de capacité de production suffisant pour chacune des entreprises de la chaîne. C'est aussi le meilleur niveau d'efficacité et donc une référence permettant une comparaison simple des performances des chaînes logistiques qui seront construites à partir des profils d'entreprises calibrés sur les valeurs cibles de leurs taux de rendement.

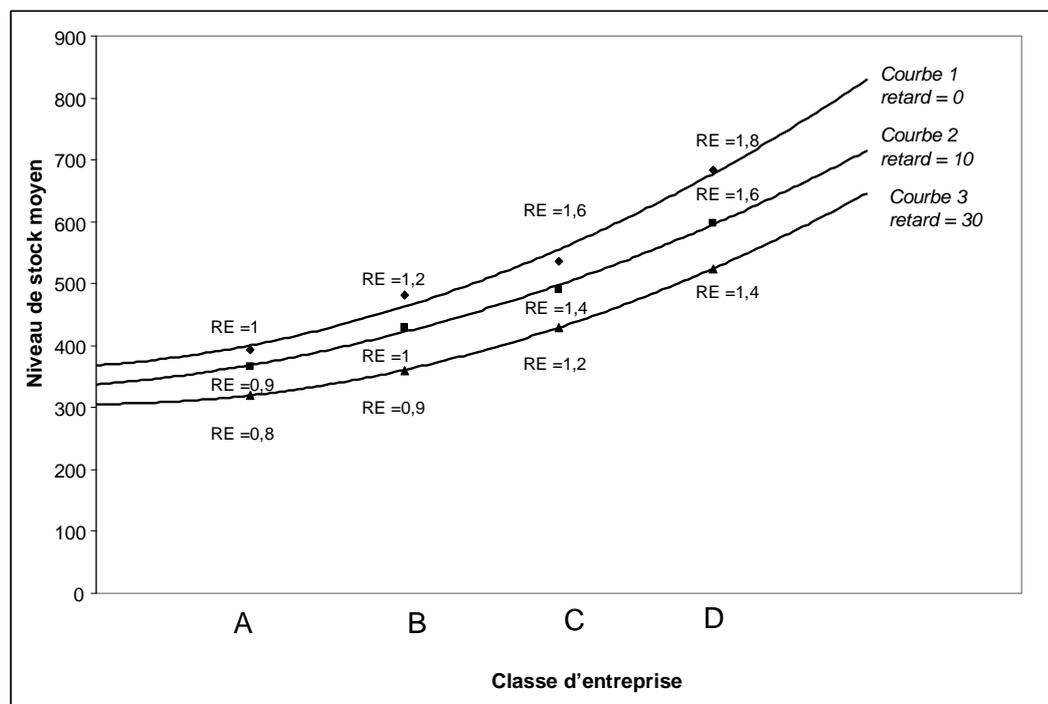


Figure VII.1. Effet de l'extra capacité sur les performances des entreprises

Une fois les paramètres de simulation calibrés pour chacune des classes d'entreprise, l'étude de simulation consiste à construire différentes combinaisons de chaînes logistiques à partir de ces profils types d'entreprise. La chaîne homogène composée de trois entreprises de classe A est alors simulée en ajustant la demande finale afin d'assurer une réponse à la demande sans retard de livraison (demande suivant la loi normale $N(50, 5)$).

Les autres configurations (combinaisons des quatre classes A, B, C et D) sont alors simulées avec la même demande. Cette démarche de calibrage permet d'avoir la même charge externe pour toutes les configurations logistiques et pouvoir ainsi comparer leurs performances.

Nous avons considéré deux environnements de production :

- une production sur stock (MTS/MTS/MTS) : les trois entreprises de la chaîne travaillent en MTS et livrent donc leurs clients à partir de stock de produits finis. Le produit doit être disponible pour livraison au moment de l'arrivée de la commande, sans quoi la livraison est considérée en retard (délai de livraison nul).
- une production à la commande en amont (ATO/ATO/MTS) : les deux premières entreprises de la chaîne produisent des produits semi-finis et finalisent leur production en réponse à la commande du client. L'entreprise aval produit sur stock pour répondre à la demande finale. Nous avons analysé ce genre de configuration pour étudier l'effet du déplacement du point de pénétration de la commande en amont de la chaîne. Ces modes de production sont souvent utilisés dans les industries de diversification de masse et constituent également des stratégies de *lean manufacturing* pour atteindre des objectifs de réduction de stocks. Il est donc intéressant de comparer ces environnements de production à des systèmes classiques de production sur stock. Un autre intérêt consiste à réaliser un benchmark de configurations logistiques en mesurant leur potentiel d'amélioration par rapport à un système de production sur stock, en fonction des capacités des échelons de la chaîne. C'est une première démarche de coordination des flux qui consiste à remonter l'information sur la demande en amont des processus de production des fournisseurs.

La demande du marché est une loi normale $N(50,5)$ pour chacun des deux flux de produits simulés. Nous avons réalisé 20 répliques de simulation pour chaque configuration logistique, avec une période de simulation de 10 000 heures/réplique. Ces campagnes de simulation sont suffisamment nombreuses et de longue durée pour dépasser la phase transitoire du système et tenir compte des phénomènes aléatoires.

VII.2.2. Plan de simulation

La combinaison de quatre classes d'entreprises (A, B, C et D) dans une chaîne à trois échelons donne un total de 64 configurations. Nous avons simulé l'ensemble de ces scénarios dans les deux environnements (sur stock et à la commande).

La figure VII.2 illustre ces combinaisons : chacun des trois axes du cube représente un échelon de la chaîne et prend donc une des quatre valeurs : A, B, C ou D. Une configuration est un point du cube, c'est-à-dire une combinaison de type XYZ avec X, Y et Z égaux aux classes A, B, C ou D.

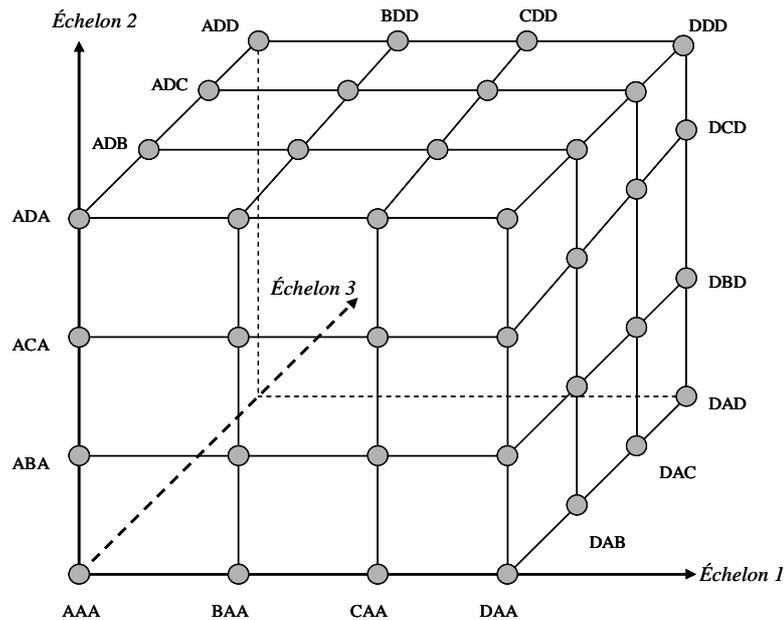


Figure VII.2. Les combinaisons de classes d'entreprises

VII.2.2.1. Modèle de production sur stock (MTS/MTS/MTS)

Le modèle de production sur stock est une chaîne logistique constituée de trois entreprises ayant chacune trois boucles de reconstituration de stocks (matières premières, produits semi-finis et produits finis), en se basant sur un modèle à point de commande. Le système fonctionne en reconstituant les stocks au fur et à mesure de leur consommation par la demande du marché. Les processus sont donc découplés par les stocks et seule l'entreprise aval de la chaîne a accès à la demande finale du client.

Le calibrage de ce modèle consiste à fixer les seuils d'approvisionnement et les quantités à commander. Ces paramètres de pilotage sont modélisés par des lois aléatoires triangulaires pour tenir compte des aléas.

Les différents paramètres de simulation sont :

- temps de processus : TPS
- temps de lancement d'OF : TPS_SETUP
- temps de changement de série : TPS_EXDIE
- le stock initial
- la taille des lots de production : TAILLELOT_PROCESS
- seuil de commande : Seuil
- taux de qualité : TQL
- mean time between failure : MTBF
- mean time to repair : MTTR
- taux supérieur d'acceptation de lancement d'un OF : TAOF2
- taux inférieur d'acceptation de lancement d'un OF : TAOF1

Le tableau VII.1 résume les valeurs de ces paramètres pour les quatre classes d'entreprises.

Classe A	Processus réception/Planning point 1	Processus Fab 1/Planning point 2	Processus Fab 2/Planning point 3	Processus Livraison
TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.15,0.17,0.19)	TRIA(0.13,0.16,0.18)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	–	TRIA(0.08,0.1,0.3)	TRIA(0.08,0.1,0.3)	–
TPS_EXDIE	–	TRIA(0.1,0.2,0.4)	TRIA(0.1,0.2,0.4)	–
Stock initial	90	90	90	–
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(70,80,90)	TRIA(70,80,90)	TRIA(70,80,90)	–
Seuil	TRIA(60,70,80)	TRIA(60,70,80)	TRIA(60,70,80)	–
TQL	0.99	0.99	0.99	–
MTBF	–	EXPO (200)	EXPO (200)	–
MTR	–	EXPO (1.5)	EXPO (1.5)	–
TAOF2	–	0.95	0.95	0.95
TAOF1	–	0.6	0.6	0.4

Classe B

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.11,0.14,0.16)	TRIA(0.10,0.12,0.14)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	–	TRIA(0.15,0.20,0.40)	TRIA(0.15,0.20,0.40)	–
TPS_EXDIE	–	TRIA(0.17,0.19,0.20)	TRIA(0.17,0.19,0.20)	–
Stock initial	90	90	90	–
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(80,90,100)	TRIA(80,90,100)	TRIA(80,90,100)	–
Seuil	TRIA(70,80,90)	TRIA(70,80,90)	TRIA(70,80,90)	–
TQL	0.96	0.96	0.96	–
MTBF	–	EXPO (150)	EXPO (150)	–
MTR	–	EXPO (3)	EXPO (3)	–
TAOF2	–	0.95	0.95	0.95
TAOF1	–	0.6	0.6	0.4

Classe C

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.10,0.11,0.12)	TRIA(0.09,0.10,0.11)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	–	TRIA(0.3,0.4,0.6)	TRIA(0.3,0.4,0.6)	–
TPS_EXDIE	–	TRIA(0.4,0.5,0.8)	TRIA(0.4,0.5,0.8)	–
Stock initial	90	90	90	–
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(90,100,120)	TRIA(90,100,120)	TRIA(90,100,120)	–
Seuil	TRIA(90,100,120)	TRIA(90,100,120)	TRIA(90,100,120)	–
TQL	0.93	0.93	0.93	–
MTBF	–	EXPO (100)	EXPO (100)	–
MTR	–	EXPO (4)	EXPO (4)	–
TAOF2	–	0.95	0.95	0.95
TAOF1	–	0.6	0.6	0.4

Classe D

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.08,0.09,0.10)	TRIA(0.07,0.08,0.09)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	–	TRIA(0.5,0.7,1)	TRIA(0.5,0.7,1)	–
TPS_EXDIE	–	TRIA(0.7,1,1.4)	TRIA(0.7,1,1.4)	–
Stock initial	90	90	90	–
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(100,110,140)	TRIA(100,110,140)	TRIA(100,110,140)	–
Seuil	TRIA(110,120,140)	TRIA(110,120,140)	TRIA(110,120,140)	–
TQL	0.91	0.91	0.91	–
MTBF	–	EXPO (80)	EXPO (80)	–
MTR	–	EXPO (5)	EXPO (5)	–
TAOF2	–	0.95	0.95	0.95
TAOF1	–	0.6	0.6	0.4

Tableau VII.1. Paramètres de simulation du modèle MTS/MTS/MTS

VII.2.2.2. *Modèle de production à la commande (ATO/ATO/MTS)*

Ce modèle consiste à s'approvisionner en amont de la chaîne auprès de fournisseurs dont la production est un processus d'assemblage à la commande. Les trois entreprises reçoivent des commandes générées par des boucles de reconstituer de stocks (approvisionnement à point de commande comme dans le précédent modèle). Pour les deux entreprises amont, le lancement des ordres de fabrication de produits finis se fait par contre sur la base des commandes effectives et non par une reconstitution de stocks. La quantité à produire dépend de la quantité demandée, du stock en cours et d'un stock de sécurité palliant les pertes (rebut et indisponibilité des machines).

Le calibrage du modèle se fait suivant la même démarche : simulation d'une demande pour chaque entreprise séparément, ajustement des paramètres et calibrage de la demande pour la chaîne constituée. Dans ce modèle, il s'agit de déterminer les stocks de sécurité (fonction des taux de rendements de chaque classe d'entreprise), et les délais de livraison.

Les différents paramètres de simulation sont :

- temps de processus : TPS
- temps de lancement d'OF : TPS_SETUP
- temps de changement de série : TPS_EXDIE
- le stock initial
- la taille des lots de production : TAILLELOT_PROCESS
- seuil de commande : Seuil
- taux de qualité : TQL
- mean time between failure : MTBF
- mean time to repair : MTTR
- taux supérieur d'acceptation de lancement d'un OF : TAOF2
- taux inférieur d'acceptation de lancement d'un OF : TAOF1
- stock de sécurité pour les produits finis : Stock Sécurité
- délai de livraison d'une commande : délai livraison

Le tableau VII.2 résume les valeurs de ces paramètres pour les quatre classes d'entreprises.

Classe A	Processus réception/Planning point 1	Processus Fab 1/Planning point 2	Processus Fab 2/Planning point 3	Processus Livraison
TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.15,0.17,0.19)	TRIA(0.13,0.16,0.18)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	---	TRIA(0.08,0.1,0.3)	TRIA(0.08,0.1,0.3)	---
TPS_EXDIE	---	TRIA(0.1,0.2,0.4)	TRIA(0.1,0.2,0.4)	---
Stock initial	90	90	10	---
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(60,70,80)	TRIA(60,70,80)	---	---
Seuil	TRIA(50,60,70)	TRIA(50,60,70)	---	---
TQL	0.99	0.99	0.99	---
MTBF	---	EXPO (200)	EXPO (200)	---
MTRR	---	EXPO (1.5)	EXPO (1.5)	---
TAOF2	---	0.95	0.95	0.95
TAOF1	---	0.6	0.6	0.4
Stock Sécurité	---	---	TRIA(5,10,15)	---
Délai livraison	---	---	---	20

Classe B

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.11,0.14,0.16)	TRIA(0.10,0.12,0.14)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	---	TRIA(0.15,0.20,0.40)	TRIA(0.15,0.20,0.40)	---
TPS_EXDIE	---	TRIA(0.17,0.19,0.20)	TRIA(0.17,0.19,0.20)	---
Stock initial	90	90	10	---
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(70,80,90)	TRIA(70,80,90)	---	---
Seuil	TRIA(60,70,80)	TRIA(60,70,80)	---	---
TQL	0.96	0.96	0.96	---
MTBF	---	EXPO (150)	EXPO (150)	---
MTRR	---	EXPO (3)	EXPO (3)	---
TAOF2	---	0.95	0.95	0.95
TAOF1	---	0.6	0.6	0.4
Stock Sécurité	---	---	TRIA(15,20,25)	---
Délai livraison	---	---	---	30

Classe C

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.10,0.11,0.12)	TRIA(0.09,0.10,0.11)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	---	TRIA(0.3,0.4,0.6)	TRIA(0.3,0.4,0.6)	---
TPS_EXDIE	---	TRIA(0.4,0.5,0.8)	TRIA(0.4,0.5,0.8)	---
Stock initial	90	90	90	---
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(90,95,110)	TRIA(90,95,110)	---	---
Seuil	TRIA(80,90,100)	TRIA(80,90,100)	---	---
TQL	0.93	0.93	0.93	---
MTBF	---	EXPO(100)	EXPO(100)	---
MTRR	---	EXPO(4)	EXPO(4)	---
TAOF2	---	0.95	0.95	0.95
TAOF1	---	0.6	0.6	0.4
Stock Sécurité	---	---	TRIA(25,30,35)	---
Délai livraison	---	---	---	40

Classe D

TPS	TRIA(0.01,0.02,0.03)	TRIA(0.08,0.09,0.10)	TRIA(0.07,0.08,0.09)	TRIA(0.01,0.02,0.03)
TPS_SETUP	---	TRIA(0.5,0.7,1)	TRIA(0.5,0.7,1)	---
TPS_EXDIE	---	TRIA(0.7,1,1.4)	TRIA(0.7,1,1.4)	---
Stock initial	90	90	90	---
TAILLELOT_PROCESS	TRIA(100,110,140)	TRIA(100,110,140)	---	---
Seuil	TRIA(110,120,140)	TRIA(110,120,140)	---	---
TQL	0.91	0.91	0.91	---
MTBF	---	EXPO (80)	EXPO (80)	---
MTRR	---	EXPO (5)	EXPO (5)	---
TAOF2	---	0.95	0.95	0.95
TAOF1	---	0.6	0.6	0.4
Stock Sécurité	---	---	TRIA(35,40,45)	---
Délai livraison	---	---	---	50

Tableau VII.2. Paramètres de simulation du modèle ATO/ATO/MTS

VII.3. Résultats de simulation

Nous avons réalisé des simulations pour les différentes combinaisons de classes d'entreprises. Nous allons présenter dans cette section les résultats de ces simulations. Nous nous sommes intéressés aux performances des différentes configurations en termes de niveau de stock global dans la chaîne (sommés de tous les stocks des entreprises de la chaîne), de retard de livraison au client final et de taux d'utilisation des ressources pour chaque échelon.

Nous présenterons dans un premier temps les résultats concernant quelques configurations particulières. Nous analyserons ensuite les résultats pour l'ensemble des configurations simulées, en utilisant certaines techniques d'analyse de données, à savoir : l'analyse en composantes principales, l'analyse des correspondances multiples et la classification hiérarchique. Ce traitement des données permet de normaliser les échelles de mesure (les indicateurs de performance n'ont pas les mêmes unités) et de construire une taxonomie des configurations logistiques, et ce en les caractérisant par des valeurs représentatives des indicateurs de performance.

VII.3.1. Les configurations MTS/MTS/MTS

VII.3.1.1. Les chaînes homogènes

La première expérience met en évidence la performance des chaînes lorsque les niveaux d'efficacité sont identiques pour les trois échelons : configurations AAA, BBB, CCC et DDD.

La figure VII.3 montre les valeurs des stocks et des retards de livraison moyens de ces configurations. Le stock moyen augmente de façon importante avec la dégradation de l'efficacité du système. Ceci se traduit par une augmentation considérable du niveau de stock (environ 400%) en passant d'une configuration AAA à DDD.

Seule la meilleure configuration AAA fonctionne sans retard de livraison. Ce dernier atteint plus de 200 heures pour la configuration la moins performante DDD. Cette dernière ne répond alors qu'à 80 % des commandes (le rapport entre le nombre de commandes livrées au client et le nombre total de commandes générées). Le taux de service (livraisons sans retard / total des commandes) de cette configuration n'est que d'environ 60%.

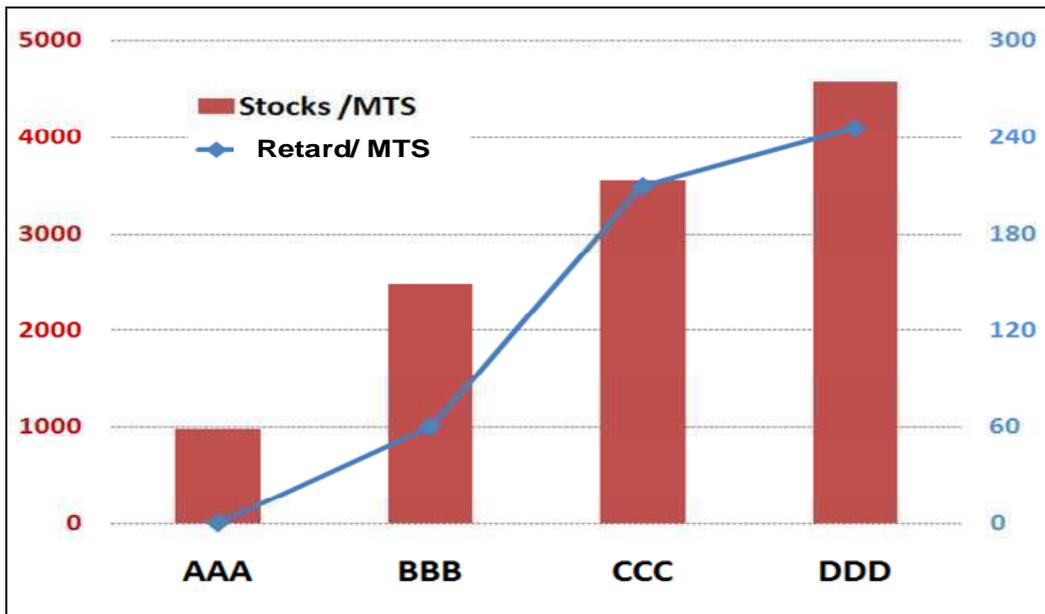


Figure VII.3. Performance des chaînes homogènes en MTS/MTS/MTS

VII.3.1.2. Les chaînes avec dégradation progressive de la performance d'un échelon

Le deuxième test consiste à analyser l'effet de la dégradation progressive de l'efficacité d'un échelon de l'entreprise placé en aval puis en amont de la chaîne. En l'occurrence, il s'agit de comparer les configurations : AAA, AAB, AAC, AAD d'une part, et les configurations AAA, BAA, CAA, DAA d'autre part. La figure VII.4 illustre les niveaux de stocks et les retards de livraison lorsque l'on dégrade la performance du dernier échelon de la chaîne.

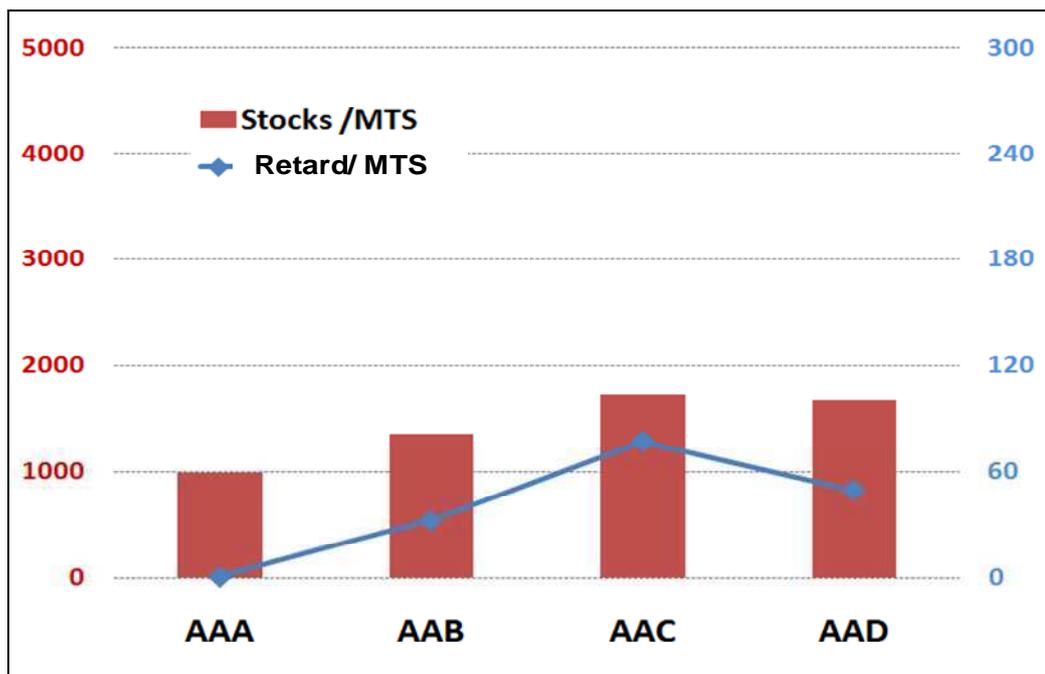


Figure VII.4. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec dégradation du dernier échelon

Le retard de livraison augmente avec la dégradation du niveau de capacité du dernier échelon. Cependant ce retard de livraison baisse pour la configuration AAD.

Le niveau de stock augmente de 20 % lorsque l'on passe du cas AAA à AAC. Le niveau de stock commence à diminuer dans le cas AAD. La différence du niveau de stock entre AAC et AAD est assez faible et ne peut donc être expliquée par les caractéristiques structurelles de ces configurations.

Quant au retard de livraison, il atteint un maximum autour de la zone de l'entreprise de classe C. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'ajout de capacité de production et de stock de sécurité (l'entreprise D fonctionne avec des lots, des seuils et des 'extra capacités' plus grands que ceux de C) permet d'atténuer les ruptures de stocks et donc les retards de livraison (résorber des retards de livraison accumulés en phase de démarrage).

Cependant, ce résultat doit être considéré en rapport avec la démarche du calibrage du modèle que nous avons utilisée. Dans la réalité, une entreprise de type D peut ne pas avoir suffisamment d'excédent capacitaire pour résorber les retards, auquel cas, la dégradation de la performance de la chaîne ne pourrait être estompée. Pratiquement, il s'agit de trouver un compromis entre le rendement (OEE) et la capacité à répondre aux fluctuations de la demande du client en ayant un excédent capacitaire et des stocks de sécurité.

Quand la dégradation de la performance se fait au niveau du premier échelon de la chaîne (BAA, CAA, DAA), les pertes de performance par rapport à la configuration AAA ne sont pas significatives. Ainsi, les configurations BAA et CAA fonctionnent sans retard de livraison et le stock augmente de 20% en passant de AAA à DAA (figure VII.5).

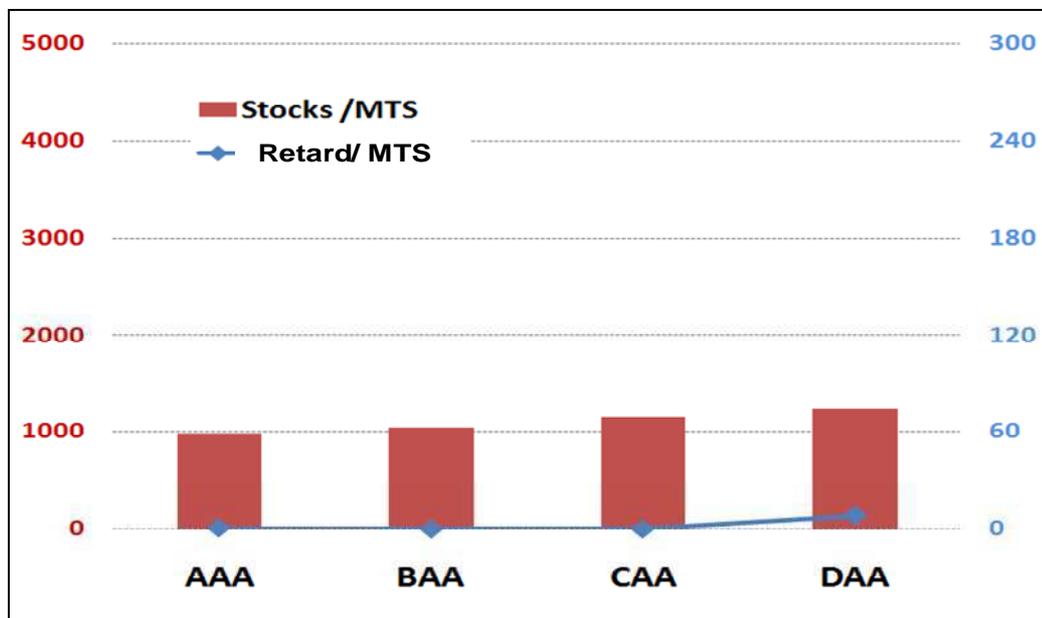


Figure VII.5. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec dégradation du premier échelon

La performance de la chaîne est donc plus sensible à celle du dernier échelon. En passant d'une chaîne homogène performante à une chaîne où le dernier échelon est moins performant, les stocks et les retards de livraison peuvent augmenter

considérablement. En revanche, lorsque les deux derniers échelons sont assez performants, l'impact de l'efficacité du premier échelon n'est pas très sensible.

VII.3.1.3. Les chaînes de classes A et D

Afin d'évaluer l'impact d'un grand gradient des performances des entreprises de la chaîne, nous avons simulé les configurations formées des entreprises A et D et comparé leur performance à celle des entreprises homogènes (AAA et DDD). Nous remarquons, comme le montre la figure VII.6, que les configurations de ce type ont des performances très disparates. En effet, les configurations ADA et ADD ont des retards de livraison très importants. Leurs niveaux de stocks sont faibles comparés aux configurations DAD, DDA et DDD, mais ces stocks faibles sont dus aux ruptures (le taux de commandes perdues dépasse 30% dans ces cas).

Exceptée la configuration DAD (performance moyenne proche de celle de BBB) et la configuration DAA qui a un maillon aval très performant, globalement, les configurations très hétérogènes (constituées d'entreprises de performances très dissimilaires) sont très peu performantes.

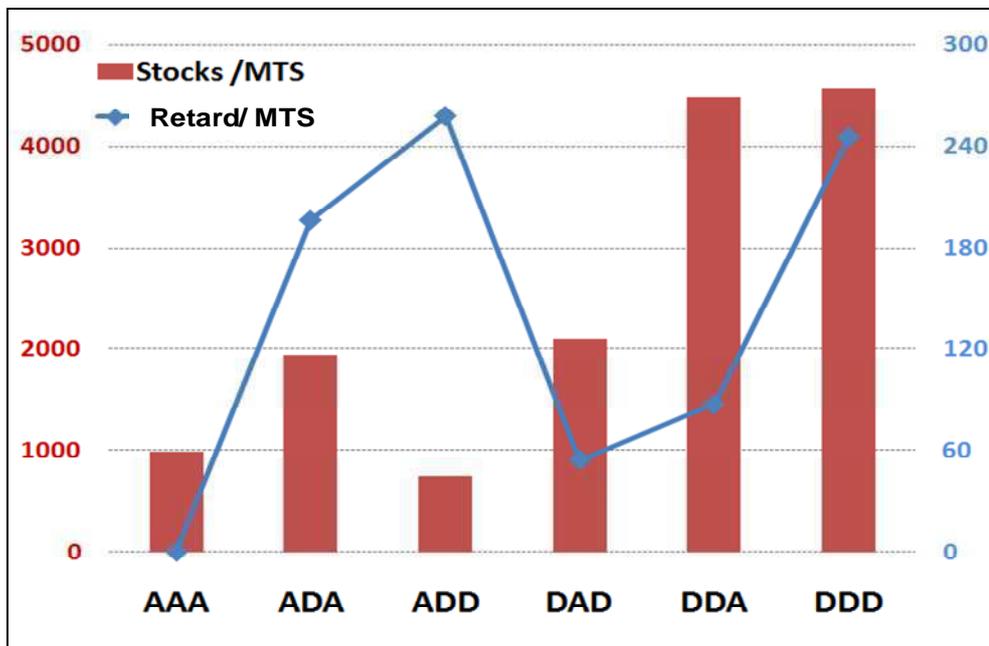


Figure VII.6. Performance des chaînes MTS/MTS/MTS avec des échelons de type A et D

VII.3.1.4. Simulation de l'ensemble des configurations MTS/MTS/MTS

Pour poursuivre l'exploration des configurations logistiques et évaluer leurs comportements en tenant compte simultanément des différents critères de performance, nous avons simulé l'ensemble des configurations de classes d'entreprises puis nous avons fait appel à différentes techniques d'analyse multidimensionnelle pour traiter les résultats obtenus.

L'analyse en composantes principales (ACP) puis l'analyse des correspondances multiples (ACM) mettent en évidence la qualité des relations entre les critères de performance pris en compte et fournissent une synthèse descriptive de la variété des configurations confrontées. En complément, la classification hiérarchique (CAH)

permet d'isoler des classes de configurations ayant des propriétés similaires en terme de niveau de stock, de retard de livraison et de taux d'occupation des ressources sur l'ensemble de la chaîne.

Plus précisément, une fois les variables normalisées c.à.d. abstraction faite des échelles de mesures, l'ACP propose une représentation simplifiée des données qui est fondée sur la recherche de facteurs (combinaisons linéaires) de variance maximale, d'autant plus fidèle lorsque les relations entre variables sont linéaires.

L'ACM quant à elle offre une réponse mieux adaptée lorsque l'hypothèse précédente peut être mise en doute. Elle nécessite un codage préalable des données quantitatives, qu'on effectue ici sur la base de plages de valeurs qui couvrent un nombre voisin de configurations : par exemple, on choisit de répartir les (64) configurations en trois groupes selon le critère niveau de stocks : le premier comprendra les 21 valeurs les plus faibles (33%), le second (33%) couvrira la plage moyenne et le dernier rassemblera les 22 configurations de stocks les plus hauts. En reproduisant ce principe pour toutes les variables, on peut dans un second temps étudier un tableau de contingence qui croise les occurrences de toutes les modalités de variables « codées » et mettre en évidence des associations plus/moins fréquentes.

Enfin, l'utilisation de la classification permet la construction d'une taxonomie des configurations logistiques. Chaque classe pouvant être décrite par un ensemble de valeurs remarquables sur les critères de performances.

Des définitions de ces techniques d'analyse de données sont données dans l'annexe B.

VII.3.1.4.1. Analyse en composantes principales

Le tableau des données d'entrée de l'analyse est constitué des résultats de simulation de 64 configurations suivant les cinq variables de performance : stock, retard, taux d'occupation du premier échelon, taux d'occupation du deuxième échelon et taux d'occupation du dernier échelon.

L'ACP montre que le premier axe factoriel représente 56% de l'inertie totale et le second axe 21%. Ces deux axes représentent donc près de 80% de l'information des données brutes.

Sur le premier plan factoriel, on distingue les configurations caractérisées par de faibles retards de livraisons et de taux d'occupation du premier échelon de celles caractérisées par de forts taux d'occupation du premier et deuxième échelons.

Les coordonnées des variables sur les deux axes factoriels sont présentées dans la figure VII.7. Nous avons présenté en différentes couleurs les variables illustratives (CIEx, $x = 1, 2, 3$) pour différencier les quatre classes d'entreprises sur chacun des trois échelons de la chaîne. Nous avons aussi présenté les coordonnées des centres de gravités (en petit carrés sur le graphe) des quatre classes d'entreprises pour chaque échelon.

Nous remarquons que le premier plan factoriel divise la population des configurations en trois groupes : les configurations de type xxD, les configurations de type xxA et entre les deux, les configurations de type xxB ou xxC ($x = A, B, C, D$). Nous voyons sur le graphe les trajectoires des variables illustrant la classe du deuxième et du troisième échelon.

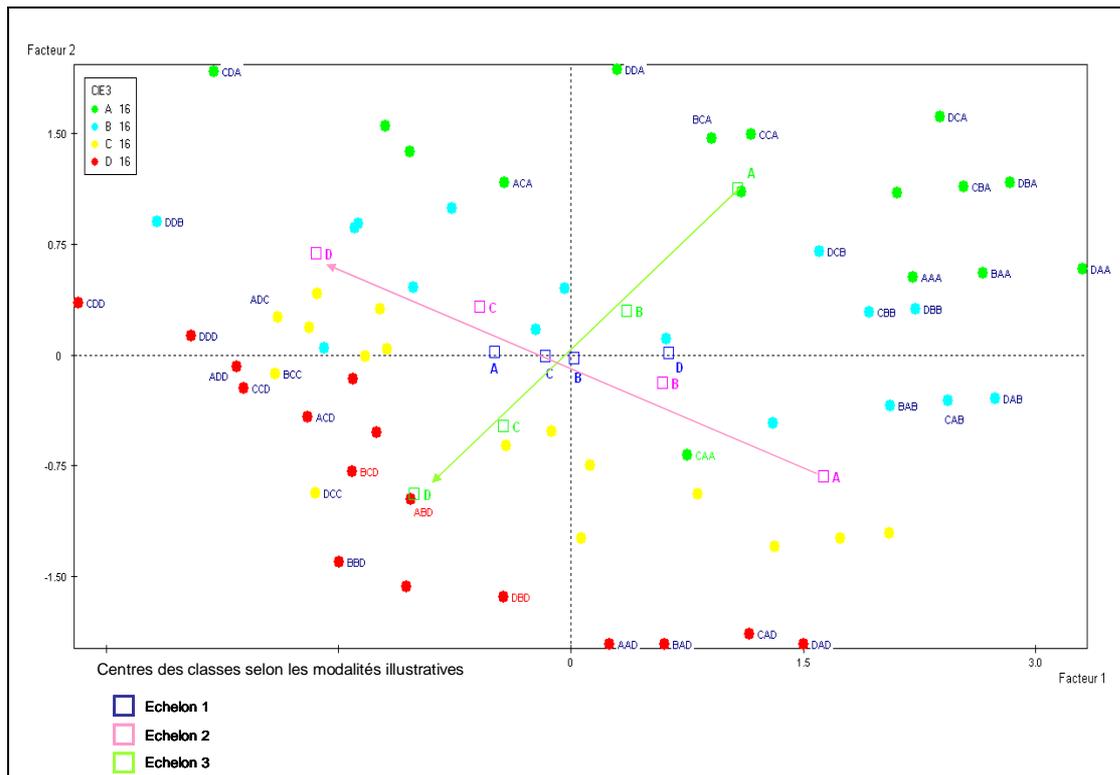


Figure VII.7. Coordonnées sur le premier plan factoriel des configurations MTS/MTS/MTS

Les deux autres axes factoriels 3 et 4 (qui représentent un pourcentage d’inertie de 20%) sont illustrés sur la figure VII.8. On remarque une représentation plus dense des données sur ce plan factoriel. On distingue néanmoins suivant l’axe 3, le groupe des configurations de type Axx, du reste des configurations. Sur l’axe 4, les configurations de type Dxx et Cxx constituent également un groupe distinct de configurations. Sur ce plan factoriel nous remarquons la représentativité de la classe d’entreprise du premier échelon.

Cette analyse montre qu'il y a quatre groupes de configurations :

- Groupe 1 : ce groupe se caractérise par des configurations ayant comme dernier échelon une entreprise de classe A ou B. Les configurations de ce groupe sont les plus performantes en termes de niveau de stock (1600 unités en moyenne) et de retard de livraison (14 heures en moyenne). Le taux d'occupation moyen des ressources est d'environ 70 %. Ce taux est pratiquement le même pour les trois échelons de la chaîne.
- Groupe 2 : ce groupe se caractérise par des configurations n'ayant pas d'entreprise de classe D au second échelon de la chaîne. Ce sont des configurations moins performantes que celles du groupe 1 (stock moyen d'environ 2000 unités et un retard de livraison d'environ 60 heures). Le taux d'occupation des ressources du premier et du deuxième échelon est plus grand que celui du groupe 1 (80% environ). Cependant, le troisième échelon a un taux d'occupation de seulement 55 %.
- Groupe 3 : ce groupe comporte seulement 7 configurations. Ce sont des configurations formées globalement des classes B, C et D. Le niveau de stock moyen est très important (plus de 7000 unités). Le retard est également assez important (160 heures en moyenne). Le taux d'occupation du premier échelon est plus important que celui des configurations du groupe 2 (plus de 90%), mais celui de la seconde entreprise est inférieur à 70% et celui du dernier échelon est encore moins occupé (moins de 50%).
- Groupe 4 : ce groupe comporte 23 configurations. Le retard de livraison est le plus élevé de tous les groupes (environ 200 heures en moyenne). Le stock est également plus important que les deux premiers groupes, mais nettement inférieur à celui du groupe 3. Dans ce groupe, l'entreprise de classe A n'apparaît pas dans le second échelon. Le dernier échelon est aussi de type B, C ou D généralement (excepté les configurations ADA, BDA, ACA). En ce qui concerne l'occupation des ressources, on remarque l'accentuation de la tendance observée dans le groupe 3, à savoir une occupation très importante du premier échelon (plus de 95%) et de faibles taux d'occupation du deuxième (60%) et troisième échelon (50%).

Cette classification montre aussi que le groupe 1 est caractérisé par un grand taux d'occupation de l'entreprise aval. Cela est corrélé avec le bon niveau de réponse à la demande dans les délais. Le groupe 2 est caractérisé par un grand taux d'occupation de l'entreprise de deuxième échelon. En effet, dans ce groupe l'entreprise du second niveau est de classe A ou B, alors que l'entreprise cliente est de classe B, C ou D. Cela induit des volumes importants de demande de l'échelon 3 à l'échelon 2 et donc une grande occupation des ressources de l'entreprise centrale. Le groupe 3 est caractérisé par des stocks importants. Les configurations de ce groupe sont formées des classes B, C ou D, ce qui induit d'importants niveaux de rechargement et donc des stocks de sécurité assez importants. Le niveau moyen du stock de la chaîne est alors important, mais les faibles rendements des entreprises aval fait que la réponse à la demande est peu fiable, d'où des retards de livraison. Enfin le groupe 4 est caractérisé par d'importants retards de livraison et un grand taux d'occupation des ressources du premier échelon.

En comparant les taux de disponibilité initiaux sur lesquels sont calibrées les classes d'entreprise (cf. *tableau IV.1*) avec les taux d'occupation moyens observés sur les chaînes, nous constatons sur le groupe 4 par exemple que :

- pour le premier échelon, l'entreprise est en surcharge de production, puisque ces configurations fonctionnent dans certains cas à 100% de la capacité (97 % en moyenne), alors que la disponibilité la plus importante qui peut être atteinte est de l'ordre de 95% (taux de disponibilité de la classe A).
- les deux derniers échelons ne sont occupés qu'à moitié. Ce taux est inférieur à la disponibilité minimale qui est celle de la classe D (taux de disponibilité moyen de 65 %).

La performance de ces chaînes est affectée par la grande hétérogénéité des classes des échelons et la faible performance des deux derniers échelons (souvent des classes C et D), qui s'approvisionnent avec de grands volumes ce qui induit une surcharge en amont de la chaîne. Tandis que l'entreprise client est inoccupée en attente d'approvisionnement, l'entreprise fournisseur accumule les ordres et sature ses ressources pour répondre à la demande. Ainsi, le taux de rendement de l'entreprise aval se trouve encore amoindri par des temps d'attente induits.

VII.3.1.4.2. Analyse des correspondances multiples

L'ACP et classification qui en résulte nous renseignent sur la répartition des configurations suivant les axes factoriels construits par une combinaison des variables de performance. Cependant, cette démarche n'est pas appropriée pour analyser des données qui peuvent éventuellement avoir un caractère non linéaire. Ainsi, nous utilisons l'ACM qui traite de modalités de variables qualitatives et qui permet d'étudier les associations entre les variables représentatives de la performance des configurations.

Nous avons considéré pour chaque mesure de performance trois modalités : haute, moyenne et basse. Nous avons également introduit des variables illustratives qui représentent la classe d'entreprise pour chacun des trois échelons (¹A veut dire premier échelon de classe A, ²B veut dire deuxième échelon de classe B, etc.). Avec ce modèle, nous traitons des variables sous formes d'intervalles de valeurs et de modalités illustratives, ce qui permet d'enrichir l'analyse.

Le premier plan factoriel a un pourcentage d'inertie de 45%, le deuxième plan 25% et le troisième 18%. Les variables actives les plus significatives sur les axes 1, 2, 3, 4 sont respectivement : un retard de livraison faible, un stock faible, un stock moyen, un taux d'occupation moyen du second échelon.

Les figures VII.9, VII.10 et VII.11 illustrent les coordonnées des configurations sur trois plans factoriels, ainsi que les variables illustratives caractérisant chaque groupement.

- Premier plan : nous distinguons trois groupes de configuration. Le premier groupement est caractérisé par un délai de livraison bas (Liv<54h), un taux d'occupation élevé du dernier échelon (Oc3>62%). Ce groupe contient des configurations dont la première et la deuxième entreprise sont de type A. Le deuxième groupe est caractérisé par un délai de livraison élevé (Liv>164 h), une faible occupation du dernier échelon (Oc3<49%) mais une forte occupation de l'entreprise amont (Oc1>96%). Ce groupe comporte des configurations dont le dernier maillon est de classe D. Entre ces deux groupes extrêmes, des configurations caractérisées par des performances moyennes et comportant des entreprises de type B et C.

- Deuxième plan : sur ce plan, on distingue des configurations différenciées par les taux d'occupation des ressources. D'un côté, on a des configurations avec un taux d'occupation élevé au premier échelon (Oc1>96%) et des niveaux de stocks moyens (1500<Stk<2700), et de l'autre côté des configurations avec un taux d'occupation faible

Une classification hiérarchique affinée (classification des résultats de l'analyse des correspondances consolidée par la méthode des centres mobiles³) des données permet de construire des groupes de configurations. Nous avons choisi 5 groupes (clairement identifiables sur l'arbre de classification). La répartition des configurations et les performances moyennes de ces groupes sont illustrées le tableau VII.4.

- Groupe 1 : ce groupe comporte 18 configurations les plus performantes en termes de stocks (1400 unités en moyenne) et de retard de livraison (10 heures en moyenne). Il se caractérise par l'absence au dernier échelon de la chaîne d'entreprises de type C et D. Le deuxième échelon ne comporte pas d'entreprise de classe D. Le taux d'occupation des ressources est stable (70 % environ) pour les trois entreprises de la chaîne.
- Groupe 2 : ce groupe comporte seulement 8 configurations. Le niveau de stock moyen est de 2600 unités et le retard de 123 heures. Les configurations ne comportent pas d'entreprise D au dernier échelon de la chaîne. Les taux d'occupation des entreprises est assez variable et diminue considérablement en remontant la chaîne d'amont en aval (96 %, 64% et 60 %). Le dernier échelon est surchargé et les entreprises amont sont au deçà des taux nominaux d'occupation.
- Groupe 3 : ce groupe compte 11 configurations dont le dernier échelon n'est que de classes C et D, alors que la deuxième entreprise est de classe A ou B. Ce groupe a un retard de livraison moyen meilleur que le groupe 2 (70 heures environ) et un stock un peu plus élevé (2700 unités environ). L'occupation des ressources est différente des groupes 2 et 1. En effet, le taux d'occupation croît quand on passe de la première entreprise à la deuxième mais décroît considérablement au niveau du dernier échelon (82%, 93% et 51%). Cela s'explique par le fait que l'entreprise de niveau deux est de type A et B, donc a un taux d'occupation élevé. Cependant, le taux d'occupation du dernier échelon (C et D) est plus important que les taux de disponibilité des entreprises de ces classes.
- Groupe 4 : ce groupe comporte 10 configurations composées essentiellement des classes B, C et D. Le niveau de stock est le plus haut des quatre groupes (près de 4500 unités). Le retard de livraison est également assez important (plus de 150 h). Les taux d'occupation des ressources sont légèrement inférieurs à ceux du groupe 2 (92%, 65% et 54%).
- Groupe 5 : ce groupe comporte 17 configurations caractérisées par deux derniers échelons de classes différentes de A (on trouve surtout des classes C et D en aval). Le niveau de stock est inférieur à celui du groupe 4, mais le retard de livraison est très important (plus de 200 heures). Le premier échelon est surchargé (97%) alors que le premier est sous chargé (seulement 45%). Ce groupe est le moins performant avec des ruptures d'approvisionnement assez fréquentes.

³ Méthode des centres mobiles : on se donne une partition de départ et chaque classe est représentée par son centre de gravité. On construit alors une nouvelle partition en affectant chaque point au plus proche des centres précédents, et on itère le procédé jusqu'à l'obtention d'une partition stable.

GROUPE 1 / 5									
V.TEST	PROBA	---- POURCENTAGES ----			MODALITES	DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES				
				28.13	CLASSE 1 / 5			aa1a	18
6.94	0.000	81.82	100.00	34.38	Livr<54	Livr		Liv1	22
6.41	0.000	80.95	94.44	32.81	Oc3>62%	Occ3		O3+	21
4.25	0.000	63.64	77.78	34.38	Stk<1500	Stk		Stk1	22
4.25	0.000	63.64	77.78	34.38	Ocl<86%	Occl		O1-	22
3.73	0.000	68.75	61.11	25.00	A	CIE3		A	16
-2.87	0.002	0.00	0.00	25.00	D	CIE2		D	16
-2.87	0.002	0.00	0.00	25.00	C	CIE3		C	16
-2.87	0.002	0.00	0.00	25.00	D	CIE3		D	16
-2.94	0.002	4.55	5.56	34.38	Oc3<49%	Occ3		O3-	22
-3.58	0.000	0.00	0.00	32.81	Liv>164	Livr		Liv3	21
-3.58	0.000	0.00	0.00	32.81	Stk>2700	Stk		Stk3	21
-3.58	0.000	0.00	0.00	32.81	Ocl>96%	Occl		O1+	21
-3.58	0.000	0.00	0.00	32.81	Liv<164	Livr		Liv2	21
-3.58	0.000	0.00	0.00	32.81	Oc3<62%	Occ3		O3=	21
GROUPE 2 / 5									
V.TEST	PROBA	---- POURCENTAGES ----			MODALITES	DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES				
				12.50	CLASSE 2 / 5			aa2a	8
3.91	0.000	38.10	100.00	32.81	Liv<164	Livr		Liv2	21
3.04	0.001	33.33	87.50	32.81	Ocl>96%	Occl		O1+	21
GROUPE 3 / 5									
V.TEST	PROBA	---- POURCENTAGES ----			MODALITES	DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES				
				17.19	CLASSE 3 / 5			aa3a	11
4.90	0.000	52.38	100.00	32.81	Oc2>78%	Occ2		O2+	21
2.72	0.003	43.75	63.64	25.00	A	CIE2		A	16
2.67	0.004	38.10	72.73	32.81	Stk<2700	Stk		Stk2	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	Oc2<78%	Occ2		O2=	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	Liv>164	Livr		Liv3	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	Oc3>62%	Occ3		O3+	21
-2.53	0.006	0.00	0.00	34.38	Oc2<62%	Occ2		O2-	22
-2.53	0.006	0.00	0.00	34.38	Stk<1500	Stk		Stk1	22
GROUPE 4 / 5									
V.TEST	PROBA	---- POURCENTAGES ----			MODALITES	DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES				
				15.63	CLASSE 4 / 5			aa4a	10
4.58	0.000	47.62	100.00	32.81	Ocl<96%	Occl		O1=	21
3.76	0.000	42.86	90.00	32.81	Oc3<62%	Occ3		O3=	21
3.76	0.000	42.86	90.00	32.81	Stk>2700	Stk		Stk3	21
-2.34	0.010	0.00	0.00	34.38	Stk<1500	Stk		Stk1	22
-2.34	0.010	0.00	0.00	34.38	Ocl<86%	Occl		O1-	22
-2.34	0.010	0.00	0.00	34.38	Liv<54	Livr		Liv1	22
GROUPE 5 / 5									
V.TEST	PROBA	---- POURCENTAGES ----			MODALITES	DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES				
				26.56	CLASSE 5 / 5			aa5a	17
6.83	0.000	80.95	100.00	32.81	Liv>164	Livr		Liv3	21
4.54	0.000	63.64	82.35	34.38	Oc3<49%	Occ3		O3-	22
4.12	0.000	61.90	76.47	32.81	Ocl>96%	Occl		O1+	21
2.73	0.003	50.00	64.71	34.38	Oc2<62%	Occ2		O2-	22
2.69	0.004	56.25	52.94	25.00	D	CIE2		D	16
2.69	0.004	56.25	52.94	25.00	D	CIE3		D	16
-2.62	0.004	4.76	5.88	32.81	Oc3>62%	Occ3		O3+	21
-2.74	0.003	0.00	0.00	25.00	A	CIE2		A	16
-3.43	0.000	0.00	0.00	32.81	Liv<164	Livr		Liv2	21
-3.56	0.000	0.00	0.00	34.38	Ocl<86%	Occl		O1-	22
-3.56	0.000	0.00	0.00	34.38	Liv<54	Livr		Liv1	22

Tableau VII.5. Caractérisation des groupes de configurations MTS/MTS/MTS

VII.3.1.5. Synthèse de simulation des chaînes MTS/MTS/MTS

La simulation de configurations de chaînes logistiques produisant sur stock (MTS/MTS/MTS) et composées d'entreprises ayant des rendements synthétiques dissimilaires nous a permis de comprendre un certain nombre de phénomènes régissant la connectivité des flux de ces chaînes logistiques et de construire une taxonomie de configurations logistiques suivant différents indicateurs de performance.

Les résultats de simulation montrent que :

- Une chaîne homogène est d'autant plus performante que la classe de l'entreprise la constituant est plus efficace.
- La dégradation du premier échelon d'une chaîne très efficace affecte peu sa performance.
- La dégradation du dernier échelon (entreprise répondant au client final) d'une chaîne très efficace détériore sa performance. Un niveau minimal de performance est atteint lorsque l'entreprise aval n'a pas un niveau de capacité suffisant et n'a pas d'excédent capacitaire et de stocks de sécurité qui lui permettent de résorber l'indisponibilité des produits. A partir de cette zone de faible performance, une entreprise aval ayant un très bas niveau de capacité compensé par une marge de sécurité suffisante sur les capacités et les stocks conduirait à une chaîne un peu plus efficace. La figure VII.12 illustre cette relation entre le niveau de capacité du dernier échelon d'une chaîne de très haute efficacité en amont et sa performance globale.

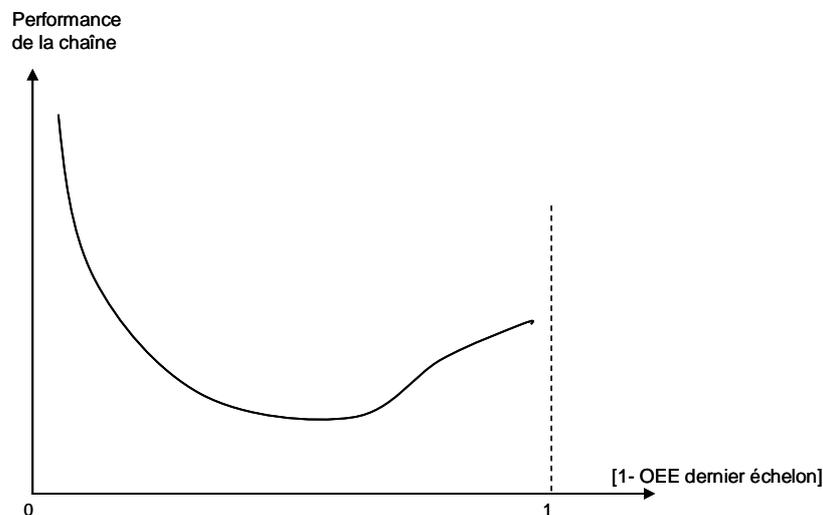


Figure VII.12. Effet de dégradation du dernier échelon d'une chaîne MTS/MTS/MTS très efficace

- La performance d'une chaîne très hétérogène (un maillon très efficace fournisseur ou client d'un maillon peu efficace) est généralement peu performante. On observe dans ce cas des ruptures d'approvisionnement résultant des volumes de recommandés commandés par l'entreprise à faible capacité à une entreprise qui travaille sur des tailles de lots moins importantes (du fait de sa meilleur

disponibilité). Dans ce cas, l'entreprise la moins performante pénalise son fournisseur qui ne peut honorer les commandes à temps, mais pénalise aussi son propre rendement par l'augmentation des temps non requis générés par l'attente de livraison de gros volumes de matières premières. Inversement, lorsque l'entreprise la plus efficace s'approvisionne chez une entreprise beaucoup moins performante, cette dernière a tendance à regrouper les commandes pour lancer de gros ordres de fabrication (résorber les pertes de disponibilité). Il en résulte des pertes de disponibilité chez le fournisseur qui pénalise le client et donc la performance globale de la chaîne.

➤ L'analyse statistique des résultats de simulation nous a permis de distinguer différents groupes de configurations logistiques caractérisées par des critères de performance dissimilaires. Grâce à une analyse factorielle et une classification hiérarchique, nous avons décelé des caractéristiques suffisamment représentatives des différents groupes de configurations logistiques. En l'occurrence, on a distingué :

- Un premier groupe de chaînes performantes (peu de stock et de retard de livraison) avec une occupation assez équilibrée des ressources des entreprises de la chaîne. Ce sont des configurations d'un bon niveau de performance en aval de la chaîne.

- Deux groupes de chaînes moyennement performantes. Ces deux groupes sont structurés différemment. D'un côté, un groupe qui comporte des configurations dont le premier et le dernier échelon sont des entreprises de performance haute ou moyenne et une entreprise centrale de performance très variée. Le niveau d'occupation du premier échelon correspond à peu près au plus haut taux de disponibilité des quatre classes d'entreprises ce qui donne une surcharge de production assez importante pour la première entreprise de la chaîne. Les deux entreprises aval ont des taux d'occupation moyens.

De l'autre côté, un groupe qui opère avec un niveau de stock comparable mais avec un niveau de service meilleur. On y trouve des chaînes avec un acteur central assez performant et un dernier échelon de performance plutôt faible. Ce dernier a un taux d'occupation beaucoup plus faible comparé à ceux des fournisseurs.

- Deux groupes de configurations très peu performantes. L'un a un niveau de stock très élevé avec une forte dégradation des taux d'occupation des ressources de l'amont vers l'aval de la chaîne. Il est composé d'entreprises de niveaux de capacité assez proches mais faibles. L'autre groupe a des retards de livraison très importants. Le niveau moyen des stocks est moins important mais la disparité des occupations des ressources entre les échelons est accentuée. Dans ce groupe les deux derniers échelons sont de faible performance, généralement avec une plus grande hétérogénéité des niveaux de capacité que l'autre groupe.

La figure VII.13 montre les profils de performance (retard, stock, occupation troisième échelon) des quatre groupes de configurations issus de l'ACP. En haut du graphe, sont présentées les valeurs moyennes des indicateurs de performance sur une échelle réduite (0 – 5). En bas du graphe, sont présentées les valeurs moyennes du niveau de stock, de retard de livraison et du taux d'occupation du troisième échelon (présenté par un cercle

de surface proportionnelle à la valeur du taux d'occupation). Nous remarquons que le groupe 1 contient des configurations avec des performances optimales (au sens de Pareto). Le groupe 2 domine également les groupes 3 et 4.

La figure VII.14 illustre les mêmes résultats pour les groupes de configurations issus de l'ACM. Avec cette analyse, le groupe 1 est optimal, mais aucun des quatre autres n'est Pareto dominant.

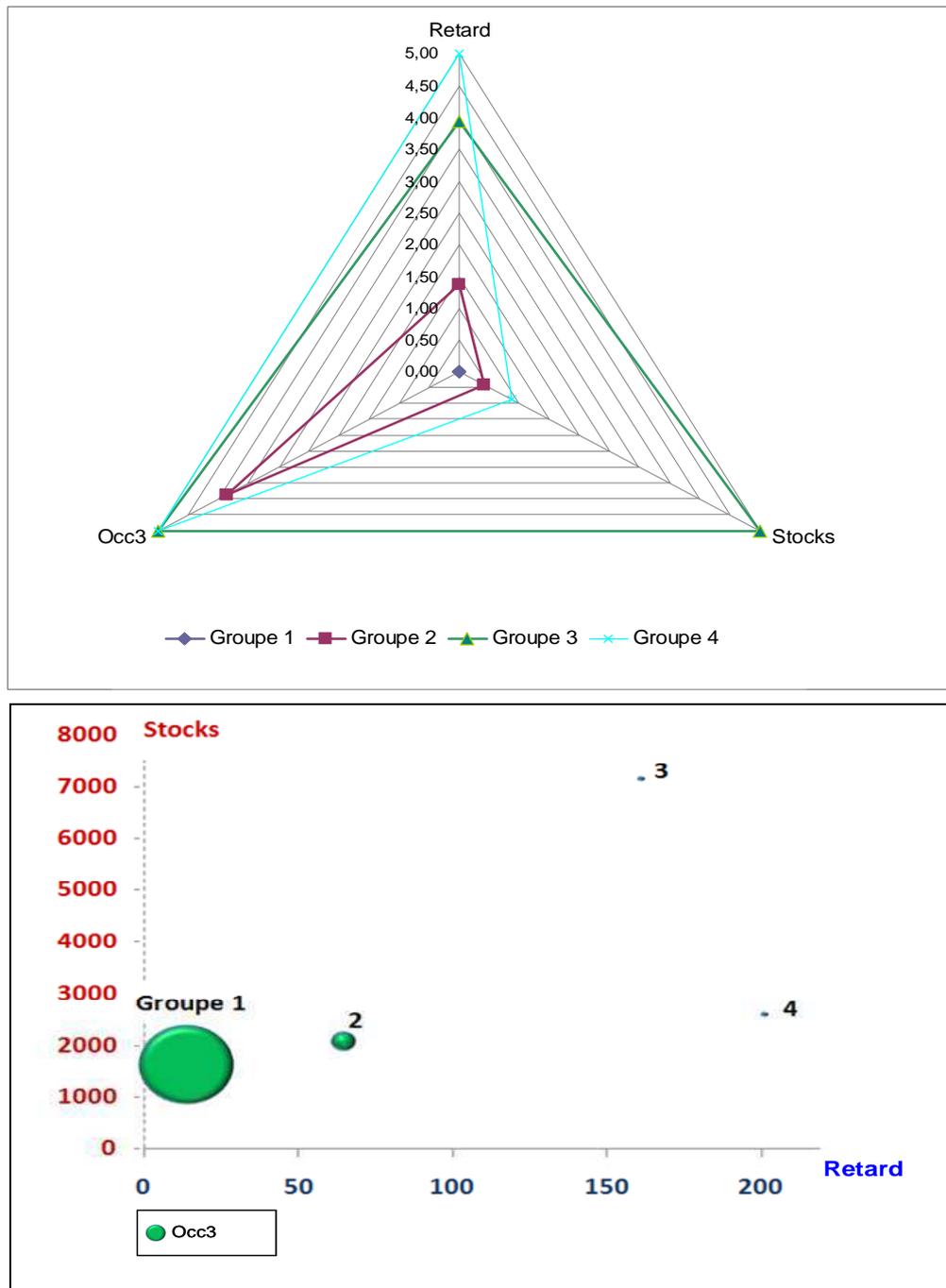


Figure VII.13. Performances des groupes de configurations MTS/MTS/MTS (ACP)

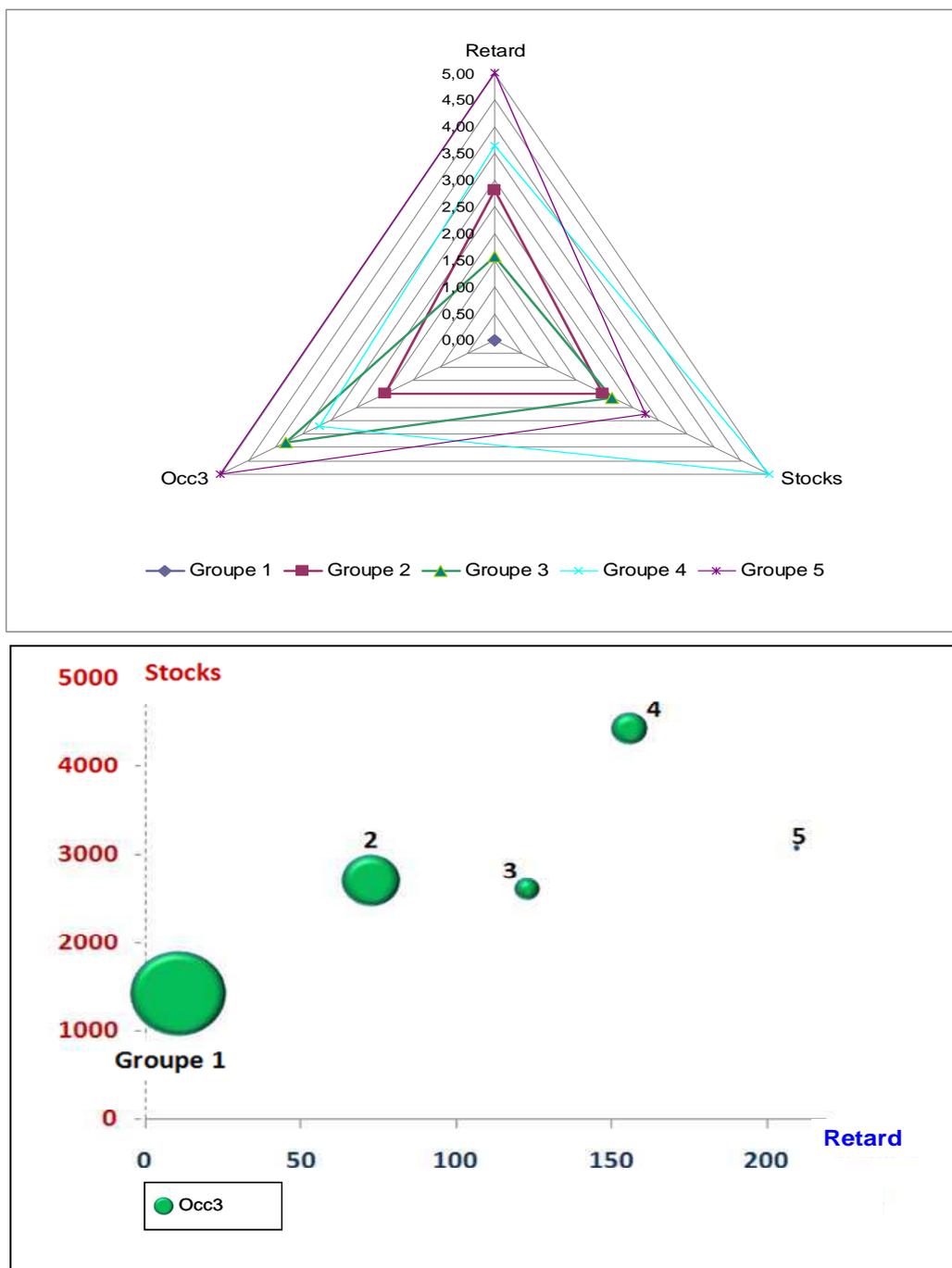


Figure VII.14. Performances des groupes de configurations MTS/MTS/MTS (ACM)

VII.3.2. Les configurations ATO/ATO/MTS

Nous avons simulé et analysé de la même façon que le cas MTS/MTS/MTS les configurations ATO/ATO/MTS. Nous avons utilisé la même demande du marché afin de se placer dans les mêmes conditions et pouvoir ainsi comparer les deux stratégies de réponse à la demande.

VII.3.2.1. Les chaînes homogènes

Comme dans le cas de production sur stock, les chaînes constituées d'entreprises de même classe sont d'autant plus performantes que le niveau de capacité de l'entreprise est élevé. La figure VII.15 illustre l'évolution du niveau de stock et du retard de livraison de ces configurations. La configuration la plus performante (AAA) a un niveau de stock d'environ 900 unités. Ce dernier atteint 1500 unités pour le cas DDD. C'est une augmentation d'environ 80%. Rappelons que dans le cas MTS/MTS/MTS, les stocks ont pratiquement triplé en passant de AAA à DDD.

Le retard de livraison augmente lui aussi, passant de zéro retard pour AAA à 25 heures de retard pour DDD. Ces retards de livraison restent assez faibles par rapport aux configurations produisant en MTS/MTS/MTS (plus de 200 heures pour le cas DDD).

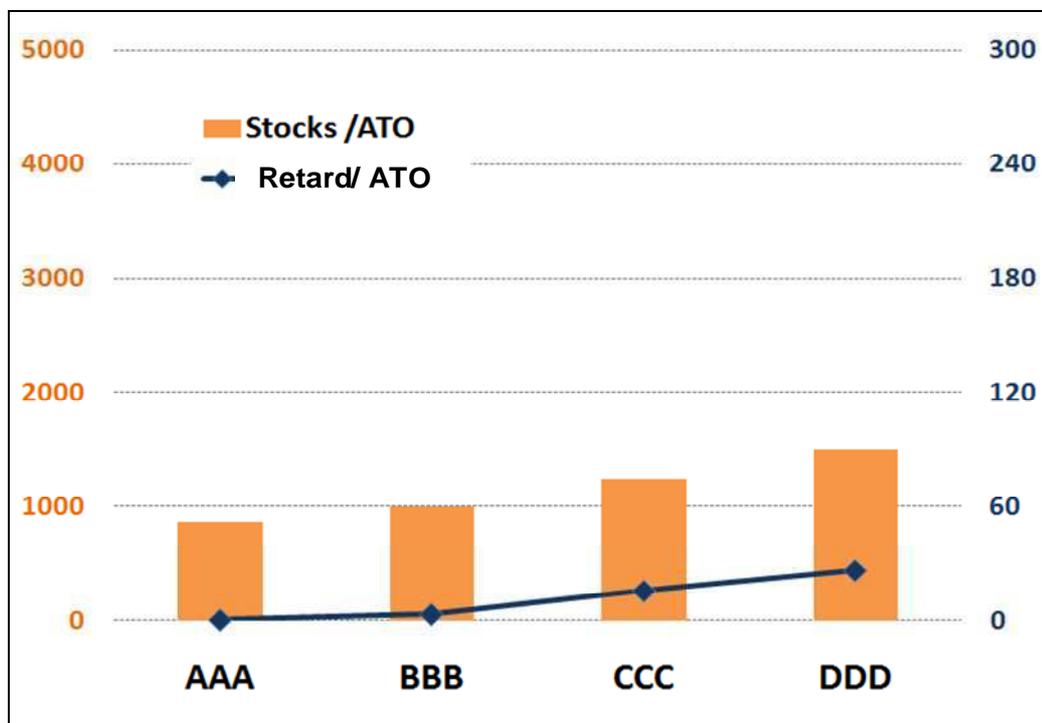


Figure VII.15. Performance des chaînes homogènes en ATO/ATO/MTS

VII.3.2.2. Les chaînes avec dégradation progressive de la performance d'un échelon

La performance des configurations de type AAX ($X = A, B, C, D$) baisse avec la dégradation du dernier échelon, comme le montre la figure VII.16. Ainsi, le stock augmente d'environ 50% entre AAA et AAD. Le retard de livraison de la configuration AAD dépasse les 200 heures (un niveau de service inférieur à la configuration DDD).

Contrairement à la stratégie MTS/MTS/MTS, où la performance de AAD est meilleure que celle de AAC, dans cet environnement de production à la commande, la performance de la chaîne continue de se détériorer. En effet, dans le cas de production sur stock en amont, l'entreprise de type D a suffisamment de marge capacitaire et de

stocks pour pallier son faible niveau de disponibilité. Dans le cas où le fournisseur de D produit en ATO, cette marge est réduite du fait du délai d'approvisionnement. Le fournisseur doit lancer la production de quantités importantes de produits finis, le client épuise pendant ce temps ses stocks de sécurité et accumule les retards de livraison au client final.

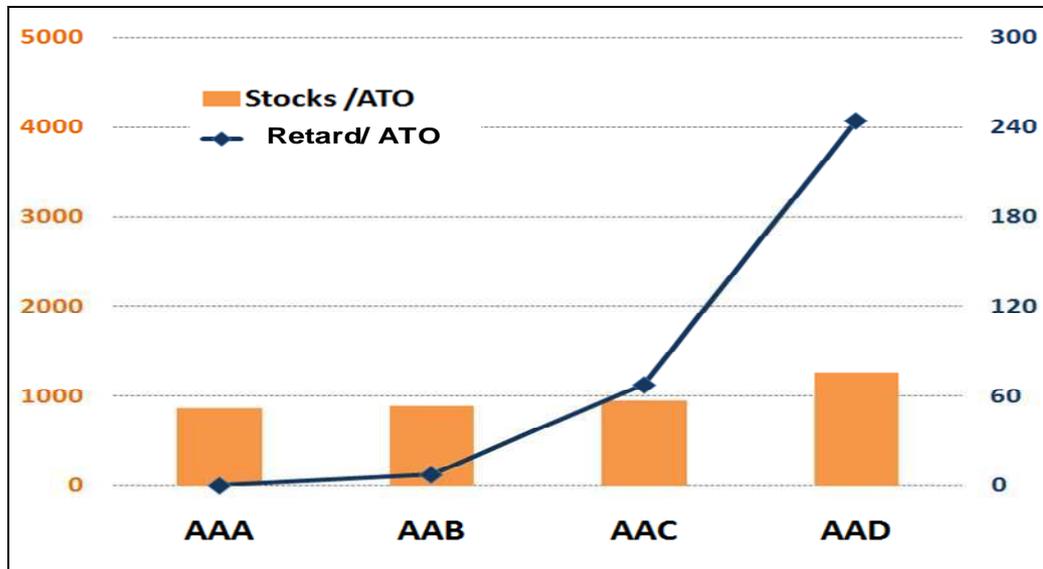


Figure VII.16. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec dégradation du dernier échelon

Dans le cas de configurations de type XAA (X = A, B, C, D), la performance de la chaîne reste stable et proche de la configuration AAA. Aucun retard de livraison n'a été observé pour ces chaînes et les stocks n'augmentent que de 20% en passant de AAA à DAA. Le fait d'avoir deux entreprises de classe A en aval de la chaîne assure une bonne performance de l'ensemble. La figure VII.17 illustre ces configurations.

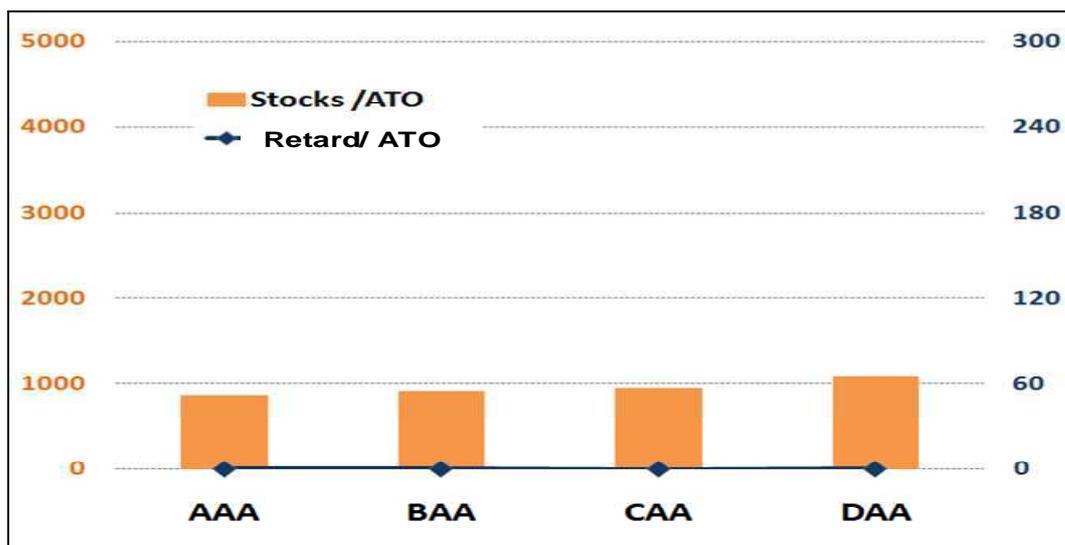


Figure VII.17. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec dégradation du premier échelon

VII.3.2.3. Les chaînes de classes A et D

La figure VII.18 illustre les niveaux de stocks et les retards de livraison des configurations composées de classes A et D. La performance des chaînes ADA, ADD et DAD est faible avec des retards de livraison importants. Dans le cas DAD, les stocks sont également élevés. La présence en amont de la chaîne (entreprises travaillant en ATO) de classes d'entreprises très hétérogènes (A – D) détériore la performance globale, alors que dans le cas d'un maillon fournisseur peu performant mais homogène (configuration DDA), la chaîne est suffisamment performante avec des livraisons sans retard, ce qui n'est pas le cas pour cette configuration dans une production MTS/MTS/MTS.

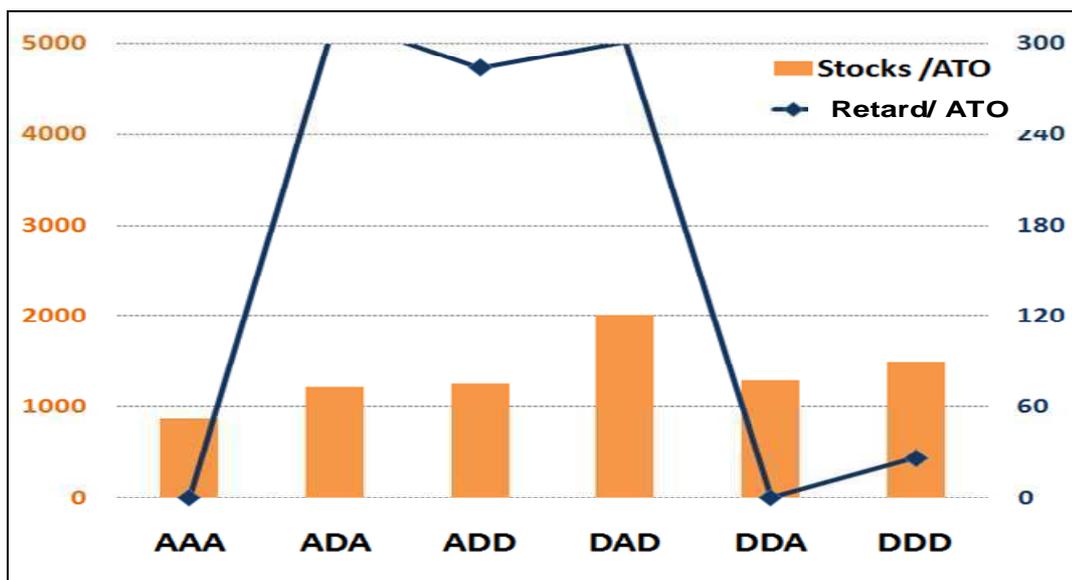


Figure VII.18. Performance des chaînes ATO/ATO/MTS avec des échelons de type A et D

VII.3.2.4. Simulation de l'ensemble des configurations ATO/ATO/MTS

Comme dans la précédente étude, nous avons simulé l'ensemble des configurations ATO/ATO/MTS et nous avons réalisé une analyse des résultats de simulation afin de caractériser les configurations en fonction des variables de performance et de variables illustratives (classe de l'entreprise pour chaque échelon de la chaîne).

VII.3.2.4.1. Analyse en composantes principales

La figure VII.19 montre la projection des données sur le premier plan factoriel (61 % d'inertie expliquée). On remarque une discontinuité des données avec deux sous-populations. Les résultats de simulation montrent que les configurations à droite du graphe ont un grand retard de livraison et une faible occupation des ressources. L'autre groupement est constitué de configurations plus performantes (retard faible et occupation élevée). Le premier plan factoriel permet de distinguer des configurations avec d'importants retards de livraison de celles ayant de faible retard avec des taux d'occupation des échelons plus élevés.

- Le groupe 1 est composé de 11 configurations. Le stock moyen est de 1033 unités et le retard de livraison est nul. Les taux d'occupation des ressources sont de 65% – 74% - 70%. Les configurations de ce groupe sont composées d'entreprise de classe A et B au deuxième et troisième échelon de la chaîne.
- Le groupe 2 est composé de 13 configurations avec un stock moyen de 1170 unités et un retard moyen de 9 heures. Les taux d'occupation moyens sont de 73% - 63 % - 65%. Dans ce groupe, nous trouvons des configurations avec un troisième échelon différent de D et un premier et deuxième échelon différent de A (des configurations avec des niveaux de capacité assez homogènes).
- Le groupe 3 est composé de 11 configurations avec un stock moyen de 1370 unités et un retard de 70 heures. Les taux d'occupations sont de 85% - 80% - 57%. Ces configurations ont un deuxième échelon différent de D et un dernier différent de A.
- Le groupe 4 est composé de 15 configurations avec un stock moyen de 1423 unités et un retard de 124 heures. Les taux d'occupation sont de 92% - 66% - 53%. Dans ce groupe, les configurations ont un deuxième et troisième échelon différent de A.
- Le groupe 5 est composé de 14 configurations avec un stock de 1500 unités et un retard de 283 heures. Les taux d'occupation sont très faibles (45% - 36% - 26%). Ces configurations sont très hétérogènes (pas de classe C au centre et des maillons de type A-D).

Le tableau VII.8 récapitule les caractéristiques de ces groupes de configurations.

Le groupe 1 est caractérisé essentiellement par un taux d'occupation élevé de l'entreprise aval et un faible retard de livraison. Il est composé généralement d'entreprise de classe A au dernier maillon de la chaîne. Le groupe 2 se caractérise par un taux d'occupation moyen du premier échelon. Le groupe 3 a un retard moyen et une forte occupation du deuxième échelon avec une entreprise de classe C en aval. Le groupe 4 se caractérise par un fort taux d'occupation du premier échelon et un taux moyen au second échelon. Enfin, le groupe 5 est composé de configurations avec un fort retard de livraison, une faible occupation du dernier maillon qui est composé d'entreprises de classe D.

GROUPE 1 / 5										
V.TEST	PROBA	POURCENTAGES			MODALITES		DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES					
				17.19	CLASSE 1 / 5				aa1a	11
4.90	0.000	52.38	100.00	32.81	0.6338	0.74	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3+	21
4.76	0.000	50.00	100.00	34.38	0.0151	6.52	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL-	22
2.72	0.003	43.75	63.64	25.00	A		ClaP3		A	16
2.72	0.003	43.75	63.64	25.00	A		ClaP2		A	16
2.67	0.004	38.10	72.73	32.81	0.7195	0.94	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2+	21
2.54	0.006	36.36	72.73	34.38	760.2000	1098.30	AVERAGE INVENTORY		STK-	22
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	7.4940	157.16	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL=	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	1451.2000	2463.40	AVERAGE INVENTORY		STK+	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	0.5180	0.63	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3=	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	0.8386	0.98	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1+	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	167.0800	316.63	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL+	21
-2.53	0.006	0.00	0.00	34.38	0.1965	0.52	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3-	22
GROUPE 2 / 5										
V.TEST	PROBA	POURCENTAGES			MODALITES		DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES					
				20.31	CLASSE 2 / 5				aa2a	13
4.76	0.000	57.14	92.31	32.81	0.6750	0.82	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1=	21
3.90	0.000	50.00	84.62	34.38	0.0151	6.52	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL-	22
2.74	0.003	42.86	69.23	32.81	1128.4000	1383.90	AVERAGE INVENTORY		STK=	21
-2.77	0.003	0.00	0.00	32.81	167.0800	316.63	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL+	21
-2.77	0.003	0.00	0.00	32.81	0.8386	0.98	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1+	21
-2.77	0.003	0.00	0.00	32.81	1451.2000	2463.40	AVERAGE INVENTORY		STK+	21
-2.89	0.002	0.00	0.00	34.38	0.1965	0.52	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3-	22
GROUPE 3 / 5										
V.TEST	PROBA	POURCENTAGES			MODALITES		DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES					
				17.19	CLASSE 3 / 5				aa3a	11
4.90	0.000	52.38	100.00	32.81	7.4940	157.16	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL=	21
4.10	0.000	47.62	90.91	32.81	0.7195	0.94	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2+	21
2.72	0.003	43.75	63.64	25.00	C		ClaP3		C	16
2.67	0.004	38.10	72.73	32.81	0.5180	0.63	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3=	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	1128.4000	1383.90	AVERAGE INVENTORY		STK=	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	167.0800	316.63	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL+	21
-2.42	0.008	0.00	0.00	32.81	0.5966	0.71	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2=	21
-2.53	0.006	0.00	0.00	34.38	0.0151	6.52	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL-	22
GROUPE 4 / 5										
V.TEST	PROBA	POURCENTAGES			MODALITES		DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES					
				23.44	CLASSE 4 / 5				aa4a	15
5.41	0.000	66.67	93.33	32.81	0.8386	0.98	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1+	21
5.41	0.000	66.67	93.33	32.81	0.5966	0.71	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2=	21
-2.46	0.007	0.00	0.00	25.00	A		ClaP2		A	16
-3.23	0.001	0.00	0.00	34.38	0.1948	0.59	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2-	22
-3.23	0.001	0.00	0.00	34.38	0.2774	0.65	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1-	22
-3.23	0.001	0.00	0.00	34.38	0.0151	6.52	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL-	22
GROUPE 5 / 5										
V.TEST	PROBA	POURCENTAGES			MODALITES		DES VARIABLES		IDEN	POIDS
		CLA/MOD	MOD/CLA	GLOBAL	CARACTERISTIQUES					
				21.88	CLASSE 5 / 5				aa5a	14
5.85	0.000	66.67	100.00	32.81	167.0800	316.63	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL+	21
5.68	0.000	63.64	100.00	34.38	0.1965	0.52	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3-	22
5.68	0.000	63.64	100.00	34.38	0.1948	0.59	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2-	22
4.92	0.000	59.09	92.86	34.38	0.2774	0.65	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1-	22
2.67	0.004	50.00	57.14	25.00	D		ClaP3		D	16
2.67	0.004	50.00	57.14	25.00	D		ClaP2		D	16
2.46	0.007	42.86	64.29	32.81	1451.2000	2463.40	AVERAGE INVENTORY		STK+	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	0.5180	0.63	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3=	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	7.4940	157.16	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL=	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	0.8386	0.98	CAPACITY USAGE OF 1 TIER		OP1+	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	0.6338	0.74	CAPACITY USAGE OF 3 TIER		OP3+	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	0.5966	0.71	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2=	21
-2.94	0.002	0.00	0.00	32.81	0.7195	0.94	CAPACITY USAGE OF 2 TIER		OP2+	21
-3.06	0.001	0.00	0.00	34.38	760.2000	1098.30	AVERAGE INVENTORY		STK-	22
-3.06	0.001	0.00	0.00	34.38	0.0151	6.52	AVERAGE DELIVERY DELAY		DEL-	22

Tableau VII.8. Caractérisation des groupes de configurations ATO/ATO/MTS

VII.3.2.5. Synthèse de simulation des chaînes ATO/ATO/MTS

Dans cette section, nous avons présenté les résultats de simulation de chaînes logistiques avec un maillon de fournisseur produisant en ATO pour une entreprise travaillant sur stock pour répondre à la demande finale du client. Nous résumons l'analyse par les principaux constats suivants :

- Comme dans le cas des chaînes produisant entièrement sur stock, les configurations ATO/ATO/MTS constituées d'entreprises homogènes ont une performance décroissante avec la dégradation du taux de rendement global de l'entreprise. Cette baisse de performance est néanmoins moins forte que dans le cas de production sur stock.
- Une chaîne avec un maillon de fournisseur très performant et qui approvisionne une entreprise d'un niveau de capacité différent est d'autant moins performante que le gradient de performance entre le maillon et l'entreprise aval est élevé. Contrairement à l'environnement MTS/MTS/MTS, où l'on a observé un regain de performance globale grâce à un dernier échelon ayant une marge capacitaire importante en dépit de son faible rendement global, la production en ATO/ATO/MTS ne permet pas cette résorption des ruptures de livraison à cause des délais plus longs de disponibilité des produits. La mise en place à ce niveau d'une gestion partagée des approvisionnements par exemple pourrait être judicieuse. En effet, la gestion des approvisionnements de l'entreprise client serait plus efficace si elle était basée sur la planification du fournisseur qui dispose d'une information plus précise sur la disponibilité de ses produits.
- Une chaîne avec un maillon aval très performant est peu sensible à la dégradation du rendement de son fournisseur et reste globalement assez efficace.
- Une chaîne logistique très hétérogène a globalement une faible performance. Cette performance est moins dégradée lorsque l'entreprise aval est assez performante et s'approvisionne auprès d'un maillon homogène.
- L'analyse des performances de l'ensemble des configurations a permis de distinguer :
 - Un groupe de configurations qui produisent pratiquement sans retard et avec des niveaux de stocks plutôt faibles. Ce sont des chaînes avec un dernier maillon assez performant.
 - Un groupe de configurations assez proches en termes de stock et de niveau de service que les chaînes de la première classe, mais avec des taux d'occupation des entreprises aval de 15 % de moins. Ces chaînes ont un assez bon niveau de capacité au dernier échelon et un niveau moyen en amont.
 - Un groupe de configurations avec des retards de livraison qui commencent à augmenter significativement et avec un taux d'occupation du maillon amont supérieur à celui des deux premiers groupes. Les chaînes de ce groupe ont un dernier échelon de faible performance et un second échelon de performance moyenne.
 - Un groupe de chaînes avec des retards assez importants et un dernier maillon de moyenne et faible capacité.
 - Un dernier groupe composé de chaînes dominées par la présence en aval (deuxième et troisième échelons) de la classe d'entreprise la moins performante. Ces chaînes ont d'importantes ruptures d'approvisionnement et par conséquent des taux très faibles d'occupation des ressources.

De la même façon que dans le cas MTS/MTS/MTS, nous avons synthétisé les performances de ces groupes de configurations pour les deux analyses ACP et ACM (figure VII.23 et VII.24 respectivement). Dans le cas d'une ACP, aucun des quatre groupes n'est optimal (au sens de Pareto). Le groupe 3 est dominé par le 2 et par le 1. Avec l'ACM, nous remarquons que le groupe 1 est optimal et tous les autres sont Pareto dominés (groupe 1 > groupe 2 > groupe 3 > groupe 4 > groupe 5).

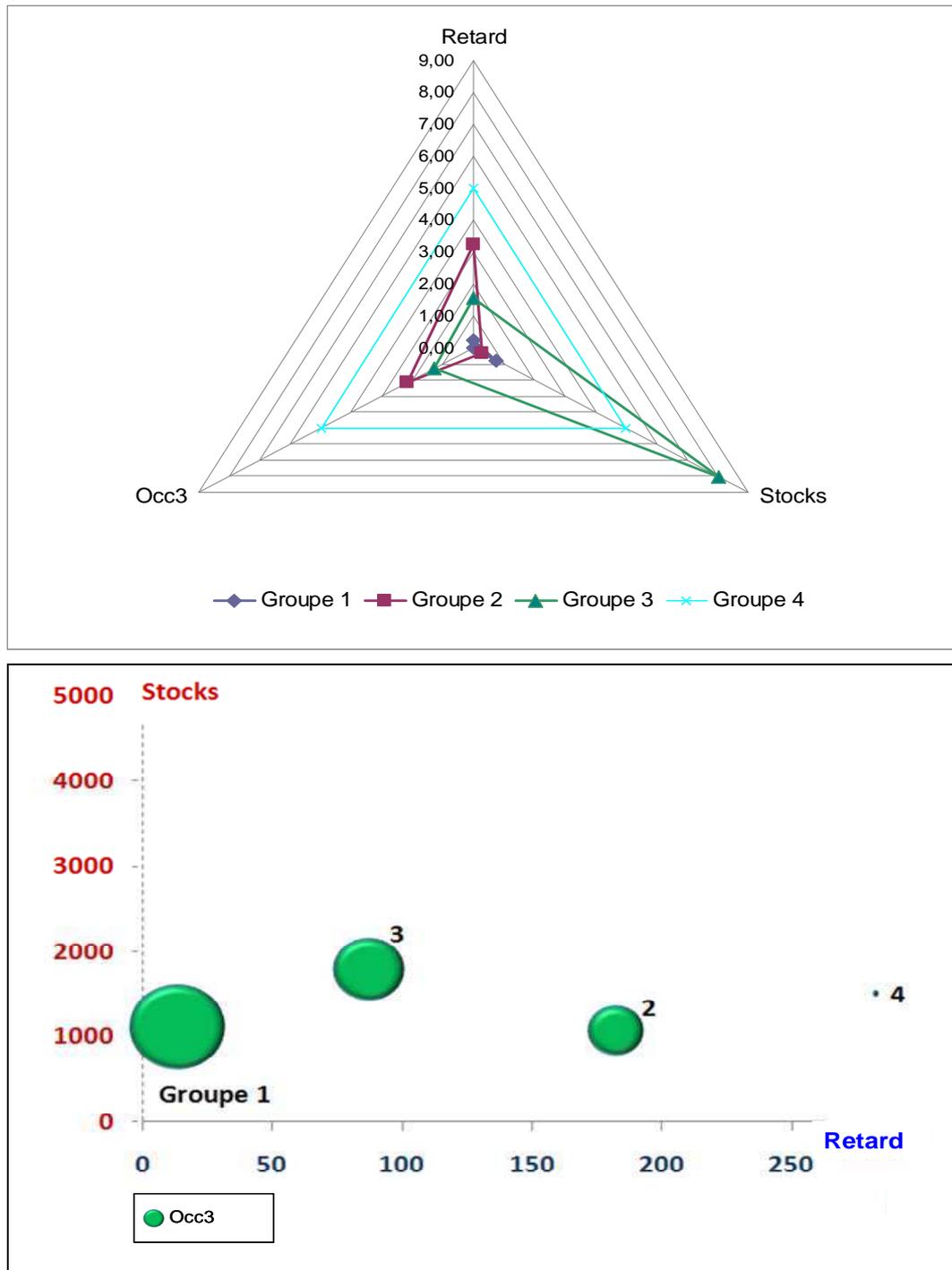


Figure VII.23. Performances des groupes de configurations ATO/ATO/MTS (ACP)

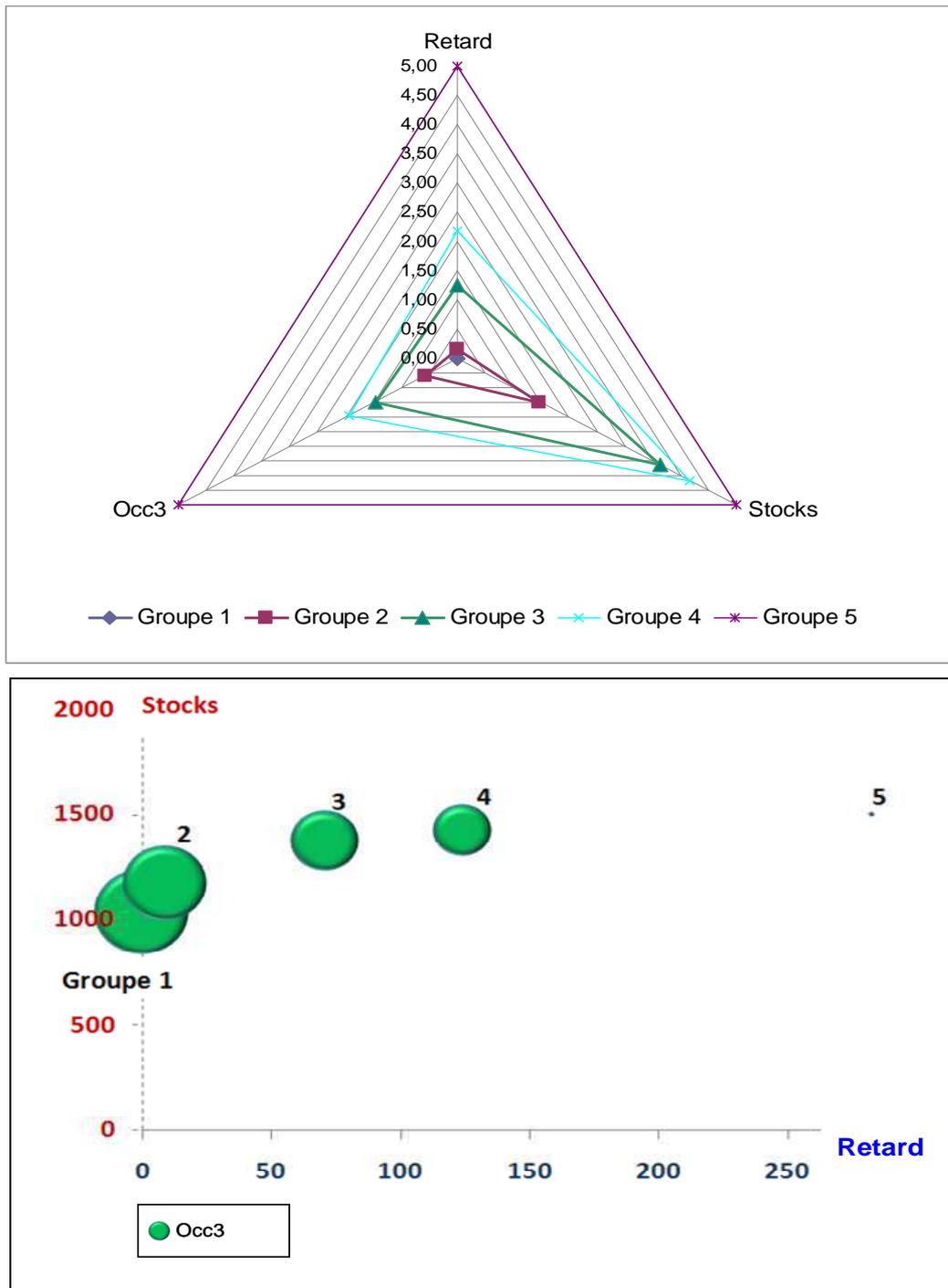


Figure VII.24. Performances des groupes de configurations ATO/ATO/MTS (ACM)

VII.3.3. Comparaison MTS/MTS/MTS et ATO/ATO/MTS

Pour comparer graphiquement les performances des deux stratégies MTS et ATO, la figure VII.25 récapitule les résultats de simulation (stock et retard de livraison) de configurations particulières dans les deux cas MTS/MTS/MTS et ATO/ATO/ATO. Nous remarquons alors les gains en termes de niveaux de stocks dans les configurations homogènes lorsque l'on passe à une production ATO. Dans le cas d'une dégradation progressive d'un échelon d'une chaîne très efficace, les performances sont assez proches dans les deux environnements de production. Dans le cas de forte disparité des efficacités des échelons, une chaîne très peu performante aux extrémités avec un acteur central très performant (DAD) produit mieux sur stock qu'avec du ATO. Globalement, les performances de ces chaînes sont assez faibles dans les deux environnements avec tout de même un gain en niveau de stock favorable à la production ATO lorsque le premier maillon de la chaîne est faiblement performant.



Figure VII.25. Comparaison des performances des stratégies ATO et MTS

VII.4. Discussion et conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les campagnes de simulation que nous avons réalisées. Les résultats de simulation et leur analyse ont permis de tirer quelques enseignements sur la dynamique de chaînes logistiques constituées d'entreprises de différents niveaux de capacité et travaillant soit dans un environnement de production sur stock, soit dans un système où un maillon de fournisseur fait de l'assemblage à la commande pour approvisionner une entreprise qui transforme ces produits intermédiaires, les stocke et livre le marché final.

Nous avons constaté que la performance de la chaîne est liée au niveau de capacité de l'échelon le plus faible, mais que la position de ce dernier est tout aussi importante. En effet, la performance de l'ensemble est sensible à celle du dernier maillon. Ce constat est beaucoup plus prononcé dans le cas de production à la commande. En effet, dans une chaîne avec une production sur stock, les marges de sécurité et les excédents capacitaires permettent de pallier les pertes de rendement de certains échelons. Une production à la commande est beaucoup plus contrainte et donc plus sensible aux performances locales des entreprises de la chaîne.

Cependant, la production à la commande permet de réduire significativement les niveaux de stocks et les retards de livraisons dans beaucoup de cas. Nous avons ainsi pu constater une réduction de plus de 50% des niveaux de stocks. Ces résultats sont évidemment théoriques et doivent être confrontés à des cas d'études réelles.

Nous avons également constaté que les configurations logistiques très hétérogènes sont peu performantes, même si elles comportent une ou deux entreprises très performantes. Il vaut mieux donc une chaîne homogène moyennement performante qu'une chaîne avec un grand gradient de performance entre les échelons. Nous avons constaté dans ces cas, des ruptures d'approvisionnements importantes du fait de la grande différence des tailles de lots et des seuils d'approvisionnement des entreprises (Burbidge Effect. cf. § IV.2.3.3).

L'étude statistique des résultats de simulation nous a permis d'obtenir une taxonomie des configurations logistiques. Les classes de configurations sont caractérisées par la classe de l'entreprise et sa position dans la chaîne. Ces résultats constituent une grille d'analyse qui peut aider le choix des partenaires logistiques. En effet, les résultats peuvent constituer un ensemble de feuilles de route pour étudier des opportunités de coopérer (ou pas) avec des partenaires logistiques en fonction des niveaux de capacité des processus de production et des stratégies de réponse à la demande utilisées. Nous avons montré comment la connectivité des flux peut être altérée par une grande disparité des performances locales des échelons.

Nous avons noté des différences entre les deux environnements de production (MTS/MTS/MTS et ATO/ATO/MTS). Nous avons remarqué la supériorité d'une production à la commande concernant la réduction des délais et des stocks.

Nous voulons affiner cette analyse des deux environnements. Notamment nous nous sommes interrogés sur la robustesse (sensibilité) des deux modèles de production à la variabilité de la demande.

La figure VII.26 illustre les performances d'une chaîne homogène (AAA) face à différents écarts-type d'une demande finale de moyenne 50.

Nous constatons que le retard de livraison d'une production MTS/MTS/MTS est nettement moins impacté par la variabilité de la demande que dans le cas ATO/ATO/MTS. A partir d'une variabilité relative (écart type/moyenne) de plus de 40%, le système ATO/ATO/MTS devient très peu efficace. Donc, même si le système de production à la commande est globalement plus performant, il est plus sensible aux caractéristiques de la demande du marché.

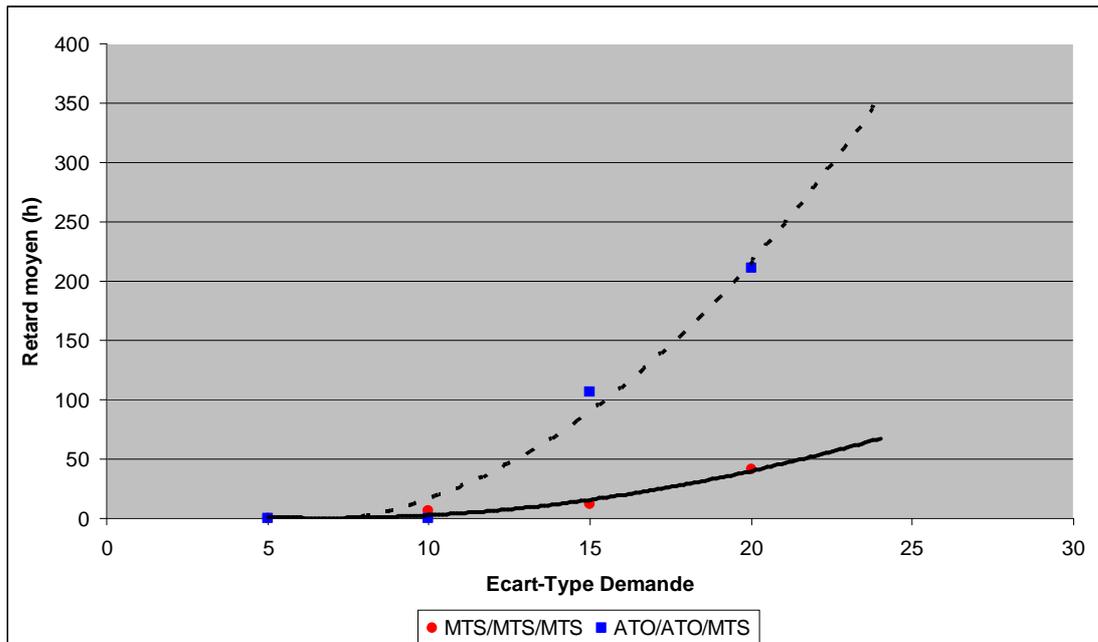


Figure VII.26. Effet de la variabilité de la demande sur l'efficacité de la chaîne

D'autres analyses de robustesse peuvent être réalisées, comme par exemple, la sensibilité à différentes structures de la demande (saisonnalité, ...), mais aussi une analyse du degré d'impact des paramètres opérationnels et de gestion sur la performance de la chaîne. Ceci est entre autres des perspectives pour affiner notre étude.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Chapitre VIII Conclusions et perspectives

VIII.1. Apports de notre étude

Les travaux décrits dans cette thèse portent sur la problématique de modélisation, de configuration et de simulation de la connectivité des flux logistiques dans un réseau manufacturier. Le modèle de configuration et de simulation que nous avons conçu et expérimenté répond à l'objectif de développement et de mise en œuvre d'outils d'aide à la décision dans le domaine de la conception et du pilotage des chaînes logistiques dans un environnement « on demand production ».

Plus précisément, nous avons développé un outil qui se base sur un modèle logistique d'entreprise. Ce modèle est assez générique et comporte les éléments essentiels décrivant la dynamique des flux dans un réseau manufacturier. Il est utilisé pour configurer différentes chaînes logistiques. L'instanciation du modèle est simple et permet de générer des chaînes logistiques différenciées par les profils des entreprises qui les composent.

Nous avons testé cet outil en réalisant des campagnes de simulation de 64 configurations logistiques dans deux environnements de production différents : une production sur stock sur l'ensemble de la chaîne et une production à la commande en amont de la chaîne.

Les apports principaux de notre travail sont :

- La modélisation générique d'une entreprise manufacturière en vue de son intégration dans un réseau manufacturier ;
- La conception d'un outil de configuration et de simulation de chaînes logistiques composées d'entreprises de différents profils en termes de processus de fabrication, de niveau de capabilité et de modes de pilotage ;
- La réalisation de simulations de chaînes logistiques composées d'entreprises de différents niveaux de performance et la construction d'une taxonomie de configurations logistiques en se basant sur une analyse multicritère de leurs performances ;
- Le diagnostic de quelques aspects de la dynamique de ces chaînes et les causes des pertes de performance de certaines d'entre elles.

VIII.2. Implications managériales des résultats de l'étude

Les résultats de simulation que nous avons présentés et commentés dans cette thèse (chapitre VII) nous renseignent sur le comportement d'une configuration logistique en fonction des profils d'entreprises qui la composent. Ils présentent une multitude d'implications sur le plan managérial. En premier lieu, nous retenons que le potentiel d'une entreprise à se connecter à un réseau manufacturier dépend de son niveau de capacité (productivité de ses ressources) et des règles de gestion qu'elle utilise. Ces paramètres ne doivent pas être considérés de façon absolue, mais relativement aux profils des partenaires de l'entreprise dans la chaîne. La performance de la chaîne constituée est différente de la somme des performances locales. C'est le « maillon faible » qui conditionne la performance de l'ensemble, mais aussi sa position dans la chaîne. En effet, nous avons montré que l'efficacité de la chaîne est beaucoup plus impactée par l'efficacité des derniers échelons.

En second lieu, nous avons observé l'effet de la dissimilarité des niveaux de performance locaux des échelons sur la performance globale de la chaîne. En effet, dans certains cas, mieux vaut choisir un maillon de partenaires constitué d'entreprises peu performantes mais de niveaux de capacité comparables que de travailler avec un fournisseur direct assez performant mais constituant un maillon très hétérogène. D'où l'intérêt d'avoir une vision globale de la chaîne lors de choix de partenaires logistiques. Nous pouvons constater que les configurations logistiques constituées d'entreprises de capacités moyennes sont globalement performantes. Les configurations avec des entreprises de très haut niveau de rendement sont certes moins coûteuses, mais moins robustes, car il suffit qu'un échelon ait une performance faible pour fragiliser le système dans sa globalité. Par ailleurs, la capacité des processus d'une entreprise résulte de l'effort d'amélioration continue et de projets de ré-engineering. De ce fait, les niveaux de maturité organisationnelle des entreprises d'une chaîne constituée peuvent être très différents. Cependant, les leviers d'action pour améliorer la connectivité des échelons de la chaîne sans s'investir dans de lourds projets d'intégration sont possibles. Un bon ajustement des paramètres de gestion des stocks en concertation avec les partenaires permettrait de pallier les effets de l'hétérogénéité des politiques de lotissement qui dégrade l'efficacité de la chaîne.

Nous retenons également que l'utilisation du point de pénétration de commande comme mécanisme de pilotage des flux est d'un grand intérêt. En effet, le positionnement de ce point en amont des processus de fabrication des fournisseurs permet une gestion plus réactive des commandes et une maîtrise des niveaux de stocks et de la disponibilité des produits. Une production avec un système de reconstituer de stocks est moins efficace mais plus robuste à la variabilité de la demande du marché.

Enfin, notons que la démarche de configuration d'un réseau manufacturier est liée au dimensionnement des capacités de production des entreprises impliquées. En effet, la complexité de pilotage de ces systèmes réside dans la recherche de compromis entre une production agile, qui permet de résorber les fluctuations de la demande le long de la chaîne, et une production lean qui minimise les stocks et les coûts de production. La connaissance des capacités des entreprises de la chaîne permet de déterminer les processus critiques. Le choix d'une production à la commande ou sur stock doit alors tenir compte des capacités des ressources critiques (classes d'entreprises de moindre performance). Le positionnement du point de pénétration de commande par rapport à ces échelons critiques permettrait alors d'atteindre les deux objectifs d'agilité et de leaness.

VIII.3. Principales conclusions

A l'issue de ce travail, nous croyons pouvoir affirmer que la connectivité des flux logistiques dans les réseaux manufacturiers constitue un problème complexe qui nécessite à notre sens des outils appropriés basés sur la modélisation et la simulation. Ces outils doivent en particulier se focaliser sur l'évaluation de la performance de chaînes logistiques constituées d'entreprises de profils différents. A ce titre, nous pensons que notre travail a permis d'apporter quelques éléments de compréhension de la dynamique des réseaux manufacturiers. Plus précisément, l'outil de simulation que nous avons développé permet d'apporter certaines connaissances quant à la performance de chaînes logistiques configurées à partir d'entreprises de différents niveaux de capacité et travaillant soit avec un modèle de reconstituration de stock soit par une stratégie d'assemblage à la commande en amont de la chaîne.

De plus, l'analyse des résultats de simulation nous a permis de réaliser un benchmark des différentes configurations logistiques et de déduire quelques mécanismes de comportement de ces chaînes. Nous avons notamment montré l'impact de l'homogénéité des échelons de la chaîne sur la performance globale. Cette dernière est très liée au rendement opérationnel du dernier échelon alors que l'échelon amont n'a pas d'impact majeur sur la performance de l'ensemble.

Nous avons également montré les gains de performance possibles grâce à l'exploitation du point de pénétration de la commande client et ce en utilisant une stratégie d'assemblage à la commande en amont de la chaîne. Cette stratégie permet de réduire les niveaux de stocks et d'améliorer globalement le niveau de service. Elle ne permet pas par contre de pallier les dysfonctionnements des chaînes très hétérogènes, dont certaines sont plus performantes avec une production sur stock qui permet alors une gestion des flux plus souple, grâce à des marges de sécurité en stocks et en extra capacités. Une production sur stock est également plus robuste à la variabilité de la demande finale.

VIII.4. Principales perspectives de recherche

Conscients des limites que présentent nos travaux, nous avons retenu principalement :

- la limitation des cas d'étude à des processus de transfert de deux flux de produits,
- la limitation des systèmes de pilotage à des modèles de gestion de stock et de calcul MRP simplifié,
- les mécanismes de coordination sont modélisés mais pas complètement implémentés et automatisés dans l'outil de simulation,
- le paramétrage du modèle est fait avec des données moyennes issues d'études de cas spécifiques,
- l'absence d'un cas d'étude réel permettant une validation expérimentale du modèle.

Nous proposons alors des perspectives de recherche pour repousser ces limites et pour enrichir l'étude. Par rapport au cadre général de notre travail, nous définissons trois

volets de perspectives : l'expérimentation, le modèle de simulation et le modèle conceptuel (figure VIII.1).

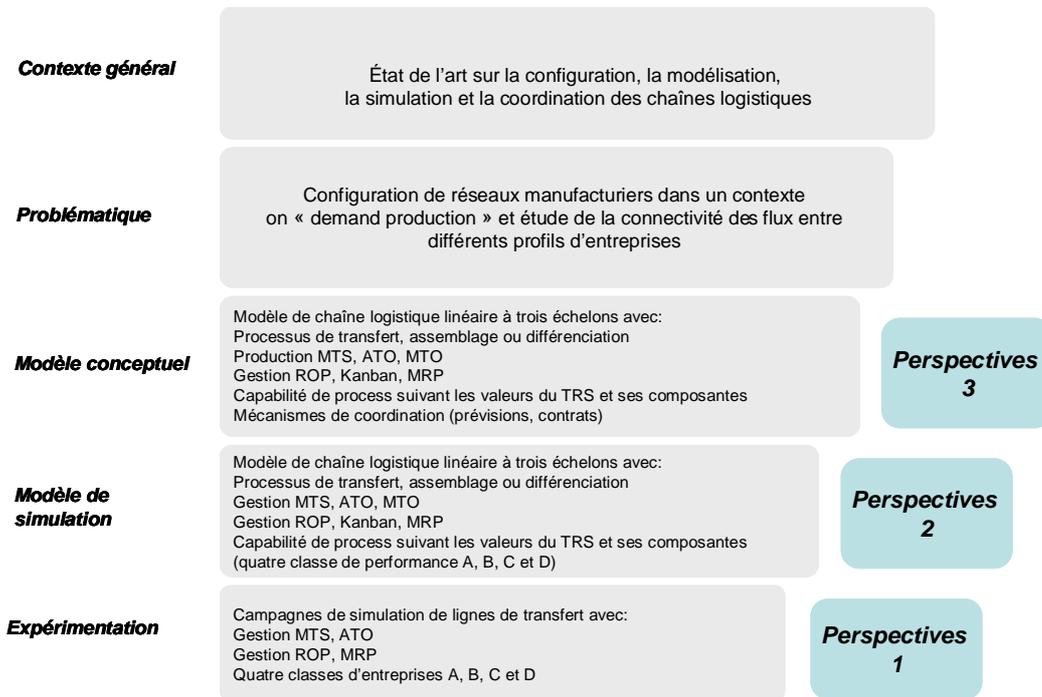


Figure VIII.1. Les perspectives de recherche

VIII.4.1. Perspectives 1

Le périmètre expérimental que nous avons étudié peut être facilement étendu à d'autres schémas logistiques grâce à la généricité de l'outil de simulation. Il s'agit notamment d'étudier des systèmes d'assemblage et de différenciation pour étudier les problématiques de synchronisation des flux et d'allocation des ressources. Il est intéressant également d'étudier le système de pilotage à flux tendu avec les boucles Kanban, évaluer le potentiel de performance de ce mode de gestion et le comparer aux modèles ROP et MRP.

Au niveau expérimental, il est également pertinent d'étudier l'impact des différents paramètres de gestion sur la performance de la chaîne. Nous avons ébauché une étude de rééquilibrage du système de production à la commande en se servant des stocks de sécurité du fournisseur et du client comme leviers d'action. Il s'agit de chercher une répartition optimale des stocks entre deux entreprises de la chaîne. Cette amélioration du modèle initial permet alors d'étudier des stratégies de gestion partagée des approvisionnements tel que le VMI et d'évaluer leurs apports et limites.

Une analyse de robustesse des variables techniques (variables définissant la classe de performance d'une entreprise) et des variables de pilotage est pertinente pour déterminer les degrés d'impact de ces variables sur la performance de la chaîne, et en déduire des modèles analytiques (plus simples à interpréter que les modèles de simulation).

VIII.4.2. Perspectives 2

Le modèle de simulation que nous avons développé peut être amélioré au niveau des systèmes de pilotage de la chaîne. Il s'agit notamment d'automatiser l'application des mécanismes de coordination. En effet, nous avons proposé un module d'interfaçage de l'entreprise avec la chaîne qui permet de mettre en place des mécanismes de partage d'information (prévisions, contrats,...). L'exploitation de ces mécanismes dans des études de simulation permettra d'étudier les impacts des stratégies de coordination sur la connectivité des flux et d'évaluer le potentiel d'amélioration des performances des différentes configurations logistiques. L'introduction de règles de pilotage plus fines (planification et ordonnancement) peut être également envisagée, avec comme objectif la prise en compte de contraintes opérationnelles (capacités de stockage, lots de transfert, transport, ...) qui sont des éléments pertinents de la gestion de la chaîne logistique.

VIII.4.3. Perspectives 3

Au niveau du modèle conceptuel, des aspects managériaux tels que les processus de négociation entre fournisseur et producteur, les mécanismes de coordination par les prix, la gestion de l'information (fiabilité, confiance, ...) sont des éléments pertinents pour enrichir l'étude des relations entre les partenaires d'un réseau manufacturier.

Enfin, une application de notre modèle sur un cas réel permettra une validation des résultats et une amélioration du modèle grâce aux suggestions de praticiens du supply chain management.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- Aderohunmu R., Mobolurin A. et Bryson N. (1995). Joint vendor-buyer policy in JIT manufacturing. *Journal of Operational Research*. Vol. 46, p.375-385.
- Agarwal A., Shankar R. et Tiwari M.K. (2005). Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP-based approach. *European Journal of Operational Research*. Vol.173, p. 211-225.
- Ahmad M.M. et Dhafr N. (2002). Establishing and improving manufacturing performance measures. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Vol.18, p.171-176.
- Alt R., Fleisch E. et Werle O. (2000). The Concept of Networkability - How to Make Companies Competitive in Business Networks. In *8th European Conference on Information Systems*. (Eds: Hansen, et al) Vienna, p. 405-411.
- Altıparmak F., Gen M., Lin L. et Paksoy T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, In Press.
- Al-Zubaidi H. et Tyler D. (2004). A Simulation Model of Quick Response Replenishment of Seasonal Clothing. *International Journal of Retail & Distribution Management*. Vol. 32, N° 6, p. 320 - 327
- Amiri A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*. Vol.171, p.567-576.
- Anderson D.L., Britt F.F. et Favre D.J. (1997). The Seven Principles of Supply Chain Management. *Supply Chain Management Review*, p.31-41.
- Anderson E.G. et Morrice D.J. (1999). A simulation model to study the dynamics in a service-oriented supply chain. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- Archibald G., Karabakal N. et Karlsson P. (1999). Supply chain vs supply chain: Using simulation to compete beyond the four walls. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, Eds: Farrington et al., p.1207-1214.
- Ashayeri J. et Keij R. (1998). Global business process re-engineering: a system dynamics based approach. *International Journal of Operations and Production Management*. Vol. 18, p.817-831.

- Aviv Y. (2001). The effect of collaborative forecasting on supply chain performance. *Management Science*. Vol.47, p.1326-1343.
- Babai M.Z. et Dallery Y. (2004). Impact de l'information sur la demande sur le choix du mode de pilotage de flux dans la chaîne logistique. *5^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation. MOSIM'04 Nantes (France)*.
- Bagchi S., Buckley S.J., Ettl M. et Lin G.Y. (1998). Experience using the IBM supply chain simulator. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*.
- Baiman S., Fischer P.E. et Rajan M.V. (2001). Performance measurement and design in supply chains. *Management Science*. Vol.47, p.173-188.
- Ballou R.H. (2001). Unresolved issues in supply chain network design. *Information Systems Frontiers*. Vol.3, p.417-426.
- Banerjee A. (1986). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences*. Vol. 17, p. 292–311.
- Banerjee A. et Kim S.L. (1995). An Integrated JIT Inventory Model. *International Journal of Operations and Production Management*. Vol. 15, N° 9, p.236-243.
- Banerjee A., Burton J.S. et Banerjee S. (2003). A simulation study of lateral shipments in single suppliers, multiple buyers network. *International Journal of Production Economics*. Vol. 81-82, p 103-114.
- Banerjee A., Kim S.L. et Burton J. (2007). Supply chain coordination through effective multi-stage inventory linkages in a JIT environment. *International Journal of Production Economics*. Vol.108, p. 271–280.
- Banks J. (1998). Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. *John Wiley, New York*.
- Banks J. et Buckley S. (2002). Opportunities for simulation in supply chain management. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- Banks J. et Buckley S. (2002). Opportunities for simulation in supply chain management. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- Barratt M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in supply chain. *Supply Chain Management: an International Journal*. Vol.9, N° 1, p.30-42.
- Bassok Y. et Anupindi R. (1997). Analysis of Supply Contracts with Total Minimum Commitment. *IIE Transactions*, Vol. 29, N° 5, p. 373-381.
- Bather J. (2000). Decision Theory: An Introduction to Dynamic Programming and Sequential Decisions. *John Wiley & Sons*.
- Beamon B.M. (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics*. Vol.55, p.281-294.
- Beamon B.M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 19, N° 3, p. 275-292.
- Beamon B.M. et Chen V.C.P. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*. Vol.15, p.3195-3218.
- Beamon B.M. et Fernandes C. (2004). Supply chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control*. Vol.15, p.270-281.

- Bel G. (2008). Comparaison et coopération entre simulation et optimisation des systèmes discrets. *7^e Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, Paris.*
- Bel G., Thierry C. et Thomas A. (2007). Supply Chain simulation : An Overview. *Présentation aux Journées STP.*
- Bellman R.E. (2003). Dynamic Programming. *Dover Publications, (Reprint).*
- Berry D. et Naim M.M. (1994). A systems engineering analysis of information and material flows in a manufacturing company. *Factory 2000 - Advanced Factory Automation, Conference Publication N° 398.*
- Berry D. et Naim M.M. (1996). Quantifying the relative improvements of redesign strategies in a PC supply chain. *International Journal of Production Economics, Vol. 46-47, p.181-196.*
- Berry W.L. et Hill T. (1992). Linking Systems to Strategy. *International Journal of Operations & Production Management. Vol.12, p.3 -15.*
- Bettonvil B., Kleijnen J.P.C. et Persson F. (2003). Robust solutions for supply chain management: simulation and risk analysis of the Ericsson case study. *Working Paper: Tilburg University.*
- Bhaskaran S. (1998). Simulation Analysis of Manufacturing Supply Chain. *Decision Sciences Vol.29, p.633-657.*
- Bilczko T., Bugbee L., Fitzhugh J., Gilbert D., Halladin S., Rubert J. et Budiman B. (2003). Aerospace supply chain dynamics. *International Series in Operations Research and Management Science.*
- Boer L., Labro L. et Morlacchi P. (2001). A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing & Supply Management. Vol. 7, p.75-89.*
- Boissiere J., Frein Y. et Rapine C. (2005). Coordination between actors in a manufacturer and distributor supply chain with a continuous demand. *Journal européen des systèmes automatisés. Vol. 39, N°7, p. 819-837.*
- Boone T., Ganeshan R. et Stenger A.J. (2005). The Benefits of Information Sharing in a Supply Chain: An Exploratory Simulation Study. *Supply Chain Management: Models, Applications, and Research Directions. Springer US.*
- Boyson S. et Corsi T. (2002). Managing the Real-Time Supply Chain. *Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences.*
- Bozarth C. et McDermott C. (1998). Configurations in manufacturing strategy: a review and directions of future research. *Journal of Operations Management. Vol.16, Issue 4, p. 427-439.*
- Brabazon P.G. (2005). Mass Customization: fundamental modes of operation and study of an order fulfilment model. *PhD Thesis. University of Nottingham.*
- Bramham J. et McCarthy B. (2004). The demand driven chain. *Manufacturing Engineer. Vol.83, p.30-33.*
- Bullinger H.J., Kuhner M. et Van Hoof A. (2002). Analysing supply chain performance using a balanced measurement method. *International Journal of Production Research. Vol.40, p.3533-3543.*

- Burbidge J.L. (1991). Period batch control (PBC) with GT – the way forward from MRP. *Paper presented at the BPCIS Annual Conference, Birmingham.*
- Burlat P. et Benali M. (2007). A methodology to characterise cooperation links for networks of firms. *Production Planning and Control (PPC), Vol. 18, N°2, p. 156-168.*
- Burlat P. et Boucher X. (2000). Pilotage distribué des groupements d'entreprises : modélisation et perspectives. *Rapport d'activités Ecole Nationale des Mines de Saint-Etienne.*
- Burlat P. et Campagne J.P. (2001). Performance industrielle et gestion des flux. *Hermès-Lavoisier.*
- Cachon G.P. (2002). Supply chain coordination with contracts. *Handbooks in Operations Research and Management Science. Graves S, De Kok T Eds. North-Holland, Amsterdam.*
- Cachon G.P. et Fisher M. (2000). Supply Chain Inventory Management and the Value of Shared Information. *Management Science. Vol.46, p.1032 – 1048.*
- Cachon G.P. et Lariviere M.A. (2001). Contracting to Assure Supply: How to Share Demand Forecasts in a Supply Chain. *Management Science. Vol. 47, N° 5, p. 629–646.*
- Cachon G.P. et Lariviere M.A. (2001). Contracting to Assure Supply: How to Share Demand Forecasts in a Supply Chain. *Management Science, Vol. 47, N°. 5, p. 629-646.*
- Camisullis C. et Giard V. (2008). Analyse des déterminants à court terme de la capacité d'une unité de production. *Journal Européen des Systèmes Automatisés.*
- Camisullis C. et Giard V. (2008). Synchronisation et découplage du pilotage des usines d'une chaîne logistique dédiée à une production de masse de produits diversifiés. *Journal Européen des Systèmes Automatisés.*
- Camm J.D., Chorman T., Sill F., Evans J., Sweeney D. et Wegryn. (1997). Blending OR/MS judgment, and GIS: Restructuring P&G's supply chain. *Interfaces. Vol.27, p.128-142.*
- Caridi M., Cigolini R. et De Marco D. (2005). Improving supply chain collaboration by linking intelligent agents to CPFR. *International Journal of Production Research. Vol.43, p.4191-4218.*
- Carruth S. et LeBel L.G. Simulation of wood yard inventory variations using a stochastic model. *The Forest Products Journal. Vol.47, p. 52-57.*
- Chan F.T.S. et Qi H.J. (2003). An innovative performance measurement method for supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal. Vol.8, N°3, p. 209-223.*
- Chand G. et Shirvani B. (2000). Implementation of TPM in cellular manufacture. *Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, p. 144-54.*
- Chandra C. et Grabis J. (2007). Supply Chain Configuration: concepts, solutions and applications. *Springer Science.*
- Chen I.J., Paulraj A. et Lado A.A. (2004). Strategic purchasing, supply management and firm performance. *Journal of Operations Management. Vol.22, p.505-523.*

- Childerhouse P., Aitken J. et Towill D.R. (2002). Analysis and design of focused demand chains. *Journal of Operations Management*. Vol.20, p.675-689.
- Choi T.Y. et Hartley J.L. (1996). An exploration of supplier selection practices across the supply chain. *Journal of Operations Management*. Vol. 14, Issue. 4, p. 333-343.
- Christopher M. (1998). Logistics and Supply Chain Management. 2nd edition. *Financial Times*.
- Christopher M. (2000). The Agile Supply Chain - Competing in Volatile Markets. *Industrial Marketing Management*. Vol. 29, p. 37-44.
- Christopher M. (2000). The Agile Supply Chain Competing in Volatile Markets. *Industrial Marketing Management*. Vol. 29, p. 37-44.
- Christopher M. et Towill D.R. (2001). An Integrated Model for the Design of Agile Supply Chains. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 30, N°4.
- Christy D.P. et Grout J.R. (1994). Safeguarding supply chain relationships. *International Journal of Production Economics*. Vol.36, P.233-242.
- Chu E. (2003). A review of simulation studies on supply chain management. *Journal of Academy of Business and Economics*.
- Chwif L. et Barretto M.R.P. (2002). Supply Chain Analysis : Spreadsheet or simulation? *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Charnes, Eds.
- Cigolini R. et Turco F. (1997). Total productive maintenance practices: a survey in Italy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Vol.3, N°4, p. 259-272.
- Closs D.J., Roath A.S., Goldsby T.J., Eckert J.A. et Swartz S.M. (1998). An empirical comparison of anticipatory and response-based supply chain strategies. *International Journal of Logistics Management*. Vol. 9, p. 21-34.
- Cochran J.K. et Marquez U.A. (2005). A set covering formulation of agile capacity planning within supply chains. *International Journal of Production Economics*. N°95. p.139-149.
- Cohen M.A. et Lee H.L. (1989). Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. *Journal of Manufacturing Operations Management*. Vol.2, p.81-104.
- Constable C.J. et New C.C. (1976). Operations Management: A Systems Approach through Text and Cases. *John Wiley & Sons, New York, NY*.
- Cooper M.C., Douglas M., Lambert D. et Pagh J.D. (1997). Supply Chain Management: More than a new name for logistics. *The International Journal of Logistics Management*. Vol.8, p.1-14.
- Corbett L.M. (1992). Delivery windows: a new view on improving manufacturing flexibility and on-time delivery performance. *Production and Inventory Management Journal*, Vol.33 N°. 3, p. 74-9.
- Courtois A., Pillet M. P. et Martin C. (1989). Gestion de la production. *Ed. d'Organisations*.

- Croom C., Romano P. et Giannakis M. (2000). Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 6, p. 67-83.
- Cullen P.A. (1999). Contracting, co-operative relations and extended enterprises. *Technovation*.
- David I. et Eben-Chaime M. (2003). How far should JIT vendor–buyer relationships go? *International Journal of Production Economics*. Vol. 81–82, p. 361–368.
- De Souza R., Zice S. et Chaoyang L. (2000). Supply chain dynamics and optimisation. *Integrated Manufacturing Systems*. Vol.11, 348–364.
- Delen D., Benjamin P.C. (2003). Towards a truly integrated enterprise modeling and analysis environment. *Computers in Industry*. Vol 51, p.257-268.
- Disney S.M. et Towill D.R. (2003). The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics*. Vol. 58, p.199–215.
- Disney S.M. et Towill D.R. (2003). Vendor-managed inventory and bullwhip reduction in a two-level supply chain. *International Journal of Operations & Production Management* Vol. 23, N°. 6, p. 625-651.
- Dolgui A. et Proth J.M. (2006). Les systèmes de production modernes. *Ed. Lavoisier*.
- Dong M. (2001). Process modeling, performance analysis and configuration simulation in integrated supply chain network design. *PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute*.
- Ellram L. et Cooper M. (1993). Characteristics of supply chain management and the implications for purchasing and logistics strategy. *International Journal of Logistics Management*, Vol. 4 N°.2, p. 1-10.
- Enns S.T. et Suwanruji P. (2006). Evaluating the effects of capacity constraints and demand patterns on supply chain replenishment strategies. *International Journal of Production Research*. Vol.44, p.4607-4629.
- Essaid M., Grimaud F. et Burlat P. (2008a). Manufacturing network simulation: analysing material flow connectivity among *dissimilar production systems*, *15th International Working Seminar on Production Economics, Innsbrück, Austria, vol. 1, p. 165-176*.
- Essaid M., Grimaud F. et Burlat P. (2008b). Supply chain performance measurement using simulation : an overall equipment effectiveness based analysis, *7ème conférence internationale de modélisation et simulation, MOSIM'08, Paris, mars 2008, (ISBN : 978-2-7430-1057-7)*.
- Essaid M., Grimaud F. et Burlat P. (2008c). Manufacturing network simulation using a data driven model. *Int. J. Simulation and Process Modelling*.
- Essaid M., Grimaud F. et Burlat P. (2007). Proposition d'un modèle d'intégration d'entreprises pour la simulation d'un réseau logistique. *7ème congrès international de génie industriel (CIGI'07), Trois Rivières, Québec, Canada, juin 2007*.
- Evans G., Towill D. et Naim M. (1995). Business process re-engineering the supply chain. *International Journal of Production Planning and Control*. Vol.6, p.227-237.

- Feigin G.C., Connors D. et Crawford I. (1996). Shape Up, Ship Out. *OR/MS Today*. Vol.4, p.24-30.
- Fiala P. (2005). Information sharing in supply chains. *Omega*. Vol 33, p.419-423.
- Fischer M., Jähn H. et Teich T. (2004). Optimizing the selection of partners in production networks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol.20, p.593-601.
- Fisher M. L. (1997). What is the Right Supply Chain for Your Product? *Harvard Business Review*, Vol. 75, N°. 2, p. 105-116.
- Fisher M., Hammond J., Obermeyer W. et Raman A. (1997). Configuring a supply chain to reduce the cost of demand uncertainty. *Production and Operations Management*. Vol.6, p.211-225.
- Fleischmann B. et Meyr H. (2003). Planning Hierarchy, modeling and advanced planning systems. *Handbooks in Operations Research and Management Science*.
- Fliedner G. (2003). CPFR: an emerging supply chain tool. *Industrial Management Data Systems*. Vol 103, p.14-21.
- Forrester J.W. (1958). Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*.
- Frohlich M.T. et Westbrook R. (2001). Arcs of integration: An international study of supply chain strategies. *Journal of Operations Management*. Vol.19, p.185-200.
- Fugate B., Sahin F. et Mentzer J.T. (2006). Supply Chain Management Coordination Mechanisms. *Journal of Business Logistics*. Vol. 27 N°. 2, p. 129-162.
- Ganeshan R., Boone T. et Stenger A.J. (2001). The impact of inventory and flow planning parameters on supply chain performance: An exploratory study. *International Journal of Production Economics*. Vol. 71, p.111-118.
- Gerstner E. et Hess J. (1995). Pull promotions and channel coordination. *Marketing Science*. Vol.14, p. 43-60.
- Ghodsypour S.H. et O'Brien C. (2001). The total cost of logistics in supplier selection under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*. Vol. 73, p.15-27.
- Giannakis M. et Groom S.R. (2004). Toward the development of supply chain management paradigm: A conceptual framework. *Journal of Supply Chain Management*, Vol. 40, N°. 2, p. 27 – 37.
- Giard V. (2003). Gestion de la production et des flux. *Ed. Economica*.
- Goyal S.K. (1976). An integrated inventory model for a single supplier–single customer problem. *International Journal of Production Research*. Vol.15, p. 107–111.
- Gunasekaran A., Patel C. et McGaughey R.E. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*. Vol.87, p. 333-347
- Gunasekaran A., Patel C. et Tirtiroglu E. (2001). Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol.21, p. 71 – 87.

- Hammami R., Frein Y. et Hadj-Alouane A.B. (2008). Supply chain design in the delocalization context: Relevant features and new modeling tendencies. *International Journal of Production Economics*. Vol. 113, p. 641- 656.
- Harrel C. et Tumay K. (1994). Simulation made easy. *Engineering & Management press*.
- Hayes R.H. et Wheelwright S.C. (1979). Link manufacturing process and product life cycles. *Harvard business review*.
- Heide J.B. (1994). Interorganizational governance in marketing channels. *Journal of Marketing*. Vol.58, p. 71-85.
- Hellström D. et Johnsson M. (2002). Using discrete-event simulation in supply chain planning. *The 14th Annual conference for Nordic Researchers in Logistics*.
- Hellström D. et Johnsson M. (2002). Using discrete-event simulation in supply chain planning. *The 14th Annual conference for Nordic Researchers in Logistics*.
- Helo P.T. (2000). Dynamic Modelling of Surge Effect and Capacity Limitation in Supply Chains. *International Journal of Production Research*. Vol. 38, N°. 17, p 4521-4533.
- Higuchi T. et Troutt M.D. (2004). Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product - Lessons from the Tamagotchi case. *Computers & Operations Research* Vol.31, p. 1097-1114.
- Hill R.M. (1997). The single-vendor single-buyer integrated production inventory model with a generalized policy. *European Journal of Operational Research*. Vol.97, p. 493-499.
- Houlihan J. B. (1987). International Supply Chain Management. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, Vol. 17, N°. 2, p. 51-66.
- Huisman W. et Smits M. (2007). Investing in Networkability to improve Supply Chain Performance. *Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- Hung W.Y., Kucherenko S., Samsatli J. et Shah N. (2004). A flexible and generic approach to dynamic modelling of supply chain. *Journal of Operational Research Society*. Vol. 55, p. 801-813.
- Ingalls R.G. (1998). The value of simulation in modelling supply chains. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference - D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson and M.S. Manivannan, Eds*.
- Ingalls R.G. et Kasales C. (1999). CSCAT: The Compaq Supply Chain Analysis Tool. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- Jammernegg W. et Reiner G. (2007). Performance improvement of supply chain processes by coordinated inventory and capacity management *International Journal of Production Economics*. Vol.108, p. 183-190.
- Jansen D.R., Weert A., Beulens A.J.M. et Huirne R.B.M. (2001). Simulation model of multi-compartment distribution in the catering supply chain. *European Journal of Operational Research*. Vol.133, p.210-224.

- Joglekar P.N. (1988). Comments on: A quantity discount pricing model to increase vendor profits. *Management Science*. Vol. 34, p.1391–1398.
- Johnson L.A. et Montgomery D.C. (1974). Operation research in production planning, scheduling and inventory control. *John Wiley & Sons, NY*.
- Johnson M.E. et Anderson E. (2000). Postponement strategies for channel derivatives. *International Journal of Logistics Management*. Vol.11 N°1, p.19-35.
- Jokar M.R.A., Frein Y. et Dupont L. (2000). Sur l'évolution du concept de la logistique. *RIRL- Les Troisièmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique Trois-Rivières*.
- Jonsson P. et Lesshammar M. (1999). Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems: the role of OEE. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19, N°1, p. 55-78.
- Jonsson P. et Mattsson S.A. (2003). The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol.23, p.872-900.
- Jorgensen S. et Zaccour G. (2003). Channel Coordination over Time: Incentive Equilibria and Credibility. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 27, N° 5, p. 801-822.
- Kaplan R.S. et Norton P.D. (1992). The balanced scoreboard measures that drives performance. *Harvard Business Review* 70 (1), 71–79.
- Kärkkäinen M. et Ala-Risku T. (2003). Facilitating the integration of SME's to supply networks with lean IT solutions. *In e- Challenges Conference Proceedings, Bologna, Italy*.
- Kelton W.D (2000). Experimental design for simulation. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, Eds.
- Kim B.J., Leung M.Y., Park K.T., Zhang G.O. et Lee S. (2002). Configuring a manufacturing firm's supply network with multiple suppliers. *IIE Transactions*. Vol.34, p.663-677.
- Kim C.S., Tannock J., Byrne M., Farr R., Cao B. et Er M. (2004). State of the art review: techniques to model the supply chain in an extended enterprise. *Operations Management Division University of Nottingham*.
- Kleijnen J. (2005). Supply chain simulation tools and techniques: a survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling*. Vol. 1, N°1, p. 82 - 89.
- Kleijnen J.P. et Smits M. T. (2003). Performance metrics in supply chain management. *Journal of the operational Research Society*. p. 1-8.
- Kleijnen J.P.C. (1980). Computers and Profits: Quantifying Financial Benefits of Information, *Addison-Wesley, Reading, MA*.
- Konopka J. et Trybula W. (1996). Overall Equipment Effectiveness (OEE) and cost. *IEEE/CPMT- Electronics Manufacturing Technology Symposium*.
- Krokoszinski H.J. (2003). Efficiency and effectiveness of wind farms—keys to cost optimized operation and maintenance. *Renewable Energy*. Vol.28, p. 2165–2178.

- Kumar A., Ow P.S. et Prietula M.J. (1993). Organizational Simulation and Information Systems Design: An Operations Level Example. *Management Science*. Vol.39, p.218-240.
- Labarthe O., Espinasse B., Ferrarini A. et Montreuil B. (2007). Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context. *Simulation Modelling Practice and Theory*. N°15, p. 113–136.
- LaLonde B. et Ginter J. (2004). The Ohio State University 2002 survey of career patterns in logistics. *Council of Supply Chain Management Professionals*, available at: www.cscmp.org.
- Lambert D.M. et Cooper M.C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*. Vol. 29, p. 65–83.
- Lambert D.M. et Terrance L.P. (2001). Supply Chain Metrics. *The International Journal of Logistics Management*. Vol. 12, p. 1-19.
- Lambert D.M., Cooper M.C. et Pagh J.D. (1998). Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. *International Journal of Logistics Management*, Vol.9, N°. 2, p.1 – 19.
- Lariviere M.A. (1999). Supply Chain Contracting and Coordination with Stochastic Demand. In S. Tayur, R. Ganeshan, & M. Magazine (Eds.), *Quantitative models for supply chain management*, Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, p. 234-268.
- Lau H.C.W. et Lee W.B. (2000). On a responsive supply chain information system. *International Journal of Physical Distribution & Logistics*. Vol.30, p.598-610.
- Lauras M. (2004). Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques : application à la coopération maison-mère- filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique. *Thèse, Centre de Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi-Carmaux*.
- Leachman R.C. et Hodges D.A. (1997). Benchmarking Semiconductor Manufacturing. IEEE/ IRW Final Report.
- Lebureau E., Grimaud F., Boucher X., Burlat P. et Essaid M. (2006). Etude de la connectabilité d'entreprises pour la configuration de chaînes logistiques. 6^e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc.
- Lee H. L. (2002). Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties. *California Management Review*, Vol. 44, N°. 3, p. 105–119.
- Lee H. L. et Billington C. (1992). Managing Supply Chain Inventory: Pitfalls and Opportunities. *Sloan Management Review*, Vol. 33, N°. 3, p. 65 – 73.
- Lee H.L. (2003). Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *IEEE Engineering Management Review*. Vol.31, p.26-34.
- Lee H.L. et Billington C. (1992). Managing supply chain inventory: Pitfalls and opportunities. *Sloan Management. Review*. Vol. 33, p. 65-73.
- Lee H.L. et Billington C. (1993). Material management in decentralized supply chain. *Operations Research*. Vol. 41, N°5, p. 835-847.

- Lee H.L. et Rosenblatt M.J. (1986). A generalized quantity discount pricing model to increase supplier's profits. *Management Science*. Vol.32, p. 1177–1185.
- Lee H.L., Padmanabhan V. et Whang S. (1997). The Bullwhip Effect in Supply Chains. *Sloan Management Review*. Vol.38, N° 3, p. 93-102.
- Lee H.L., So K.C. et Tang C.S. (2000). The value of information sharing in a two-level supply chain. *Management Science*, Vol. 46 N°. 5, p. 626-43.
- Lehtonen J.M. (1995). Logistics Performance Measurement: an Application to Pulp and Paper Industry. *Proc. Intl. Federation for Information Processing Working Conf. on Reengineering the Enterprise, University College Galway, Ireland*, 319-327.
- Levy D.L. (1997). Lean production in an international supply chain. *Sloan Management Review*. Vol. 38, p.94–102.
- Lin CR. et Chen H.S. (2004). A fuzzy strategic alliance selection framework for supply chain partnering under limited evaluation resources. *Computers in Industry*. Vol.55, p.159-179.
- Lohtia R., Xie T. et Subramaniam R. (2004). Efficient consumer response in Japan Industry concerns, current status, benefits, and barriers to implementation. *Journal of Business Research*. Vol. 57, p.306– 311.
- Ludema M.W. (2003). Supply Chain Analysis Thinking. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference*. Vol. 5, p. 4566- 4571.
- Lummus R.R. et Vokurka R.J. (1999). Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management and Data Systems*. 99/1, p. 11–17.
- Mak H.Y. (1992). System dynamics and discrete event simulation modelling. *PhD. Thesis, The London School of Economics, University of London*.
- Malone T.W. et Crowston K. (1994). The Interdisciplinary Study of Coordination. *ACM Computing Surveys*, Vol. 26, N°.1.
- Maloni M.J. et Benton W.C. (1997). Supply Chain Partnerships: Opportunity for Operations Research. *European Journal of Operational Research*. Vol.101, p.419-429.
- Mason-Jones R. et Towill D.R. (1997). Information enrichment: designing the supply chain for competitive advantage. *International Journal of Supply Chain Management*. Vol. 2 N°.4, p.137-48.
- Mason-Jones R. et Towill D.R. (1999). Total cycle time compression and the agile supply chain. *International Journal of Production Economics*. Vol. 62, p. 61-73.
- Mason-Jones R., et Towill D.R. (1999). Using the information de-coupling point to improve supply chain performance. *International Journal of Logistics Management*, Vol. 19, N°.2, p.13-36.
- McCarthy I. (1995). Manufacturing classification: lessons from organizational systematics and biological taxonomy. *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 6, p.37-48.
- Melcher A.J., Khouja M. et Booth D.E. (2002). Toward a production classification system. *Business Process Management Journal*. Vol.8, p.53-79.

- Mendy G. et Giard V. (2006). Exploitation of the knowledge of the final demand in the piloting of a logistics chain. *Conference ILS 2006 (International Conference on Information Systems, Logistics And Supply Chain)*, Lyon.
- Mendy G. et Giard V. (2006). Le passage de l'approvisionnement synchrone à la production synchrone dans la chaîne logistique. *Revue Française de gestion*.
- Mentzer J.T., DeWitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D. et Zacharia Z.G. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of business logistics*. Vol.22, N° 2.
- Miltenburg J. (1995). Manufacturing Strategy. *Productivity Press Portland, Oregon*.
- Min H. et Zhou G. (2002). Supply chain modeling : past, present and future. *Computers and Industrial Engineering*. Vol. 43, p.231-249.
- Monahan J.P. (1984). A quantity discount pricing model to increase vendor profits. *Management Science*. Vol. 30, p.720–726.
- Monteiro T. et Ladet P. (2001). Formalisation de la coopération dans le pilotage distribué des flux interentreprises. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, p.963-989.
- Nakajima S. (1989). TPM Development Program. *Productivity Press, Cambridge*.
- Naylor J.B., Naim M. et Berry D. (1999). Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*. Vol. 62, p. 107-118.
- Newman W.R. et Sridharan V. (1995). Linking manufacturing planning and control to the manufacturing environment. *Integrated Manufacturing systems*. Vol.6, p.36-42.
- Ng W.K., Piplani R. et Viswanathan S. (2003). Simulation workbench for analysing multi-echelon supply chains. *Integrated manufacturing systems*. Vol 14, p 449-457.
- Olhager J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics*. Vol.85, N° 3, p. 319-329.
- Olhager J. et Rudberg M. (2002). Linking manufacturing strategy decisions on process choice with manufacturing planning and control systems. *International journal of production research*. Vol.40, p. 2335-2351.
- Oliver R. K. et Webber M. D. (1982). "Supply Chain Management: Logistics Catches Up with Strategy. *Chapman and Hall, London*, p. 63 – 75.
- Pagh J.D. et Cooper M.C. (1998). Supply chain postponement and speculation strategies: how to choose the right strategy. *Journal of Business Logistics*, Vol. 19 N°.2, p.13-33.
- Parrod N., Thierry C., Fargier H. et Cavaille J.B. (2007). Cooperative subcontracting relationship within a project supply chain: A simulation approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Vol.15, p.137-152.
- Partanen J. et Haapasalo H. (2004). Fast production for order fulfilment: Implementing mass customization in electronics industry. *International Journal of Production Economics*. Vol.90, p. 213–222.

- Pasternack B.A. (1985). Optimal Pricing and Return Policies for Perishable Commodities. *Marketing Science*, Vol. 4, N°. 2, p. 166-176.
- Pedersen VB. (2001). Supporting partner selection for virtual enterprises. *International Conference on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing*. Vol. 191, p.95-102.
- Persson F. et Olhager J. (2002). Performance Simulation of Supply Chain Designs. *International Journal of Production Economics*, Vol.77, p. 231 – 245.
- Petrovic D. (2001). Simulation of supply chain behaviour and performance in an uncertain environment . *International Journal of Production Economics*. Vol. 71, p. 429-438.
- Plane D.R. (1997). How to build spreadsheet models for production and operations management. *OR/MS Today*. Vol. 24, N°. 2, p.50-54.
- Powell S.G. (1997). Leading the spreadsheet revolution. *OR/MS Today*. Vol. 24, p.8-10.
- Pundoor M. et Herrmann R. (2006). A hierarchical approach to supply chain simulation modelling using the Supply Chain Operations Reference model. *International Journal of Simulation and Process Modeling*. Vol.2, p.124-132.
- Reeve J.M. (2002). The financial advantages of the lean supply chain. *Supply Chain Management Review*.
- Reiner G. et Trcka M. (2004). Customized supply chain design: problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis. *International Journal of Production Economic*. Vol. 89, p. 217 – 229.
- Riddalls C.E. et Bennett S. (2002). Production-inventory system controller design and supply chain dynamics. *International Journal of Systems Science*. Vol.33, p. 181-195.
- Riis J.O., Smeds R. et Van Landeghem R. (2000) Games in Operations Management. *Kluwer, Boston, MA*.
- Robinson S. (2005). Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? *Journal of the Operational Research Society*. Vol.56, p. 619–629.
- Robinson S. (2006). Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements. *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*
- Rossetti M.D.et Chan H.T. (2003) A Prototype Object-Oriented supply chain simulation framework. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*. S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice, Eds.
- Rota K., Thierry C. et Bel G. (2001). La maîtrise des flux. *Chapitre 5 "Gestion des flux dans les chaînes logistiques (Supply Chain Management)", Ouvrage Hermès : Traité Systèmes pour l'ingénieur, Ed. Hermès*.
- Rudberg M. et Olhager J. (2002). Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective. *The International Journal of Management Science*. Vol.31, p. 29-39.
- Sahin F et Robinson E.P. (2003). Information Sharing and Coordination in Make-to-Order Supply Chains. *Working paper*.

- Sahin F. et Robinson E.P. (2002). Flow coordination and information sharing in supply chains: review, implications, and directions for future research. *Decision Sciences*, Vol. 33 N°4, p.505-36.
- Sarjoughian H.S., Wang W., Huang D., Rivera D.E., Godding G.W., Kempf K.G. et Mittelmann H.D. (2005). Hybrid Discrete event simulation with model predictive control for semiconductor supply chain manufacturing. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*.
- Sattler L. et Schlueter R. (1998). Semiconductor Metrics: Conflicting Goals or Increasing Opportunities? *IEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*.
- SCC (Supply Chain Council), <http://www.supply-chain.org>, accès 2007.
- Schary P.B. et Skjott-Larsen T. (1995). Managing the Global Supply chain. *Munksgaard International Publishers, Copenhagen*.
- Schonsleben P. (2004). Integral logistics management: Planning and control of comprehensive supply chains. *The St-Lucie Press series on Resource Management*.
- Schroeder R.G., John C.A. et Scudder G.D. (1986). White collar productivity measurement. *Management Decision*. Vol. 24, p. 3–7.
- Sethi S.P. et Thompson G.L. (2000). Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics. *Kluwer Academic Publishers*.
- Shannon R.E. (1975). Systems Simulation: The Art and Science. *Prentice-Hill, Inc., New Jersey*.
- Sharman G. (1984). The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review*.
- Sheffi Y. (1985). Some analytical problems in logistics research. *Transportation Research. Part A: General*. Vol.19, p.402-405.
- Silver E.A., Pyke D.F. et Peterson R. (1998). Inventory management and production planning and scheduling. *John Wiley & Sons, NY*.
- Simatupang T.M. et Sridharan R. (2005). Supply chain discontent. *Business Process Management Journal*. Vol.11 N° 4, p. 349-369.
- Simchi-Levi D., Kaminsky P. et Simchi-Levi E. (2000). Designing and Managing the Supply Chain. Concepts, strategies and case studies. *McGraw-Hill Higher Education*.
- Simchi-Levi D., Kaminsky P. et Simchi-Levi E. (2003). Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies. *Second Edition, Irwin/McGraw-Hill, Boston, MA*.
- Slack N. (1991). The Manufacturing Advantage. *Mercury Books, London*.
- Smits M., Heuvel V. et Huisman W. (2006). The Tacit Liaison between Networkability and Supply Chain Performance. *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Vol. 8.
- Sodhi M.S. (2001). Applications and opportunities for operations research in internet-enabled supply chains and electronic marketplaces. *Interfaces*, Vol. 31, p.56–69.

- Sounderpandian J.D.B.A. (1989). MRP on spreadsheets: a do-it-yourself alternative for small firms. *Production and Inventory Management Journal, Second Quarter*, p.6-11.
- Spekman R.E., Kamauff J.W. et Myhr N. (1998). An empirical investigation into supply chain management. *International Journal of Physical & Logistics Management, Vol.28 N° 8*, p.630-650.
- Spengler T. et Schröter M. (2003). Strategic management of spare parts in closed-loop supply chains—a system dynamics approach. *Interfaces. Vol. 33, N° 6*, p.7–17.
- Stadtler H. (2005). Supply chain management and advanced planning - basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research. Vol. 163*, p.575–588.
- Steege P. (1996). Overall Equipment Effectiveness in Resist Processing Equipment. *IEEE/SEMI- Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*.
- Sterman J.D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *McGraw-Hill, Boston, MA*.
- Sterman, J. D. (1989). Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science. Vol. 35*, p.321-339.
- Swaminathan J.M. (1998). Modeling supply chain dynamics: A multi-agent approach. *Decision Sciences. Vol.29*.
- Swaminathan J.M., Sadeh N.M. et Smith S.F. (1995). Information Exchange in Supply Chains. *Technical Report. CMU-RI-TR-95-36. Carnegie Mellon University, Pittsburgh*.
- Tagaras G. (1999). Pooling in multi-location periodic inventory distribution systems. *Omega Vol.27*, p.39-59.
- Tannock J., Cao B., Farr R. et Byrne M. (2007). Data-driven simulation of the supply-chain-Insights from the aerospace sector. *International Journal of Production Economics. Vol. 110*, p.70–84.
- Taratynava N., Burlat P. et Boucher X. (2008). Partage des prévisions dans une chaîne logistique à deux niveaux. *7^e Conférence Internationale de Modélisation et Simulation, Paris*.
- Taylor D.H. (1999). Measurement and analysis of demand amplification across the supply chain. *International Journal of Logistics Management. Vol.10*, p. 55–70
- Tayur S., Ganeshan R. et Magazine M. (1999). Quantitative models for supply chain management. *Kluwer Academic Publishers*.
- Ten Wolde H. (2000). Building blocks of education. *OR/MS Today, Vol. 27*, p.12.
- Terzi S. et Cavalieri S. (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in Industry. Vol. 53*, p.3 – 16.
- Tewoldeberhan T.W., Verbraeck A., Valentin E. et Bardonnnet G. (2002). An evaluation and selection methodology for discrete-event simulation software. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, Calif*.
- Thierry C. (2003). Gestion de chaînes logistiques : Modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme. *Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université Toulouse II Le Mirail*.

- Towill D.R. (1996). Time compression and supply chain management – a guided tour. *Supply Chain Management, Vol.1, N°.1, p.15-27.*
- Towill D.R. et McCullen P.L. (1999). The impact of agile manufacturing on supply chain dynamics. *The International Journal of Logistics Management. Vol.10 N°.1, p.83-96.*
- Towill D.R., Naim N.M. et Wikner J. (1992). Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management. Vol.22, p.3-13*
- Tsay A.A. (1999). The Quantity Flexibility Contract and Supplier-Customer Incentives. *Management Science, Vol. 45, N° 10, p. 1339-1358.*
- Turban E., McLean E. et Wetherbe J. (2004). Information Technology for Management. *4th ed., Wiley, New York.*
- Tzatestas S. et Kapsiotis G. (1994). Coordinated Control of Manufacturing Supply Chains Using Multi-level Techniques. *Computer Integrated Manufacturing Systems. Vol.7, p.206-212.*
- Umeda S. et Lee T. (2004). Design specifications of a generic supply chain simulator. *Proceedings of the 2004 Winter simulation conference.*
- Van der Vorst J.G.A.J., Beulens A.J.M., De Wit W. et Van Beek P. (1998). Supply chain management in food chains: Improving performance by reducing uncertainty. *International Transactions in Operational Research. Vol.5, p. 487–499.*
- Van Donselaar K., Kopczak., L.R., et Wouters M. (2001). The use of advance demand information in a project-based supply chain. *European Journal of Operational Research Vol.130, p.519-538.*
- Verwijmeren M. (2004). Software component architecture in supply chain management. *Computers in Industry. Vol.53, p.165-178.*
- Viswanathan S. et Piplani R. (2001). Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs. *European Journal of Operational Research. Vol.129, p.277-286.*
- Vollmann T.E., Berry W.L., Whybark D.C. et Jacobs F.R. (2005). Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management. *McGraw-Hill International Edition.*
- Vorst van der J.G.A.J. et Beulens A.J.M. (2002). Identifying sources of uncertainty to generate supply chain redesign strategies. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management. Vol. 32, N° 6, p. 409-430.*
- Wacquet M., Bouras A., Neubert G. et Ouzrout Y. Supply Chain Management : vers de nouveaux modes de pilotage. *Groupement de Recherche en Productique Toulouse - novembre 2001.*
- Waller M., Johnson M.E. et Davis T. (1999). Vendor-managed inventory in the retail supply chain. *Journal of Business Logistics. Vol.20, p. 183–203.*
- Wanke P.F. et Zinn W. (2004). Strategic logistics decision making. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Vol. 34, N° 6, p. 466-478*

- Waterson P.E., Clegg C.W., Bolden R., Pepper K., Warr P. B., et Wall T. D. (1999). The use and effectiveness of modern manufacturing practices: a survey of UK industry. *International Journal of Production Research*. Vol.37, N°10, p. 2271-2292.
- White A., Daniel E.M. et Mohdzain M. (2005). The role of emergent information technologies and systems in enabling supply chain agility. *International Journal of Information Management*, N° 25, p. 396-410.
- Wiendahl H.P et Lutz S. (2002). Production in Networks. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.51, Issue 2, p.573-586.
- Wigand R.T., Picot A., et Reichwald R. (1997). Information, Organization and management: Expanding Markets and Corporate Boundaries. *John Wiley & Sons, Chistester, England*.
- Wikner J., Towill D.R. et Naim M. (1991). Smoothing Supply Chain Dynamics. *International Journal of Production Economics*. Vol.22, p.231-248.
- Wild R. (1971). The Techniques of Production Management. *Holt, Reinhardt and Winston, London*.
- Wilding R.D. (1998). Chaos Theory; Implications for Supply Chain Management. *International Journal of Logistics Management*, Vol.9, N° 1, p.43-56.
- Willmott P. et McCarthy D. (2001). Total Productivity Maintenance: A Route to World-Class Performance. *2nd edition, Newnes, p. 2-7*
- Wilson E.B. (1952). Introduction to Scientific Research. *McGraw-Hill, New York*.
- Winston W.L. (1996). Simulation Modeling Using @Risk. *Wadsworth Publ. Co. Belmont, CA, USA*.
- Wyland B., Buxton K. et Fuqua B. (2000). Simulating the Supply Chain. *IEE Solutions*, p. 37-42
- Zhao X., Xie J. et Lau S.M. (2001). Improving the supply chain performance: use of forecasting models versus early order commitments. *International Journal of Production Research*. Vol. 39, N°. 17, p. 3923-3939.
- Zhao X., Xie J. et Leung J. (2002). The impact of forecasting model selection on the value of information sharing in a supply chain. *International Journal of Production Economics*. Vol. 142, p.321-44.
- Zipkin P. (2000). Foundations of Inventory Management. *McGraw-Hill, New York*.

ANNEXES

Annexe A. Modèles de gestion des stocks

A.1. La gestion des stocks en point de commande et reapprovisionnement périodique

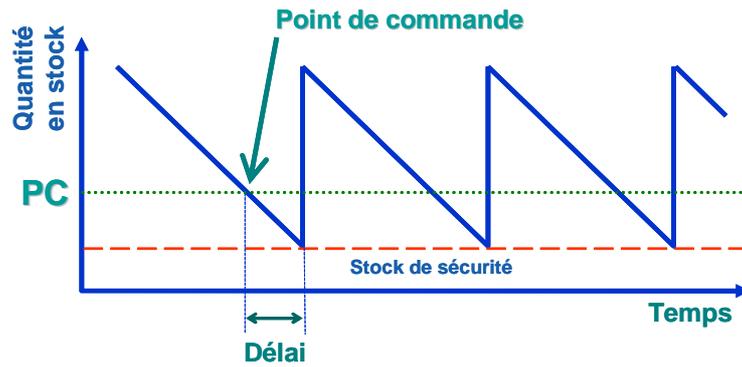
Les premiers travaux concernant les systèmes de planification se sont intéressés à la gestion des stocks dans l'entreprise pour répondre de façon efficace à la demande du client. Principalement, deux politiques de gestion de stocks sont utilisées :

La politique dite à point de commande, ou Replenishment Order Point (*ROP*) : cette politique consiste à commander une quantité fixe chaque fois que la position de stock atteint un seuil appelé point de commande.

La politique à reapprovisionnement périodique : consiste à commander, toutes les périodes T , une quantité variable de manière à ramener la position de stock à une valeur donnée appelée niveau de reapprovisionnement. Par la suite, plusieurs autres variantes de ces politiques ont été développées.

La gestion optimale de stock revient à répondre principalement à deux questions : combien commander et quand commander ?

Les figures A.1 et A.2 illustrent le calcul des points de commande et de niveau cible pour les politiques *ROP* et périodique (respectivement).



$$PC = (u \times d) + Ss$$

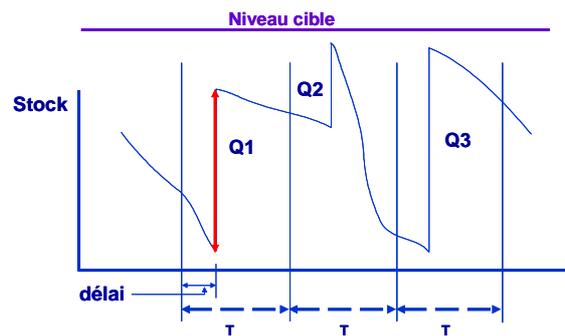
PC: Point de commande

u: Taux de consommation moyen (demande moyenne)

d: Délai de livraison moyen exprimé en unités de temps

Ss: Stock de sécurité

Figure A.1. Calcul du point de commande (ROP)



Niveau de stock qui permet de déterminer la taille du lot à commander.

$$\text{Niveau cible} = DD + DR + SS$$

DD = utilisation durant le délai

DR = utilisation durant la période de révision

SS = stock de sécurité

Figure A.2. Calcul du niveau cible (périodique)

Pour déterminer la quantité à commander le modèle de Wilson (quantité économique) est souvent utilisé pour réaliser un compromis entre le coût de commande et le coût de possession des stocks.

Chaque commande d'achat ou ordre de fabrication coûte à l'entreprise. Le coût de lancement ou coût de passation des commandes représente tous les frais liés au fait de passer une commande et est supposé être proportionnel au nombre de commandes passées dans l'année. Ces coûts sont déterminés à l'aide de la comptabilité analytique.

Le coût de possession du stock est constitué des charges liées au stockage physique mais également du non rémunération des capitaux immobilisés dans le stock (voire du coût des capitaux empruntés pour financer le stock). Pour cette dernière raison, ce coût est considéré comme étant proportionnel à la valeur du stock moyen et à la durée de détention de ce stock. Le taux de possession annuel est le coût de possession ramené à une unité monétaire de matériel stocké. Il est obtenu en divisant le coût total des frais de possession par le stock moyen.

Le tableau A. 1 donne les données nécessaires au calcul de la quantité économique.

N	le nombre de pièces consommées (fabriquées ou achetées)
Q	le nombre de pièces approvisionnées ou lancées en fabrication en une seule fois
Pu	le prix unitaire de la pièce
Ss	le stock de sécurité envisagé pour cette pièce
T	le taux de possession de l'entreprise exprimée en %
CL	le coût d'approvisionnement ou de lancement en fabrication
Ss	le stock de sécurité envisagé pour cette pièce

Tableau. A.1. Les données de calcul de la quantité économique

Trouver la quantité économique Q_e , c'est trouver la valeur de Q pour laquelle le coût total est minimal, c'est à dire la valeur Q_e pour laquelle la dérivée du coût total par rapport à la quantité est nulle.

$$\frac{dC_t}{dQ} = -\left(\frac{N}{Q} \times CL\right) + \frac{t \times Pu}{2} = 0$$

D'où la formule de la quantité économique Q_e :

$$Q_e = \sqrt{\frac{2 N \times CL}{t \times Pu}}$$

La figure A.3 illustre les coûts de gestion du stock et la quantité économique.

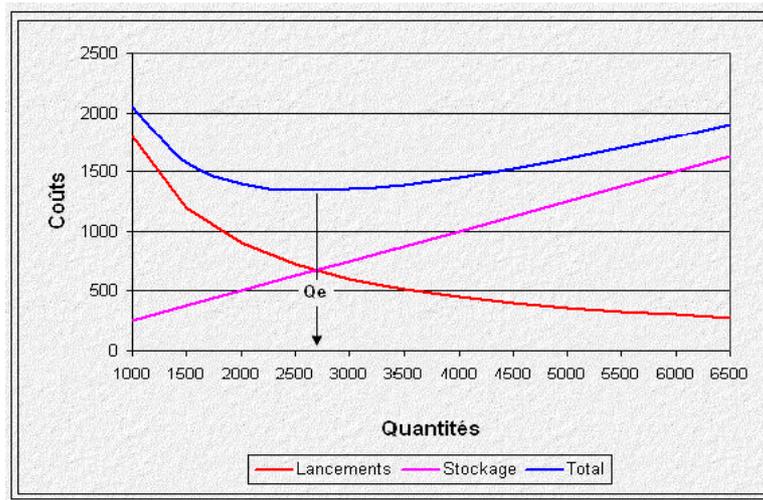


Figure.A.3. Quantité économique de commande

A.2. Le système Kanban

Le système Kanban est un moyen simple de la mise en œuvre d'un système de pilotage en flux tirés, par le transfert des informations de l'aval en amont. Dans une production contrôlée par un système Kanban, les kanbans (cartes) sont utilisés comme des ordres de fabrication. Le système de production est décomposé en plusieurs étages. A chaque étage est associé un nombre fixe de kanbans. Lorsqu'un lot est traité par le processus aval, le kanban qui lui est rattaché revient et prend place dans un tableau. Quand le nombre de kanbans dans le tableau dépasse un seuil, ce qui signifie que le processus aval a consommé un certains nombre de lots, un ordre de fabrication est déclenché sur le processus amont pour fournir le stock aval.

Le système kanban est donc un mécanisme permettant d'asservir la production ou l'approvisionnement d'un composant à la consommation qui en est faite.

Dans le détail, si l'on observe ce qui se passe entre deux postes de travail consécutifs, on peut observer que (voir la figure ci-après) :

- Le poste n°3 consomme des pièces usinées par le poste n°2. Chaque fois qu'il utilise un container de pièces il détache de celui-ci une carte kanban qu'il renvoie au poste n°2. Cette carte kanban constitue pour le poste n°2 un ordre de fabrication d'un container de pièces.
- Quand le poste n°2 a terminé la fabrication du container, il attache à celui-ci le kanban. Le container est alors acheminé vers le poste n°3.
- Entre deux postes de travail, circule un nombre défini de kanbans (donc de containers).
- Un kanban particulier (par exemple pour une référence de produit) ne circule qu'entre deux postes de travail spécifiques (il apparaîtra donc sur le kanban l'adresse du poste amont et l'adresse du poste aval entre lesquels il circule).
- Les kanbans sont donc soit attachés à des containers en attente devant le poste n°3; soit sur le planning à kanbans au poste n°2 en attente d'usinage de pièces.

La figure A.4 illustre une boucle Kanban.

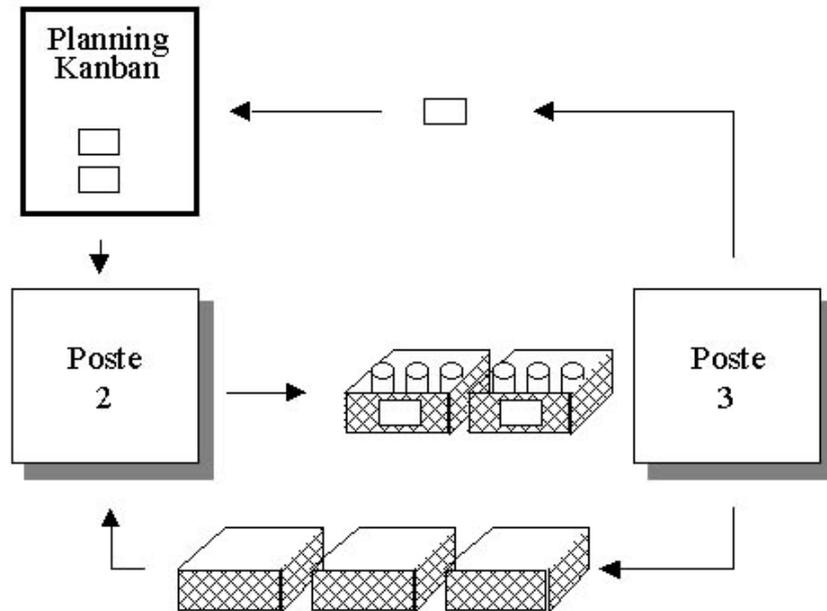


Figure. A.4. Système Kanban

Un problème important quand on met en place un système Kanban dans un atelier est de déterminer le nombre de Kanbans à mettre en circulation. Il n'existe pas de formule miracle. Deux méthodes peuvent être utilisées : méthode empirique et méthode de calcul.

- Méthode empirique : Les entreprises procéderont en général empiriquement, pas à pas, en mettant beaucoup de kanbans au début puis en diminuant petit à petit le nombre jusqu'à ce que le flux casse.

- Méthode de calcul : Pour avoir une idée du nombre de kanbans à utiliser, certains spécialistes de gestion de production proposent le calcul suivant :

D : la demande moyenne de pièces par unité de temps (heure, jour, semaine, mois, etc.)

L : délai de mise à disposition d'un container de pièces (qui est en particulier fonction de la cadence du poste considéré)

C : la capacité d'un container

G : facteur de gestion (valorisation des aléas possibles, <10% du produit $D \times L$)

Le nombre de kanbans n est calculé comme suit :

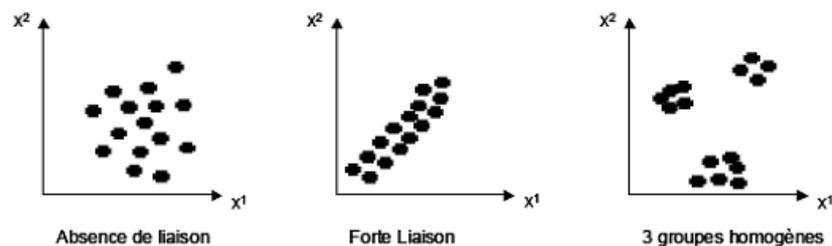
$$n = (D \times L + G) / C$$

Annexe B. Techniques d'analyse des données

B.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP a pour objectif la description de données contenues dans un tableau individus-variables numériques par une représentation approchée du nuage des individus dans un sous-espace de variables de dimensions plus faibles. L'objectif est de permettre, par une interprétation graphique, de déterminer des groupes d'individus qui se distinguent des autres et des variables discriminantes.

La figure B.1 illustre un exemple de relations entre des individus suivant deux variables X^1 et X^2 .



L'algorithme de l'ACP est le suivant : On commence par translater les données pour que le point moyen du nuage de points soit à l'origine (afin de pouvoir utiliser de l'algèbre linéaire). Ensuite, on essaye d'effectuer une rotation pour que l'écart-type de la première coordonnée soit le plus grand possible : cela revient à diagonaliser la matrice des covariances (c'est une matrice symétrique réelle (elle est même positive), elle est donc diagonalisable dans une base orthonormée), en commençant par les vecteurs propres les plus grands. Le premier axe des nouvelles coordonnées correspond à une approximation du nuage de point par un sous-espace de dimension un ; si on veut une approximation par un sous-espace de dimension k , on prend les k premiers vecteurs propres. Pour choisir la dimension de ce sous-espace, on regarde (graphiquement) les valeurs propres, et on s'arrête quand elles se mettent à décroître rapidement.

B2. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'AFC cherche à réduire l'espace de représentation d'un tableau de contingence (tri croisé d'un tableau de données), tout en essayant de ne pas perdre trop d'information. Les tableaux de contingence sont dérivés des tableaux de données et composés des effectifs d'individus ayant une modalité d'un premier caractère qualitatif et une modalité d'un deuxième caractère qualitatif. La méthode déploie une ACP sur les lignes et les colonnes du tableau de contingence. La métrique utilisée en AFC est une distance du Khi-2 sur les profils, c'est-à-dire les données divisées par les effectifs des modalités.

L'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) est une extension de l'AFC. Alors que l'AFC met en correspondance deux caractères (analyse bivariée), l'AFCM traite n caractères simultanément (analyse multivariée). Cette méthode a l'avantage de rendre homogènes les données (par un codage disjonctif complet) ce qui permet de traiter des données de différents type et unité. Elle fait apparaître toutes les modalités des variables ce qui facilite l'interprétation.

B.3. La classification hiérarchique

Le Classification Hiérarchique Ascendante (ou "par agrégation") procède par fusions successives de clusters déjà existants. A chaque étape, les deux clusters qui vont fusionner sont ceux dont la "distance" est la plus faible. La question est donc de trouver une bonne définition de ce que l'on entend par la "distance" entre deux groups de points. Il existe de nombreuses définitions d'une telle distance, la plus utilisée étant la distance de Ward.

La Classification Ascendante Hiérarchique (ou CAH) considère initialement toutes les observations comme étant des clusters ne contenant qu'une seule observation (singleton), et leur distance est alors le plus souvent définie comme étant leur distance euclidienne. La première étape consiste donc à réunir dans un cluster à deux observations les deux observations les plus proches. Puis la CAH continue, fusionnant à chaque étape les deux clusters les plus proches au sens de la distance choisie. Le processus s'arrête quand les deux clusters restant fusionnent dans l'unique cluster contenant toutes les observations.

La règle la plus communément utilisée pour tracer l'arbre de la hiérarchie est telle que les typologies qui ont le plus de chance d'être significatives sont obtenues simplement en traçant une ligne horizontale en travers du dendogramme, et en retenant dans la typologie les clusters terminaux qui sont juste au-dessus de cette ligne. En changeant la hauteur de la ligne, on change le nombre de clusters retenus, et on dispose ainsi d'un moyen simple pour faire varier la granularité de la typologie finale.

La Classification Hiérarchique Descendante (ou "par division") procède de façon inverse. Elle considère l'ensemble des données comme un gros cluster unique, et le scinde en deux clusters descendants. La scission s'opère de façon à ce que la distance entre les deux descendants soit la plus grande possible, de façon à créer deux clusters bien séparés. Cette procédure est ensuite appliquée à chacun des descendants (procédure récursive) jusqu'à ce qu'il ne reste plus que des clusters ne contenant qu'une seule observation (singletons).

La même représentation en dendrogramme, et la même procédure de définition d'une typologie à partir d'un dendrogramme utilisées par l'approche ascendante sont utilisables avec par approche descendante (Figure B.2).

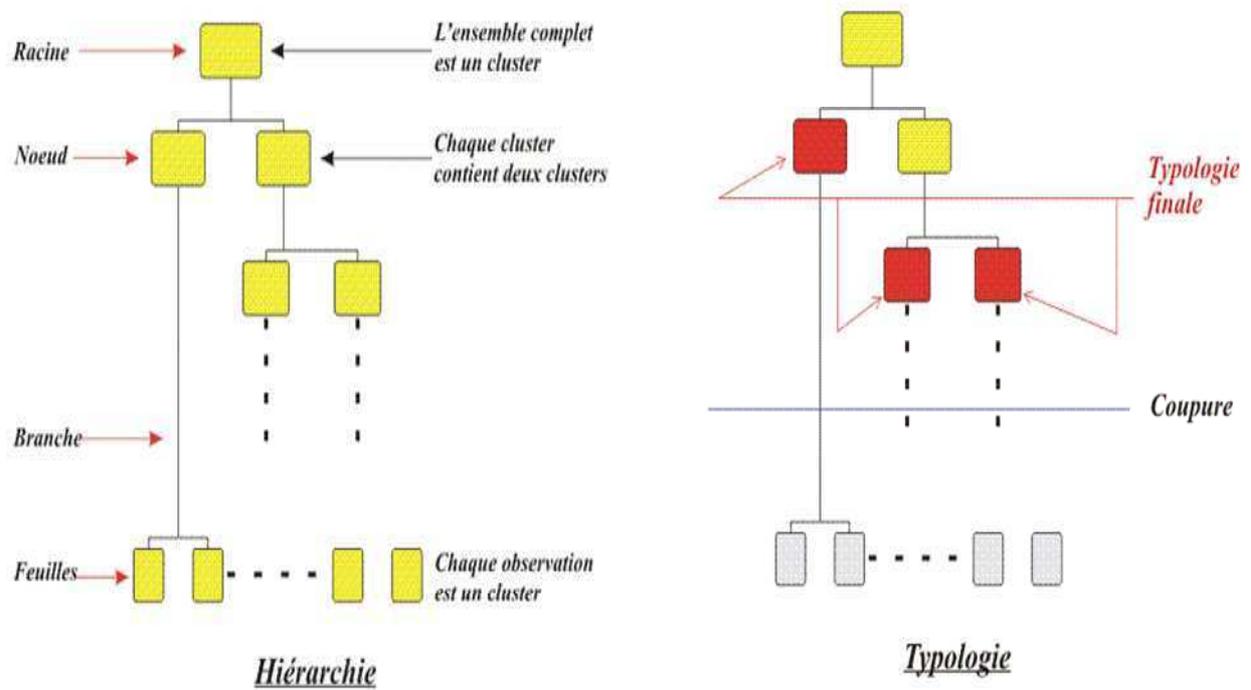


Figure B.2. Principe de la classification hiérarchique

N° d'ordre : 498 GI

Mohand ESSAID

MODELLING AND SIMULATION OF LOGISTIC FLOWS CONNECTIVITY WITHIN MANUFACTURING NETWORKS

Speciality: Industrial Engineering

Keywords: Manufacturing Networks, Flow Connectivity, Supply Chain, Simulation, Capability, Demand Response Strategy.

Abstract:

Manufacturing network configuration is today a major industrial problem, especially in a “on demand production” context, characterized by logistical relations in the short term to respond quickly to market opportunities. Our work fits into this and aims to study the dynamics of production flow and evaluating the performance of supply chains. There is more accurately the potential for a company to connect to a manufacturing network, we also call flow connectivity. This potential depends on the organizational maturity of the companies involved in the network. This organizational maturity can be characterized by some attributes describing the operating system and the operations management system of the company. These attributes define enterprises-profiles and help to build a generic model of manufacturing systems.

Our research approach is to assess the performance of supply chains made up of different profiles of companies by using simulation in laboratory “*in vitro simulation*”. The objective of this approach is the benchmark of different logistical scenarios, the detection of inefficient configurations and the implementation of coordination mechanisms to improve their performance. From the experimental results, it is possible to establish a methodological guide to help with the decision, without going through simulations.

From a state of the art on the supply chain configuration and modelling, we developed a conceptual model of manufacturing network. This model is instantiated depending on the type of production process, the operations management policies and the level of capability of the company. The latter is defined based on the overall performance effectiveness. The company profiles obtained from the model are then incorporated into a supply chain. The model is then implemented using discrete event simulation.

We have made simulations of supply chains by focusing on levels of capability of enterprises in the chain and their demand response strategies. Specifically, we have studied a Make To Stock strategy and an Assemble To Order strategy upstream the chain.

We have achieved a benchmark of different supply chain configurations and deduced some behavioural flow dynamics. We showed the impact of heterogeneity of capability levels of supply chain tiers on the overall performance of the system, as well as the potential gains of an Assemble To Order strategy.

N° d'ordre : 498 GI

Mohand ESSAID

MODELISATION ET SIMULATION DE LA CONNECTIVITE DES FLUX LOGISTIQUES DANS LES RESEAUX MANUFACTURIERS

Spécialité : Génie Industriel

Mots clefs : Réseaux manufacturiers, Connectivité des flux, Configuration logistique, Simulation, Stratégie de réponse à la demande, Capabilité, Performance.

Résumé :

La configuration des réseaux manufacturiers constitue de nos jours une problématique industrielle majeure, plus particulièrement dans un contexte « on demand production », caractérisé par des relations logistiques à court terme en vue de répondre rapidement à des opportunités de marché. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans cette optique et ont pour objectif d'étudier la dynamique des flux de production et l'évaluation de la performance des chaînes logistiques constituées. On s'intéresse plus précisément au potentiel d'une entreprise à se connecter à un réseau manufacturier, que nous appelons aussi la connectivité des flux. Ce potentiel dépend en grande partie de la maturité organisationnelle des entreprises impliquées dans le réseau. Cette maturité organisationnelle peut être caractérisée par un certain nombre d'attributs décrivant le système opérant et le système de pilotage de l'entreprise. Ces attributs permettent de définir des profils types d'entreprise et de modéliser de façon générique des systèmes manufacturiers. Notre démarche de recherche consiste à évaluer la performance de chaînes logistiques constituées de différents profils d'entreprises, et ce en utilisant une simulation en laboratoire « *in vitro* ». L'objectif de cette démarche est le benchmark de différents scénarios logistiques et la détection de configurations peu performantes et la mise en œuvre de mécanismes de coordination pour améliorer leur performance. A partir des résultats expérimentaux, il est alors possible de constituer un guide méthodologique permettant une aide à la décision, sans repasser par des simulations.

A partir d'un état de l'art sur la configuration et la modélisation des chaînes logistiques, nous avons développé un modèle conceptuel d'entreprise en vue de son intégration dans un réseau manufacturier. Ce modèle est instancié selon le type de processus de production, le mode de pilotage des flux et le niveau de capabilité de l'entreprise. Ce dernier est défini en se basant sur le taux de rendement synthétique des process. Les profils d'entreprises obtenus à partir du modèle sont alors incorporés dans une chaîne logistique. Le modèle logistique est ensuite implémenté sous un outil de simulation à événements discrets.

Nous avons réalisé des campagnes de simulation de chaînes logistiques en se focalisant sur les niveaux de capabilité des entreprises de la chaîne et leurs stratégies de réponse à la demande. Plus précisément, nous nous sommes intéressés une stratégie de production sur stock et une stratégie d'assemblage à la commande en amont de la chaîne. Les résultats de simulation nous ont permis de réaliser un benchmark de différentes configurations logistiques et de déduire quelques mécanismes de comportement de ces chaînes. Nous avons notamment montré l'impact de l'homogénéité des échelons, de la position de l'entreprise la moins performante sur la performance globale de la chaîne, ainsi que les gains potentiels d'une stratégie de production à la commande.