

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
MOHAMMED AMINE BENKADDOUR

UTILISATION DE LA MODULARISATION DANS LA CONCEPTION DES
CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT DES ENTREPRISES DU SECTEUR
AÉRONAUTIQUE

MONTRÉAL, LE 13 SEPTEMBRE 2007

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amar Ramudhin, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 22 AOÛT 2007
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

UTILISATION DE LA MODULARISATION DANS LA CONCEPTION DES CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT DES ENTREPRISES DU SECTEUR AÉRONAUTIQUE

Mohammed Amine Benkaddour

SOMMAIRE

Ce projet porte sur la conception de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le secteur aéronautique. Notre objectif est de valider un modèle d'optimisation des chaînes logistiques en prenant en compte la nomenclature des produits et en intégrant la notion de modularité dans la production, ce qui permet d'assurer plus de flexibilité au niveau de la chaîne et d'englober l'ensemble des volets de l'approvisionnement, de la production et de la distribution à travers l'optimisation des flux des matières entre les unités de la chaîne et le positionnement des sites dans le réseau logistique.

La résolution de ce problème de design du réseau dans un cas réaliste de l'industrie aéronautique nécessite l'utilisation de la programmation linéaire en nombres mixtes. Cependant, la taille des problèmes abordés risque de se heurter à la robustesse et à la performance des progiciels d'optimisation. Par ailleurs, des décompositions du problème peuvent être implantées pour résoudre de tels modèles; dans le cadre de ce projet, la méthode de décomposition de Benders a été efficacement appliquée dans un cas simple, ce qui permet de valider les résultats obtenus par les logiciels commerciaux.

Les concepts développés dans ce projet peuvent non seulement s'appliquer avantageusement à plusieurs facettes du problème posé, mais également s'étendre aux autres volets de l'industrie.

USING MODULARIZATION CONCEPT IN SUPPLY CHAIN MODELS IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

Mohammed Amine Benkaddour

ABSTRACT

This project deals with the design of the supply chain network of an aircraft industry. Our goal is to validate an optimization model for logistic chains, taking into consideration the Bill Of Materials (BOM) and integrating the modularity concept in the production process, which ensures more flexibility in the supply chain and includes the issues of supply, production and distribution through the optimization of materials' flow among business units of the chain and the location of sites in the logistic network.

The resolution of this network design problem in a realistic case of the aircraft industry requires the use of Mixed Integer Linear Programming (MILP). However, the size of the problems considered could limit the performance of the optimization software packages. Besides, decomposition methods can be applied to solve such models; within the framework of this project, Benders decomposition was effectively applied in a simple case, which makes it possible to validate the results obtained by commercial softwares.

The concepts developed in this project can be applied to several facets of the problem; it can be easily extended to other industries.

REMERCIEMENTS

Je dédie ce travail à mes chers et tendres parents, Driss et Naïma, et à mes sœurs, Awatif et Aïcha, sans qui je ne serais pas où j'en suis aujourd'hui. Je ne saurais trouver les mots justes pour les remercier pour leur soutien et tous les sacrifices qu'ils ont faits durant ces dernières années.

Je remercie chaleureusement M. Amar Ramudhin d'avoir accepté d'encadrer ce travail, avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité. Merci pour ses conseils, son optimisme et sa confiance qu'il m'a accordé durant toutes ces années.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait M. Michel Rioux en acceptant de présider le jury d'évaluation. Je lui exprime toute ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Que M. Marc Paquet trouve toute ma reconnaissance pour sa présence en tant que membre du jury. Les mots ne sont plus expressifs pour lui exprimer ma gratitude pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son expérience et ses grandes compétences qui m'ont permis d'accomplir ce travail. Qu'il accepte les marques de mon plus profond respect.

Je tiens à remercier particulièrement mademoiselle Julie Pronovost pour la pertinence de ses remarques et pour son aide qui a grandement valorisé ce travail. Merci à M. Marc Savard pour son soutien logistique et technique et pour son amabilité.

Que mes amis et collègues du Laboratoire de Recherche sur les Chaînes d'Approvisionnement trouvent ici toute ma gratitude pour leur sympathie et pour leur

grandeur d'âme qui fait de notre laboratoire un endroit agréable pour la recherche. Je pense particulièrement à Amin, Marius, Guillaume, Georges, Abdelkader, Éric, Abdelatif...

Les expressions de reconnaissance ne sauraient exprimer ce que je ressens pour ma tante et sa famille à Montréal, qui m'ont offert la chaleur familiale nécessaire pour résister aux longs hivers québécois!

À vous tous, merci beaucoup.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE.....	iii
ABSTRACT.....	iv
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Introduction	1
1.2 Problématique et objectifs de la recherche.....	2
1.3 Méthodologie et procédures proposées.....	4
1.4 Revue de littérature	8
1.4.1 Définitions des chaînes d'approvisionnement	8
1.4.2 Gestion des chaînes d'approvisionnement	12
1.4.3 Les niveaux de décision dans une chaîne d'approvisionnement.....	13
1.4.3.1 Décisions stratégiques	13
1.4.3.2 Décisions tactiques.....	15
1.4.3.3 Décisions opérationnelles.....	17
1.4.4 Modélisation des chaînes d'approvisionnement	18
1.4.4.1 Variables décisionnelles dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement.....	22
1.4.4.2 Les mesures de performance dans les chaînes d'approvisionnement	26
1.4.4.3 Classification des modèles d'optimisation des chaînes logistiques ..	34
1.4.4.4 Conception et pilotage des chaînes d'approvisionnement	38
1.5 Conclusion	66
CHAPITRE 2 LA MODULARITÉ	67
2.1 Introduction	67
2.2 Le concept de modularité	68
2.3 La modularité dans la conception des chaînes d'approvisionnement	76
2.4 Conclusion	85
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU PROBLÈME ÉTUDIÉ	87
3.1 Introduction	87
3.2 Nomenclature de produits spécifique au secteur aéronautique	87
3.3 Description des éléments du problème	90
3.4 Hypothèses de travail	94
3.5 Conclusion	95

CHAPITRE 4 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME	96
4.1 Introduction	96
4.2 Notations	97
4.3 Paramètres du problème	98
4.4 Variables de décision	99
4.5 Formulation mathématique	100
4.5.1 Fonction-objectif	100
4.5.2 Contraintes du problème	100
4.6 Extension multi-période au modèle	106
CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE	108
5.1 Introduction	108
5.2 Résolution d'un premier modèle : turbine HP	110
5.2.1 Données du problème : turbine HP	110
5.2.2 Présentation et interprétation des résultats	114
5.3 Résolution du modèle dans un cas réaliste : BOM 10	117
5.3.1 Données du problème : BOM 10	118
5.3.2 Présentation et interprétation des résultats	119
5.3.3 Analyse de sensibilité	121
5.3.3.1 Scénario 1 : Variation des coûts fixes	121
5.3.3.2 Scénario 2 : Variation des coûts variables	122
5.3.3.3 Scénario 3 : Variation des coûts de transport	123
5.3.3.4 Scénario 4 : Variation des temps de fabrication de la sous-traitance	124
5.3.3.5 Scénario 5 : Variation des capacités des fournisseurs de matières premières	126
5.3.3.6 Scénario 6 : Variation du pourcentage minimal d'occupation de capacité chez les sous-traitants	127
5.4 Conclusion	128
CHAPITRE 6 RÉSOLUTION DU MODÈLE AVEC LA MÉTHODE DE DÉCOMPOSITION DE BENDERS	131
6.1 Introduction	131
6.2 Théorie de la méthode	131
6.2.1 Présentation générale	132
6.2.2 La reformulation de Benders	133
6.2.3 L'algorithme de Benders	136
6.3 Implantation de la méthode	138
6.4 Présentation des résultats	141
6.5 Conclusions	142
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	143
7.1 Conclusions	143
7.2 Perspectives de recherche	144
ANNEXE 1 Génération automatique du modèle	146

ANNEXE 2 Outil de résolution du modèle : ILOG CPLEX 10.0	159
ANNEXE 3 SSA Supply Chain Design.....	162
BIBLIOGRAPHIE	166

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau I	Tableau récapitulatif des niveaux décisionnels.....	18
Tableau II	Les variables décisionnelles dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement	24
Tableau III	Les mesures de performance dans une chaîne d'approvisionnement ...	33
Tableau IV	Raisons derrière la modularité selon le secteur d'activité	74
Tableau V	Effets de la modularité sur les dimensions de la qualité	75
Tableau VI	Avantages et risques liés à la modularité	76
Tableau VII	Données relatives aux coûts fixes et variables et aux capacités de la sous-traitance.....	111
Tableau VIII	Données relatives aux coûts fixes et variables et aux capacités d'approvisionnement en matières premières.....	112
Tableau IX	Données relatives à l'affectation des pièces orphelines aux modules..	112
Tableau X	Données relatives au transport de tous les produits	113
Tableau XI	Répartition des coûts encourus de la chaîne d'approvisionnement	114
Tableau XII	Répartition des coûts fixes	120
Tableau XIII	Répartition des coûts variables.....	120
Tableau XIV	Effet de l'augmentation des coûts fixes sur le coût optimal	122
Tableau XV	Effet de l'augmentation des coûts variables sur le coût total	123
Tableau XVI	Effet de l'augmentation des coûts de transport sur le coût total	124
Tableau XVII	Effet de l'augmentation des temps de fabrication	125
Tableau XVIII	Effet de l'augmentation des capacités des fournisseurs de matières premières	126
Tableau XIX	Impact de la variation du pourcentage minimal de capacité agrégée à utiliser chez les sous-traitants.....	128
Tableau XX	Résultats obtenus par la décomposition de Benders	141
Tableau XXI	Étapes de génération et de résolution du modèle	147

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Plan de lecture du mémoire.....
Figure 2	Un réseau typique de chaîne d'approvisionnement (Tsiakis <i>et al.</i> , 2001)....
Figure 3	Processus de la chaîne d'approvisionnement
Figure 4	Dimensions structurelles du réseau de la chaîne d'approvisionnement
Figure 5	Taxinomie de la modélisation dans les chaînes d'approvisionnement.....
Figure 6	Les trois aspects de la modularité traités par la littérature
Figure 7	Modularisation de la chaîne logistique
Figure 8	Nomenclature de produit aplatie
Figure 9	Chaîne d'approvisionnement correspondant à la nomenclature aplatie
Figure 10	Nomenclature de produits à plusieurs niveaux (utilisation de la modularité).....
Figure 11	Chaîne d'approvisionnement multi-échelons après modularisation.....
Figure 12	Exemple de nomenclature de produits
Figure 13	Réseau logistique potentiel associé à la nomenclature de la figure 12
Figure 14	Résumé des étapes suivies dans la génération automatique.....
Figure 15	Configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement.....
Figure 16	Réseau optimal de la chaîne d'approvisionnement
Figure 17	Algorithme de la méthode de décomposition de Benders.....
Figure 18	Modèle relationnel de données (MRD).....
Figure 19	Script généré par <i>SILVERRUN-RDM</i>
Figure 20	Phases de développement de la base de données
Figure 21	Format LP du fichier
Figure 22	Interface utilisée pour la génération automatique dans <i>Visual Basic</i>

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Introduction

L'industrie aéronautique contribue largement à la puissance économique du Québec et du Canada. Selon le Ministère du Développement Économique, de l'Innovation et de l'Exportation, elle contribue à faire du Québec l'un des principaux joueurs du secteur sur l'échiquier mondial avec près de 40 000 emplois et des ventes de 11.1 milliards de dollars en 2005. Cette industrie est l'un des fers de lance du secteur manufacturier québécois. En effet, elle compte plus de 7 % des ventes et du chiffre d'affaires de ce secteur, ce qui fait de l'aéronautique la quatrième industrie manufacturière au Québec. Selon la même source, les ventes de cette industrie ont enregistré une croissance annuelle moyenne de 10 % au cours des vingt dernières années. Cette tendance est appelée à se maintenir au cours des deux prochaines décennies, ce qui lance de nouveaux défis aux entreprises œuvrant dans le secteur. En particulier, ces entreprises doivent reconstruire leurs méthodes et leurs philosophies d'approvisionnement pour faire face à la demande des clients qui exigent des avions de plus en plus adaptés à leurs besoins spécifiques. Le marché aéronautique est de plus en plus sollicité à développer des avions plus accessibles à la clientèle au moindre coût.

Cette nouvelle situation du marché ouvre une nouvelle ère dans le milieu aéronautique. Le nombre d'usagers du transport aérien devenant de plus en plus grand, le volume de production devient alors plus important. Dans un contexte caractérisé par le nombre considérable de pièces achetées dans la nomenclature du produit fini, la conception, la gestion et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement deviennent critiques.

Alors que la gestion des chaînes d'approvisionnement a été le point de mire de la recherche durant les dernières décennies, le milieu aéronautique n'a commencé à s'y intéresser que lors des dernières années. Il est donc devenu nécessaire, plus que jamais, que le secteur améliore ses performances en optimisant sa chaîne d'approvisionnement.

1.2 Problématique et objectifs de la recherche

Dans le contexte particulier de l'industrie aéronautique, l'introduction d'un nouveau moteur d'avion nécessite la mise en œuvre et la coordination d'activités aussi bien au niveau de l'ingénierie que du réseau logistique apte à répondre aux exigences des clients. Il y a en effet une très étroite corrélation entre le processus de design du moteur et les activités de conception de la chaîne d'approvisionnement, les deux se font d'ailleurs en parallèle et impliquent la collaboration de plusieurs ressources; d'une part, le département d'ingénierie propose un premier design conformément aux exigences du client, apporte les modifications nécessaires suite aux différentes expérimentations et donne sa certification du moteur avant de lancer la production. D'autre part, l'équipe de design de la chaîne d'approvisionnement, les départements d'approvisionnement et d'assemblage final ainsi que les ingénieurs de projet doivent travailler de concert pour prendre les décisions adéquates quant à la sélection des fournisseurs et à la définition des échelons de la chaîne.

Cependant, et face à l'augmentation de la demande et à la complexité des décisions à prendre, le processus actuel du design de la chaîne d'approvisionnement laisse apparaître beaucoup de points de faiblesse dont les principaux sont :

- a. la nécessité de ressources expérimentées vu le caractère manuel du processus d'analyse ;
- b. la nécessité d'avoir recours à ces ressources pendant plusieurs mois ;
- c. la difficulté de quantifier les coûts générés par la chaîne d'approvisionnement ;
- d. la difficulté liée à l'analyse de scénarios ;

- e. l'aspect « analyse de scénarios » ne permet pas forcément l'atteinte d'une solution optimale ;
- f. la difficulté d'avoir une conceptualisation pour la gestion des flux de matériel générés par les sources d'approvisionnement multiples ;
- g. la longue durée et le coût conséquent du processus dû essentiellement au nombre d'intervenants.

Ces éléments montrent que le processus de design de la chaîne d'approvisionnement utilisé actuellement souffre de l'absence d'une approche intégrée qui englobe les différents volets à prendre en compte, c'est-à-dire d'une part les différentes configurations possibles de la nomenclature du moteur, et d'autre part les configurations optimales de la chaîne d'approvisionnement qui optimisent les flux de matériel et améliorent ses performances.

À la lumière de ces éléments, le présent projet de recherche propose une approche d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement, en intégrant à la fois la nomenclature de produits et le design du réseau logistique. Globalement, les chaînes logistiques se composent de fournisseurs, d'usines et d'entrepôts, l'objectif principal étant de satisfaire le client final tout en assurant la réussite de l'entreprise. Les réseaux logistiques sont un terrain fertile pour la recherche et ce dans tous les secteurs. Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons au problème de conception des chaînes d'approvisionnement pour les entreprises œuvrant dans le secteur aéronautique, en prenant en compte la nomenclature du produit fini et en introduisant la notion de modularisation dans la conception des produits.

Ainsi, l'objectif principal de ce projet est de modéliser la conception d'un réseau logistique d'approvisionnement-production-distribution qui s'adapte aux spécificités de l'industrie aéronautique. Néanmoins, il est tout à fait envisageable de rendre cette

modélisation applicable à d'autres secteurs moyennant des modifications mineures (nomenclature de produits divergente par exemple).

La conception d'une chaîne d'approvisionnement nécessite la prise d'un ensemble de décisions qui appartiennent à différents niveaux décisionnels. La modélisation proposée dans ce mémoire relève des niveaux stratégique et tactique. Les décisions relevant du niveau stratégique sont :

- a. quels fournisseurs de matières premières choisir ;
- b. quels sous-traitants des produits fabriqués choisir ;
- c. quels sites seront opérationnels ;
- d. quelles pièces orphelines affecter à quel module et à quel sous-traitant (les pièces orphelines et les modules seront définis au chapitre 2 de ce mémoire).

Quant aux décisions d'ordre tactique, elles sont les suivantes :

- a. quelle est la quantité de matières premières à commander chez chacun des fournisseurs ;
- b. quelle quantité produire de chaque produit et dans quel site ;
- c. quelle quantité (de matières premières, de produits semi-finis ou de produits finis) doit être envoyée d'un site à l'autre.

Les décisions faites seront celles qui minimiseront les coûts sous-jacents à l'exploitation de l'ensemble de la chaîne; c'est-à-dire les coûts fixes d'affectation des produits aux différents nœuds, les coûts d'approvisionnement en matières premières, les coûts de production et les coûts de transport des produits.

1.3 Méthodologie et procédures proposées

Pour la conception du réseau logistique des entreprises de l'industrie aéronautique, nous devons tenir compte de deux principaux aspects : l'aspect nomenclature de produits et l'aspect configuration de la chaîne logistique à proprement parler.

Dans le cadre de l'aspect nomenclature de produits, nous ferons le point sur la structure du produit et les assemblages nécessaires pour l'obtention du produit fini. Nous nous attarderons également sur la définition de la notion de modularisation et la manière dont elle change la structure de la nomenclature.

Pour ce qui est de l'aspect chaîne d'approvisionnement, nous définissons les différents intervenants du réseau logistique (fournisseurs de matières premières, sous-traitants et clients) à travers leurs localisations, les produits fournis et les coûts d'approvisionnement.

Il est aussi extrêmement important d'expliquer l'interaction entre les deux aspects et comment le premier peut agir sur le second en modifiant notamment le nombre d'échelons dans la chaîne d'approvisionnement.

La modélisation se basera sur la programmation mathématique. Le modèle comprendra des variables associées à chacune des décisions précédemment mentionnées. Plus spécifiquement, il s'agit d'un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes, où les variables binaires rendent compte des décisions d'ordre stratégique et les variables continues relèvent des décisions tactiques. Le but ultime étant de minimiser l'ensemble des coûts logistiques impliqués.

La génération et la résolution du modèle proposé fait appel à un ensemble d'outils techniques, nous prendrons le soin d'expliciter les démarches s'y rattachant.

Le reste de notre mémoire est organisé de la façon suivante. Tout d'abord, après avoir positionné le projet de recherche dans son contexte, le reste du Chapitre 1 donne une revue de littérature dans laquelle nous présentons les définitions des chaînes d'approvisionnement dans l'état de l'art. Ensuite, nous définissons la notion de gestion

des chaînes d'approvisionnement ainsi que les niveaux décisionnels. Nous continuerons cette revue en donnant un état de l'art sur les concepts de conception et de pilotage des chaînes d'approvisionnement.

Dans le Chapitre 2, la notion de modularisation est explicitée avant d'aborder sa présence dans la conception des réseaux logistiques. Au Chapitre 3, nous présentons le problème étudié en décrivant ses éléments et en explicitant les hypothèses de travail. Le Chapitre 4 donne la modélisation mathématique du problème; en particulier, les intrants et les extrants du modèle sont précisés.

Ensuite, le Chapitre 5 servira à valider le modèle mathématique proposé, en présentant deux exemples de problèmes résolus. Le premier étant purement expérimental dans le but de vérifier la robustesse du modèle. Le second est plus représentatif de la réalité, car il traite un cas réaliste de l'industrie aéronautique et est basé sur une nomenclature d'un programme de moteur réel. Toutefois, les différentes données injectées dans le modèle sont fictives dans le but de préserver la confidentialité de l'entreprise concernée. Par la suite, une analyse de sensibilité a été faite dans le but de voir l'impact de l'augmentation de différents paramètres sur la configuration optimale du réseau.

Au Chapitre 6, nous mettons en œuvre la méthode de décomposition de Benders pour résoudre le même problème. Il s'agit, dans un premier temps, de faire une comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes. Le second objectif étant de pouvoir comparer les performances d'un solveur commercial et d'une méthode de décomposition. On se pose notamment la question si une méthode de relaxation pourrait accélérer la résolution d'un tel problème. Le Chapitre 7 regroupera des conclusions sur le projet de recherche et présentera quelques perspectives pour la poursuite de la recherche dans l'avenir. La figure 1 présente le plan de lecture du présent mémoire.

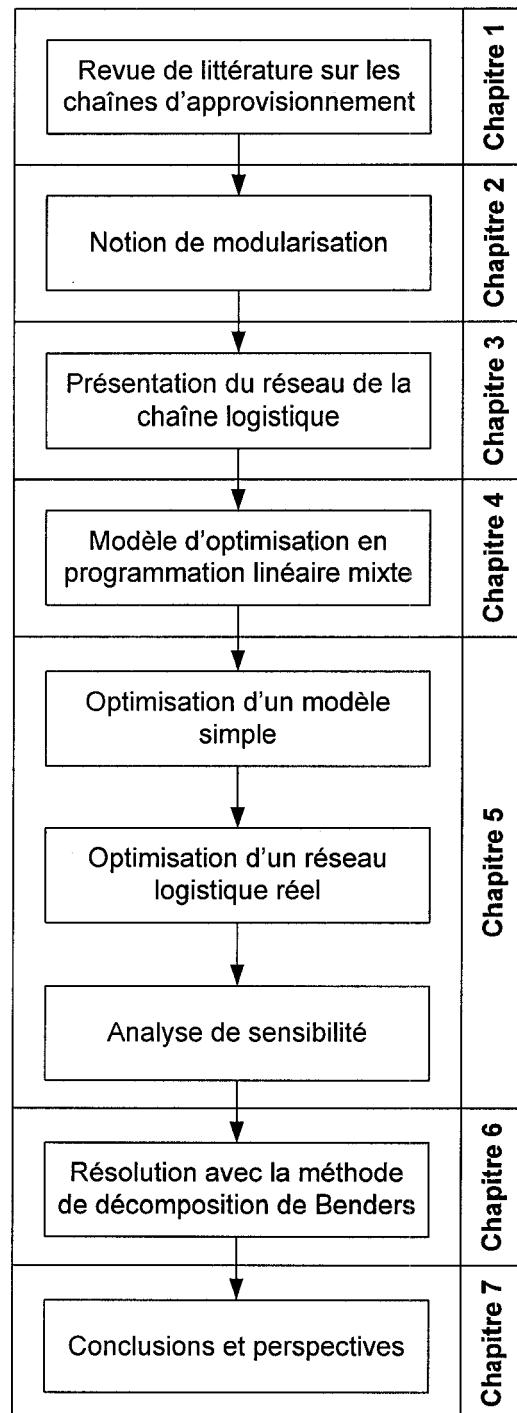


Figure 1 Plan de lecture du mémoire

1.4 Revue de littérature

La littérature abonde de contributions traitant des chaînes d'approvisionnement. Depuis des années, les chercheurs se sont penchés sur l'étude et l'optimisation des réseaux logistiques et ces derniers ont été un terrain fertile pour la recherche depuis les années soixante-dix. Plus récemment, on note l'existence de groupes de recherche qui développent des approches et des outils traitant différents aspects des réseaux logistiques. De ce fait, il nous est malheureusement impossible, dans le cadre de ce mémoire, de couvrir l'ensemble de la littérature sur ce sujet.

Pour mieux assimiler les chaînes logistiques, les outils de leur conception et de leur pilotage, ainsi que la manière dont la littérature les aborde, nous avons décidé d'organiser cette revue de la façon suivante : tout d'abord nous définissons les chaînes d'approvisionnement avant d'aborder le sujet de leur gestion et des différents niveaux de décision qu'elles impliquent. La modélisation des chaînes d'approvisionnement sera ensuite élucidée, où nous parlerons notamment des modélisations faites dans le but de concevoir et piloter les chaînes logistiques. À l'issue de cette revue, nous tirerons les conclusions par rapport à la pertinence et à l'originalité de notre projet de recherche.

1.4.1 Définitions des chaînes d'approvisionnement

Sous l'effet de la compétition globale, la mondialisation des marchés et la variabilité de la demande, les entreprises se sont mises à reconstruire leurs organisations pour s'intégrer dans des chaînes logistiques. Ainsi, une nouvelle forme de concurrence est apparue. En effet, les firmes ne sont plus en compétition directe, mais à travers les réseaux logistiques auxquels elles appartiennent. Cette philosophie est devenue même l'une des clés de leur réussite et les aide à conserver leur avantage concurrentiel. Aujourd'hui, il ne s'agit plus de produire le bon produit au bon moment pour l'acheminer ensuite à la bonne destination, mais il faut en plus le faire de manière

efficace en mobilisant le moins de ressources possibles et en assurant un haut niveau de satisfaction du client. Dans cette optique, comment définir alors une chaîne d'approvisionnement?

Selon Le grand dictionnaire terminologique (Office québécois de la langue française : www.granddictionnaire.com), une chaîne logistique est l'ensemble des processus requis, depuis l'acheminement des matières premières jusqu'à la livraison des produits ou services, et qui sont inter-reliés d'un bout à l'autre de la chaîne afin de satisfaire les besoins de la clientèle.

Selon Chopra et Meindl (2001), la chaîne logistique consiste en toutes les parties impliquées, directement ou indirectement, à la satisfaction du client. Ils affirment que la chaîne d'approvisionnement ne comprend pas seulement les manufacturiers et les fournisseurs, mais également les transporteurs, les entrepôts, les centres de distribution et les clients. La figure 2 illustre un réseau typique de chaîne d'approvisionnement :

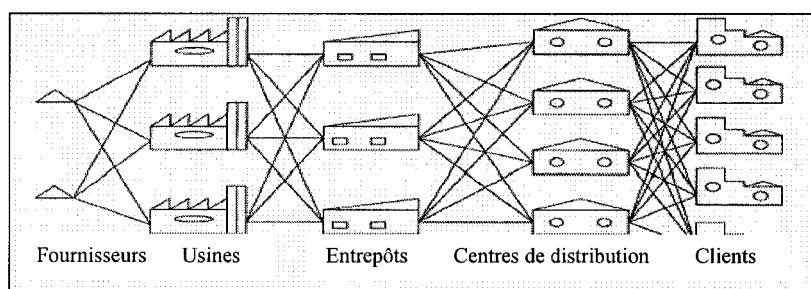


Figure 2 Un réseau typique de chaîne d'approvisionnement
(Tsiakis *et al.*, 2001)

Min et Zhou (2002) décrivent une chaîne d'approvisionnement comme étant un système intégré qui synchronise une série de processus d'affaires inter-reliés dans le but d'acquérir de la matière première et des pièces, transformer ces matières premières et pièces en produits finis, ajouter de la valeur à ces produits, distribuer et promouvoir ces produits à des détaillants ou des clients et finalement, faciliter l'échange d'information entre les différentes entités d'affaires.

Beamon (1998) définit la chaîne logistique comme étant un processus intégré où plusieurs entités d'affaires (fournisseurs, manufacturiers, distributeurs et détaillants) travaillent de concert dans le but d'acheter de la matière première puis la transformer en produits finis pour ensuite délivrer ceux-ci aux clients. Selon Beamon, la chaîne d'approvisionnement est composée de deux processus intégrés : le processus de planification de la production et de contrôle de l'inventaire ainsi que le processus de distribution et logistique. Alors que le processus de planification de la production et de contrôle de l'inventaire englobe les sous-processus de fabrication et de stockage ainsi que de leurs interfaces, le processus de distribution et logistique détermine la façon dont les produits sont transportés entre les entrepôts et les détaillants, les produits pouvant être acheminés aux détaillants directement ou en transitant par les centres de distribution. La figure 3 illustre les processus de la chaîne logistique.

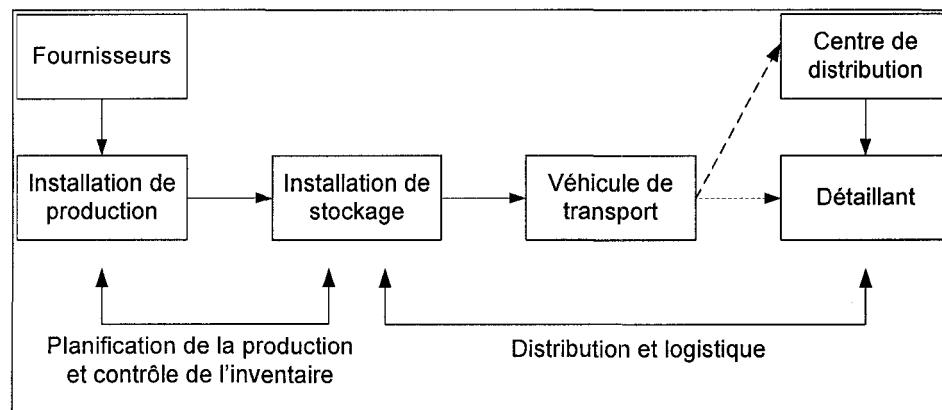


Figure 3 Processus de la chaîne d'approvisionnement
(Beamon, 1998)

Sous une autre appellation, nous retrouvons cette même approche processus chez Min et Zhou (2002) qui affirment que la chaîne logistique est composée de deux principaux processus d'affaires : la gestion matérielle (*material management*) qui traite de l'acquisition et du stockage des matières premières et des pièces ainsi que de l'approvisionnement ; et de la distribution physique (*physical distribution*) qui regroupe

l'ensemble des activités logistiques visant à offrir le service aux clients, ces activités comprennent la réception et le traitement des commandes, le déploiement des stocks, l'entreposage et la manutention, le transport, l'attribution des coûts, les campagnes de promotion, la gestion des retours et finalement le support de cycle de vie. Selon Min et Zhou, la gestion matérielle fait partie de la logistique d'arrivée (*inbound logistics*) alors que la distribution physique appartient à la logistique sortante (*outbound logistics*).

Du point de vue des flux, la chaîne d'approvisionnement est caractérisée par un flux vers l'avant des produits et un flux vers l'arrière de l'information (Min et Zhou (2002), Beamon (1998) et Tsiakis *et al.* (2001)).

Pour Tsiakis *et al.* (2001), une chaîne logistique peut être définie comme un réseau d'installations qui accomplissent les fonctions d'achat de matières, de transformation de ces matières en produits intermédiaires et en produits finis et de distribution de ces produits aux consommateurs. De ce fait, une chaîne d'approvisionnement comprend des fournisseurs, des sites de production, des installations de stockage et des clients. Avant d'être distribués aux clients, les produits finis sont potentiellement stockés à deux niveaux : les entrepôts et les centres de distribution. Ces endroits où les produits sont stockés sont appelés « échelons »; ceux-ci déterminent souvent la complexité de la chaîne logistique.

À partir de ces définitions, nous pouvons remarquer la complexité des chaînes d'approvisionnement puisque celles-ci font intervenir un ensemble d'entreprises qui, elles, s'étendent sur plusieurs sites organisés eux-mêmes sur de multiples niveaux. De plus, la notion d'installation dans la définition de Tsiakis *et al.* (2001) ajoute un autre niveau de complexité puisqu'elle peut désigner :

- a. un fournisseur ;
- b. un centre de production (producteur, assembleur, *etc.*) ;
- c. une unité de stockage ;

- d. un centre de distribution (entrepôt) ;
- e. un client.

Maintenant que le point a été mis sur le concept de chaîne d'approvisionnement, il devient primordial de comprendre les mécanismes utilisés pour leur gestion et leur pilotage. Ceci fera l'objet des paragraphes suivants.

1.4.2 Gestion des chaînes d'approvisionnement

Selon Le grand dictionnaire terminologique (Office québécois de la langue française), la gestion de la chaîne logistique (*Supply Chain Management*) englobe l'ensemble des activités, des méthodes et des outils qui visent à optimiser les processus de commande, de production et de livraison en améliorant l'approvisionnement et en réduisant les stocks et les délais de livraison. L'objectif de la gestion de la chaîne logistique est de tendre vers des progrès spectaculaires dans la gestion administrative et d'éliminer ainsi un nombre important d'erreurs. Ce concept permet également entre autres de :

- a. augmenter les rotations de stocks ;
- b. diminuer les coûts sur des produits déterminés ;
- c. diminuer le temps de cycles ;
- d. diminuer le délai d'exécution des commandes ;
- e. diminuer le temps de réponse.

Johnson et Pyke (1999) affirment que la « gestion de la chaîne logistique » est le terme utilisé pour décrire le management du flux de matériels, d'informations et des fonds à travers l'intégralité de la chaîne d'approvisionnement, des fournisseurs au client final en passant par les fabricants de composantes, les assembleurs et les distributeurs (entrepôts et détaillants), les auteurs vont même jusqu'à inclure le service après-vente, les retours et le recyclage dans le concept.

Pour mener à bien le pilotage des installations de la chaîne d'approvisionnement et afin de bien conditionner l'organisation des flux matériels et informationnels entre ses entités, il est nécessaire de prendre les bonnes décisions aux bons moments. Quelle est donc l'ampleur de ces décisions ? Et comment peuvent-elles caractériser les flux entre les entités de la chaîne ? Nous tenterons de répondre à ces questionnements aux prochains paragraphes.

1.4.3 Les niveaux de décision dans une chaîne d'approvisionnement

Une bonne gestion d'une chaîne d'approvisionnement nécessite la prise d'un certain nombre de décisions visant à satisfaire la demande du client dans les délais requis tout en utilisant les moyens mis à disposition d'une façon optimale. Ces décisions peuvent être regroupées en trois niveaux hiérarchiques : stratégique, tactique et opérationnel. Ces niveaux diffèrent par leur ampleur, c'est-à-dire par la portée des décisions qu'ils impliquent, mais aussi par leurs dimensions temporelles respectives. Cependant, il est extrêmement important de noter que le fait de classer des décisions liées à la conception d'une chaîne logistique est très difficile, et qu'il n'existe pas de méthode générique qui pourrait se généraliser sur l'ensemble des industries. Nous aborderons ces niveaux décisionnels plus en détail dans les sections qui suivent.

1.4.3.1 Décisions stratégiques

Les décisions stratégiques d'une chaîne logistique sont celles qui déterminent la structure de la chaîne. Elles conditionnent le positionnement de l'entreprise sur les marchés locaux ou internationaux. Pour prendre de telles décisions, les décideurs doivent être particulièrement attentifs à l'analyse des facteurs concurrentiels engageant l'entreprise à long terme. De plus, il est primordial que les décisions stratégiques soient cohérentes avec la stratégie concurrentielle de l'entreprise. Selon Slats *et al.* (1995), à ce

niveau, les questions soulevées s'articulent autour du développement des objectifs et des politiques de la chaîne logistique.

La planification stratégique est une planification à long terme. Dépendamment de l'industrie considérée, elle s'étale sur une période de trois à dix ans. Plus spécifiquement, elle vise à identifier puis évaluer les différentes options d'acquisition des ressources, dans l'ultime but d'améliorer la position concurrentielle de l'entreprise à long terme.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les décisions stratégiques déterminent la structure du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Elles nécessitent des données agrégées et approximatives (Vidal et Goetschalckx, 1997) et portent plus particulièrement sur :

a. Faire ou faire faire

Pour se procurer les matières, produits et services nécessaires à son activité, une entreprise dispose de plusieurs possibilités : elle peut soit les réaliser à l'interne par ses propres moyens, soit les passer à une entreprise externe indépendante, soit réaliser une partie de ses besoins en externalisant l'autre partie.

b. Le nombre et le choix de fournisseurs

Pour les produits et les pièces externalisés, il faudra faire le tri des fournisseurs en sélectionnant ceux qui répondent aux exigences et aux cahiers des charges. Parmi les fournisseurs sélectionnés, on retiendra un ou plusieurs fournisseurs (mono-source ou multi-fournisseur). Un nombre réduit de fournisseurs correspondrait à une optique d'accroissement du niveau de coopération, tandis qu'un nombre élevé jouerait plus sur la concurrence.

c. Le nombre et la localisation des sites

La détermination du nombre de sites (production, stockage, *etc.*) est une autre problématique qui se pose au niveau stratégique, car un nombre élevé de sites de

production ou d'entrepôts augmenterait les coûts de production et de stockage. D'autre part, cette décentralisation diminuerait considérablement les coûts de transport et améliorerait les délais de livraison. Quant aux problèmes de localisation, l'entreprise doit savoir où situer ses sites de production, ses sites de stockage (matières premières, produits semi-finis et produits finis) ainsi que ses centres de service après vente.

d. Les capacités des sites

Le problème de capacité des sites est étroitement lié au problème de détermination du nombre de sites mentionnés précédemment, car un nombre faible de sites de production ou de stockage nécessite l'utilisation d'une grande capacité de production ou de stockage.

e. Les technologies des sites

Il est nécessaire de choisir la technologie pour chaque site de production ou de stockage. Ce choix est conditionné par des critères économiques, financiers, sociaux, *etc.* Notons que le choix de technologie est fortement lié au choix de la capacité; en effet, une capacité donnée pourrait contraindre la technologie à utiliser, et inversement, le choix d'une technologie pourrait nécessiter une capacité minimale d'utilisation pour être économiquement rentable.

1.4.3.2 Décisions tactiques

Les décisions tactiques sont celles qui reposent sur l'allocation et l'utilisation des ressources ainsi que sur les modalités de circulation des produits dans la structure conçue au niveau stratégique. Selon Slats *et al.* (1995), les questions soulevées au niveau tactique sont celles des moyens à utiliser afin d'atteindre les objectifs du niveau stratégique, tels que la détermination des outils, des approches et des ressources. L'horizon de planification tactique est estimé entre quelques mois et une année. Les

décisions prises à ce niveau nécessitent des données générales (Vidal et Goetschalckx, 1997) et portent particulièrement sur :

a. L'allocation des fournisseurs aux sites de production

Dans ce type de décisions, l'entreprise spécifie les fournisseurs choisis pour approvisionner un site de production donné.

b. L'allocation des produits aux sites de production

Étant donné que les coûts de production et les coûts de transport sont différents d'un site à l'autre, et que la capacité d'un site donné est limitée, il est probable que l'on ait besoin de plusieurs sites pour produire les quantités demandées. La décision d'allocation des produits aux sites de production doit prendre en compte ces paramètres et ces contraintes afin de déterminer les produits et les quantités à produire dans chacun des sites de production.

c. L'allocation des centres de distribution aux clients

La décision porte sur le choix des centres de distribution pour desservir les différents clients, en prenant en compte les capacités de stockage des centres et la demande des clients. Le but étant d'optimiser un ou plusieurs critères tels que le coût de transport et le niveau de service.

d. Le dimensionnement des niveaux de stock

Les quantités commandées, la fréquence de ces commandes, les coûts de stockage et la variabilité de la demande sont des éléments qui ont un impact sur les niveaux de stocks. À titre d'exemple, des stocks de sécurité très importants assurent un haut niveau de service aux clients, mais augmentent considérablement les coûts de stockage. Il est donc nécessaire qu'une entreprise révise sa politique de gestion des stocks en fonction des évolutions de son marché.

1.4.3.3 Décisions opérationnelles

Les décisions opérationnelles visent à assurer la bonne gestion des moyens de la chaîne d'approvisionnement au sein de chacune des installations, ainsi qu'entre les différentes installations, et ce à court terme. Elles reflètent le fonctionnement quotidien des opérations logistiques (Slats *et al.*, 1995). Les données à ce niveau doivent être des données transactionnelles (Vidal et Goetschalckx, 1997). Ci-après, nous présentons les décisions opérationnelles les plus importantes d'une chaîne d'approvisionnement :

a. Le programme de livraison

Il s'agit de donner les produits, les destinations et les quantités à livrer pour chacun des sites.

b. L'allocation des moyens de transport aux sites

Compte tenu du programme de livraison, les moyens de transport doivent être alloués aux différents sites étant donné que ces moyens sont limités.

c. Le programme de transport

Ce programme, qui s'établit pour chaque site, doit donner pour chaque moyen de transport les charges quotidiennes, le contenu de chaque véhicule, la destination, les heures de départ et d'arrivée, *etc.*

d. La sélection d'itinéraire

En tenant compte des positions géographiques des points de demande (ou des points d'approvisionnement) et du trafic, l'itinéraire doit être déterminé de façon à minimiser les coûts sous-jacents, ou de façon à ce qu'il soit le plus rapide possible.

Le tableau I récapitule les propriétés des principales caractéristiques selon le niveau décisionnel.

Tableau I
Tableau récapitulatif des niveaux décisionnels

Caractéristique	Nature de la décision		
	Stratégique	Tactique	Opérationnelle
Portée de la décision	Configuration du réseau logistique	Gestion des ressources	Exploitation des ressources dans la production
Horizon de planification	Long terme	Moyen terme	Très court terme
Durée	3 à 10 ans	Quelques mois à un an	Quelques jours
Réversibilité	Quasiment non réversible	Faiblement réversible	Fortement réversible
Partie qui prend la décision	Direction générale	Divisions fonctionnelles	Chefs de service ou d'atelier
Mesures correctives	Quasiment impossibles	Difficilement corrigible	Facilement corrigible

1.4.4 Modélisation des chaînes d'approvisionnement

Compte tenu de la complexité des chaînes d'approvisionnement, il est extrêmement difficile, voire impossible, de concevoir un modèle qui considère tous les aspects des processus liés aux chaînes logistiques. Pour faire un compromis entre la complexité du modèle et la réalité, le concepteur de modèle doit définir la portée de son modèle tout en s'assurant que la complexité du modèle ne mette pas en péril sa résolution. Même s'il n'existe pas de manière systématique qui permette de définir la portée d'un problème de modélisation de la chaîne logistique, Min et Zhou (2002) affirment que, dans la littérature, il existe tout de même des lignes directrices qui permettent de situer le problème. Une manière de définir la portée du problème serait de l'identifier à l'un des trois niveaux de décision que nous avons vus précédemment : la stratégie compétitive, les plans tactiques et les routines opérationnelles. L'autre alternative repose sur les trois structures d'un réseau de chaîne d'approvisionnement, ces structures sont :

- a. Le type d'association dans la chaîne d'approvisionnement ;
- b. Les dimensions structurelles du réseau de la chaîne logistique ;
- c. Les caractéristiques des liens entre les partenaires dans la chaîne logistique.

En fait, dans une chaîne d'approvisionnement, les partenaires peuvent être classifiés en deux catégories : **des partenaires primaires** qui sont des unités stratégiques d'affaires accomplissant des activités gestionnaires ou opérationnelles dans le but de produire un produit ou un service spécifique pour un marché ou un client particulier, et **des partenaires secondaires** qui sont plutôt des firmes fournissant des ressources, du savoir et des services à la chaîne logistique. En ce qui concerne les dimensions structurelles de la chaîne, il est nécessaire de bien les assimiler pour l'analyse et la modélisation des liens dans un réseau logistique; en général, il y a deux dimensions structurelles : **une dimension horizontale** qui rend compte du nombre d'échelons à travers la chaîne logistique et **une dimension verticale** qui rend compte du nombre de fournisseurs et de clients dans chacun des échelons. Cette représentation en dimensions structurelles du réseau logistique est illustrée à la figure 4:

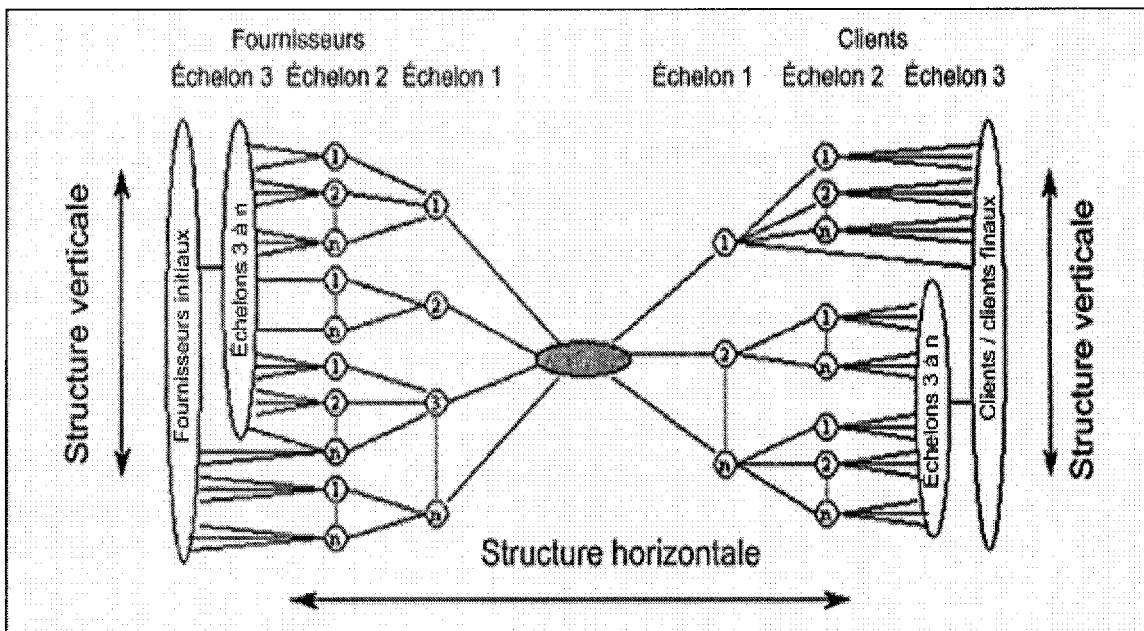


Figure 4 Dimensions structurelles du réseau de la chaîne d'approvisionnement
(Min et Zhou, 2002)

Pour ce qui est des liens entre les partenaires de la chaîne logistique, ils ont une importance stratégique puisqu'ils permettent de bénéficier d'avantages compétitifs. Les caractéristiques distinctives des liens d'une chaîne d'approvisionnement identifiées par Min et Zhou (2002) sont :

- liens gérés de processus d'affaires ;
- liens suivis de processus d'affaires ;
- liens non gérés de processus d'affaires ;
- liens non membres d'affaires.

Les liens gérés de processus d'affaires sont ceux pour lesquels la compagnie intègre un processus d'affaires avec un ou plusieurs clients / fournisseurs. Les liens suivis ne sont pas totalement contrôlés par la firme, mais celle-ci participe à leur gestion. Les liens non gérés ne sont ni gérés ni suivis par la compagnie, mais celle-ci fait entièrement confiance

à ses partenaires pour leur gestion. Les liens non membres sont ceux qui existent entre les partenaires et les non-membres de la chaîne d'approvisionnement de la compagnie.

Ainsi, pour que la modélisation soit représentative de la réalité, il est primordial de définir sa portée de façon à se concentrer sur l'aspect particulier que l'on cherche à modéliser.

Slats *et al.* (1995) soulignent le rôle important que joue la recherche opérationnelle dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement. En effet, l'intégration de la logistique nécessite un ensemble d'outils d'aide à la décision pour aider les gestionnaires. La recherche opérationnelle donne les techniques de modélisation et d'analyse de la performance des processus logistiques. Cependant, et malgré leur apport en tant qu'outil d'aide à la décision, les techniques et les modèles sont peu utilisés en pratique ; ceci est dû au manque de sensibilisation des gestionnaires quant à l'énorme contribution que peut apporter la recherche opérationnelle. Ceci étant, les auteurs ne manquent pas de souligner que les modèles laissent apparaître des inconvénients, tels que les hypothèses trop simplificatrices qui, dans le souci de réduire la complexité, finissent par cacher quelques facettes de la réalité. De plus, les incertitudes sont souvent ignorées ce qui est loin de représenter la réalité.

Quels sont donc les éléments qui entrent dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement ? Que cherche-t-on à modéliser dans la chaîne ? Quels sont les différents types de modélisation que l'on trouve dans la littérature ? Et comment celle-ci aborde-t-elle le problème de conception et de pilotage des chaînes logistiques ? Ces questions seront traitées dans les paragraphes suivants.

1.4.4.1 Variables décisionnelles dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement

Dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement, les mesures de performance (que nous traiterons plus en détails au paragraphe suivant) sont exprimées comme une fonction de variables de décision. Ces variables sont ensuite choisies de façon à optimiser une ou plusieurs mesures de performance (Min et Zhou, 2002 et Beamon, 1998).

Min et Zhou (2002) présentent une liste non-exhaustive de variables de décision rencontrées dans la littérature :

- a. variables de **localisation** : visant à déterminer l'emplacement géographique des usines, des entrepôts, des points de consolidation et des fournisseurs ;
- b. variables d'**allocation** : visant à déterminer les centres de distribution, les usines et les points de consolidation qui répondront aux besoins des clients, du segment du marché ou des fournisseurs ;
- c. **structure du réseau** : visant à déterminer la combinaison de fournisseurs, d'usines, d'entrepôts et de points de consolidation à utiliser ;
- d. **nombre d'installations et d'équipements** : visant à déterminer le nombre d'usines, d'entrepôts et de points de consolidation nécessaires pour répondre aux exigences des clients ;
- e. **nombre d'échelons** : visant à déterminer le nombre d'échelons dans la chaîne en accroissant ou en décroissant le niveau d'intégration horizontale de la chaîne ;
- f. **séquence de service** : visant à déterminer les chemins et l'ordonnancement des livraisons pour les véhicules au service des clients ou des fournisseurs ;
- g. **variables de volume** : visant à donner les quantités optimales à acheter, à produire et à transporter dans chacun des nœuds de la chaîne ;

- h. **niveaux de stocks** : déterminent les quantités optimales de matières premières, de composantes, des produits semi-finis et des produits finis à stocker au niveau de chaque échelon de la chaîne ;
- i. **taille des effectifs** : visant à déterminer la taille de la main d'œuvre nécessaire à l'accomplissement des tâches ;
- j. **L'étendue de la sous-traitance** : visant à déterminer les fournisseurs de produits et de services (technologie de l'information, 3PL : prestataire de services logistiques) avec qui il faudrait entretenir des partenariats de sous-traitance à long terme, lesquels seront retenus pour la sous-traitance multiple, *etc.*

Quant à Beamon (1998), elle dresse une revue des variables utilisées dans les différents modèles étudiés :

- a. ordonnancement des systèmes de production et de distribution ;
- b. niveaux d'inventaires ;
- c. nombre d'échelons ;
- d. allocation des centres de distribution aux clients ;
- e. allocation des produits aux usines ;
- f. détermination des relations critiques entre le fournisseur et l'acheteur ;
- g. spécification de l'étape de différenciation de produit ;
- h. nombre des types de produit en stocks.

Le tableau II dresse la liste des variables de décision rencontrées dans la littérature telles que mentionnées par ces auteurs :

Tableau II

**Les variables décisionnelles dans la modélisation
des chaînes d'approvisionnement**

Variables décisionnelles	Min et Zhou (2002)	Beamon (1998)
Localisation des sites	X	
Allocation des centres de distribution aux clients	X	X
Allocation des produits aux usines	X	X
Structure du réseau	X	
Nombre d'installations et d'équipements	X	
Nombre d'échelons	X	X
Séquence de service	X	
Volume	X	
Niveau des stocks	X	X
Taille des effectifs	X	
Étendue de la sous-traitance	X	
Ordonnancement des systèmes de production et de distribution		X
Relation fournisseur / acheteur		X
Spécification de l'étape de différenciation de produits		X

Goetschalckx *et al.* (2002) dressent une liste de composantes logistiques dans une organisation. Ces composantes rendent compte des variables de décisions utilisées notamment dans les modèles intégrés relevant des niveaux stratégique et tactique. Ces composantes sont :

- a. Le nombre d'usines de fabrication ;
- b. Le nombre d'échelons du réseau logistique et le nombre de centres de distribution ;
- c. Les clients ;
- d. Les fournisseurs de composantes et de matières premières ;
- e. Les centres de recyclage pour produits usés et les contenants réutilisables ;

f. Les canaux de transport qui relient les composantes présentées ci-haut.

De plus, les variables de décisions utilisées répondent notamment aux questions qui se posent aux ingénieurs logisticiens et aux gestionnaires. Ces questions sont :

- a. Est-il profitable de commercialiser un produit spécifique dans un pays donné ?
- b. Dans quel pays et dans quelle usine un produit spécifique devrait-il être fabriqué ?
- c. Comment un produit devra-t-il être distribué? Et quels sont les modes de transport à utiliser ?
- d. Quels plans de production adopter ? Quelle quantité de chaque produit doit être maintenue en stocks dans chaque entrepôt ?
- e. Quels centres de distribution utiliser pour un produit spécifique dans chaque pays ?
- f. Quelle configuration adopter dans le cadre d'un éventuel élargissement de capacité ?
- g. Quelle est la meilleure façon de faire (du point de vue économique et écologique) pour être conforme aux réglementations environnementales sur le recyclage et le traitement des déchets ?

Dans leur article, Goetschalckx *et al.* (2002) présentent un modèle de design d'un réseau logistique international. Dans ce modèle, les auteurs introduisent un autre type de variables de décision, il s'agit des variables de prix de transfert. Un prix de transfert peut être défini comme étant le prix qu'un département, une division ou une filiale d'une compagnie facture à un autre département, division ou filiale de la même compagnie en vue de vendre un produit ou un service. Les auteurs rapportent dans leur article que les prix de transfert constituent actuellement l'un des plus grands problèmes qui se posent devant les entreprises multinationales, et qu'ils le resteront dans le futur proche.

D'autre part, dans le cas spécifique de modélisation de la chaîne d'approvisionnement dans le secteur aéronautique, d'autres variables et paramètres techniques et logistiques peuvent intervenir comme critères de décision : outre l'assignation des modules (composants principaux) aux sous-traitants, nous pouvons citer la détermination des capacités des fournisseurs et sous-traitants, le dimensionnement des stocks de sécurité des composants figurant dans la nomenclature du produit fini, la présence ou non des 3PL, la taille des lots à commander, *etc.*

Comme nous l'avons déjà mentionné, les variables de décision sont choisies d'une manière optimale, c'est-à-dire de façon à ce que les critères de performance adoptés prennent la meilleure valeur possible. Dans la section qui suit, nous allons mettre la lumière sur les critères de performance rapportés dans l'état de l'art.

1.4.4.2 Les mesures de performance dans les chaînes d'approvisionnement

L'établissement des mesures de performance appropriées constitue la pierre angulaire de la conception et de l'analyse des chaînes d'approvisionnement. Une ou plusieurs mesures de performance sont utilisées pour déterminer l'efficience et / ou l'efficacité d'un système déjà existant ou dans le but de comparer plusieurs variantes d'un système. Ces mesures peuvent également être utilisées pour la conception de systèmes, en déterminant les valeurs des variables de décision qui donnent à la mesure adoptée les niveaux désirés. Dans la littérature, plusieurs travaux identifient les mesures de performance utilisées pour évaluer l'efficience et l'efficacité des chaînes logistiques.

Beamon (1998) identifie deux types d'indicateurs de performance : des indicateurs qualitatifs et des indicateurs quantitatifs. Les critères qualitatifs sont ceux pour lesquels il n'y a pas de mesure numérique directe et unique pour les exprimer, même si quelques uns de leurs aspects sont quantifiables. Bien que très importants dans tout processus de

prise de décision, ces mesures sont peu utilisées dans la littérature. Beamon en identifie les critères suivants :

- a. La satisfaction du client, qui rend compte du degré de satisfaction du client à l'égard du produit ou du service, que cela soit avant, pendant ou après la transaction ;
- b. La flexibilité, qui démontre la capacité de la chaîne à répondre aux fluctuations aléatoires de la demande ;
- c. L'intégration des flux de matériel et de l'information, qui détermine le niveau de communication entre les fonctions de la chaîne d'approvisionnement en ce qui concerne le flux des biens et le transport des matériels ;
- d. La gestion effective des risques, qui cherche à minimiser les facteurs de risques inhérents aux relations entre les entités d'une chaîne logistique ;
- e. La performance des fournisseurs, qui détermine la capacité de ceux-ci à livrer les matières premières aux centres de fabrication dans les temps exigés et dans les meilleures conditions.

Quant aux critères quantitatifs, ce sont ceux qui peuvent être décrits numériquement. Ces critères sont eux-mêmes classifiés en deux catégories : les mesures basées directement sur le coût ou sur le profit, et les mesures basées sur la sensibilité par rapport à la demande des clients.

Les mesures basées sur des considérations de coûts sont :

- a. La minimisation du coût, qui est le critère le plus utilisé dans la littérature. Il est le plus souvent minimisé pour l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement (coût total), ou pour un ensemble d'unités d'affaires ;
- b. La maximisation des ventes en nombre d'unités vendues ou en équivalent monétaire ;
- c. La maximisation du profit qui est la différence entre les revenus et les coûts encourus ;

- d. La minimisation des coûts de production, incluant les coûts de stockage et le coût de produit ;
- e. La maximisation du retour sur investissement (*Return On Investment*, ROI), c'est-à-dire la maximisation du ratio du profit net sur le capital de l'investissement initial capitalisé pour générer ce profit.

Pour ce qui est des mesures basées sur la sensibilité par rapport à la demande du client, elles sont énumérées par Beamon (1998) de la façon suivante :

- a. La maximisation du taux de satisfaction de la demande à temps ;
- b. La minimisation des retards de livraison ;
- c. La minimisation du temps de réponse aux clients, c'est-à-dire le temps entre l'instant de passation de commande et l'instant de réception de la commande par le client ;
- d. La minimisation du temps de cycle (*lead time*), c'est-à-dire le temps écoulé entre le début et la fin du processus de fabrication d'un produit ;
- e. La minimisation de la duplication des fonctions, c'est-à-dire la réduction du nombre de fonctionnalités fournies par plusieurs entités d'affaires.

Après avoir dressé la liste des mesures de performance utilisée dans l'état de l'art et identifié les principales contributions pour chacune des mesures, Beamon souligne que la littérature n'a pas étudié la justesse de l'utilisation de ces mesures dans la conception et l'analyse des chaînes d'approvisionnement. Elle affirme que la recherche devrait porter toute l'attention sur cet aspect en répondant notamment aux questions suivantes :

- a. Est-ce que les mesures de performance existantes sont appropriées pour les chaînes logistiques ? Car une seule mesure n'est probablement pas capable de couvrir tous les aspects des chaînes d'approvisionnement, il faudrait donc un système intégré de mesures pour évaluer la chaîne ;
- b. Quelles sont les mesures les plus adéquates à l'analyse des chaînes d'approvisionnement ? Et pourquoi ?

Pour Min et Zhou (2002), l'établissement d'un objectif est la première étape dans la modélisation d'une chaîne d'approvisionnement, en effet, un concepteur de modèle doit d'abord assimiler puis trouver les forces majeures qui régissent les liens dans une chaîne logistique. Selon la classification des auteurs, les objectifs de la modélisation incluent le service aux clients, la valeur monétaire, le transfert de l'information et du savoir et les éléments de risque.

Pour ce qui est du service aux clients, il constitue l'ultime objectif d'une chaîne d'approvisionnement. En dépit de la difficulté de sa quantification, on peut trouver dans la littérature, d'après Min et Zhou, quelques éléments telles que :

- a. La disponibilité du produit pour répondre à la demande fluctuante, qui peut être quantifiée par le stock disponible en nombre de jours équivalents, ou encore par le taux de la demande satisfaite, *etc.* ;
- b. Le temps de réponse qui traduit le degré de flexibilité de la chaîne d'approvisionnement. Il peut être quantifié par le temps de livraison à temps, le temps de cycle, le temps de processus, le temps de transport, le temps improductif, *etc.*

En ce qui concerne la valeur monétaire, Min et Zhou affirment également qu'elle est généralement définie comme étant le ratio entre les revenus et le coût total. Par conséquent, une chaîne d'approvisionnement peut améliorer sa valeur monétaire en augmentant ses revenus de ventes, sa productivité, sa part de marché, *etc.* et en réduisant ses dépenses et son taux de produits défectueux. Cette mesure est la plus largement utilisée puisqu'elle reflète l'efficience et la profitabilité des activités de la chaîne logistique. Les auteurs classifient la valeur monétaire en trois catégories : l'avantage de l'utilisation, le retour-sur-investissement et le comportement du coût. Si les deux premières catégories sont évidentes, il nous semble nécessaire d'expliquer brièvement le concept de comportement du coût, en effet, une classification traditionnelle des coûts en coûts fixes et autres variables fonctionnerait au niveau d'une seule compagnie et perd de

sa pertinence au niveau de la chaîne complète, car une telle approche ne prend pas en considération d'autres aspects tels que l'économie d'échelle, le coût de qualité (COQ), *etc.*

Quant au transfert du savoir et de l'information, il permet aux partenaires dans la chaîne d'approvisionnement de coordonner leurs actions et d'augmenter la visibilité par rapport à l'inventaire (Chopra et Meindl, 2001). Pour ce faire, les différents partenaires doivent synchroniser le partage de l'information en temps réel, ceci peut être permis grâce à l'installation de plusieurs plateformes techniques. Par exemple : Internet, échange de documents informatisé : *Electronic Data Interchange* ou EDI, progiciel de gestion intégré : *Enterprise Resource Planning* ou ERP, système de gestion d'entrepôt : *Warehouse Management System* ou WMS, *etc.* D'autre part, le transfert technologique entre les partenaires dans une chaîne logistique permet aux différents protagonistes de bénéficier du savoir-faire et de l'expertise de chacun d'eux.

Le dernier critère de performance relevé par Min et Zhou est la considération des éléments de risque. En effet, l'intégration de la chaîne logistique a un effet de levier sur la réduction du risque, car les entreprises n'agissent plus individuellement mais dans un cadre plus global qui est la chaîne d'approvisionnement à laquelle elles appartiennent. Par conséquent, chaque entreprise focalise ses efforts sur son domaine d'expertise, ce qui a pour effet de diminuer considérablement le risque inhérent aux activités qui sortent de son domaine d'expertise. Cependant, la complexité et la volatilité liées aux chaînes logistiques constituent un autre élément de risque à prendre en considération, d'où l'importance d'une collaboration totale et transparente entre les partenaires. Par conséquent, le concepteur de modèle doit avoir un profil clair des risques potentiels impliqués dans les activités de la chaîne. Ces risques recensés dans la littérature, selon Min et Zhou, sont :

- a. Le risque de défaut de qualité, car un défaut à un niveau de la chaîne d'approvisionnement met en péril la qualité à travers les niveaux en aval. Ceci est dû notamment à l'interdépendance des partenaires de la chaîne ;
- b. Le risque de défaut de l'information, dont l'une des conséquences les plus connues est l'effet coup de fouet (*Bullwhip Effect*), qui a pour effet de gonfler la demande du client final dans les échelons en amont de la chaîne logistique créant ainsi une demande imaginaire exagérée, et par conséquent des surproductions et des stocks énormes.

Gunasekaran *et al.* (2004) présentent une revue des métriques et des indicateurs de performance utilisés dans les chaînes d'approvisionnement en fonction de leurs activités, soit la planification, l'approvisionnement, la production et / ou l'assemblage et la livraison au client. Nous présentons dans ce qui suit les indicateurs de performance de la chaîne d'approvisionnement selon l'activité sur la base de la classification proposée par les auteurs.

Pour la fonction de **planification des commandes**, les auteurs recensent trois familles d'indicateurs de performance :

- a. La méthode de transmission des commandes : détermine la façon dont les spécifications du client sont converties en informations échangées tout au long de la chaîne ;
- b. Le temps de cycle de la commande : qui est en fait le temps écoulé entre la passation de commande par le client et la réception du produit fini par ce client ;
- c. Le chemin de commande : qui détermine le temps écoulé pour la transmission de la commande à travers les canaux de communication.

Pour ce qui est de **l'approvisionnement**, les auteurs parlent d'« évaluation des liens d'approvisionnement ». Celle-ci repose sur l'évaluation des fournisseurs compte tenu de

l'efficacité, du flux, de l'intégration, du taux de réponse à la demande, *etc.* Elle a des implications tant au niveau stratégique qu'aux niveaux tactique et opérationnel.

En ce qui concerne les indicateurs de performance au niveau de **la production et / ou l'assemblage**, les métriques recensées par les auteurs sont :

- a. L'étendue des produits et services : qui rend compte de la capacité des fournisseurs à introduire des nouveaux produits ;
- b. L'utilisation de la capacité : qui affecte le temps de réponse à la demande à travers son impact sur la flexibilité, les temps de cycle et le taux de livraison ;
- c. L'efficacité des techniques de l'ordonnancement : ceci est relatif aux techniques d'ordonnancement telles que la production juste-à-temps, la planification des besoins de matières (MRP), les progiciels de gestion intégré (ERP), *etc.*

Quant aux indicateurs reliés à la **livraison**, les auteurs distinguent l'évaluation de la performance de livraison indiquant le taux de livraison à temps ; cette mesure peut être quantifiée à travers le nombre de livraisons facturées ne comportant pas d'erreurs, et aussi à travers la flexibilité des systèmes de livraison pour la satisfaction de demandes particulières. L'autre mesure est le coût de distribution qui totalise les coûts associés au mouvement du matériel à travers la chaîne entière.

Les auteurs donnent également les métriques utilisées dans la littérature afin de mesurer la satisfaction du client et les coûts logistiques dans une chaîne d'approvisionnement. Afin de mesurer la satisfaction du client, les auteurs parlent notamment de flexibilité et de services post-transactionnels. Pour ce qui est des coûts logistiques dans une chaîne d'approvisionnement, une attention particulière est portée aux avoirs de l'entreprise et au retour sur l'investissement ainsi que le coût de l'information.

L'aspect le plus important de l'étude est sans doute la classification que les auteurs proposent comme cadre de travail pour le choix des mesures de performance pour la

chaîne d'approvisionnement et ce à chacun des niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Pour faire cette classification, une étude a été menée auprès de plusieurs compagnies situées au Royaume-Uni dans laquelle les gestionnaires jugeaient de l'importance de chacune des mesures. Les auteurs ont synthétisé l'ensemble des activités de la chaîne logistique avec les mesures correspondantes jugées plus adéquates aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel comme le présente le tableau suivant :

Tableau III

Les mesures de performance dans
une chaîne d'approvisionnement
(Source : adapté de Gunasekaran *et al.*, 2004)

Activité / processus de la chaîne logistique	Stratégique	Tactique	Opérationnel
Planification	Niveau de la valeur du produit perçue par le client, variation par rapport au budget, temps de cycle des commandes, coût de traitement de l'information, profit net vs productivité, temps de cycle total, temps d'auto-financement, temps de cycle de développement de produit	Temps de quête du client, temps de cycle de développement de produit, exactitude des techniques de prévision, temps de cycle du processus de planification, méthode d'entrée de données, productivité des ressources humaines	Méthode d'entrée de données, productivité des ressources humaines
Approvisionnement		Performance de livraison du fournisseur, délai de livraison, coûts chez le fournisseur par comparaison au marché, efficacité du temps de cycle de la commande, efficacité de la méthode d'auto-financement, engagement du fournisseur par rapport aux procédures	Efficacité du temps de cycle de la commande, coûts chez le fournisseur par comparaison au marché

Fabrication / assemblage	Gamme de produits et services	Pourcentage de produits défectueux, coût par heure de fonctionnement, utilisation de capacité, utilisation de lots économiques	Pourcentage de produits défectueux, coût par heure de fonctionnement, indice de productivité des ressources humaines
Livraison	Flexibilité du service pour répondre à la demande des clients, efficacité du programme de planification de la distribution	Flexibilité du service pour répondre à la demande des clients, efficacité du programme de planification de la distribution, efficacité des méthodes de facturation à la livraison, pourcentage de produits finis en transit, fiabilité de la livraison	Qualité des produits livrés, livraison à temps, efficacité des méthodes de facturation à la livraison, nombre de livraisons facturées sans erreurs, pourcentage de livraisons urgentes, richesse de l'information dans l'exécution des livraisons, fiabilité de la livraison

Dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement, une fois que les mesures de performance ont été choisies, et que les variables de décision ont été bien identifiées, il est très important de bien comprendre l'approche adoptée pour la modélisation. Les différentes approches sont bien répertoriées dans la littérature et elles seront explicitées dans la section suivante.

1.4.4.3 Classification des modèles d'optimisation des chaînes logistiques

Beamon (1998) fournit une revue de littérature assez complète de la modélisation multi-étape des chaînes d'approvisionnement. Elle donne aussi dans son article un agenda pour les futures recherches dans ce domaine. Elle présente sa revue en quatre catégories de modèles :

- a. Les modèles analytiques déterministes ;
- b. Les modèles analytiques stochastiques ;
- c. Les modèles économiques ;
- d. Les modèles de simulation.

Ce qui caractérise les modèles analytiques déterministes, c'est le fait que les variables de décision sont connues et spécifiées. Dans ce contexte, plusieurs études ont été faites (Beamon, 1998), les modèles conçus cherchent particulièrement à :

- a. assigner des produits finis et des sous-assemblages aux sites de fabrication, des vendeurs aux centres de distribution, des centres de distribution aux marchés, *etc.* ;
- b. déterminer les quantités de produits finis et de sous-assemblages à transporter entre les vendeurs, les centres de fabrication et les centres de distribution ;
- c. déterminer les quantités des composants, sous-assemblages et produits finis à produire dans chacun des sites ;
- d. déterminer le nombre d'échelons dans la chaîne logistique.

Pour la quasi-totalité de ces modèles, l'objectif est de maximiser les profits après-impôt, minimiser les coûts fixes et variables, *etc.* Les intrants des modèles sont les coûts de fabrication et les coûts de transport. Nous trouvons ainsi des modèles multi-produits, multi-échelons, avec plusieurs sites et plusieurs modes de transport cherchant à minimiser les coûts encourus des activités quotidiennes, des coûts fixes et variables de production, de stockage, de manutention, des coûts indirects et généraux et des coûts de transport. La plupart des modèles se basent sur le volume de la demande et intègre les différents coûts, certaines rares études intègrent la nomenclature de produit fini dans la modélisation.

Dans les modèles analytiques stochastiques, une ou plusieurs variables sont inconnues et sont supposées suivre une distribution de probabilité particulière. La recherche a été très active dans ce type de modèles à travers plusieurs études. On peut citer notamment :

- a. L'établissement des politiques de demande de produits pour l'ensemble des échelons de la chaîne ;
- b. Le contrôle des flux de produits sur une base site par site ;
- c. La localisation des inventaires dans la chaîne d'approvisionnement ;

- d. La réponse de la chaîne au caractère aléatoire de la demande, et la détermination des stocks de sécurité minimum exigés ;
- e. L'analyse des configurations de produits pour la différenciation retardée étant donnée des demandes stochastiques ;
- f. La conception de système de production/stockage généralisé avec des temps de traitement aléatoires, des temps de mise en course et des stocks tampons ;
- g. La description et l'analyse de l'effet coup de fouet (*Bullwhip Effect*). Cette étude montre l'effet du traitement de la demande, du jeu de rationnement, des lots de commandes et des variations des prix sur la surestimation de la demande.

Peu d'études ont été menées dans le cadre des modèles économiques. Plus particulièrement, un cadre de travail pour la modélisation de la relation fournisseur / client au sein d'une chaîne d'approvisionnement a été proposé par Christy et Grout (1994). Il s'agit de définir une matrice carrée d'ordre deux qui sert à identifier les conditions sous lesquelles un type de relation est désiré. Ces conditions varient d'un haut niveau à un bas niveau de spécificité « processus », et d'un haut niveau à un bas niveau de spécificité « produit ». En particulier, un bas niveau de spécificité « processus » implique que c'est le client qui assume le risque, tandis qu'un niveau bas de spécificité « produit » implique que c'est le fournisseur qui assume le risque.

Quant aux modèles de simulation, ils ont été un domaine fertile pour la recherche. La simulation a été utilisée en vue d'évaluer l'impact de plusieurs stratégies des chaînes d'approvisionnement sur les fluctuations de la demande. Les résultats ont montré que la stratégie juste-à-temps et l'inclusion de la fonction distribution dans l'échelon de fabrication sont les plus efficaces pour le lissage des fluctuations de la demande. La simulation a également permis de montrer que l'intégration du flux d'information et la séparation des demandes en commandes réelles et en provisions (qui utilisent les stocks de sécurité) donnent la meilleure amélioration par rapport à la variabilité de la demande.

Min et Zhou (2002) proposent une synthèse assez complète de la modélisation des chaînes d'approvisionnement. Les auteurs présentent un sommaire des recherches qui ont été faites dans le passé, identifient les composantes-clés de la modélisation et suggèrent des lignes directrices pour un développement réussi des modèles d'optimisation des chaînes logistiques. D'une façon similaire à celle de Beamon (1998), ils proposent une taxinomie des modèles de chaîne d'approvisionnement rencontrés dans la littérature, et ce en quatre catégories majeures :

- a. Les modèles mathématiques déterministes ;
- b. Les modèles mathématiques stochastiques (probabilistes) ;
- c. Les modèles hybrides ;
- d. Les modèles basés sur les technologies de l'information.

Comme Beamon, Min et Zhou considèrent comme modèle déterministe tout modèle dont les paramètres sont connus et déterminés avec certitude. Les auteurs ajoutent un niveau de hiérarchisation supplémentaire en distinguant au sein de cette catégorie les modèles à une seule fonction-objectif des modèles multi-objectifs, cette classe de modèles a été développée en vue de prendre en compte des objectifs conflictuels dans la modélisation des chaînes d'approvisionnement. Les modèles stochastiques tiennent compte de l'incertitude et de l'aspect aléatoire des paramètres, ils sont subdivisés en deux classes de modèles : la théorie du contrôle optimal et la programmation dynamique. Les modèles hybrides utilisent des éléments caractérisant les modèles déterministes et les modèles stochastiques, ils incluent la théorie des stocks et les modèles de simulation, ils ont l'intérêt de traiter des problèmes avec un lot de paramètres déterministes et aléatoires. Les nouveaux-nés de la modélisation des chaînes d'approvisionnement sont les modèles basés sur les technologies de l'information, ceux-ci s'intéressent à l'intégration et à la coordination, en temps réel, des différentes phases de planification de la chaîne logistique à travers l'utilisation d'applications logicielles diverses visant à améliorer la visibilité. Ces modèles incluent les systèmes de gestion d'entrepôt (WMS), la planification des besoins de matières (MRP), les systèmes

d'information géographique (GIS), *etc.* De tels systèmes gagnent en popularité étant donné leur rôle déterminant dans la facilitation du flux de l'information à travers la chaîne d'approvisionnement.

La figure 5 présente la taxinomie des modèles selon Min et Zhou :

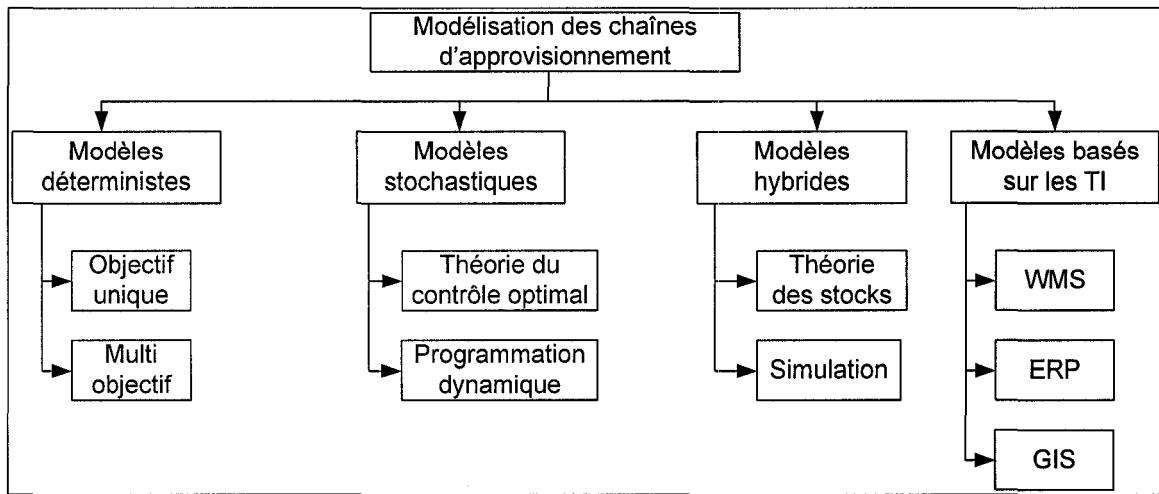


Figure 5: Taxinomie de la modélisation dans les chaînes d'approvisionnement
(Source : adapté de Min et Zhou, 2002)

1.4.4.4 Conception et pilotage des chaînes d'approvisionnement

Les problèmes d'optimisation des chaînes d'approvisionnement peuvent être abordés selon deux visions : les problèmes de conception du réseau logistique et les problèmes de pilotage des flux. Ce sont en effet deux concepts différents : dans un problème de conception du réseau logistique, il est supposé que le réseau n'est pas encore construit, l'objectif principal est de le construire de manière optimale. Alors que dans un problème de pilotage de flux, on suppose que le réseau est déjà configuré, le but principal dans ce type de problème est de mettre en place un système de planification et de contrôle des matières entre les nœuds du réseau.

Nous pouvons également comprendre la différence entre les problèmes de conception et les problèmes de pilotage du réseau logistique en considérant leurs portées au niveau décisionnel. Lors du pilotage de la chaîne d'approvisionnement, les décisions qui sont prises relèvent du niveau opérationnel, tandis que dans un contexte de conception du réseau, les décisions sont plutôt d'ordre stratégique et tactique.

Dans cette section, nous allons essayer de couvrir une bonne partie des travaux qui ont été faits dans le contexte de conception et de pilotage des chaînes d'approvisionnement. Bien entendu, il est impossible dans le cadre de ce projet d'aborder l'ensemble de la littérature à ce sujet, étant donné le nombre très important d'articles et de thèses qui ont traité l'un ou l'autre de ces problèmes.

Le problème de conception de la chaîne d'approvisionnement est le plus souvent désigné par le problème de « localisation-allocation » ; alors que la « localisation » fait référence à la situation géographique des nœuds du réseau, l'« allocation » désigne l'ensemble des activités qui seront affectées à chacun des sites. Dans ce type de problèmes, l'objectif est de déterminer la localisation des sites de production, de stockage, de sous-traitance ainsi que les trajectoires que les produits suivent entre les nœuds. De tels problèmes sont très souvent de grande envergure et exigent une forte puissance des outils informatiques utilisés pour les résoudre.

L'une des premières contributions faites dans ce cadre a été le travail de Geoffrion et Graves (1974) dans lequel les auteurs se sont intéressés au problème d'allocation optimale des centres de distribution entre les usines de fabrication et les clients. Ils ont proposé une formulation du problème sous forme d'un modèle mathématique linéaire en nombres entiers, dans un contexte multi-produits, pour une seule période, avec des capacités limitées pour les usines et les centres de distribution et une demande déterministe. L'objectif étant de déterminer les centres de distribution à utiliser, leurs tailles respectives, les zones de service qu'ils doivent desservir et la configuration des

flux de chaque produit de façon à satisfaire la demande au coût minimum. La fonction-objectif étant composée de coûts de production et de distribution; ceux-ci sont exprimés en coûts fixes et variables, les coûts de transport sont supposés être linéaires. Le problème est sujet aux contraintes de capacité des usines, à la satisfaction de la demande, à la stratégie de distribution (fourniture exclusive), et aux bornes inférieures et supérieures des quantités des produits traversant les centres de distribution. La flexibilité du modèle proposé permet la considération d'autres contraintes telles que le niveau de service à la clientèle. Basé sur un problème réel de l'industrie alimentaire, le problème a été ensuite résolu avec la méthode de décomposition de Benders (taille du problème : 11 854 contraintes, 727 variables binaires et 23 513 variables continues). L'étude a démontré l'efficacité de la méthode de décomposition de Benders comme stratégie de résolution d'un problème d'allocation de centres de distribution.

Breitman et Lucas (1987) ont présenté un outil d'aide à la décision qui modélise la quasi-totalité des aspects de la chaîne d'approvisionnement, cet outil est baptisé PLANETS (*Production Location Analysis NETwork System*). Il s'agit d'un système flexible de modélisation et d'optimisation applicable à n'importe quelle industrie. Selon les auteurs, ce système a été conçu pour mettre en application l'expertise quantitative des sciences de la gestion et de la recherche opérationnelle afin de formuler, modéliser et résoudre des problèmes de planification stratégique complexes. Il permet de décider quels produits fabriquer, quand, où et comment les fabriquer, quels marchés potentiels viser et quelles ressources utiliser. Il permet également de donner un plan détaillé de transport des produits ainsi que le plan de dépense du capital d'investissement.

À travers ses boîtes de dialogue, le système permet à l'utilisateur de :

- a. Définir un environnement d'affaire en fournissant une approche structurée pour la définition du problème posé ;
- b. Définir les hypothèses spécifiques pour l'analyse, notamment à travers les scénarios de type « What if? » ;
- c. Vérifier la faisabilité de tout scénario potentiel ;

- d. Générer et résoudre automatiquement le modèle mathématique ;
- e. Interpréter les résultats de l'optimisation et générer des rapports sommaires : ceux-ci peuvent être de base tels que les rapports d'utilisation des centres et les rapports d'allocation de produits, ou financiers tels que les rapports de l'investissement et les rapports des revenus et des flux de trésorerie (*cash flow*).

Dans le même registre, Arntzen *et al.* (1995) présentent dans leur article l'outil GSCM (*Global Supply Chain Model*). La raison d'être de cet outil est l'optimisation de modèles déterministes de design de la chaîne logistique dans un contexte global, c'est-à-dire dans le cas où le réseau s'étend sur plusieurs pays, en tenant compte des contraintes de temps, de coûts et de capacité dans l'ensemble des opérations logistiques et manufacturières. La modélisation est basée sur la programmation en nombres mixtes, elle vise à minimiser les coûts et / ou les temps pondérés de production et de distribution. Le problème est assujetti aux contraintes de satisfaction de la demande et aux différentes considérations du commerce à l'échelle internationale. Les coûts considérés incluent les charges de production fixes et variables, les coûts de stockage, les coûts de transport, les taxes et les droits douaniers.

Les auteurs mettent l'accent sur le fait que GSCM permet d'étudier plusieurs scénarios. En effet, il peut exécuter des analyses de réseaux de chaîne d'approvisionnement pour intégrer de nouveaux produits. L'évaluation des scénarios concernant la base de fournisseurs à intégrer en fonction de leur localisation est également possible. D'autres questions telles que la fourniture exclusive ou la fourniture multiple peuvent aussi être étudiées.

GSCM permet aussi d'analyser les bases de fournisseurs en fonction des familles de produits, il aide ainsi à choisir la base optimale de fournisseurs tout en maintenant un minimum de liens à gérer dans le réseau logistique.

L'autre catégorie de scénarios que GSCM peut analyser est l'étude du réseau d'approvisionnement d'une entreprise ou d'une division. Les produits sont regroupés dans le système selon deux approches : selon le procédé de fabrication ou selon les activités (distribution par exemple.) afin de gérer l'information plus facilement.

Dans l'article de Paquet *et al.* (2004), les auteurs abordent la question de la prise en compte des décisions de sélection des technologies dans le design des réseaux manufacturiers. Ils proposent une méthodologie d'optimisation pour la conception d'un réseau logistique dans un contexte multi-produit avec une demande déterministe et une nomenclature de produits non triviale. Le modèle mathématique proposé utilise la programmation mathématique en nombres entiers pour trouver la structure optimale du réseau, définir les tâches des installations et déterminer la technologie et la capacité utilisées dans chacune des installations. L'approche prend en considération les économies d'échelle et d'envergure. Pour résoudre le modèle, les auteurs se basent sur la décomposition de Benders, ils en concluent que l'utilisation d'un solveur commercial tel que CPLEX est largement suffisante pour résoudre de tels problèmes, la méthode de décomposition de Benders est à privilégier dans le cas des modèles de très grande envergure.

Talluri et Narasimhan (2003) soulignent l'importance de sélectionner les bons partenaires dans les réseaux organisationnels. Ils proposent une approche dite « max-min » pour l'évaluation des fournisseurs en prenant en compte la variabilité de leurs performances. Cette approche consiste à maximiser puis à minimiser la productivité ou l'efficience de chaque fournisseur en se basant sur un modèle mathématique linéaire qui détermine les poids à donner aux intrants et aux extrants dans les deux cas de figure (maximisation puis minimisation). Pour illustrer l'apport de l'approche, un exemple d'évaluation des fournisseurs d'une compagnie pharmaceutique a été développé. Les auteurs affirment que l'approche adoptée permet d'analyser les performances des fournisseurs, elle permet aussi d'identifier des groupes homogènes de fournisseurs, ce

qui assure plus de flexibilité pour les décideurs quant au choix final des fournisseurs à retenir. Le décideur peut aussi porter son attention, au sein d'un même groupe de fournisseurs, sur d'autres critères qui n'ont pas été considérés durant l'étude.

Garavelli (2003) propose un article qui traite du concept de la flexibilité limitée pour l'optimisation des flux de produits dans une chaîne d'approvisionnement. Il affirme que la flexibilité est une arme à la disposition des entreprises pour faire face à l'incertitude qui accompagne le réseau logistique, cette incertitude peut émaner de la demande, de la qualité, des retards dans le flux de l'information ou des délais. Elle permet de commuter la production entre les usines et les fournisseurs pour faire face à la variabilité, donc d'être flexible sans augmenter d'une façon pharamineuse les coûts associés à la flexibilité. L'article propose un modèle de simulation pour l'évaluation des effets de différents degrés de flexibilité sur la performance d'une chaîne d'approvisionnement multi-produits sous une demande stochastique, avec plusieurs clients, centres d'assemblage et sites de fournisseurs. Les critères de performance sont les stocks en produits semi-finis (*Work in Process, WIP*) et les délais.

Toujours selon Garavelli, pour chacune des opérations « achat » et « distribution », on peut définir trois degrés de flexibilité : la configuration « sans flexibilité » où chaque usine produit un seul type de produit et par conséquent dessert tous les marchés par ce produit, la configuration « flexibilité totale » où chaque usine assemble tous les produits pour son marché local seulement, et finalement la configuration « flexibilité limitée » qui est toute configuration intermédiaire possible entre les deux premières. Le modèle de simulation de Garavelli compare les critères de performance pour chacune des neuf configurations possibles pour le même nombre de fournisseurs et de sites d'assemblage. L'étude a montré que l'utilisation de la « flexibilité limitée » donne les meilleurs résultats, et que la flexibilité est d'autant plus avantageuse qu'elle se situe au niveau des fournisseurs qu'au niveau des sites d'assemblage, l'auteur explique cela par l'effet coup de fouet (*Bullwhip Effect*).

Dogan et Goetschalckx (1999) font une étude de conception intégrée d'une chaîne d'approvisionnement aux niveaux stratégique et tactique en déterminant la structure du réseau ainsi que l'allocation de production et de distribution dans une optique multi-produits, multi-périodes pour une demande avec variations saisonnières. Dans l'étude menée, le processus de fabrication contient deux phases, caractérisées chacune par des lignes de production avec des technologies et des capacités différentes. D'autre part, la connexion entre les sites de production et de distribution se fait au moyen de canaux de transport. Le réseau est divisé en quatre catégories : les fournisseurs, la première puis la seconde phase de production et les clients. Des arcs sont utilisés pour modéliser les différents coûts (fixes et variables) et les contraintes de capacité pour les équipements de production, pour les machines ainsi que pour les équipements d'entreposage.

L'objectif du modèle proposé par Dogan et Goetschalckx est de déterminer la configuration d'un système de production-distribution en minimisant les coûts d'approvisionnement, de production, de transport, de stockage et d'utilisation d'équipements de façon à répondre à la demande qui suit des variations saisonnières. Le problème posé est formulé sous forme d'un modèle mathématique en nombres mixtes et une méthodologie de résolution basée sur la décomposition de Benders est présentée. Le modèle est illustré par une étude de cas de l'industrie d'emballage dans laquelle les auteurs ont eu recours à des techniques d'accélération pour réduire le temps de résolution. Les auteurs affirment que cette intégration des décisions stratégiques et tactiques a permis d'économiser 2 % comparativement avec une approche hiérarchique où l'optimisation se fait séquentiellement.

Frayret *et al.* (2001) présentent un cadre de travail stratégique pour concevoir un système manufacturier agile, qui permet de planifier, contrôler et diriger des opérations quotidiennes contingentes dans un environnement dynamique. Cette approche est basée sur la stratégie organisationnelle collaborative baptisée « NetMan », qui se compose d'une méthode d'affaires dynamique pour organiser et actionner des activités de

fabrication par la configuration, l'activation et l'opération d'un réseau distribué des centres de fabrication interdépendants et responsables.

Deux principaux concepts déterminent l'approche « NetMan » :

a. Les centres « NetMan »

Ce sont des centres internes ou externes qui ont une mission exprimée en termes d'ensemble des responsabilités ; chaque responsabilité comprend des besoins spécifiques à satisfaire pour les centres clients. Chaque centre est indépendant et est responsable de sa propre gestion stratégique, tactique et opérationnelle, cependant, il interagit avec les centres-parents. Les centres constituent les composantes fondamentales de l'approche présentée. Ils s'organisent et reconfigurent leurs associations suivant les changements de l'environnement. Pour accomplir sa mission, un centre « NetMan » peut utiliser ou adapter ses relations avec d'autres centres, établir et utiliser d'autres sources, utiliser ses ressources internes ou créer un nouveau centre « NetMan » puis établir et utiliser cette nouvelle relation.

b. Les réseaux « NetMan »

C'est la structuration organisationnelle des centres « NetMan », elle est conçue pour répondre à la mission globale des centres. Il s'agit d'une structure hiérarchique conçue d'une façon dynamique de manière à permettre à l'organisation de s'adapter aux changements de l'environnement. Elle peut être centralisée ou décentralisée ou entre les deux. La configuration du réseau « NetMan » induit un remodelage complet de toute l'organisation et de ses processus d'affaires tel que suggéré par Hammer et Champy (1992). La structure est basée sur une association « gagant-gagnant » entre les clients et les fournisseurs (*win-win client-provider partnerships*). Cette approche distribuée induit des relations d'affaires très interdépendantes, elle est basée sur trois dimensions : l'échange d'informations, la collaboration entre les partenaires en termes de planification et de gestion des opérations et le respect des règles du jeu

des affaires. De cette façon, « NetMan » fait face à l'effet de fouet en implantant des approches de planification collaboratives fondées sur l'échange de l'information.

Les auteurs affirment que l'approche définit les mécanismes de collaboration en se basant sur trois principes :

a. Organisation et structure

Chaque centre est responsable de sa propre gestion dans un réseau d'affaires collaboratif.

b. Communication

Chaque centre utilise un canal conventionnel de communication qui permet d'accomplir les transactions et d'échanger les informations de manière rapide, compréhensible et efficace.

c. Coordination

Les centres utilisent un cadre de coordination pour structurer leurs activités interdépendantes.

Ces mécanismes de collaboration sont :

- a. le système d'information : l'approche utilise en fait les technologies de l'information pour la communication et l'échange d'information ;
- b. l'échange des modèles d'affaires ;
- c. le partage efficace des ressources ;
- d. le partenariat basé sur une approche « gagnant-gagnant » et l'éclaircissement des règles du jeu ;
- e. la gestion des contingences (éventualités) en définissant l'ensemble des actions à entreprendre lorsqu'un événement imprévu a lieu ;

- f. les mesures de performance de la collaboration en vue d'évaluer les relations collaboratives.

L'approche modélise les centres « NetMan » comme des logiciels qui interagissent entre eux en utilisant le cadre de travail coordinateur : Convention, Accord et Transaction (CAT).

Les auteurs concluent leur article par une étude de cas basée sur l'approche « NetMan » pour une compagnie de montage d'autocars. Une analyse comparative a été également menée, mettant en jeu les différences entre cette approche avec d'autres approches ; les notions de groupes et de sous-groupes sont les plus remarquables puisqu'elles ne sont pas explicites dans l'approche « NetMan ». Le groupe y est considéré plutôt comme étant un réseau d'affaires flexible et collaboratif.

L'approche « NetMan » a été présentée plus tôt dans l'article de Montreuil *et al.* (2000). Dans celui-ci, les auteurs présentent les mêmes grandes lignes de l'approche évoquées dans l'article de Frayret *et al.* (2001), avec un aspect qui retient l'attention, celui du fait que la stratégie collaborative stipule que chaque centre maintient une évaluation actualisée de sa propre performance ainsi que de celles de ses partenaires. Ceci est un des éléments déterminants dans le choix des partenaires.

Dasci et Verter (2001) s'intéressent au problème de design des systèmes de production-distribution. Ils présentent un cadre de modélisation basé sur l'utilisation de fonctions continues pour représenter les distributions spatiales des coûts et de la demande. Le modèle continu proposé permet aux dirigeants d'avoir une vue d'ensemble sur l'impact de la modification des paramètres du problème sur les décisions de design du réseau. Dans ce problème, les auteurs cherchent à déterminer la meilleure configuration concernant la localisation des sites, leur taille, la technologie et l'ensemble des produits à fabriquer en vue d'accomplir les objectifs de l'entreprise à long terme. Les auteurs

soulignent que la majorité écrasante des approches analytiques du problème de production-distribution se basent sur la programmation mathématique en nombres mixtes (modèles discrets), et que les modèles continus sont très peu exploités bien qu'ils ont du succès dans les problèmes de logistique. En effet, les modèles discrets fournissent des solutions optimales mais la taille des données et les temps de calcul augmentent considérablement dans les modèles réalistes. De plus, la fiabilité et la précision des données diminuent. Pour pallier à ces problèmes, les auteurs affirment que l'approximation continue peut être très bénéfique, car elle est moins exigeante au niveau de la précision des données, tout en étant capable de donner des résultats intéressants proches de la solution optimale.

Le modèle d'approximation continu proposé par les auteurs considère la localisation de nouveaux sites dans le marché où chaque site peut servir une seule région de service. Les variables de décision sont le nombre de sites, leurs localisations (données par le couple de coordonnées) et les zones de service respectives dans l'enceinte du marché. Le modèle considère une densité de demande à des points donnés. Le problème est sujet aux contraintes de satisfaction de la demande ; chaque zone de service sera satisfaite par un seul site. L'objectif étant de minimiser les coûts totaux qui se composent de coûts fixes d'ouverture des nouveaux sites, des coûts d'acquisition de capacité et de coûts de transport. Il est considéré que tous les paramètres varient peu dans une même zone de service, et que les coûts d'acquisition de capacité et d'opération sont sujets à l'économie d'échelle. Les coûts de transport sont donnés par produit-distance.

Le modèle ainsi proposé nécessite des hypothèses draconiennes sur le nombre, la forme et l'orientation des zones de service. Les auteurs donnent une approche pour la résolution ; cette approche consiste à trouver premièrement les zones de service de manière optimale, et de déterminer ensuite la localisation précise des sites par une analyse subséquente. Pour ce faire, on utilise une fonction en escalier qui caractérise la

zone de service en termes de taille et de frontière. Les résultats obtenus sont ensuite présentés.

Les auteurs soulignent que cette méthode de résolution soulève deux questions : le problème de trouver une fonction en escalier avec laquelle la technique de recherche avec le gradient fonctionne bien ; une fois cette fonction trouvée, le problème de localisation des sites peut être traité séparément en considérant les zones de service indépendamment. L'autre question que soulève cette méthode est que le modèle devient inutilisable quand de grandes différences apparaissent dans un même voisinage. Les auteurs ne manquent pas de faire remarquer que les approches de modélisation en nombres mixtes et d'approximation continue sont complémentaires et servent à donner aux dirigeants une idée globale sur l'impact de la variation des paramètres.

Dans un autre aspect de la gestion des chaînes d'approvisionnement, Gunasekaran et Ngai (2004) soulignent les facteurs pertinents, le rôle et les implications des technologies de l'information dans la gestion des réseaux logistiques, et ce en classifiant d'abord la littérature disponible selon les critères adéquats et en la révisant dans le but de développer un cadre de travail pour étudier les applications des technologies de l'information dans le pilotage de la chaîne. Basées sur cette revue et après une analyse approfondie, des recommandations ont été faites dans le but d'intégrer ces technologies dans la gestion des chaînes logistiques.

Les auteurs proposent une classification de la littérature parue au sujet de la gestion des chaînes d'approvisionnement en six catégories majeures :

a. La planification stratégique

Elle a pour but de déterminer les implications à long terme des technologies de l'information sur les systèmes de gestion des chaînes d'approvisionnement.

b. L'entreprise virtuelle

Elle est basée sur le concept de délocalisation (approvisionnement extérieur) pour tirer profit des compétences des partenaires dans le but d'assurer la flexibilité et la réactivité nécessaires pour faire face aux changements du marché.

c. Le commerce électronique (e-commerce)

Les développements des technologies tels que le Web et le commerce électronique peuvent supporter plusieurs activités tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

d. Les infrastructures des technologies de l'information

Elles incluent le matériel, les logiciels ainsi que le type des systèmes requis pour la technologie utilisée. Les cellules de formation sur ces technologies font partie intégrante de ces infrastructures.

e. La connaissance et la gestion des technologies de l'information

Elle s'exprime en termes de besoin de former les employés pour qu'ils puissent contribuer aux activités à valeur ajoutée. Ceci exige une approche systémique et un cadre pour l'éducation et la formation des employés en groupes de travail.

f. La mise en œuvre des technologies de l'information dans la gestion des chaînes logistiques

Elle exige une approche de gestion de projet, un soutien de la part des hauts responsables sur le plan moral et financier.

Après une revue de la littérature selon ces catégories, les auteurs donnent un cadre pour l'identification et l'application des technologies de l'information. Au niveau de la planification stratégique, l'implication du management et le changement des processus d'affaires sont nécessaires. L'entreprise virtuelle permettrait de réduire

considérablement les temps de cycle mais nécessiterait des formations dans les technologies de l'information telles que JAVA, XML et les applications basées Web. Selon les auteurs, le modèle B2B *Business to business* semble être le plus adéquat pour le commerce électronique. En ce qui concerne les infrastructures, une importance plus particulière devrait être accordée aux portails Internet plus rapides où un compromis devrait être fait entre la quantité et la qualité des informations disponibles sur les sites. Le ralliement avec d'autres partenaires, la collaboration avec les universités locales ainsi que la formation continue des employés sont des éléments essentiels pour le développement des connaissances des technologies de l'information. Pour ce qui est de l'implémentation, il est primordial de former des équipes fortes disposant des fonctionnalités nécessaires de toutes les parties en brisant les barrières hiérarchiques ; l'implication de la haute direction, l'apport des changements nécessaires aux processus d'affaires et le développement des mesures de performance adéquates sont également des considérations à prendre en compte pour l'implémentation des technologies de l'information.

Dans un article cherchant à démontrer le profit à tirer des relations opérationnelles collaboratives entre les partenaires dans une chaîne d'approvisionnement, Muckstadt *et al.* (2001) établissent un ensemble de principes directeurs pour la conception et l'exécution d'un réseau logistique. Selon les auteurs, la chaîne logistique devrait être vue comme étant composée de cinq systèmes d'affaires interconnectés : les systèmes d'ingénierie, le marketing, les manufacturiers, les logistiques et le management. Ils affirment que la réussite d'une chaîne logistique est liée à l'intégration de ces cinq systèmes à l'intérieur de l'organisation et à l'intégration de ces fonctions le plus possible avec les collaborateurs. Les firmes doivent également traiter du problème de l'incertitude dans le réseau et de son impact sur les décisions qui, selon les dires des auteurs, ne sont pas liés simplement à l'échange des données.

En fait, la collaboration constitue une arme pour contrer l'incertitude. Dans ce cadre, les auteurs distinguent entre quatre types de chaîne logistique : dans le premier type, les partenaires planifient conjointement les plans stratégiques et tactiques, dans le second type, les clients communiquent leurs plans extraordinaires tels que les ventes promotionnelles, dans ce cas, les intervenants sont des « coopérateurs ». Le troisième type caractérise des firmes qui partagent les données opérationnelles telles que les niveaux de stocks, les politiques de stockage et la demande du client ; les intervenants de ce type sont des « coordinateurs ». Le quatrième type considère le cas où le consommateur passe la commande à la firme qui doit répondre à la demande dans les délais requis par le consommateur, dans ce cas, les intervenants sont des « communicateurs ».

Quel que soit le type auquel la chaîne d'approvisionnement appartient, certains principes garantissent l'excellence de sa gestion. Ces principes sont au nombre de cinq et sont énumérés par les auteurs de la façon suivante : la connaissance du client en ayant une compréhension claire de ses besoins (produits, dates de livraison, niveau de service, méthode d'achat, *etc.*), la construction d'une chaîne logistique agile qui élimine les pertes, la variabilité et l'incertitude, la construction d'infrastructure d'échange d'information, la construction des processus d'affaire – ceux-ci doivent être établis à l'intérieur et entre les organisations pour soutenir les objectifs stratégiques de la chaîne d'approvisionnement – et la construction d'un système d'aide à la décision.

Dans leur article, les auteurs soulèvent la question de la nécessité d'un nouveau paradigme de modélisation décisionnelle, étant donné que les environnements déjà développés ne prennent pas en considération les aléas dus à l'incertitude. Il est impératif de créer une chaîne d'approvisionnement intégrée qui est à même de déplacer rapidement et répétitivement les bonnes quantités de produits aux clients. Pour ce faire, les auteurs proposent une nouvelle philosophie baptisée « *The No B/C Supply Chain Design and Operating Strategy* », celle-ci essaie de considérer simultanément

l'incertitude de la demande, les exigences en termes de délais, les limites de capacité de production et les décisions de stockage. C'est une stratégie de planification hybride : fabrication pour les stocks et fabrication sur commande (*Make-to-Stock / Make-to-Order*), elle vise à stocker des produits qui ont une capacité de production limitée et une grande incertitude dans la demande. Dans cette philosophie, les produits sont classés en catégories, les produits stockés sont ceux pour lesquels il y a plus de chances d'être vendus rapidement. La priorité de production est donnée aux produits ayant une grande incertitude de la demande et peu d'unités présentes en stocks. Cette politique permet de réduire la variété de produits et le nombre de produits présents en stocks, de réduire le niveau global des stocks, d'améliorer le service à la clientèle et d'éliminer des stocks non nécessaires.

Taluri *et al.* (1999) affirment que les structures multi-organisationnelles sont désormais considérés comme étant le moyen le plus efficace pour introduire de nouveaux produits rapidement, et ce au niveau de qualité et au coût espérés. Dans ce contexte, le processus de sélection des partenaires devient un élément critique de la chaîne de valeur. Les auteurs proposent un cadre de travail à deux phases permettant d'aider au processus de prise de décision quant à la sélection efficace et compatible d'un ensemble de partenaires.

La méthode de sélection des partenaires introduite par l'article se compose de deux étapes; la première étape permet de filtrer les partenaires en se basant sur des variables de décision internes aux candidats, ce qui permet de réduire considérablement le nombre de possibilités à considérer lors de la deuxième étape de l'analyse. Cette dernière utilise un programme mathématique multi-objectif utilisant des variables de décision externes aux candidats.

Plus spécifiquement, la première phase nécessite la prise d'un certain nombre de considérations :

- a. identification des types de processus d'affaires ;
- b. identification des candidats potentiels pour chaque type ;
- c. identification des intrants et des extrants à mesurer pour chaque type de processus ;
- d. collection des données pour les intrants et les extrants utilisés ;
- e. recherche des partenaires les plus efficents.

Il s'agit d'un modèle qui évalue l'efficience relative d'unités de prises de décision en présence de plusieurs mesures d'intrants / extrants. Pour une unité de prise de décision, le modèle maximise le ratio des extrants aux intrants en cherchant les poids à donner à chaque mesure.

La seconde phase est une approche multicritères, dans laquelle un modèle de programmation mathématique en nombres entiers multi-objectif est utilisé avec les partenaires choisis à l'issue de la première phase, il permet de trouver la combinaison des partenaires qui participent à la formation de la chaîne de valeur. Les objectifs considérés sont :

- a. la minimisation des coûts associés à la formation du partenariat ;
- b. la minimisation de la distance entre les partenaires afin de faciliter les interactions entre eux pour répondre aux changements ;
- c. minimiser le temps de création du réseau de la chaîne de valeur ;
- d. maximiser la compatibilité culturelle entre les partenaires.

D'autres objectifs peuvent être inclus par ailleurs. Il est à noter que les conversions entre les unités des différents objectifs sont en fait considérées comme des poids à donner aux déviations correspondantes. Le problème est sujet à la contrainte d'une seule combinaison de partenaires, ainsi qu'à des contraintes liant les objectifs à leurs valeurs optimales plus ou moins une certaine déviation. Un exemple illustrant l'applicabilité de

la démarche a été traité avec sept fournisseurs, sept fabricants et deux processus d'affaires : l'approvisionnement et la fabrication.

Cette approche a toutefois quelques limitations. En effet, si la première phase est faite de façon optimale, la solution finale obtenue à l'issue de la phase finale risque d'être sous-optimale car des partenaires potentiels peuvent être écartés de la course à l'issue de la première phase alors qu'ils pourraient donner plus de compatibilité. De plus, la détermination des intrants et des extrants pourrait influer sur le choix final des partenaires.

Toujours dans le cadre de l'analyse multicritère, Cheng *et al.* (2003) intègrent l'analyse multicritère avec un programme inexact linéaire en nombres mixtes avec une fonction-objectif unique pour aider à la prise de décision quant à la localisation d'une déchetterie et à l'allocation du flux des déchets, de façon à minimiser le coût total, et faire le meilleur compromis entre les facteurs tangibles et intangibles.

La résolution du problème se fait en deux étapes :

- a. un programme inexact linéaire en nombres mixtes est utilisé pour déterminer le flux des déchets au coût minimal pour chaque localisation potentielle. Ce programme a l'avantage de supporter les incertitudes sur les paramètres intrants. Les contraintes utilisées pour ce modèle incluent la période, l'équilibre des quantités de déchets, la capacité et les équipements disponibles aux différentes périodes. Les extrants de ce modèle sont le coût du flux des déchets, le coût total et l'intervalle de temps avant le développement d'une nouvelle déchetterie ;
- b. une analyse multicritère utilisant deux types d'intrants : les extrants de la première phase pour chacune des alternatives et les poids des critères subjectifs à considérer. Les critères utilisés sont le coût total, l'impact sur la pollution des eaux de la nappe phréatique et les effets sur l'agriculture, la faune et la flore.

L'approche a été illustrée par un exemple de gestion de déchets de la ville de Regina. Dans cet exemple, cinq méthodes d'analyse multicritères ont été utilisées pour donner plus de flexibilité aux décideurs quant au choix de la méthode à préconiser.

Tsiakis *et al.* (2001) traitent le problème de conception de réseaux manufacturiers multi-produits et multi-échelons. Le réseau est constitué de sites manufacturiers où sont fabriqués les différents produits, d'entrepôts et de centres de distribution où lesdits produits sont stockés, et enfin de zones clients où sont livrés les produits. Les localisations des sites manufacturiers et des zones clients sont supposées être connues, cependant celles des entrepôts et des centres de distribution ne sont pas connues *a priori* et doivent être choisies parmi les localisations potentielles. Le problème est formulé avec un programme mathématique linéaire en nombres mixtes; il permet de déterminer le nombre, la localisation, les capacités des entrepôts et des centres de distribution à établir, les liens de transport à établir, les flux et les taux de production des différents produits. L'objectif étant de minimiser le coût total annualisé de l'ensemble du réseau en considérant les coûts de mise en course et les coûts d'opérations.

Plus spécifiquement, les auteurs traitent le cas du régime permanent du problème, dans lequel la demande ne varie pas en fonction du temps (mais possiblement incertaine), et la production ainsi que les flux de produits sont des moyennes dans le temps. Dans le modèle mathématique, les variables binaires rendent compte de la localisation des entrepôts et des centres de distribution ainsi que des liens entre les sites, quant aux variables continues, elles rendent compte du taux de production et des différents flux de produits ainsi que des capacités des sites. La fonction-objectif est la somme des coûts fixes liés à l'établissement des sites, des coûts de production, des coûts de manutention et des coûts de transport ; ces derniers respectent l'économie d'échelle.

Pour tenir compte de l'incertitude dans l'optimisation du réseau logistique considéré, les auteurs adoptent l'approche basée sur la planification de scénarios ; celle-ci utilise un

nombre réduit de scénarios et vise à trouver une solution robuste qui donne de bons résultats sous toutes les conditions, avec une certaine probabilité pour chacun des scénarios, la fonction-objectif minimise l'espérance mathématique des coûts.

Pour illustrer la méthode, les auteurs traitent un exemple avec trois sites manufacturiers, 14 produits, six entrepôts, 15 centres de distribution et 18 zones clients, et ce dans le cas d'une demande déterministe puis dans le cas d'une demande aléatoire avec trois scénarios équiprobaables.

Yusuf et al. (2004) voient dans l'agilité l'une des composantes clés pour atteindre les objectifs compétitifs d'une chaîne d'approvisionnement. D'après les auteurs, l'agilité peut être discutée selon deux dimensions : l'étendue de l'information et la portée des activités mises en réseau avec les autres compagnies; l'étendue de l'information va de « personne à personne » jusqu'à la globalité, tandis que la portée des activités va des messages électroniques jusqu'à l'intégration basée sur les technologies Web. Une chaîne d'approvisionnement agile doit atteindre les plus hauts niveaux de chaque dimension. Une autre vision de l'agilité peut être évaluée en termes de la phase atteinte sur trois dimensions interdépendantes : l'interaction avec le client, les atouts de configuration et l'accroissement de la connaissance. Les exigences pour avoir une chaîne d'approvisionnement agile sont : la possession de communautés de clients, l'adhésion à des coalitions de ressources et la possession d'une force de travail qui travaille dans une communauté d'experts. Dans ce contexte particulier, les auteurs proposent un modèle conceptuel pour évaluer les aptitudes d'une chaîne d'approvisionnement agile. Le modèle est composé de quatre dimensions :

- a. La pratique de la chaîne de valeur ;
- b. Les objectifs compétitifs ;
- c. L'impact des moteurs de changement ;
- d. La performance des affaires.

Les configurations de l'intégration des chaînes logistiques diffèrent selon les compagnies ; les pratiques doivent aller des alliances conditionnelles aux relations maîtres-serveurs entre les fournisseurs et les clients, et à la collaboration basée sur l'Internet. Or dans la littérature, les auteurs relèvent trois configurations dominantes : le partenariat traditionnel, la chaîne d'approvisionnement allégée (*Lean Supply Chain*) et la chaîne soutenue par l'échange des compétences. Basé sur leur modèle conceptuel, ils identifient les impacts relatifs des trois configurations sur la performance des affaires en fondant leurs conclusions sur une étude menée à base de questionnaire auprès de 600 compagnies manufacturières britanniques. Les résultats obtenus montrent entre autres que :

- a. le partenariat traditionnel dans la formation des alliances reste populaire ;
- b. les chaînes d'approvisionnement qui mettent l'accent sur l'échange des capacités et l'intégration informatique sont loin d'être réalisées ;
- c. les relations commerciales à long terme avec les clients et les fournisseurs sont plus populaires alors que l'intégration des données et la coalition des ressources ne sont pas à l'ordre du jour dans les industries ;
- d. la collaboration clients / fournisseurs et l'intégration des données sont étroitement liées aux objectifs compétitifs ;
- e. les compagnies jouent la sécurité et réservent leurs compétences, processus et données pour elles-mêmes.

Yildirim *et al.* (2005) présentent une formulation mathématique multi-périodes d'un problème de production et d'approvisionnement (*sourcing*) dans le cas d'une demande stochastique. Le problème considère un manufacturier qui dispose d'un nombre d'usines et de sous-traitants, avec des coûts de production, des capacités et des délais d'approvisionnement différents. L'objectif est de répondre à la demande en différents produits selon les niveaux de service préconisés par les clients tout en minimisant les coûts encourus de stockage et de production durant tout l'horizon, la demande étant aléatoire. La méthodologie est basée sur une approche de programmation mathématique,

le caractère aléatoire de la demande et les contraintes probabilistes du niveau de service sont intégrés dans un programme mathématique déterministe en ajoutant des contraintes linéaires additionnelles. Les auteurs montrent que cette approche mène aux mêmes résultats que la politique du stock de base (*base stock policy*) pour une seule source. Pour le cas de plusieurs sources, les résultats sont similaires à la politique du seuil critique (*threshold subcontracting policy*).

Dans ce modèle, les variables de décision sont les quantités à fabriquer, les périodes et les sites où il faut fabriquer ainsi que le niveau de stocks à chaque période. La méthode de résolution consiste à résoudre un problème mathématique déterministe à chaque période sur tout l'horizon en utilisant le problème mathématique linéaire équivalent au problème mathématique dynamique difficile à résoudre. À chaque résolution sur une période, les résultats sont utilisés pour résoudre le problème de la période suivante.

Les auteurs ont ensuite comparé les résultats ainsi obtenus avec d'autres politiques bien connues dans deux cas spéciaux : la fourniture exclusive avec ou sans délais d'approvisionnement en utilisant la politique du stock de base (*base stock policy*), et la fourniture multiple avec demande stationnaire en utilisant la politique du seuil critique (*threshold subcontracting policy*). Les résultats obtenus sont similaires ou très proches dans les deux cas.

Dans leur article, Yan *et al.* (2003) proposent un modèle stratégique de production-distribution pour la conception d'une chaîne d'approvisionnement, prenant en compte la nomenclature de produits. Des contraintes logiques sont utilisées pour représenter cette nomenclature ainsi que des relations associées entre les principales entités de la chaîne logistique (fournisseurs, sites d'assemblage et centres de distribution). Les auteurs montrent comment formuler ces relations en tant que contraintes logiques dans un modèle de programmation en nombres mixtes et ce, en se basant sur la représentation des règles logiques selon la Forme Normale Conjonctive (*Conjunctive Normal Form*,

CNF). Les auteurs ont ensuite illustré par un exemple réel pour démontrer la viabilité du modèle.

L'article souligne l'abondance des recherches sur les chaînes d'approvisionnement qui se basent sur la modélisation en nombres mixtes sans pour autant inclure des considérations de la nomenclature de produits, alors que celle-ci fournit des informations clés sur la coordination des activités entre les planifications d'achat et de production. L'introduction des contraintes de la nomenclature serait selon les auteurs un moyen raisonnable pour traiter du problème de sélection des fournisseurs et de sous-traitants d'assemblages, surtout si les différents acteurs de la chaîne opèrent dans des endroits géographiquement éloignés. Le modèle proposé a pour objectif de choisir les fournisseurs, les localisations des sites d'assemblage et les centres de distribution. Les variables de décision sont le nombre d'unités de chaque produit à transporter entre les sous-traitants et les fournisseurs, entre les sous-traitants et les centres de distribution et entre les centres de distribution et les zones clients. L'objectif du modèle est de minimiser les coûts d'achat, de production, de transport, de distribution et les coûts fixes d'ouverture et de fonctionnement des installations. Le problème est sujet aux contraintes des besoins en différents produits, aux limites de capacité chez les différents acteurs, au respect du niveau de service exprimé par la portion de la demande à satisfaire, aux contraintes logiques de la nomenclature de produits et les contraintes de consistance logiques. Ces contraintes logiques sont par la suite transformées et intégrées dans un modèle linéaire en nombres mixtes. Une illustration a été faite et une analyse de sensibilité a été étudiée.

L'article de Cordeau *et al.* (2007) propose une nouvelle formulation générale et flexible des problèmes de design du réseau logistique, dans un contexte déterministe, dans un pays donné, et pour une période unique. La formulation intègre la localisation et le choix de capacité pour les usines et les entrepôts, ainsi que le choix des fournisseurs et la sélection du mode de transport, l'assignation et le flux des produits. Les auteurs

décrivent ensuite deux approches pour la résolution du problème : une approche basée sur la méthode de séparation et d'évaluation progressive (*Branch-and-Bound*) de l'algorithme du simplexe, et une approche basée sur la méthode de décomposition de Benders. Les résultats expérimentaux obtenus par les deux approches sont présentés; ils démontrent que la méthode de la décomposition de Benders est plus avantageuse pour les problèmes difficiles. Ils montrent aussi l'amélioration que l'ajout de certaines inégalités valides apporte à la résolution du modèle que cela soit pour l'une ou l'autre des méthodes.

La structure du modèle permet d'imposer plusieurs types de configuration telles que les contraintes de fourniture exclusive; il peut être facilement extensible aux problèmes multi-périodes ou pour une demande stochastique. D'autre part, il peut être résolu par un solveur commercial et est approprié à la résolution par la méthode de décomposition de Benders. Il s'agit de minimiser la somme de tous les coûts fixes et variables. Les coûts variables incluent les coûts de transport, d'acquisition, de production et de stockage. Les contraintes rendent compte des flux de matières premières et de produits à travers les usines et les entrepôts, du respect de la demande, du respect de la capacité des fournisseurs, des usines et des entrepôts ainsi que la capacité de transport. Les auteurs affirment que d'autres contraintes peuvent être ajoutées pour rendre compte de la réalité, telles que les commandes minimales qui justifient l'établissement du contrat ou permettent de bénéficier de réductions. D'autre part, il est possible de forcer l'ouverture (ou non) de sites dans le modèle si le management impose l'ouverture d'un site quelconque.

Les données (paramètres) du problème ont été générées aléatoirement, tout en s'assurant que la valeur aléatoire générée est comprise dans un intervalle de valeurs réalistes. Les modèles ont été testés pour plusieurs scénarios par rapport à la sous-traitance exclusive et aux coûts fixes de transport. Ils ont montré que les deux approches sont toutes les

deux performantes, et que toutefois la méthode de décomposition de Benders est légèrement avantageuse pour les problèmes très larges.

L'objectif principal de la recherche de Goetschalckx *et al.* (2002) est de démontrer les économies substantielles que peut générer l'intégration stratégique du design du réseau d'une chaîne d'approvisionnement avec la détermination tactique de l'allocation production-distribution et des prix de transfert dans un réseau logistique international. Le problème logistique posé est la détermination de la configuration optimale d'un système de production-distribution ainsi que les prix de transfert entre les filiales d'une compagnie étant donné un ensemble de fournisseurs potentiels, un ensemble de sites de production et de centres de distribution avec plusieurs configurations possibles, le tout en satisfaisant la demande déterministe du client et en maximisant le profit après impôt de la compagnie.

Les auteurs proposent deux modèles de résolution : le premier se focalise sur l'établissement des prix de transfert dans une chaîne d'approvisionnement à l'échelle internationale avec l'objectif de maximiser le profit après impôts; les contraintes mandatées par les autorités douanières créent une formulation bilinéaire de la modélisation; une résolution heuristique très efficace du modèle a été décrite, cet algorithme alterne l'optimisation des prix de transfert et celle des flux de matériel. Le second modèle se concentre sur l'allocation d'un système de production-distribution dans un pays unique avec une demande saisonnière. Les auteurs ont développé une méthodologie intégrée basée sur les méthodes de décomposition primales pour les problèmes mixtes en nombres entiers. Une étude relevant de l'industrie d'emballage a été faite pour illustrer le modèle.

Lakhal *et al.* (2001) présentent un modèle visant à faciliter la prise de décision stratégique quant à la structure de la chaîne d'approvisionnement d'une organisation. Le modèle de programmation mathématique en nombres mixtes assume un certain nombre

d'hypothèses concernant les paramètres de production, les coûts et les fonctions de la valeur. Il permet d'optimiser le réseau entier en maximisant la valeur ajoutée de toutes les activités internes de l'entreprise, obtenue en soustrayant les coûts des intrants (produits entrants et ressources utilisées) des revenus générés par les produits finis. Les auteurs font mention de l'aspect stratégique qui pousse les entreprises à modeler leur chaîne d'approvisionnement en fonction de leurs compétences clés. Ils concluent leur article en soulignant la principale limitation de leur modèle qui réside dans son caractère statique, or les défis auxquels les entreprises font face leur imposent d'évoluer dans un environnement dynamique, ce qui mérite d'être traité dans les études futures.

Sen *et al.* (2004) présentent une étude sur les stratégies de positionnement des chaînes d'approvisionnement (*Supply Chain Positioning Strategy*, SCPS). Ces stratégies ont été définies, analysées et classifiées. En effet, une stratégie de positionnement de chaîne d'approvisionnement correspond aux actions prises par une entreprise pour répondre à la demande des clients, elles n'incluent pas seulement les activités de production mais aussi les opérations à travers la chaîne logistique tels que la livraison et l'achat. Dans ce contexte, les auteurs présentent les stratégies « Fabrication pour stockage », « Fabrication sur commande » et « Montage sur commande » (*Build-to-Stock, Build-to-Order, Assemble-to-Order*). Dans la modélisation, les auteurs assument que la demande est aléatoire et suit une distribution de Poisson, et que l'erreur des prévisions suit une loi normale. L'objectif du modèle est de minimiser les coûts de stockage. Les variables de décision sont les ratios d'intégration verticale des stratégies « Fabrication pour stockage » et « Fabrication sur commande » dans chacune des localisations de la chaîne. Les auteurs discutent ensuite de la dynamique de la chaîne d'approvisionnement. Celle-ci peut être définie comme étant la déformation de l'information et la fluctuation de la demande dans la chaîne. Le modèle proposé a été ensuite étendu pour intégrer la dynamique dans la stratégie de positionnement. L'étude analyse plus spécifiquement l'impact de la dynamique causée par la prévision de la demande, les retards et la capacité sur diverses stratégies. Pour ce faire, des modèles de simulation ont été

construits pour évaluer les profits et les niveaux de service au client. Les expérimentations ont montré que la modélisation mathématique combinée avec les modèles de simulation est un outil très efficace pour aider les compagnies à établir leur stratégie de manière optimale. L'approche a été appliquée dans le cas d'une industrie électronique, ce qui confirme son applicabilité et son efficacité.

Jung *et al.* (2004) s'intéressent à la gestion de la chaîne d'approvisionnement sous une demande aléatoire. Ils affirment que des stocks additionnels amélioreraient le niveau de satisfaction du client, mais entraîneraient des coûts de stockage importants, d'où l'importance d'un compromis entre la satisfaction du client et les coûts de stockage. Ce compromis peut être posé comme un problème d'optimisation stochastique multi-étape dans lequel les niveaux de production et de stocks sont les principales variables de décision. Selon les auteurs, les solutions analytiques déjà développées dans ce contexte sont très simplistes et n'arrivent pas à refléter les problèmes réels de la chaîne d'approvisionnement. Pour cela, les auteurs proposent une approche pour la détermination des niveaux de stocks de sécurité, afin de pouvoir utiliser ceux-ci dans une stratégie classique de planification multi-période, cette stratégie prend en compte la nature stochastique du niveau de satisfaction du client.

Dans leur modèle, les auteurs considèrent une compagnie ayant plusieurs sites de production avec plusieurs lignes et différentes capacités. Cette compagnie fabrique plusieurs produits classifiés en diverses familles. Les clients sont eux aussi regroupés en régions. La distribution de probabilité de la demande est estimée à partir des données historiques. Pour chaque produit, la compagnie s'est fixée un certain niveau de satisfaction du client à atteindre, l'objectif est de déterminer le niveau de stock de sécurité de chaque produit dans chaque site de production de manière à minimiser la valeur espérée du coût de la chaîne d'approvisionnement. La fonction objectif se compose de trois termes : le coût de production de la première période, les coûts de production, de stockage et de pénurie des autres périodes de planification et de la

pénalité due à la déviation des niveaux de service par rapport aux niveaux de service visés pour chaque produit. Le problème est sujet aux contraintes de production, de chaîne d'approvisionnement, de non négativité des variables, des bornes supérieures (capacités) et de satisfaction de clients.

L'approche d'optimisation repose sur la résolution de deux sous-problèmes :

- a. un premier sous-problème se basant sur une optimisation stochastique visant à minimiser la somme pondérée des déviations par rapport aux niveaux de service désirés. La résolution utilise la simulation de Monte-Carlo ;
- b. un modèle de planification déterministe qui détermine les niveaux de production et de stocks.

Les auteurs insistent sur le fait que la solution ainsi obtenue sera sous-optimale étant donnée la stratégie de résolution adoptée. Cependant, la qualité des solutions est très acceptable. Afin de démontrer la performance de la stratégie utilisée dans la résolution de problèmes réalistes, une étude de cas tirée d'un grand producteur de polyéthylène a été développée. Pour conclure leur article, les auteurs soulignent que l'une des limitations de l'approche présentée réside dans les temps de calcul très grands quant à la résolution de problèmes de grande envergure.

La thèse de Hadj-Hamou (2002) propose une contribution au développement de méthodes d'outils d'aide à la conception de produits à forte diversité et de chaînes logistiques de production et de distribution dans le but de réduire les coûts et les délais de production, de stockage et de distribution. Dans sa thèse, il développe un modèle par la programmation linéaire en nombres entiers qui permet d'optimiser la structure de la chaîne logistique, de configurer les installations du réseau et de spécifier leurs activités. De manière parallèle, le modèle d'optimisation permet d'évaluer les solutions de conception de produit par la recherche de la meilleure instance de la nomenclature

générique. C'est un modèle déterministe multi-produits de planification stratégique de réseaux multi-sites de production et de distribution, sur un horizon multi-périodes.

1.5 Conclusion

Dans leur revue de littérature, Vidal et Goetschalckx (1997) et Yan *et al.* (2003) soulignent le manque de modèles prenant en considération les contraintes de la nomenclature de produits. Ils argumentent que la nomenclature de produits devrait être considérée comme un lot de contraintes dans un modèle stratégique de production-distribution lors de la conception du réseau d'une chaîne d'approvisionnement, car elle fournit des données-clés pour la coordination du comportement des fournisseurs avec les activités de production et de distribution. Cette considération est d'autant plus importante que les acteurs de la chaîne sont situés dans plusieurs pays géographiquement éloignés.

Dans le cadre de ce projet, nous développons un modèle de conception de la chaîne d'approvisionnement à partir d'une nomenclature de produits, étant donné un ensemble de fournisseurs et de sous-traitants pour chacune des composantes. De plus, nous ajoutons un autre élément-clé, soit celui de la modularité dans la conception du réseau de la chaîne logistique, ce qui, au meilleur de notre connaissance, n'a pas été fait dans la littérature. Nous consacrerons le chapitre suivant à la notion de modularité, et nous expliquerons la manière de l'intégrer dans notre modélisation.

CHAPITRE 2

LA MODULARITÉ

2.1 Introduction

La modularité est actuellement une question-clé dans l'industrie. Même si ce concept n'est pas nouveau, son importance est devenue de plus en plus notable durant les dernières années, notamment dans le secteur automobile (Salerno et Dias, 2000).

Le développement de l'interchangeabilité et la standardisation des pièces sont les précurseurs de la modularité. Pour la construction de navires de guerre au XV^e siècle, on utilisait déjà des composants standardisés. Durant la seconde guerre mondiale, la modularité a été étudiée de près pour la construction des bateaux allemands « U-Boats ». Elle a été également utilisée dans l'industrie automobile et dans la construction de cargos. La Commission Américaine a vu que la pratique employée par des fabricants américains qui consiste à fabriquer des composants à des points centraux en vue d'être assemblées ailleurs peut être adaptée à la construction de navires (Arnheiter et Harren, 2006).

La toute première utilisation du mot « production modulaire » remonte à Starr (1965). L'auteur a comparé le comportement des systèmes classiques de production avec les pratiques de production modulaire ou combinatoire. Aujourd'hui, un grand nombre d'industries utilise la modularité dont l'industrie automobile, les ordinateurs personnels, les outils de machinerie, la génération d'électricité, *etc.* Les constructeurs d'ordinateurs préfèrent la modularité car elle réduit grandement le temps et le coût d'assemblage, en plus de permettre une personnalisation de masse.

Dans ce chapitre, nous allons voir comment la littérature traite de la modularité. En particulier, nous allons mettre le point sur le concept de modularité en explicitant ses différentes définitions selon le domaine d'application. Ensuite, nous nous attarderons sur le volet qui nous intéresse particulièrement, celui des chaînes d'approvisionnement, et nous essayerons d'expliquer comment la modularité peut transformer la structure du réseau de la chaîne logistique.

2.2 Le concept de modularité

Une étude particulièrement intéressante qui offre une revue assez complète de la modularité est présentée dans l'article de Calcagno (2002). Dans cet article, nous trouvons une discussion en profondeur du concept de modularité à travers une analyse critique de la littérature à ce sujet.

L'une des toutes premières définitions des modules est donnée par Baldwin et Clark (2000). Ils sont définis comme étant des parties conçues et produites indépendamment les unes des autres, qui fonctionnent ensemble d'une façon homogène et cohérente. En outre, de nouveaux modules peuvent être ajoutés, les anciens peuvent être améliorés. Les auteurs ajoutent qu'un module est une unité dont les éléments structurels sont fortement connectés entre eux et relativement faiblement connectés aux éléments des autres unités.

De ce fait, la partition d'un produit en un ensemble de modules augmente le nombre d'options possibles en combinant un nombre de modules de plusieurs manières. Et la modularité traite de la façon dont les ensembles de produits sont groupés ensemble et de la manière dont ils réagissent et communiquent entre eux, d'où l'importance de trois mots-clés : la communication, l'interaction et le regroupement de pièces. Ce qui veut dire que la modularité devient un problème de langage. La modularité est aussi un problème de degré, car un système complexe peut être modulaire à des degrés

différents ; ceci relève la question de la mesurabilité du degré de modularité, de traçage de ses trajectoires d'évolution vers des configurations plus ou moins modulaire.

Selon Calcagno (2002), la modularité a été abordée par la littérature selon trois axes :

- a. modularité dans le design ;
- b. modularité dans la production ;
- c. modularité dans l'organisation inter-firmes.

La figure 6 montre les trois aspects majeurs de la modularité dans la littérature selon Calcagno (2002) avec les références qui constituent le fondement de chacun des aspects.

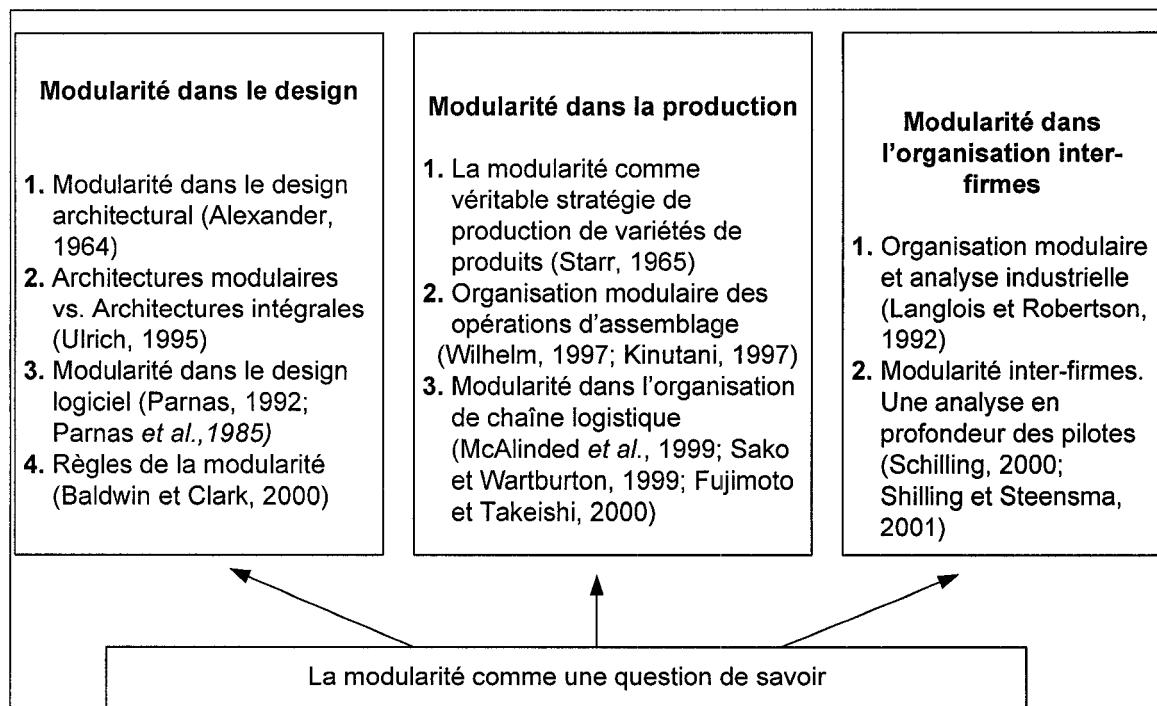


Figure 6 Les trois aspects de la modularité traités par la littérature
(Source : adapté de Calcagno, 2002)

Une classification quasi-similaire des types de modularité a été identifiée par Baldwin et Clark (1997) :

a. Modularité en production

Elle explose le produit en composants et permet la standardisation des pièces.

Ces composants sont fabriqués d'une manière indépendante les uns des autres avant d'être assemblés à l'étape finale.

b. Modularité en design

Avec une architecture globale et des interfaces standard, les modules sont conçus indépendamment les uns des autres, puis combinés en vue de créer le système complet.

c. Modularité en utilisation

On parle de ce type de modularité quand le produit permet aux consommateurs eux-mêmes de combiner les composantes pour arriver à un système complet.

Wolters (1999) distingue aussi trois types de modularité. En plus de la modularité de produits telle que mentionnée par Baldwin et Clark (1997), il considère la modularité de processus et la modularité des chaînes d'approvisionnement. Il affirme qu'un produit est dit un « module » s'il est physiquement une portion distincte d'un produit qui a son propre design et qui a une fonction bien définie. Toujours dans le cadre de la modularité de produits, il souligne l'importance des définitions données par Ulrich (1995). Celui-ci distingue entre les composants d'un produit et la façon dont ils sont intégrés. Celle-ci définit l'architecture du produit qui est finalement le schéma en vertu duquel les éléments physiques d'un produit sont disposés en « grosses » pièces et celui qui définit leur interaction. Une architecture est totalement modulaire s'il y a autant de composantes physiques que de composantes fonctionnelles et s'il y a un découplage d'interfaces physiques entre les composantes qui interagissent, ce qui signifie qu'un changement qui affecte un composant n'affecte pas obligatoirement les autres composants. Quant à la modularité de processus, Wolters affirme qu'il s'agit d'une unité élémentaire de travail qui n'a pas de sous-structure externe visible, qui peut opérer dans des contextes

différents et qui produit le même extrant quand elle est répétée. Le troisième type de modularité identifiée par Wolters est celle des chaînes d'approvisionnement, nous y reviendrons plus en détail au paragraphe suivant dédié à la modularité dans la conception des chaînes logistiques.

Arnheiter et Harren (2006) soulignent l'apport considérable de la modularité mais font remarquer le manque d'entente sur la terminologie à ce sujet entre les managers et les chercheurs, ce qui complique la comparaison des stratégies modulaires. Pour pallier ce problème, les auteurs ont classifié la modularité en quatre types distincts. Ils insistent sur le fait que ces quatre types doivent être considérés avec précaution par les managers avant de procéder à une stratégie modulaire.

a. Modularité de production

Il s'agit d'une technique de production de produits finis en utilisant un nombre restreint de sous-assemblages pré-assemblés (ou modules). Les compagnies utilisent ce type pour faciliter la personnalisation de masse en produisant plusieurs configurations alternatives de produits (Pine (1993) et Baldwin et Clark (1997)). Elles peuvent utiliser les mêmes modules sur plusieurs produits dérivés. Cette technique est également utilisée lorsque l'assembleur coordonne seulement la production quand l'assemblage des modules est fait par ses partenaires, elle est utilisée notamment par Volkswagen, Ford, GM, Daimler Chrysler, *etc* (Arnheiter et Harren (2006)). Et puisque la construction de modules est très souvent sous-traitée, la fabrication modulaire peut simplifier la chaîne d'approvisionnement et réduire la quantité de travail requise dans l'usine pour faire l'assemblage du produit fini.

b. Modularité d'utilisation de produits

Ce type de modularité implique l'utilisation de modules pour faciliter la personnalisation de produit par le consommateur. Les modules standardisés sont

vendus soit avec l'équipement original, soit comme articles après la vente. Ces modules peuvent être remplacés, supprimés, stockés avec d'autres modules choisis par l'utilisateur.

c. Modularité de durée de vie limitée

Ce type de modularité consiste à utiliser des modules jetables ayant des caractéristiques distinctes. Les modules doivent être remplaçables aisément. Les interfaces doivent être bien définies et les points de connexion des modules interchangeables doivent être accessibles. La taille et la géométrie du module à durée de vie limitée doivent être restreintes de façon à ce que seulement les pièces usées soient remplacées. Ces modules sont extrêmement sensibles au coût puisqu'il faut les remplacer plusieurs fois durant leur cycle de vie. D'autre part, leur design doit tenir compte des questions d'ordre environnemental.

d. Modularité d'accès aux données

Ce type inclut les DVD, CD, cartes mémoires, clés USB, *etc.* L'objectif de ces systèmes est de stocker les informations indépendamment du système dans lequel elles sont utilisées. Ces modules doivent être durables, capables de supporter un usage répété et interchangeables pour une large gamme de systèmes.

En ce qui nous concerne dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à la modularité dans la production. Arnheiter et Harren (2005) et Arnheiter et Harren (2006) affirment qu'un module est un sous-assemblage autonome qui est connecté à d'autres modules en utilisant des interfaces communes. Les modules peuvent contenir une large gamme de produits à valeur ajoutée dont la complexité s'étend du plus simple au plus complexe. En accroissant la taille et la complexité de chaque module, il est possible de simplifier grandement la chaîne d'approvisionnement en réduisant le nombre de pièces individuelles à manipuler à quelques sous-assemblages. De ce fait, la modularité est l'utilisation des modules pour faciliter l'assemblage, elle

peut être utilisée pour simplifier et faciliter la fabrication des produits. Selon Ulrich (1995), la fabrication modulaire consiste à appliquer la normalisation d'unités ou les principes de substitution afin de créer des composantes modulaires qui peuvent être configurés dans une large gamme de produits finis dans le but de répondre aux besoins spécifiques du client.

Globalement, on trouve dans la littérature deux aspects prédominants de la modularité en production. Il s'agit tout d'abord d'une nouvelle stratégie pour satisfaire la demande de la variété par le client car la modularité permet de combiner les produits d'un nombre maximum de manières. En effet, l'utilisation de modules permet de réduire le temps de production, les coûts, les efforts d'ingénierie et les investissements. De plus, elle permet aux firmes d'être plus réactives par rapport à la clientèle et de tirer profit de l'économie d'échelle. D'autre part, la modularité est une tendance à réorganiser les processus de production à l'intérieur de l'entreprise et au niveau de toute la chaîne d'approvisionnement, de ce fait, elle est bénéfique à l'assembleur final et au sous-traitant. En effet, l'assembleur final peut tirer son épingle du jeu en s'assurant plus d'efficience, en simplifiant les processus d'assemblage et en bénéficiant du soutien des sous-traitants. De son côté, le sous-traitant peut trouver dans la modularité la réponse à sa recherche de croissance et à son désir de ne pas être marginalisé.

Tu *et al.* (2004) affirment que les raisons derrière ce grand mouvement de modularité sont : la rapidité des changements technologiques, les progrès de l'information et des technologies de réseaux qui permettent aux clients de demander une plus grande variété de produits à bas prix et la complexité croissante des technologies reliées aux produits. Les auteurs affirment que l'assemblage à partir de modules standard permet aux fabricants de réduire considérablement l'incertitude et la complexité, ainsi que le temps de développement de produits et les coûts globaux.

Dans leur article, Arnheiter et Harren (2005) résument les motivations derrière la modularité selon le secteur d'activité des firmes. Ces motivations sont données dans le tableau IV.

Tableau IV

Raisons derrière la modularité selon le secteur d'activité
(adapté d'Arnheiter et Harren, 2005)

Secteur d'activité	Raisons de la modularité
Montage de bicyclettes (e.g. NBIC, Huffy)	Minimiser les coûts finaux
Ordinateurs personnels (e.g. Dell, Gateway)	Permettre la personnalisation de masse Réduire les coûts d'assemblage
Automobile (e.g. Daimler-Chrysler, VW, Dana)	Réduire les dépenses en capital Réduire les coûts directs de main d'œuvre et de production Simplifier la chaîne logistique
Aéronautique (e.g. Airbus)	Réduire les dépenses en capital Réduire les coûts directs de main d'œuvre et de production Simplifier la chaîne logistique
Outils portables sans-fil	Faciliter la personnalisation du produit par le client

À toutes ces raisons, Ernst et Kamrad (2000) ajoutent que les entreprises trouveront dans la production modulaire la réponse adéquate à leur volonté de combiner parfaitement la flexibilité pour les produits finis avec la standardisation des composants.

Si la quasi-totalité des contributions vantent les mérites de la modularité en termes de réduction des coûts, des dépenses en capital et des temps de développement, et aussi en termes de capacité à promouvoir la personnalisation de masse, la standardisation et la flexibilité, très peu d'études ont été menées pour montrer ses inconvénients. L'une des rares études faites à cet effet est l'article d'Arnheiter et Harren (2006) dans lequel les auteurs identifient huit dimensions de qualité et examinent l'effet de la modularité sur chacune d'entre elles. Il ressort de cette étude que la modularité a des effets positifs et négatifs sur l'esthétique, la perception de la qualité par le consommateur, la performance, la conformité aux spécifications, les caractéristiques, l'utilisabilité, la fiabilité et la durabilité d'un produit. Ces effets sont résumés dans le tableau V.

TableauV

Effets de la modularité sur les dimensions de la qualité
 (Adapté d'Arnheiter et Harren, 2006)

Dimension	Impact positif potentiel de la modularité	Impact négatif potentiel de la modularité
Esthétique	Améliore la cohérence cosmétique des sous-assemblages	Le besoin d'interfaces bien définies limite la créativité dans le design
Qualité perçue	Pas d'avantage évident	Usage excessif des mêmes modules à travers plusieurs lignes de production
Performance	Pas d'avantage évident	L'utilisation de modules génériques peut limiter la performance du système
Conformité	Si le fournisseur est l'extension de l'assembleur, la conformité sera au bon niveau	Pas d'effet négatif évident différent de ceux associés à la sous-traitance
Caractéristiques	N'améliore pas la qualité des caractéristiques, mais facilite l'ajout d'autres caractéristiques et permet la personnalisation de masse	Pas d'effet négatif évident
Résistance	Rapidité de service améliorée	Dépenses inutiles dues au remplacement d'un module alors qu'un seul élément est défectueux
Fiabilité	Permet de regrouper des composantes en fonction de leur fiabilité. Permet aussi de développer et de tester des modules de façon indépendante	Pas d'effet négatif évident
Durabilité	Permet des mises à niveau peu compliquées	Pas d'effet négatif évident

Les auteurs affirment que pour bien comprendre l'impact des designs modulaires, les managers devraient établir un plan de pondération pour les différentes dimensions de la qualité, en les classant selon leur importance relative du point de vue client.

Arnheiter et Harren (2005) affirment que pour bien comprendre les avantages et les inconvénients de la modularité, il est impératif de prendre en considération les points de vue de l'assembleur et du fournisseur. Ils dressent une liste des avantages et des risques liés à la modularité, ceux-ci sont présentés au tableau VI.

Tableau VI

Avantages et risques liés à la modularité
(Adapté d'Arnheiter et Harren, 2005)

Assembleur		Fournisseur	
Avantages	Risques	Avantages	Risques
<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des besoins en capital - Réduction des besoins en travail direct - Réduction de temps de lancement de nouveaux produits - Facilitation de la personnalisation de masse - Augmentation de la productivité - Simplification du réseau de la chaîne d'approvisionnement 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des barrières d'entrée pour les concurrents - Pertes de certains aspects du contrôle du design - Limitations concernant le design - Manque de compétences chez les fournisseurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation des barrières d'entrée pour les concurrents - Contrats à long terme - Les fournisseurs consolident leur position sur le marché 	<ul style="list-style-type: none"> - Les modules peuvent devenir des produits de base - Augmentation du travail direct - Augmentation du besoin en capital - Les fournisseurs incapables de produire des modules perdent leur part du marché

Maintenant que nous avons bien cerné le concept de modularité, et plus particulièrement la modularité dans la production, nous essayerons d'assimiler sa présence dans la conception des chaînes d'approvisionnement, en mettant l'accent notamment sur la corrélation entre la modularité et la structure du réseau de la chaîne logistique.

2.3 La modularité dans la conception des chaînes d'approvisionnement

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu qu'il y a un accord quasi-total sur le fait que la modularité est un catalyseur de la personnalisation de masse, de la flexibilité stratégique et de l'innovation. Plusieurs auteurs distinguent entre la modularité de produits et celle des processus. Un autre type de modularité a attiré l'attention récemment, celui de la modularité des chaînes d'approvisionnement (Wolters, 1999).

L'idée derrière la modularité des chaînes d'approvisionnement est que non seulement les produits et les processus peuvent être modularisés, mais la modularité peut être

également appliquée à la gestion des chaînes logistiques. De façon similaire aux modularités de produits et de processus, une chaîne d'approvisionnement modulaire permet de substituer les différentes versions de composantes fonctionnelles en vue de créer des variantes de chaîne d'approvisionnement avec différentes fonctionnalités ou différents niveaux de performance. Par conséquent, un module (ou un composant) de chaîne d'approvisionnement peut être défini comme une entité distincte de l'ensemble de la chaîne qui a son propre design et qui a une fonction bien définie.

Wolters (1999) fait une distinction explicite entre un module de processus intra-organisationnel et un module de chaîne d'approvisionnement inter-organisationnel. Le processus se rattache aux technologies et aux procédures utilisées pour produire et livrer des produits et des services à l'intérieur d'une organisation, alors que le module de chaîne d'approvisionnement se rattache aux choix et à la conception du réseau environnant une organisation. Un module de processus rend compte de la façon dont un produit est manufacturé, tandis qu'un module de la chaîne précise le partenaire qui le fait. Dans une structure inter-organisationnelle modulaire, un module change continuellement et résout les problèmes à travers des processus auto-organisés interconnectés et bien coordonnés. En outre, une firme est capable d'utiliser une architecture modulaire de produit pour coordonner un réseau ou une constellation de partenaires, en transformant le choix d'une architecture modulaire en stratégie de coordination.

Fine (1998) souligne le lien existant entre le choix d'architecture modulaire et l'adoption d'une stratégie de coordination. Il affirme qu'un avantage concurrentiel réel peut être tiré par les organisations qui savent comment concevoir et coordonner leur chaîne d'approvisionnement, c'est-à-dire comment configurer efficacement les modules de leur chaîne logistique, en décidant quels modules fabriquer et quels modules acheter, ceux qui constituent la compétence principale de l'organisation et ceux qui sont périphériques. Dans ce cadre, la modularité agit sur la performance du réseau qui peut

être définie comme étant la flexibilité stratégique qui détermine la capacité d'une organisation à répondre efficacement à la variabilité et à la volatilité des marchés.

Dans son article, Wolters (1999) insiste sur l'interdépendance entre les trois structures modulaires : produit, processus et réseau de la chaîne d'approvisionnement. Il affirme qu'elles doivent être conçues simultanément car des produits modulaires conduisent à des chaînes d'approvisionnement modulaires et inversement. Un ensemble de propositions ont été énoncées par l'auteur, celles-ci soulignent, entre autres, l'interdépendance entre la modularité de produit, celle des processus et des chaînes d'approvisionnement ainsi que la corrélation entre une conception modulaire (produit, processus et chaîne d'approvisionnement) et l'efficacité de la chaîne globale.

Nous trouvons également la notion de chaîne d'approvisionnement modulaire chez Arnheiter et Harren (2005). En effet, les auteurs soulignent la tendance, de la part de nombreuses industries occidentales, à réduire le nombre de fournisseurs du premier échelon et à établir des contrats à long terme avec un groupe restreint de partenaires. Par ailleurs, les produits sont devenus plus complexes et sont très difficiles à manipuler par les assembleurs. Cette nouvelle donne a augmenté le recours à la modularité, car de grosses pièces plus complexes peuvent être achetées d'un groupe plus petit de fournisseurs. Les auteurs ajoutent que dans une chaîne d'approvisionnement modulaire, non seulement les produits finis sont assemblés à partir de modules, mais également les sous-assemblages. Ces composants sont acheminés à l'usine d'assemblage en unités pré-assemblées. En modularisant la fabrication, l'assemblage et les opérations de distribution, il est possible de réduire considérablement le nombre de fournisseurs dans la chaîne d'approvisionnement. Ce qui réduit le nombre de relations fournisseur-acheteur. Parmi les avantages que l'on peut en tirer, la réduction des coûts et l'élimination des barrières de communication.

Dans leur article, Salerno et Dias (2000) ont basé la discussion sur le domaine de l'industrie automobile au Brésil qui implique les principaux assembleurs, certains des plus importants fournisseurs du premier échelon et quelques uns du second échelon. Les auteurs affirment que la modularité ne se limite pas à une stratégie de conception (en produit ou en design). En effet, dans le champ de recherche considéré, les auteurs ont trouvé que ce que les compagnies désignent par « production modulaire » n'a pas tout à fait les caractéristiques de la modularité. La caractéristique principale de ce que l'on appelle « arrangements modulaires » qui sont apparus dans l'industrie automobile est une nouvelle forme de relation entre les assembleurs et les fournisseurs qui refaçonne les frontières de l'industrie, et en quelque sorte, redéfinit les affaires et les risques qui y sont liés. La modularité dont il s'agit a une dimension physique (proximité des fournisseurs) et une dimension fonctionnelle (détermination des tâches). En outre, elle inclut des activités en sus du design et de la livraison physique, ces activités sont : la copropriété industrielle qui introduit la responsabilité des fournisseurs vis-à-vis de certains services telle que l'assistance technique, la participation directe à la résolution de problèmes sur la ligne d'assemblage et la réaction aux changements par rapport à l'ordonnancement initial. Cette structure a pour effet de soulever des questions d'ordre logistique et financier : **la proximité des fournisseurs** qui insinue notamment que l'assembleur reçoit moins de composants, mais dont la valeur ajoutée est plus importante. D'autre part, **le fournisseur se tient responsable** du sous-assemblage qu'il fournit. La modularité définit **la relation de service** qui impose au fournisseur d'être présent aux installations de l'assembleur. Le dernier aspect est **la décentralisation** puisque le développement des modules peut être fait en processus parallèles.

Pour ce qui concerne notre mémoire, la façon de considérer la modularité est très similaire à la stratégie présentée dans Arnheiter et Harren (2005). La figure 7, tirée de cet article, explique comment la modularité transforme la chaîne d'approvisionnement. En effet, la compagnie considérée a initialement 16 fournisseurs appartenant au premier niveau (*Tier*). La compagnie réorganise ensuite sa chaîne et réduit ainsi son réseau à

seulement quatre fournisseurs au premier niveau, ces fournisseurs absorbent le travail des 12 fournisseurs du second niveau. Certains des fournisseurs du deuxième niveau fusionnent, ce qui résulte en une chaîne d'approvisionnement compacte constituée de quatre fournisseurs du premier niveau et sept fournisseurs du deuxième niveau.

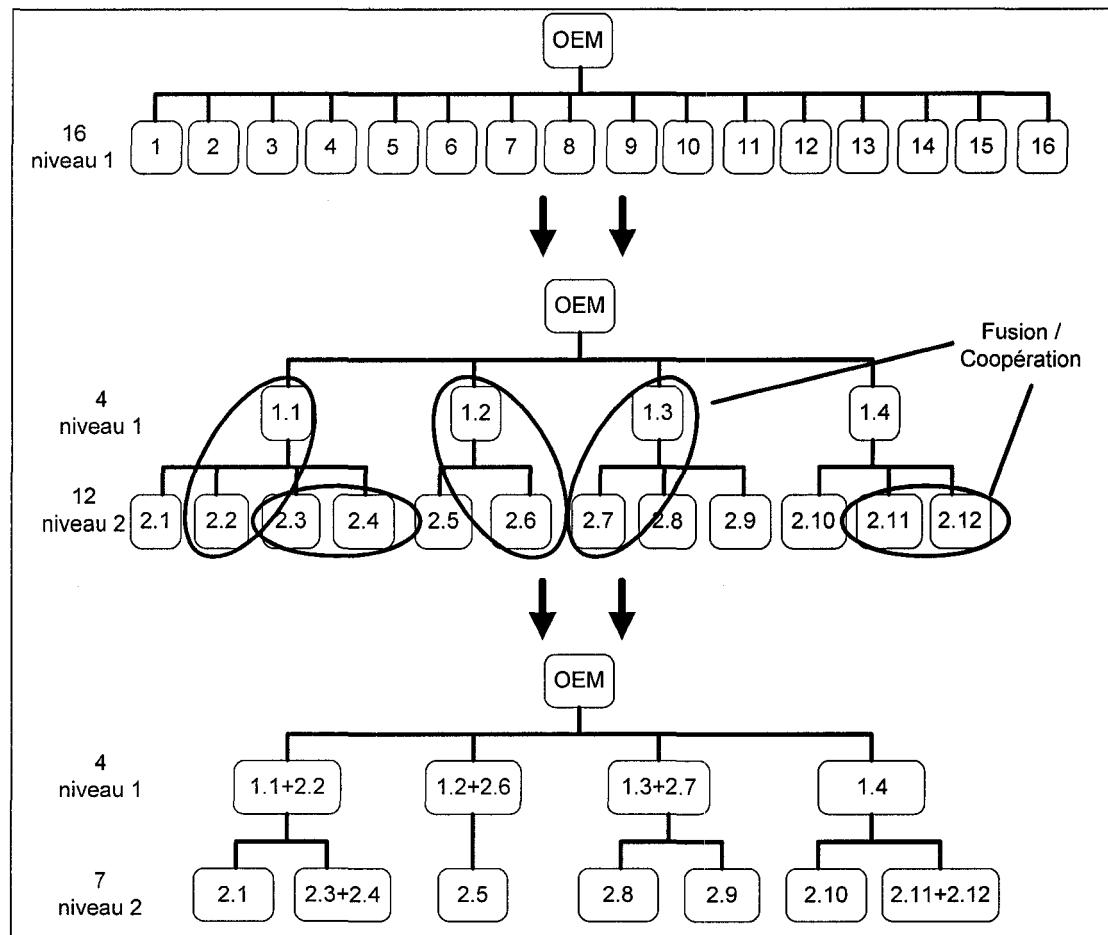


Figure 7 Modularisation de la chaîne logistique
(Source : adapté d'Arnheiter et Harren, 2005)

Dans le cas de Pratt & Whitney Canada, la demande d'un client pour un nouveau moteur d'avion engendre une première définition de la nomenclature de produit. Dans un premier temps, l'équipe de conception proposera un prototype d'un moteur basé sur les spécifications techniques. La nomenclature de ce prototype est aplatie telle que montrée dans la figure 8 :

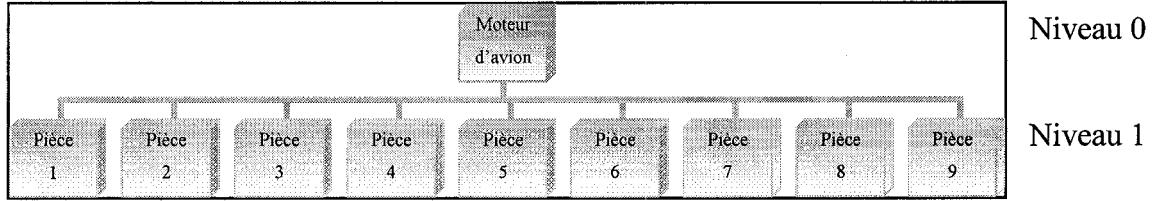


Figure 8 Nomenclature de produit aplatie

Une fois approuvé, le prototype sera sujet aux tests et essais techniques et les pièces le composant seront raffinées.

La nomenclature ainsi donnée permet d'identifier les fournisseurs potentiels capables de produire les pièces requises. Les fournisseurs considérés sont souvent des partenaires déjà assignés à des programmes de moteurs existants. Le nombre d'options possibles est diminué compte tenu de la rareté des nouveaux sous-traitants dans le domaine aéronautique. Vient alors l'étape où la firme se pose des questions stratégiques quant à la production du moteur. Pour chaque pièce, deux alternatives sont alors à évaluer : doit-on acheter la pièce d'un sous-traitant ? Ou vaudrait-il mieux la fabriquer à l'interne ? Dans chacune des situations, un nombre de considérations doivent être prises en compte. Ces décisions sont prises après une analyse des données relatives au coût standard des pièces ainsi que par les données historiques sur les performances des fournisseurs potentiels (livraison à temps, qualité, capacité de production, *etc.*)

À l'issue de cette étape, un bilan initial des sources potentielles d'approvisionnement est dressé pour les pièces apparaissant dans cette nomenclature. Une première version de la chaîne d'approvisionnement peut être déduite. Cette chaîne d'approvisionnement a la structure du réseau de la figure 9 :

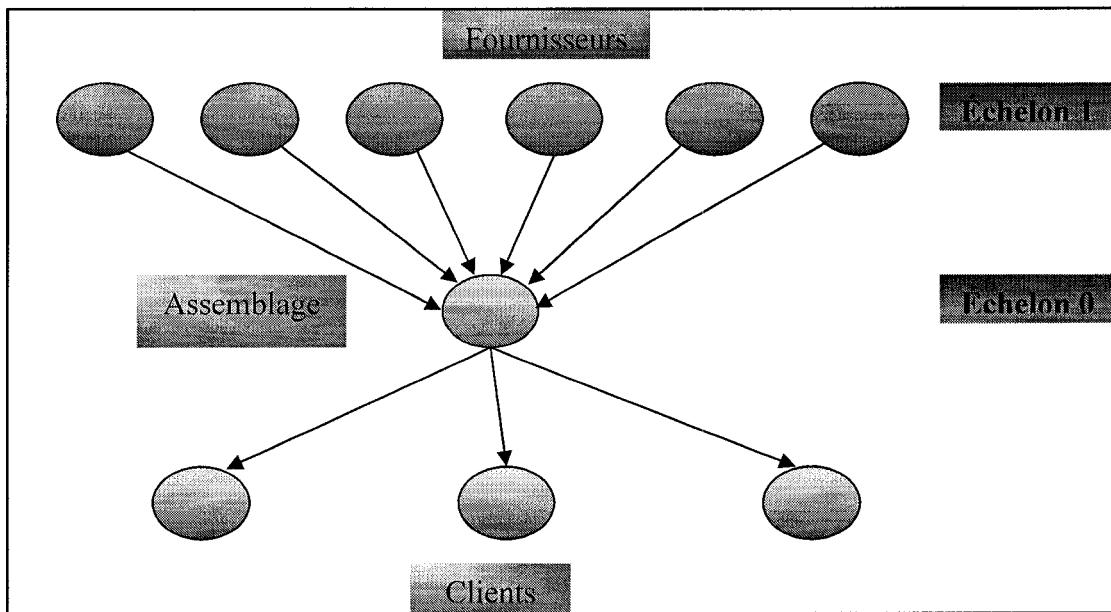


Figure 9 Chaîne d'approvisionnement correspondant à la nomenclature aplatie

La modularisation exige des informations bien précises quant à la nomenclature de produits. Les ingénieurs de design du moteur, les spécialistes des approvisionnements, les ingénieurs de production et les coordonnateurs de chaînes d'approvisionnement sont appelés à travailler de concert afin de mener à bien le processus de modularisation. En outre, les opérateurs interviennent aussi dans ce processus de manière à valider les méthodes utilisées et la compatibilité des opérations d'assemblage.

Dans notre cas, nous distinguons deux types de modularisation : d'une part le sous-assemblage à proprement parler et le « kit ». Le sous-assemblage est constitué de pièces assemblées et identifiées par un numéro identifiant unique. Ils sont déterminés par les ingénieurs de conception et de fabrication en considérant les contraintes mécaniques et industrielles. Tandis que le « kit » est un ensemble de pièces distinctes non-assemblées mais organisées et placées dans un même contenant. Les composantes d'un « kit » seront ensuite intégrées individuellement lors de l'assemblage du produit fini. Le fait d'organiser des composantes dans un même contenant permet d'optimiser le flux de matériel en dirigeant directement l'ensemble des pièces vers la bonne station

d'assemblage, l'opérateur faisant l'assemblage n'aura pas à aller chercher individuellement les pièces pour finaliser son opération, ceci a l'avantage de faire des gains substantiels au niveau du temps d'opération.

La modularisation permet de bien contrôler le flux de matériel qui arrive à la ligne d'assemblage. En effet, dans le domaine aéronautique, un moteur peut contenir des centaines, voire des milliers de composantes. Sans modularité, toutes ces composantes sont dirigées vers la ligne d'assemblage où les opérateurs font eux-mêmes les sous-assemblages. Une telle situation génère des délais d'assemblage assez grands (plusieurs jours), et rend la gestion du flux une tâche particulièrement difficile. En outre, elle nécessite des ressources dédiées à la gestion des retards. La modularité modifie la nomenclature de produits en introduisant des niveaux hiérarchiques supplémentaires. La figure 10 montre la nouvelle structure de la nomenclature de produit présentée à la figure 8 :

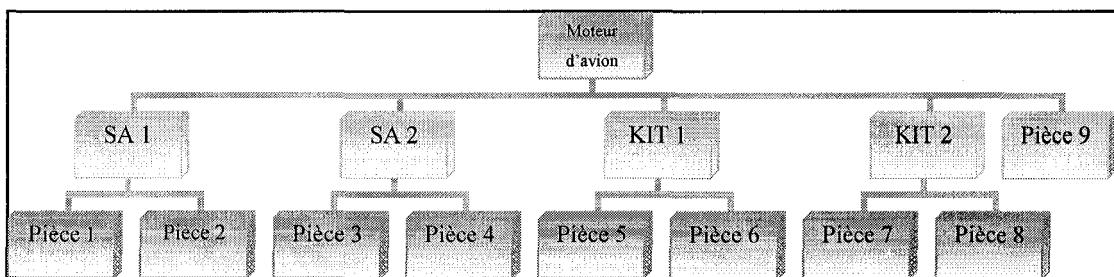


Figure 10 Nomenclature de produits à plusieurs niveaux (utilisation de la modularité)

Cette nouvelle structure de la nomenclature de produits suggère que les pièces 1 et 2 sont désormais assemblées de façon à constituer un sous-assemblage qui va arriver à la ligne d'assemblage final comme un produit unique bien identifié SA 1 ; il en va de même pour les pièces 3 et 4 qui constituent le sous-assemblage SA 2. De la même manière, que les sous-assemblages, des « kits » peuvent être formés : ainsi, les pièces 5 et 6 constituent le KIT 1, et les pièces 7 et 8 forment le KIT 2 ; cependant, comme nous l'avons bien précisé antérieurement, les pièces d'un même « kit » arrivent dans un même

contenant mais gardent chacune leur identifiant. La pièce 9 ne fait partie ni d'un sous-assemblage ni d'un « kit », et ne subit par conséquent pas de modularité. Il est important de noter que, dans notre étude, nous ne considérons que les décisions de « kitting », les sous-assemblages étant déjà déterminés par les équipes de conception et de fabrication compte tenu des contraintes mécaniques et de conception.

Le fait de regrouper les pièces en sous-assemblages et en « kits » à travers la chaîne d'approvisionnement permet de réduire le nombre de composantes qui affluent vers la ligne d'assemblage de façon remarquable. Le temps d'assemblage est réduit quant à lui de façon significative. En ce qui concerne l'entreprise qui nous intéresse, les expériences actuelles montrent en particulier que pour une nomenclature aplatie, l'assemblage d'un moteur d'avion nécessiterait environ 45 heures, ce temps ne se chiffre qu'à quatre heures pour la nomenclature modularisée, car le travail de sous-assemblage peut être fait en parallèle.

Le fait d'utiliser la modularité introduit un certain nombre de sous-assemblages, et comme nous l'avons explicité au paragraphe précédent, ceci ajoute des niveaux supplémentaires dans la nomenclature de produits. Cette modularisation influe sur la structure de la chaîne d'approvisionnement en introduisant notamment des échelons additionnels. Une fois les sous-assemblages et / ou les « kits » identifiés, il faudrait déterminer, parmi les fournisseurs sélectionnés, ceux qui sont en mesure de les fabriquer ou de les assembler. Généralement, dans le cas de l'entreprise qui nous intéresse, le fournisseur d'un sous-assemblage ou d'un « kit » est celui qui en fabrique la composante principale. Ce fournisseur appartiendra au premier échelon, les autres fournisseurs qui l'approvisionnent en produits nécessaires pour venir à bout de son assemblage seront des fournisseurs de second échelon ainsi de suite. À la fin du processus d'assignation des sous-assemblages et des « kits », ainsi que de leurs composantes aux fournisseurs, la structure du réseau de la chaîne d'approvisionnement est tout à fait différente de celle

présentée à la figure 9. En effet, la principale différence est notamment la structure multi-échelons telle que présentée à la figure 11 :

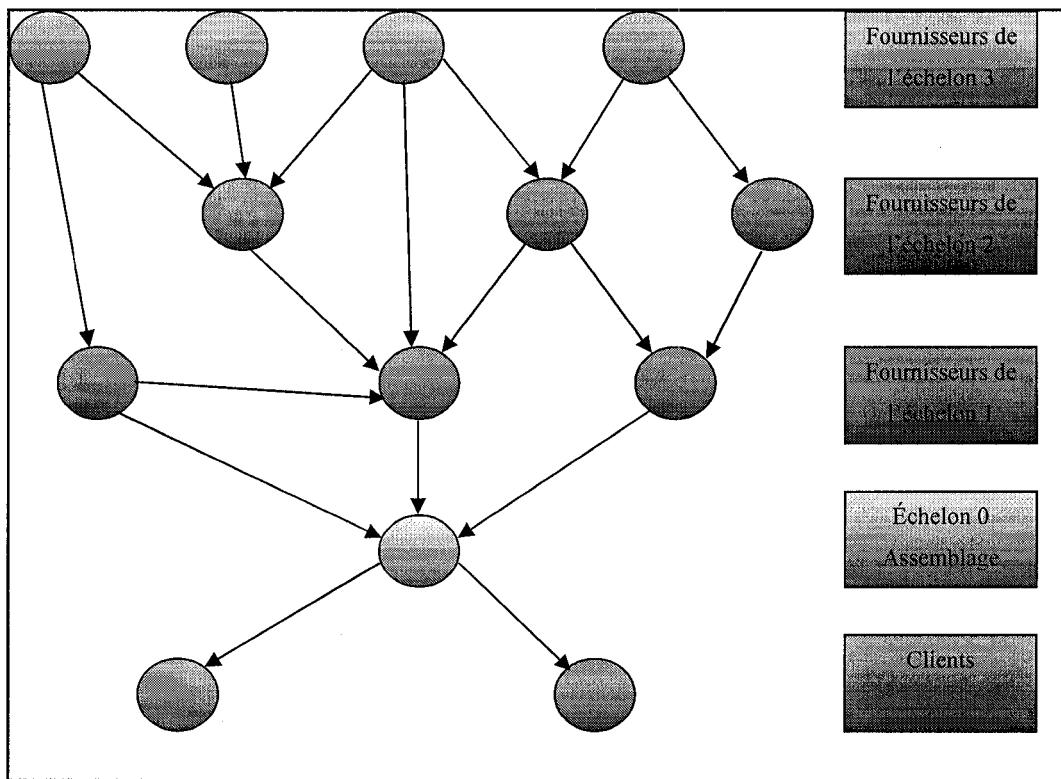


Figure 11 Chaîne d'approvisionnement multi-échelons après modularisation

2.4 Conclusion

Arnheiter et Harren (2005) soulignent que l'absence d'accord sur la terminologie utilisée pour définir la notion de modularité a pour effet de limiter les énormes avantages qu'on peut en tirer. Les différentes définitions utilisées par les chercheurs et par les gestionnaires compliquent la comparaison des stratégies modulaires. C'est pour cette raison que nous avons donné dans ce chapitre une revue de littérature sur la modularité. Nous avons essayé, autant que possible, de donner des définitions précises de la modularité, et ce selon le domaine où elle s'applique. Bien que cela ne soit pas systématique, la littérature classifie cette notion selon trois principaux volets : le design, la production et l'organisation inter-firmes.

Après avoir introduit la notion de modularité et mis le point sur ses définitions, nous avons fait une revue de littérature sur sa présence dans la conception des chaînes d'approvisionnement. Nous avons également expliqué comment la notion de modularité sera considérée dans le cadre de notre mémoire.

Nous constatons, à partir des éléments vus dans ce chapitre, qu'il y a eu beaucoup d'efforts pour bien définir et cadrer la modularité dans les différents contextes où elle peut intervenir. D'autres études relatent ses avantages et les améliorations qu'elle peut apporter. Cependant, nous notons qu'au meilleur de notre connaissance, les études faites jusqu'à présent ne montrent pas de cadre de travail intégré pour inclure la modularité dans la conception des chaînes d'approvisionnement. Notre but dans le cadre de ce projet sera donc de proposer une approche intégrée afin de pouvoir utiliser la modularité et optimiser le réseau de la chaîne d'approvisionnement d'une industrie québécoise œuvrant dans le secteur aéronautique. Cette approche sera développée dans les chapitres suivants.

Les réseaux de chaîne d'approvisionnement que nous traiterons dans le cadre de notre projet sont tirés d'exemples réels. Il s'agit de la conception de réseaux de chaînes logistiques liés aux nouveaux programmes de moteurs d'avion de l'entreprise Pratt & Whitney Canada.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DU PROBLÈME ÉTUDIÉ

3.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous présenterons les étapes de modélisation du problème de design du réseau logistique pour un moteur d'avion. Nous détaillerons les composants et les hypothèses du modèle. Dans un premier temps, nous discuterons du type de nomenclatures de produits – spécifiques au secteur aéronautique – que nous aurons à traiter. Nous effectuerons ensuite une description des éléments du problème. Nous exposerons par la suite les hypothèses de travail et expliciterons les notions clés utilisées lors de la modélisation.

3.2 Nomenclature de produits spécifique au secteur aéronautique

Pour toute fin de modélisation où devrait intervenir la production, l'élaboration de la nomenclature de produits est un élément de modélisation d'une importance majeure. Outre le produit fini, la nomenclature inclut d'autres types de produits : les matières premières et les produits semi-finis. En plus, la nomenclature indique les quantités nécessaires des composantes intervenant dans la production de chaque produit ; chacun de ceux-ci suit un processus de production particulier selon son type et son emplacement dans la nomenclature.

Dans le cas de l'industrie aéronautique, la nomenclature de produits est convergente ; des produits sont ainsi nécessaires pour la production d'une composante plus importante à chaque niveau de hiérarchie. De cette façon, la nomenclature est définie par une liste hiérarchisée et quantifiée des articles entrant dans la composition d'un produit donné. Elle fait le lien entre les composés et les composants, et spécifie aussi la quantité requise

de ces derniers. Par conséquent, la nomenclature codifie tous les liens existant entre les différents produits tout au long du réseau logistique pour ainsi faciliter la modélisation ultérieure.

Dans le cas de notre étude, nous introduisons la notion de modularité de la production dans le problème de design du réseau de la chaîne d'approvisionnement. La façon de considérer la modularité a fait l'objet du chapitre précédent, où nous avons démontré le lien existant entre l'introduction de la notion de modularité au niveau de la nomenclature de produits et les modifications que cela apporte à l'échelle du réseau de la chaîne logistique. Nous avons distingué entre les sous-assemblages et les « kits », cependant, dans notre modèle, nous ne considérerons que les « kits », c'est-à-dire que nous aurons à choisir l'affectation de pièces que nous appellerons « pièces orphelines » à des composantes plus importantes, de façon à ce que l'ensemble constitue un « kit » et qu'il soit envoyé dans un seul contenant. Les sous-assemblages sont déterminés par les équipes de conception et de fabrication, et leur conception ne fera pas l'objet de cette étude. Cependant, dans notre étude, il est envisageable de grouper des « kits » avec des sous-assemblages pour former des modules. Un exemple de nomenclature de produits (à quatre niveaux) incluant le « kitting » est illustré à la figure 12 :

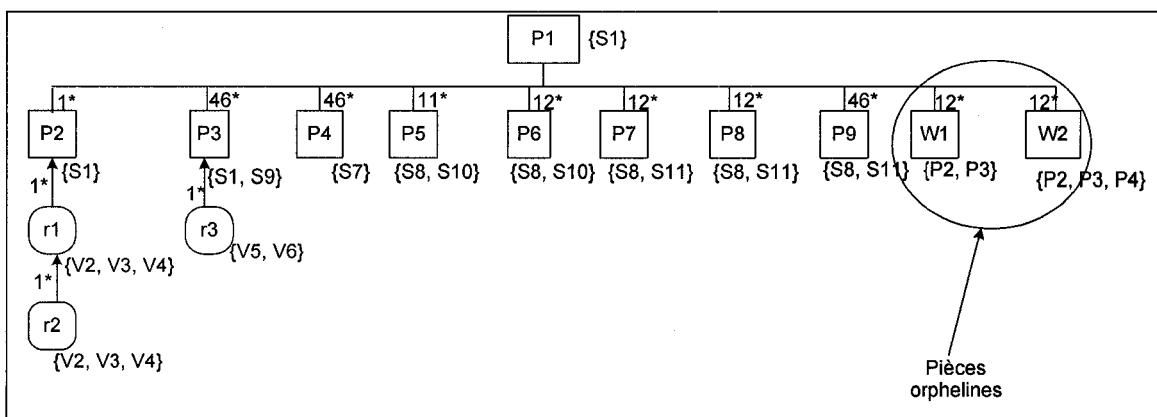


Figure 12 Exemple de nomenclature de produits

La lecture de cette figure indique que l'assemblage du produit fini, noté P1, nécessite l'ensemble des pièces suivantes :

- a. 1 pièce P2 ;
- b. 46 pièces P3 ;
- c. 46 pièces P4 ;
- d. 11 pièces P5 ;
- e. 12 pièces P6 ;
- f. 12 pièces P7 ;
- g. 12 pièces P8 ;
- h. 46 pièces P9 ;
- i. 12 pièces W1 ;
- j. 12 pièces W2.

De la même façon, la production de la pièce P2 nécessite une matière première r1, la production de la pièce P3 requiert une matière première r2, et la fourniture de la matière première r1 nécessite une matière première r2.

La nomenclature de produit donnée à la figure 12 fournit plusieurs autres informations quant au processus de production des différentes composantes; ainsi, nous avons mis entre accolades, à côté de chaque produit, les identifiants des différents sous-traitants qui peuvent le fabriquer. Nous pouvons donc déduire que le produit fini P1 peut être assemblé chez le sous-traitant S1, et que le produit P5 par exemple peut être produit par le sous-traitant S8 ou le sous-traitant S10, *etc.* Il en va de même pour les matières premières, à titre d'exemple, les matières premières désignées r1 et r2 peuvent être fournies par les fournisseurs V2, V3 ou V4.

L'aspect qui différencie notre modèle des rares modélisations tenant compte de la nomenclature de produits est la présence des pièces orphelines qui sont candidates à être affectées à d'autres pièces plus importantes pour constituer des « kits ». Dans notre

mémoire, nous appellerons ces pièces importantes des « modules ». Dans le cas de la figure 12, les pièces orphelines sont W1 et W2. À côté de chaque pièce orpheline, nous avons indiqué, entre accolades, les composantes majeures (modules) auxquelles elles peuvent être affectées. Ainsi, la pièce orpheline W1 peut être affectée soit au module P2 soit au module P3, de la même façon, on peut déduire que la pièce orpheline W2 peut être affectée à l'un des modules P2, P3 ou P4. De ce fait, ces pièces orphelines sont fabriquées avec les pièces auxquelles elles sont affectées, cela veut dire que si on décide d'affecter W1 au module P2, W1 sera alors fabriquée chez le sous-traitant S1 qui produit le module P2 ; si par contre elle est affectée à P3, elle sera fabriquée avec P3 soit chez le sous-traitant S1 soit chez le sous-traitant S9.

3.3 Description des éléments du problème

La modélisation de la structure du réseau de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le secteur aéronautique passe par la définition de toutes les unités de la chaîne ainsi que des variables associées à chacune de ses activités, de même que par la détermination des coûts engendrés par celles-ci. C'est au niveau des variables de décision qu'apparaît l'enjeu managérial.

Le modèle de programmation mathématique que nous proposerons au chapitre suivant regroupe l'ensemble des activités d'approvisionnement, de production et de distribution de la chaîne logistique. Il permet d'optimiser aussi bien la configuration du réseau logistique en choisissant les sites qui devraient être ouverts que les flux de matières entre les unités de la chaîne.

Trois ensembles majeurs constituent les éléments de notre problème :

a. Les nœuds

Ce sont les entités physiques du réseau logistique potentiel. Un nœud peut être un fournisseur de matières premières, un sous-traitant (pour une ou plusieurs composantes) ou encore une zone-client.

b. Les produits

Ce sont les matières qui circulent dans le réseau de la chaîne. Un produit peut être une matière première, un produit semi-fini (pièce majeure, pièce orpheline) ou un produit fini.

c. Les flux

Les flux caractérisent le transport des produits entre les nœuds du réseau de la chaîne d'approvisionnement. En ce qui nous concerne, nous distinguerons entre trois types de flux : le flux de matières premières entre les fournisseurs de celles-ci et les sous-traitants, le flux des produits semi-finis entre les sous-traitants et enfin le flux des produits finis entre les sous-traitants (assembleurs des produits finis) et les zones-clients.

L'objectif de notre programme mathématique est d'optimiser la chaîne d'approvisionnement de l'entreprise en tenant compte de la nomenclature de produits tout en portant une attention particulière à la notion de modularité (« kitting »). En d'autres termes, le modèle mathématique sera en mesure de :

- a. Sélectionner les fournisseurs des matières premières ;
- b. Sélectionner les sous-traitants des produits semi-finis ;
- c. Affecter chaque pièce orpheline à un module et à un sous-traitant ;
- d. Déterminer les quantités de produits à fabriquer ou à fournir dans chacun des nœuds ;
- e. Déterminer les quantités de produits transportés entre les nœuds.

Le modèle que nous présenterons considère le coût comme principal critère d'optimisation. C'est un modèle déterministe, c'est-à-dire que les coûts et les autres paramètres qui y sont injectés (temps, capacités, demande) sont connus à l'avance. Il est statique et non dynamique, ce qui veut dire qu'il concerne une période de temps déterminée. Dans ce qui suit, nous allons présenter les différents paramètres nécessaires à notre modélisation :

a. Les coûts fixes

Les coûts fixes du réseau sont ceux qui sont relatifs à la structure du réseau et ne dépendent pas des activités de production. Dans le modèle, ils seront associés aux variables binaires. Il s'agit des :

- Coûts fixes associés à l'affectation d'un produit à un fournisseur de matière première ou à un sous-traitant ;
- Coûts fixes associés à l'affectation d'une pièce orpheline à un module.

b. Les coûts variables

Les coûts variables encourus dans le réseau de la chaîne d'approvisionnement sont des coûts relatifs aux activités de production et de transport. Ils sont proportionnels aux volumes des produits fabriqués (ou fournis). Notre modèle considérera les coûts suivants :

- Coûts de production des produits semi-finis, et d'assemblage du produit fini ;
- Coûts de fourniture des matières premières ;
- Coûts de transport (flux de transport).

c. La nomenclature de produits

La nomenclature de produits est considérée dans le modèle dans la mesure où elle fournit les données nécessaires quant à la hiérarchie des produits et des quantités nécessaires à leur production.

d. Les capacités

La capacité est une caractéristique de dimension d'une unité de production indiquant la quantité de produits qu'elle est susceptible de fournir pendant une certaine période de temps, lorsqu'elle fonctionne dans des conditions normales. Cette notion de capacité est présente dans notre modèle. En outre, nous considérerons une capacité exprimée en unité de temps disponible chez chacun des sous-traitants.

La figure 13 met en évidence le réseau potentiel de la chaîne d'approvisionnement associée à la nomenclature de produits de la figure 12. Au dessus de chaque nœud, nous avons mis la liste de produits qui peuvent être fabriqués ou approvisionnés par celui-ci.

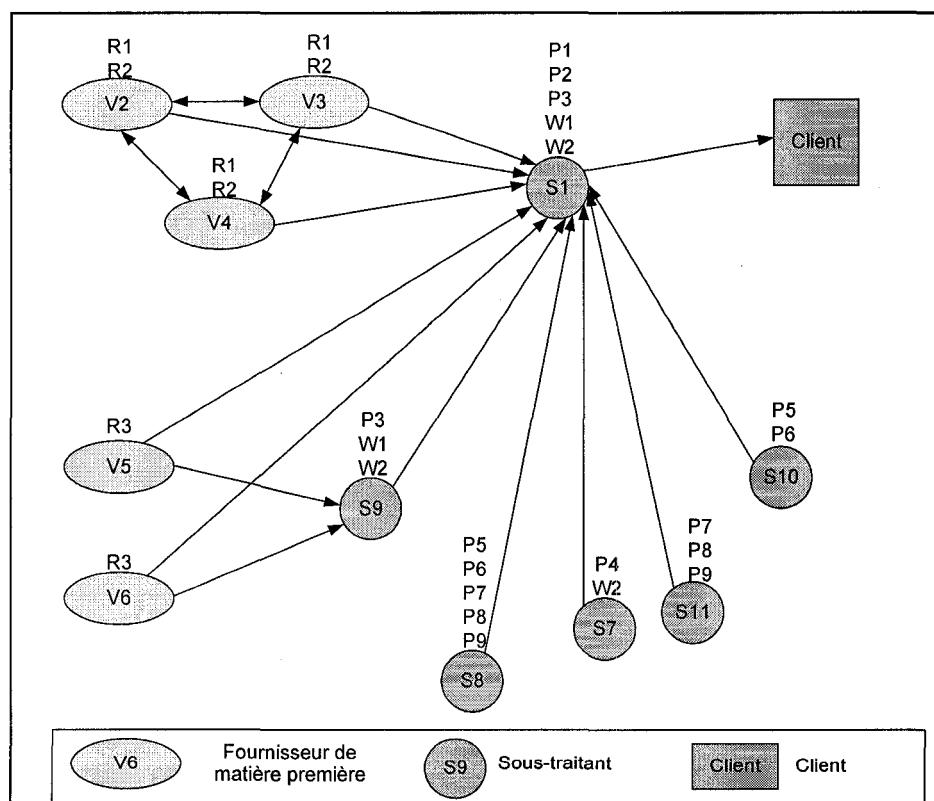


Figure 13 Réseau logistique potentiel associé à la nomenclature de la figure 12

3.4 Hypothèses de travail

Dans le cadre de notre recherche, un nombre d'hypothèses ont été prises. Il est donc primordial de les indiquer pour la validité des résultats qui seront présentés dans le présent rapport. Certaines hypothèses ont été mentionnées explicitement ou implicitement dans ce chapitre. Dans ce qui suit, nous dressons une liste des principales hypothèses posées :

- a. Le problème est déterministe, c'est-à-dire que les différents paramètres du modèle (coûts, temps, demande...) sont connus à l'avance et avec précision ; ils ne font l'objet d'aucune incertitude ;
- b. Les coûts et les temps de traitement sont fixes ;
- c. Les délais de livraison sont fixes et ne dépendent pas des quantités commandées ;
- d. Les temps de transport sont fixes et ne dépendent pas des quantités transportées ;
- e. Les pièces orphelines sont candidates à être affectées à des modules qui appartiennent au même niveau qu'elles dans la nomenclature de produits. Toutefois, les pièces orphelines peuvent appartenir à n'importe quel niveau de la nomenclature (pas nécessairement le premier niveau) pourvu qu'il y ait un module auquel elles peuvent être affectées ;
- f. Une pièce orpheline peut être affectée à un seul module et à un seul sous-traitant ;
- g. Une composante autre que module ou pièce orpheline, peut être fabriquée chez plusieurs sous-traitants. C'est-à-dire que le modèle tolère la possibilité de la diversification des fournisseurs (*multi-sourcing*) ;
- h. Un sous-traitant peut produire plusieurs produits s'il est habilité à le faire ; un fournisseur de matières premières peut fournir plusieurs matières premières s'il est capable de le faire ;
- i. Aucun retard n'affecte la chaîne d'approvisionnement ; c'est-à-dire que les sous-traitants sont fiables à 100 % et que les délais sont toujours respectés ;
- j. Les équipements chez les différents sous-traitants sont assez fiables pour que la chaîne ne soit affectée par des pannes éventuelles ;

- k. Les capacités des intervenants dans la chaîne sont connues et sont limitées. D'autre part, ces capacités tiennent compte des arrêts planifiés pour la maintenance ;
- l. Les produits fabriqués sont toujours acceptables, leur niveau de qualité répond aux normes de l'industrie aéronautique et aucun rejet n'est considéré. Cette hypothèse est justifiable jusqu'à un certain niveau puisque la pré-sélection des sous-traitants fait en sorte que l'on ne considère que les sous-traitants ayant des procédés de fabrication fiables qui donnent les qualités voulues ;
- m. Les contrats avec les sous-traitants et les fournisseurs préconisent un niveau minimum de production et d'approvisionnement afin de maintenir un rythme de production profitable aux sous-traitants. Ceci est nécessaire dans une chaîne d'approvisionnement pour le maintien d'une relation privilégiée avec les différents intervenants du réseau.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure et décrit les éléments de notre modèle de conception de la chaîne d'approvisionnement, en soulignant notamment la manière dont nous entendons introduire la nomenclature de produits dans le design du réseau. Nous avons également mis le point sur les éléments de notre problème et présenté les principales hypothèses que nous avons prises pour mener à bien notre travail de modélisation.

Le prochain chapitre sera entièrement dédié au modèle de conception de la chaîne d'approvisionnement qui tient compte de la nomenclature de produits et de la notion de modularité. Le modèle est basé sur la programmation linéaire en nombres mixtes.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

4.1 Introduction

Le modèle proposé pour le problème de design du réseau logistique se doit de fournir une représentation globale de la structure optimale à retenir pour le réseau. Le modèle de programmation mathématique linéaire en nombres entiers développé dans ce chapitre a pour objectif de faire le design du réseau de la chaîne d'approvisionnement en choisissant les fournisseurs de matières premières et les sous-traitants pour les produits, de façon à minimiser l'ensemble des coûts fixes associés à l'assignation des pièces aux sous-traitants, des coûts de production et des coûts de transport. Le modèle d'optimisation est en mesure de déterminer l'assignation des pièces orphelines aux modules pour constituer des « kits ». Il permet aussi de déterminer la quantité de matières premières à fournir par chaque fournisseur, les quantités des autres produits à fabriquer par chaque sous-traitant, de même que les quantités des différents produits à transporter d'un nœud à un autre dans le réseau. L'objectif étant de minimiser le coût total composé de coûts fixes et de coûts variables de façon à satisfaire la demande des clients. La prise en compte de la structure de la nomenclature de produits dans le modèle est considérée dans les contraintes de flux.

Pour formuler le problème de design du réseau logistique d'une entreprise du secteur aéronautique, nous définirons dans ce qui suit les différents ensembles, paramètres et variables requis et nous présenterons le modèle d'optimisation élaboré. Soulignons au passage qu'outre les décisions stratégiques et tactiques habituelles, le modèle propose une façon d'inclure les décisions de modularisation de la production dans la conception optimale des chaînes d'approvisionnement. Par conséquent, une fois le modèle optimisé,

les décisions d'affectation des pièces orphelines aux modules seront prises et permettront de savoir dans quels sites chacune de ces pièces seront fabriquées.

4.2 Notations

Les ensembles suivants seront nécessaires à la modélisation du problème.

P	Ensemble de tous les produits.
$R \subset P$	Ensemble des matières premières.
$M \subset P$	Ensemble des produits fabriqués.
$G \subset M$	Ensemble des produits qui peuvent être considérés comme module, ou autre composante.
$W \subset M$	Ensemble des pièces orphelines qui peuvent être assignées à un module.
$C \subset P$	Ensemble des produits finis.
N	Ensemble de tous les nœuds (fournisseurs de matières premières, sous-traitants de produits semi-finis et zones-clients).
$D \subset N$	Ensemble des points de la demande ou zones-clients.
$S \subset N$	Ensemble de tous les sous-traitants.
$S_p \subset S$	Ensemble des sous-traitants du produit $p \in M$.
$V \subset N$	Ensemble de tous les fournisseurs de matières premières.
$V_p \subset V$	Ensemble des fournisseurs de la matière première $p \in R$.
$Suc(p) \subset P$	Ensemble des successeurs immédiats du produit $p \in P / C$ dans la nomenclature de produits.
$S(Suc(p)) \subset S$	Fonction qui renvoie tous les sous-traitants des produits immédiatement successeurs du produit $p \in P / C$ dans la nomenclature.
$M_s \subset M$	Ensemble de tous les produits qui peuvent être fabriqués par le sous-traitant $s \in S$.

$R_v \subset R$	Ensemble de toutes les matières premières qui peuvent être fournies par le fournisseur $v \in V$.
-----------------	--

Pour plus de précision quant à la terminologie, nous utilisons le terme « fournisseur » pour les nœuds du réseau qui peuvent fournir des matières premières, et le terme « sous-traitant » pour les nœuds qui fabriquent des produits semi-finis ou qui font des sous-assemblages. Les produits semi-finis peuvent être des composantes, des modules ou des pièces orphelines. Ces dernières devant être assignées aux modules.

4.3 Paramètres du problème

Les coûts suivants sont les données nécessaires à la modélisation :

a_{ip}	Coût fixe associé à l'assignation du produit $p \in G \cup R$ au site $i \in S_p \cup V_p$.
c_{ip}	Coût unitaire de production d'un produit $p \in M \cup R$ au site $i \in S_p \cup V_p$.
z_{wm_i}	Coût fixe associé à l'assignation de la pièce orpheline $w \in W$ au module $m \in G$ et au sous-traitant $i \in S_m$.
t_{ijp}	Coût de transport d'une unité de produit $p \in P$ du nœud $i \in V_p \cup S_p$ au nœud $j \in S(Suc(p)) \cup D$.

Les données suivantes seront également utilisées dans le modèle :

$g_{pp'}$	Nombre d'unités de produit $p \in P / C$ requises pour la fabrication d'une unité de produit $p' \in Suc(p)$.
m_p	Nombre maximum de sites qui peuvent être ouverts pour le produit $p \in G \cup R$
d_{pd}	Quantité de produit fini $p \in C$ demandée à la zone-client $d \in D$
q_{pv}	Quantité maximale de la matière première $p \in R$ qui peut être fournie par le fournisseur $v \in V_p$.

\bar{b}_{ip}	Capacité (en nombre d'unités) du sous-traitant $i \in S_p$ pour le produit $p \in M$
te_{ip}	Temps de production du produit $p \in M$ au nœud $i \in S_p$
ρ_i	Borne inférieure (en %) de la capacité agrégée d'un sous-traitant ou d'un fournisseur de matière première $i \in S \cup V$.
T_i	Temps total disponible sur la ligne d'assemblage du sous-traitant $i \in S$. Il est considéré comme étant la capacité agrégée chez le sous-traitant.

4.4 Variables de décision

Afin de trouver la configuration optimale du réseau, les variables de décision suivantes sont requises :

F_{ijp}	Nombre d'unités du produit $p \in P$ transportées du nœud $i \in V_p \cup S_p$ au nœud $j \in S(Suc(p)) \cup D$.
X_{ip}	Nombre d'unités de produit $p \in M \cup R$ fabriquées ou fournies au nœud $i \in S_p \cup V_p$.
Y_{ip}	Variable binaire égale à 1 si le produit $p \in M \cup R$ est assigné au nœud $i \in V_p \cup S_p$, 0 sinon.
Z_{wpi}	Variable binaire égale à 1 si la pièce orpheline $w \in W$ est affectée au module $p \in G$ et au sous-traitant $i \in S_p$, 0 sinon.
A_i	Variable binaire égale à 1 si le noeud $i \in V \cup S$ est ouvert et est opérationnel pour au moins un produit, 0 sinon.

4.5 Formulation mathématique

Le problème de design de la chaîne d'approvisionnement que nous avons énoncé peut être résolu à l'aide du modèle de programmation mathématique linéaire en nombres mixtes dont la fonction objectif et les contraintes sont explicitées dans ce qui suit.

4.5.1 Fonction-objectif

Le coût total de la chaîne d'approvisionnement est composé de coûts fixes et de coûts variables. La fonction objectif à minimiser est donnée par :

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{i \in S_p \cup V_p} \sum_{p \in G \cup R} a_{ip} Y_{ip} + \sum_{p \in G_w} \sum_{w \in W} \sum_{i \in S_p} z_{wpi} Z_{wpi} + \sum_{i \in S_p \cup V_p} \sum_{p \in M \cup R} c_{ip} X_{ip} \\ & + \sum_{i \in V_p} \sum_{j \in S(\text{suc}(p))} \sum_{p \in R} t_{ijp} F_{ijp} + \sum_{i \in S_p} \sum_{j \in S(\text{suc}(p))} \sum_{p \in M} t_{ijp} F_{ijp} + \sum_{i \in S_p} \sum_{j \in D} \sum_{p \in C} t_{ijp} F_{ijp} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Le premier terme de la fonction objectif rend compte des coûts fixes d'affectation des produits aux sites (« kits » et autres composantes aux sous-traitants et matières premières aux fournisseurs). Le second terme représente les coûts fixes d'affectation des pièces orphelines aux modules et aux sous-traitants. Le troisième terme traduit les coûts d'approvisionnement des matières premières et de production des modules et autres composantes. Les trois termes restants reflètent les coûts de transport des matières premières entre les fournisseurs et les sous-traitants, des produits semi-finis entre les sous-traitants, et des produits finis entre les sous-traitants et les points de demande.

4.5.2 Contraintes du problème

Pour notre modèle de design du réseau, nous allons prendre plusieurs contraintes en considération. Ces contraintes sont de plusieurs types et rendent compte de plusieurs éléments relatifs à la chaîne d'approvisionnement. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- a. Les contraintes d'équilibre des produits aux différents nœuds ;
- b. Les contraintes de capacité ;
- c. Les contraintes de capacités minimales à occuper ;
- d. Les contraintes de la nomenclature de produits ;
- e. Les contraintes de satisfaction de la demande.

Toutes les contraintes de notre modèle sont explicitées dans ce qui suit :

a. Nombre maximum de sites par produit

Pour chacune des matières premières, chacune des composantes et chacun des modules, le nombre de sites opérationnels ne devrait pas excéder le nombre maximum de fournisseurs et de sous-traitants décidé à l'échelle stratégique.

$$\sum_{i \in S_p \cup V_p} Y_{ip} \leq m_p \quad \forall p \in R \cup G \quad (4.2)$$

b. Affectation des pièces orphelines aux modules et aux sous-traitants

Une pièce orpheline doit être affectée à un et un seul module, chez un et un seul sous-traitant. Ceci est assuré par les contraintes suivantes :

$$\sum_{p \in G_w} \sum_{i \in S_p} Z_{wpi} = 1 \quad \forall w \in W \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in S_p} \sum_{p \in G_w} Y_{iw} = 1 \quad \forall w \in W \quad (4.4)$$

De plus, si une pièce orpheline est affectée à module et à un sous-traitant, alors la pièce orpheline et le module sont tous les deux assignés au même sous-traitant.

Ce qui peut être traduit par les contraintes ci-après :

$$Y_{iw} - Z_{wpi} \geq 0 \quad \forall w \in W, p \in G_w, i \in S_p \quad (4.5)$$

$$Y_{ip} - Z_{wpi} \geq 0 \quad \forall w \in W, p \in G_w, i \in S_p \quad (4.6)$$

c. Capacité des sous-traitants pour les produits semi-finis

Lorsqu'un produit (module, pièce orpheline ou autre composante fabriquée) est assigné à un sous-traitant, la quantité fabriquée de ce produit par ce sous-traitant ne doit pas excéder la capacité de celui-ci pour ledit produit.

$$X_{ip} - \bar{b}_{ip}Y_{ip} \leq 0 \quad \forall p \in W \cup G, i \in S_p \quad (4.7)$$

d. Respect du temps disponible sur la ligne d'assemblage des sous-traitants

Si un sous-traitant est choisi pour la fabrication d'au moins un produit, alors le temps de fabrication utilisé chez ce sous-traitant ne doit pas dépasser le temps total disponible sur sa ligne d'assemblage.

$$\sum_{p \in M_i} X_{ip}te_{ip} - T_iA_i \leq 0 \quad \forall i \in S \quad (4.8)$$

e. Occupation minimale de la capacité temporelle agrégée des sous-traitants

Il y a souvent un minimum de capacité agrégée d'un sous-traitant qui doit être utilisée pour justifier l'établissement d'un contrat. Cette considération conduit aux contraintes de la forme :

$$\sum_{p \in M_i} X_{ip}te_{ip} - \rho_iT_iA_i \geq 0 \quad \forall i \in S \quad (4.9)$$

Le premier terme de la partie gauche de l'inégalité traduit le temps total utilisé sur la ligne d'assemblage ou sur les équipements du sous-traitant. Le second terme de la partie gauche est le temps minimum à utiliser si le sous-traitant est choisi.

f. Capacité des fournisseurs pour les matières premières

Si un fournisseur est choisi pour l'approvisionnement d'une matière première, alors la quantité transportée de ce fournisseur à ses successeurs ne peut excéder sa capacité d'approvisionnement.

$$\sum_{j \in S(Suc(p))} F_{ijp} \leq q_{pv} Y_{ip} \quad \forall p \in R, i \in V_p \quad (4.10)$$

g. Capacité minimale à utiliser chez les fournisseurs de matières premières

Pour conclure des contrats avec des fournisseurs de matières premières, un minimum de capacité agrégée à utiliser peut également être considéré. Dans le cadre de notre projet, nous avons considéré que le minimum à utiliser est un pourcentage de la quantité maximale de toutes les matières premières que ce fournisseur peut fournir. Ceci est traduit par la contrainte suivante :

$$\sum_{p \in R_i} X_{ip} - (\rho_i \sum_{p \in R_i} q_{pi}) A_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (4.11)$$

h. Flux sortant des produits dans les différents nœuds

L'inégalité suivante traduit le flux des produits vers l'extérieur des nœuds :

$$X_{ip} - \sum_{j \in S(Suc(p))/\{i\}} F_{ijp} - \sum_{p' \in Suc(p)} g_{pp'} X_{ip'} - \sum_{j \in D} F_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in M \cup C, i \in S_p \quad (4.12)$$

En effet, la quantité de produit p fabriquée par le sous-traitant i doit au moins égaler la quantité de ce produit transportée du sous-traitant aux sous-traitants des produits p' (successeurs du produit p dans la nomenclature). En outre, quand le sous-traitant i fabrique aussi un successeur p' du produit p , il utilisera le produit p pour le transformer en produit p' et par conséquent consommera la quantité déterminée par le troisième terme de l'équation (4.12) en produit p . L'inégalité (4.12) reste valide quand le produit p est un produit fini; dans ce cas, les deuxième et troisième termes sont éliminés car un produit fini est au sommet de la nomenclature de produits et n'a pas de successeurs.

Si nous décidons de restreindre le réseau à avoir des nœuds distincts pour un produit et ses successeurs, nous n'aurons également plus besoin du troisième

terme dans l'équation (4.12). Il est nécessaire de souligner que seulement l'un des deuxième ou quatrième termes peut figurer dans l'inégalité selon que le produit est un produit semi-fini ou un produit fini.

i. Flux sortant des pièces orphelines

De façon similaire aux autres produits, le flux des pièces orphelines est exprimé par l'inégalité suivante :

$$X_{ip} + \sum_{j \in S_p / \{i\}} F_{jip} - \sum_{p' \in Suc(p)} g_{pp'} X_{ip'} - \sum_{j \in S_p / \{i\}} F_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in W, i \in S_p \quad (4.13)$$

j. Flux entrant pour les produits fabriqués

Pour les produits fabriqués (modules, pièces orphelines et autres composantes), la quantité qui arrive chez un sous-traitant doit au moins égaler la quantité nécessaire pour la production des sous-assemblages supérieurs.

$$\sum_{j \in S_p} F_{jip} - \sum_{p' \in Suc(p)} g_{pp'} X_{ip'} = 0 \quad \forall p \in G \cup W, i \in S(Suc(p)) \quad (4.14)$$

k. Flux entrant pour les matières premières

La même contrainte s'applique sur les matières premières

$$\sum_{j \in V_p} F_{jip} - \sum_{p' \in Suc(p)} g_{pp'} X_{ip'} = 0 \quad \forall p \in R, i \in S(Suc(p)) \quad (4.15)$$

l. Contraintes logiques

Des contraintes logiques relient les variables binaires d'ouverture des sites (A_i) aux variables binaires d'affectation des produits aux sites (Y_{ip}).

Si un site se voit affecter un seul produit, alors il est considéré comme opérationnel. Ce qui est traduit par l'inégalité suivante :

$$Y_{ip} - A_i \leq 0 \quad \forall i \in S \cup V, p \in G_i \cup R_i \quad (4.16)$$

De plus, si un site ne se voit affecter aucun produit, alors il est fermé

$$\sum_{p \in G_i} Y_{ip} - A_i \geq 0 \quad \forall i \in S \text{ (Pour les produits semi finis)} \quad (4.17)$$

$$\sum_{p \in R_i} Y_{ip} - A_i \geq 0 \quad \forall i \in V \text{ (Pour les matières premières)} \quad (4.18)$$

m. Satisfaction de la demande

La quantité de produit fini envoyée des sous-traitants aux zones-clients doit égaler la demande en ce produit.

$$\sum_{i \in S_p} F_{idp} = d_{pd} \quad \forall p \in C, d \in D \quad (4.19)$$

n. Contraintes de non-négativité

Les quantités fournies par les nœuds et les quantités transportées sont continues et non-négatives.

$$F_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in R, i \in V_p, j \in S(\text{suc}(p)) \quad (4.20)$$

$$F_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in M, i \in S_p, j \in S(\text{suc}(p)) \quad (4.21)$$

$$F_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in C, i \in S_p, j \in D \quad (4.22)$$

$$X_{ip} \geq 0 \quad \forall (p, i) \in R \times V_p \cup M \times S_p \quad (4.23)$$

o. Contraintes d'intégrité

Les variables binaires sont :

$$Y_{ip} \in \{0, 1\} \quad \forall (p, i) \in R \times V_p \cup M \times S_p \quad (4.24)$$

$$Z_{wpi} \in \{0,1\} \quad \forall w \in W, p \in G_w, i \in S_p \quad (4.25)$$

$$A_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in S \quad (4.26)$$

4.6 Extension multi-période au modèle

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le domaine de l'aéronautique. La modélisation est basée sur la programmation mathématique en nombres mixtes. Dans notre modèle, nous prenons en considération la nomenclature de produits et la modularité dans la production pour concevoir la chaîne d'approvisionnement.

L'un des points forts du modèle présenté est sa capacité de s'appliquer à d'autres domaines de l'industrie dès lors que l'on est dans un contexte de production. De plus, il peut être facilement étendu pour devenir multi-période; dans ce cas, il faudrait ajouter un indice qui rend compte du temps à toutes les variables de décision ; on devrait également ajouter des variables de stocks à la fin de chaque période de l'horizon de planification. Au niveau de la fonction objectif, la considération des coûts de stockage est nécessaire pour avoir un modèle d'optimisation intégré. De la même façon, des contraintes d'équilibres de stocks à l'issue de chaque période doivent être considérées.

Dans un contexte multi-période, le modèle devient particulièrement intéressant puisqu'il permet de voir l'impact de plusieurs scénarios sur la configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, il peut être judicieux d'évaluer l'impact de maintes décisions sur le design du réseau. Les scénarios qu'on peut imaginer sont multiples et peuvent concerner notamment :

- a. L'ouverture des sites au début de l'horizon sans possibilité de fermeture au cours de la période de planification ;

- b. L'ouverture des sites à n'importe quelle période sans possibilité de fermeture au courant de l'horizon ;
- c. L'ouverture et la fermeture des sites à n'importe quelle période.

Dans les chapitres qui suivent, nous validons notre modèle à l'aide de l'expérimentation sur deux modèles de tailles différentes, la résolution se base sur le solveur commercial ILOG CPLEX. Dans le chapitre 6, nous résolvons le premier modèle (de petite taille) avec la méthode de décomposition de Benders. À l'issue de ce chapitre, nous ferons une étude comparative des résultats obtenus par le solveur et par la méthode de décomposition de Benders.

CHAPITRE 5

VALIDATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons suggéré une formulation du problème de design du réseau de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise du secteur aéronautique avec des considérations de la nomenclature de produits et de la modularité. Le modèle ainsi proposé fait partie de la famille des problèmes linéaires en nombres mixtes. Nous avons cité tous les paramètres de coûts, de capacité et de temps qui seront utilisés comme intrants de notre modèle mathématique.

Une des étapes les plus cruciales de la modélisation consiste, en premier lieu, à collectionner toutes les données nécessaires reliées aux unités qui composent le réseau potentiel telles que les localisations des sites, leurs capacités et leurs coûts associés. Ensuite, toutes ces informations doivent être organisées et enregistrées dans une base de données, ce qui facilitera amplement le recours ultérieur à ces informations.

Dès le début du présent projet, nous étions conscients de l'importance d'utiliser un cadre de travail qui permette de traiter des problèmes d'envergure, conséquence naturelle du fait que l'on œuvre dans le secteur aéronautique, où un moteur d'avion peut être constitué de près de 1 000 pièces, chacune d'elles peut être fabriquée par un ou plusieurs sous-traitants, et chacune doit être transportée d'un site à un autre en vue d'être utilisée dans les sous-assemblages subséquents. La complexité et la taille de tels problèmes nécessitent de procéder d'une manière fiable et élégante, en suivant quelques étapes et en utilisant, lors de chacune des étapes, les moyens informatiques adéquats.

À l'annexe 1, nous proposons un cadre de travail qui pourrait être utilisé lorsqu'on traite des modèles mathématiques de grande taille. Tout d'abord, un modèle relationnel de données a été construit dans SILVERRUN-RDM 2.7.2.0. Ceci permet de générer un gabarit de base de données dans Microsoft Access 2003. Cette base de données est ensuite développée en la peuplant des données et paramètres du problème. Le modèle mathématique peut alors être généré en utilisant un code dans Microsoft Visual Basic 6.0. À l'issue de cette étape, un fichier de format « LP » est généré avec la fonction-objectif et les contraintes du modèle. Ce fichier sera l'intrant de l'étape en aval : l'optimisation avec ILOG CPLEX 10.0 (annexe 2). Le schéma de la figure 14 présente d'une manière concise les étapes que nous suivons pour la génération automatique de notre modèle, en précisant les intrants et les extrants pour chacune des étapes.

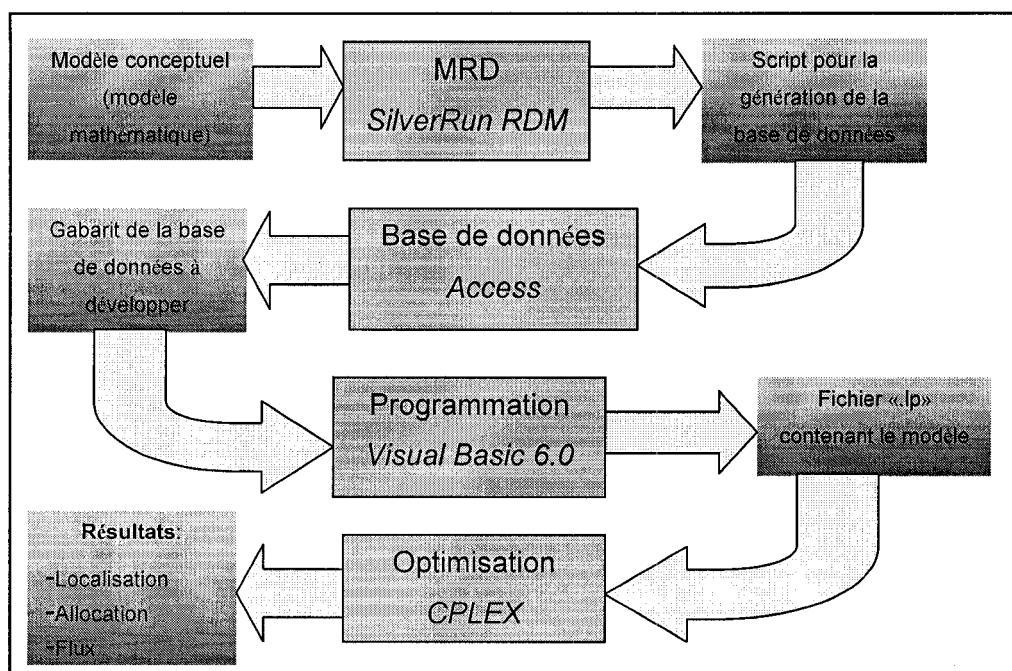


Figure 14 Résumé des étapes suivies dans la génération automatique

Dans ce chapitre, nous procédons à l'optimisation du réseau de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le secteur aéronautique, et ce, à partir d'une nomenclature de produits et d'un réseau potentiel tels que présentés aux

figures 12 et 13. Cela consiste à déterminer la localisation des sites de fournisseurs de matières premières et de sous-traitants, ainsi que l'allocation des produits aux sites et le flux des différents produits entre les sites. L'optimisation du modèle permet également d'affecter des pièces orphelines à des modules qui vont être fabriqués ensemble chez un même sous-traitant. L'objectif principal est de répondre à la demande des clients, tout en minimisant l'ensemble des coûts totaux de la chaîne d'approvisionnement.

Dans ce qui suit, nous résolvons le modèle dans deux cas de nomenclature de produits. Dans le premier modèle, nous traitons un problème de petite taille en nous basant sur une nomenclature de produits de quatre niveaux (figure 12). Dans la suite de ce mémoire, ce problème sera appelé « turbine HP ». Il s'agit d'optimiser le réseau potentiel présenté à la figure 13. Dans le second cas, nous traitons un problème réaliste de grande taille, que nous appellerons « BOM 10 », à base de nomenclature de produits d'un moteur d'avion réel. Les résultats de chacun des modèles sont présentés, et une analyse de sensibilité est faite pour le modèle réaliste « BOM 10 » afin de déterminer les paramètres qui ont un effet significatif sur le réseau. Nous validons ainsi notre modèle de conception de la chaîne d'approvisionnement.

5.2 Résolution d'un premier modèle : turbine HP

Dans cette section, nous procédons à l'optimisation du réseau de la chaîne d'approvisionnement à partir du réseau potentiel de la figure 13 et de la nomenclature de la figure 12.

5.2.1 Données du problème : turbine HP

Pour ce premier modèle, il est important de souligner que l'accent a été mis davantage sur la validité des résultats obtenus à l'issue de l'optimisation. Dans un premier temps, nous avons abandonné les contraintes suivantes :

- a. Les contraintes (4.8) rendant compte du respect du temps disponible sur la ligne d'assemblage des sous-traitants ;
- b. Les contraintes (4.9) rendant compte de l'occupation minimale de la capacité agrégée des sous-traitants ;
- c. Les contraintes (4.11) traduisant l'utilisation d'une capacité minimale des fournisseurs de matières premières.

Dans ce qui suit, nous présentons les données requises dans notre modélisation.

Tableau VII

Données relatives aux coûts fixes et variables et aux capacités de la sous-traitance

Sous-traitant	Produit	Coût de start_up (\$)	Coût de production unitaire (\$/unité)	Capacité de production (unité)
S1	P1	0	5 600	1 100
S1	P2	800	800	1 200
S1	P3	800	900	50 000
S7	P4	1 000	500	50 000
S8	P5	1 000	150	12 000
S8	P6	1 000	200	6 000
S8	P7	1 000	150	4 000
S8	P8	1 000	150	13 000
S8	P9	1 000	200	50 000
S9	P3	600	1 200	50 000
S10	P5	1 000	350	11 000
S10	P6	1 000	400	7 000
S11	P7	300	100	8 000
S11	P8	300	125	20 000
S11	P9	300	110	60 000

Tableau VIII

Données relatives aux coûts fixes et variables
et aux capacités d'approvisionnement en matières premières

Fournisseur	Produit	Coût_start_up (\$)	Coût unitaire d'approvisionnement (\$/unité)	Capacité d'approvisionnement
V2	R1	1 000	3 000	960
V2	R2	1 000	3 000	960
V3	R1	1 000	3 200	1 100
V3	R2	1 000	3 000	1 100
V4	R1	1 000	2 750	1 050
V4	R2	1 000	3 800	1 050
V5	R3	1 200	3 000	1 300
V6	R3	1 200	3 000	45 000

Tableau IX

Données relatives à l'affectation des
pièces orphelines aux modules

Pièce orpheline	Module	Sous-traitant	Coût d'affectation (\$)	Coût de production unitaire (\$/unité)	Capacité de production (unité)
W1	P2	S1	130	200	12 000
W2	P2	S1	250	110	20 000
W1	P3	S1	130	200	12 000
W2	P3	S1	250	110	20 000
W2	P4	S7	225	150	10 000
W1	P3	S9	160	225	60 000
W2	P3	S9	190	190	49 000

Tableau X

Données relatives au transport de tous les produits

Noeud source	Noeud destination	Produit	Coût de transport unitaire par unité de distance (\$/unité/km)	Distance (km)
V2	V2	R2	0	0
V2	V3	R2	20	352,56
V2	V4	R2	20	6 768,39
V2	S1	R1	25	5 060,56
V3	V2	R2	20	352,56
V3	V3	R2	0	0
V3	V4	R2	20	6 555,39
V3	S1	R1	25	4 827,85
V4	V2	R2	20	6 768,39
V4	V3	R2	20	6 555,39
V4	V4	R2	0	0
V4	S1	R1	25	1 755,69
V5	S1	R3	3	1 055,10
V5	S9	R3	3	1 811,83
V6	S1	R3	3	2 489,29
V6	S9	R3	3	3 196,02
S1	S1	P2	0	0
S1	S1	P3	0	0
S1	S1	W1	0	0
S1	S1	W2	0	0
S1	Client	P1	0	0
S7	S1	P4	5	487,74
S7	S1	W2	2	487,74
S8	S1	P5	3	10,37
S8	S1	P6	3	10,37
S8	S1	P7	2	10,37
S8	S1	P8	3	10,37
S8	S1	P9	3	10,37
S9	S1	P3	6	766,50
S9	S1	W1	3	766,50
S9	S1	W2	2	766,50
S10	S1	P5	3	37,06
S10	S1	P6	3	37,06
S11	S1	P7	2	3 544,09
S11	S1	P8	3	3 544,09
S11	S1	P9	3	3 544,09

En ce qui concerne les données relatives à la nomenclature de produits, elles sont données à la figure 12. Le problème est ensuite résolu pour une demande de 1 000 unités en produit fini P1.

5.2.2 Présentation et interprétation des résultats

Le problème de design optimal du réseau de la chaîne d'approvisionnement dans ce petit cas de nomenclature de produits est formulé en un modèle mathématique comportant 99 variables, dont 64 variables continues et 35 variables binaires. Il comporte 103 contraintes (98 contraintes d'inégalité et cinq contraintes d'égalité). Ce modèle est généré en trois secondes. ILOG CPLEX lit le problème immédiatement et le résout en 0.01 secondes en utilisant 22 itérations. Le coût total optimal de la chaîne d'approvisionnement est de **791 361 011 \$**. Le tableau XI donne la synthèse de la répartition des coûts encourus composés de coûts fixes, de coûts variables et de coûts de transport.

Tableau XI

**Répartition des coûts encourus
de la chaîne d'approvisionnement**

Start-up	Sous-traitance et approvisionnement en matières premières	Transport
13 680 \$	237 560 000 \$	553 787 331 \$

La répartition de ces coûts montre que 70 % du coût total est absorbé par le transport alors que 30 % est consommé par la sous-traitance et l'approvisionnement en matières premières. Les coûts fixes sont négligeables par rapport aux autres éléments de coût.

La configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement est donnée dans la figure 15 où nous avons représenté la localisation des nœuds de la chaîne (sous-traitants, fournisseurs de matières premières, clients, *etc.*), ainsi que l'allocation des produits aux nœuds. Nous avons indiqué à côté de chaque nœud les produits qui lui sont alloués ainsi que les quantités à fournir.

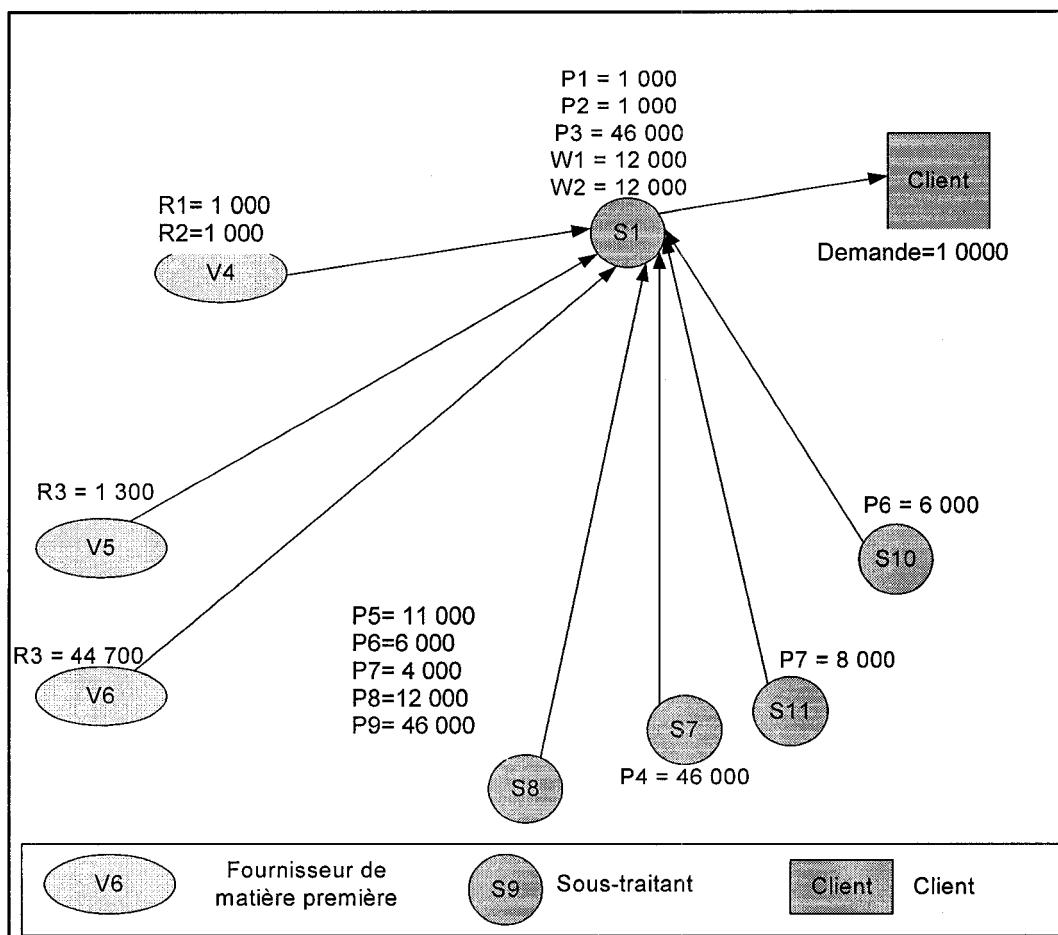


Figure 15 Configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement

La configuration optimale du réseau est la suivante :

a. Affectation des matières premières

- $R1$ sera fourni par le fournisseur $V4$ qui en fournira 1 000 unités ;

- R2 sera fourni par le fournisseur V4 qui en fournira 1 000 unités ;
- R3 sera fourni en partie par le fournisseur V5 qui en fournira 1 300 unités, la quantité restante (44 700 unités) sera fournie par le fournisseur V6.

b. Affectation des composantes fabriquées aux sous-traitants

- P1 sera assigné à S1 : 1 000 unités ;
- P2 sera assigné à S1 : 1 000 unités ;
- P3 sera assigné à S1 : 46 000 unités ;
- P4 sera assigné à S7 : 46 000 unités ;
- P5 sera assigné à S8 : 11 000 unités ;
- P6 sera assigné à S8 : 6 000 unités et à S10 : 6 000 unités ;
- P7 sera assigné à S8 : 4 000 unités et à S11 : 8 000 unités ;
- P8 sera assigné à S8 : 12 000 unités ;
- P9 sera assigné à S8 : 46 000 unités.

Il est important de souligner au passage que le fournisseur V5 et le sous-traitant S8 sont utilisés à pleine capacité pour l'approvisionnement de la matière première R3 et pour la fabrication des pièces P6 et P7 respectivement. La même chose s'applique pour le sous-traitant S11 qui fabrique toute sa capacité en produit P7.

c. Affectation des pièces orphelines

- W1 sera assignée au module P2 fabriqué par S1 : 12 000 unités ;
- W2 sera assignée au module P2 fabriqué par S1 : 12 000 unités.

d. Produits transportés entre les noeuds

Les quantités indiquées sont également celles transportées du noeud auquel elles sont assignées au noeud suivant dans le réseau de la figure 15.

Notons que les résultats obtenus à partir de la compilation du modèle et des données générées doivent être compréhensibles et fiables pour que l'entreprise puisse les prendre en considération lors de la conception de sa chaîne d'approvisionnement. Ainsi, l'une des étapes les plus cruciales lors de la mise en œuvre de l'implantation de la chaîne d'approvisionnement est la validation des données et du modèle lui-même. Afin de les valider, on peut exécuter plusieurs scénarios et effectuer une analyse de sensibilité. Cette dernière est sans doute l'un des volets les plus importants de la validation, car la valeur de certains paramètres reste approximative ; il est donc extrêmement important de s'assurer que la solution retenue, c'est-à-dire la configuration optimale du réseau n'est pas trop sensible à des variations des paramètres.

5.3 Résolution du modèle dans un cas réaliste : BOM 10

À ce stade, nous pouvons valider notre modèle d'optimisation des chaînes d'approvisionnement du secteur aéronautique. Dans le paragraphe suivant, nous allons tester notre modèle avec un cas réaliste de moteur d'avion, tout en prenant en compte les contraintes (4.8), (4.9) et (4.11). La validation sera plus pertinente avec une analyse de sensibilité afin de tester la solidité du modèle et de voir l'impact de différents paramètres sur la configuration optimale de la chaîne d'approvisionnement.

Dans ce paragraphe, nous faisons des expérimentations sur un problème réel de conception de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le secteur aéronautique, et ce pour un programme de moteur d'avion réel. Rappelons que l'objectif est de concevoir la chaîne d'approvisionnement en choisissant les fournisseurs pour les matières premières, les sous-traitants pour les modules, les pièces orphelines et les autres composantes, de façon à minimiser le coût total de la chaîne tout en satisfaisant la demande. Nous allons présenter et discuter par la suite les résultats que nous avons obtenus, nous ferons également une analyse de sensibilité.

5.3.1 **Données du problème : BOM 10**

Pour la résolution du problème dans un cas de nomenclature de produits réaliste, nous avons supposé que les localisations des fournisseurs et des sous-traitants sont connues, et que les coûts de transport incluent les taxes et les droits de douane. Nous avons considéré que la compagnie devrait acquérir au moins 15 % de la capacité d'un sous-traitant ou d'un fournisseur de matières premières pour justifier l'établissement d'un contrat, et que ce pourcentage est valable pour tous les acteurs de la chaîne d'approvisionnement. Pour des considérations de confidentialité, les différents coûts ont été modifiés, étant donné que l'emphase est plus mise sur le modèle lui-même.

Pour notre cas d'expérimentation, la nomenclature du moteur d'avion considéré contient dix niveaux (du niveau A au niveau J). Nous avons fait l'hypothèse que toutes les composantes du niveau J sont des matières premières. Ces matières premières peuvent être approvisionnées par quatre fournisseurs. La nomenclature de produits contient 789 composantes, toutes pièces confondues, qui peuvent être sous-traitées à 40 sous-traitants. Une présélection des partenaires d'affaires donne une moyenne de trois sous-traitants potentiels pour chaque composante. La nomenclature de produits contient également 17 pièces orphelines qui peuvent être assignées à des modules pour former des kits. Dans un travail précédent auquel nous avons participé (Ramudhin et Pronovost, 2006), nous avons considéré que les pièces orphelines doivent être assignées à des modules dans le premier niveau de la nomenclature de produits ; dans le présent mémoire, les pièces orphelines peuvent être assignées à des modules à n'importe quel niveau de la nomenclature pourvu que les pièces orphelines et les modules appartiennent au même niveau. Dans notre cas, les pièces orphelines appartiennent aux niveaux B, C et D.

Le modèle mathématique linéaire en nombres mixtes correspondant à ce problème contient 5 787 variables dont 1 587 sont binaires, toutes les autres variables étant

continues. Il contient 6 570 contraintes où 6 528 sont des inégalités et 42 sont des égalités. Le modèle est généré en 10 minutes et est résolu en 212 secondes.

5.3.2 Présentation et interprétation des résultats

La figure 16 (réalisée à l'aide du logiciel SSA Supply Chain Design 8.1 que nous présentons à l'annexe 3) montre la configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement correspondant à la nomenclature du moteur d'avion dans le cas réel, et ce pour une demande de six unités en produit fini et pour une utilisation minimale de la capacité agrégée de 15 % chez chaque fournisseur et chaque sous-traitant choisi. Pour cette configuration, le coût total optimal est de **6 149 394 \$**. Le réseau optimal comprend 20 sous-traitants et deux fournisseurs de matières premières.

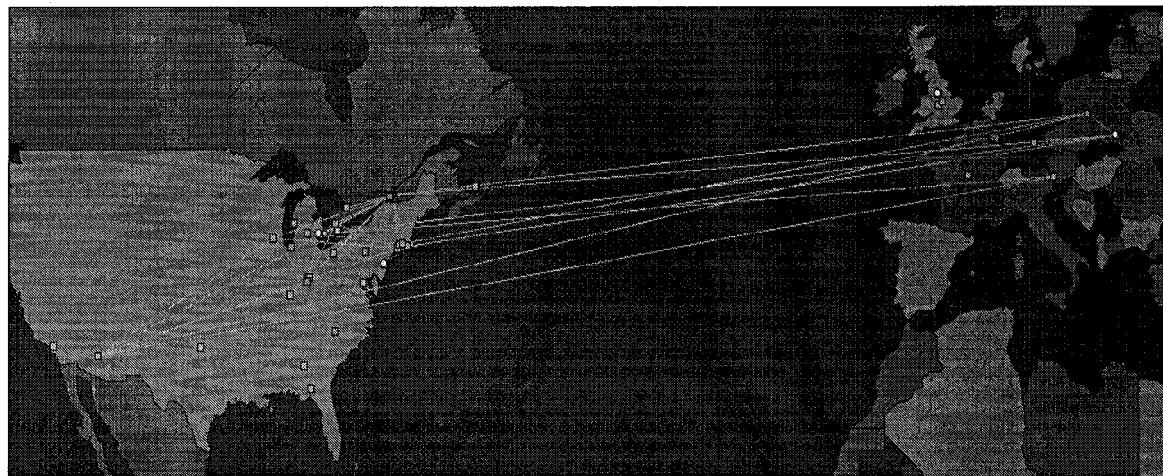


Figure 16 Réseau optimal de la chaîne d'approvisionnement

Les tableaux suivants montrent la répartition des coûts fixes et variables de la configuration optimale du réseau de la figure 16.

Tableau XII

Répartition des coûts fixes

Coûts fixes		
Matières premières	Modules et autres composantes	Pièces orphelines
1 550 \$	234 822 \$	40 986 \$

Tableau XIII

Répartition des coûts variables

Coûts variables			
Approvisionnement des matières premières	Sous-traitance de modules et autres composantes	Sous-traitance des pièces orphelines	Coûts de transport
135 \$	4 633 120 \$	1 182 \$	1 237 600 \$

Ces résultats montrent qu'en particulier, les coûts variables d'approvisionnement de matières premières et de sous-traitance représentent 75 % du coût total alors que les coûts de transport représentent 20 %. Les coûts fixes absorbent 5 % du coût total. Ceci veut dire que les décideurs devraient plutôt concentrer leur effort sur la réduction des coûts de sous-traitance, suivis par les politiques de transport. Il est également nécessaire de mentionner que les différents paramètres de coûts devraient être injectés dans le modèle avec le plus de précision possible afin que les résultats puissent être considérés lors du déploiement de la stratégie logistique, car une estimation erronée de tels paramètres fausserait la configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement.

Avant de procéder à une analyse de sensibilité, nous voudrions souligner que la présentation des résultats sous forme graphique, telle que le montre la figure 16, a une très grande importance pour le déploiement de la stratégie logistique auprès des

décideurs notamment. En effet cela permet de voir plus explicitement la structure et l'étendue géographique du réseau. Dans ce cadre, SSA Supply Chain Design a été utilisé pour visualiser le réseau ainsi que les liens entre les différents acteurs de la chaîne (fournisseurs de matières premières, sous-traitants, clients, *etc.*).

5.3.3 Analyse de sensibilité

Dans le but de voir le comportement de notre réseau de chaîne d'approvisionnement, nous avons testé plusieurs scénarios où nous avons essayé de varier différents paramètres qui ont un impact significatif sur le réseau tels que les coûts fixes, les coûts variables, les temps de fabrication chez les sous-traitants pour les différents produits et les capacités des fournisseurs pour les matières premières. Nous avons également fait varier le pourcentage de capacité minimale à utiliser chez les sous-traitants. Dans ce qui suit, nous présentons et discutons les résultats obtenus.

5.3.3.1 Scénario 1 : Variation des coûts fixes

Le modèle linéaire en nombres mixtes que nous avons proposé et testé est un modèle déterministe qui suppose que tous les paramètres et tous les coûts sont connus avec précision, alors qu'en réalité, ces paramètres ne peuvent être qu'estimés.

Dans cette optique, nous avons fait varier les coûts fixes du modèle en les accroissant d'un pas de 10 % jusqu'à une augmentation de 50 % de leurs valeurs initiales. Les résultats sont regroupés dans le tableau XIV.

Tableau XIV

Effet de l'augmentation des
coûts fixes sur le coût optimal

Scénario 1 : augmentation des coûts fixes			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
10	6 177 128 \$	0,45%	176
20	6 204 830 \$	0,90%	1 027
30	6 232 476 \$	1,35%	663
40	6 260 059 \$	1,80%	857
50	6 287 612 \$	2,25%	31 859

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation de 10 % des coûts fixes augmente le coût total de la chaîne de 0,45 %. Il est nécessaire de souligner que ces augmentations des coûts fixes ne changent pas la structure du réseau lui-même avec les valeurs des paramètres que nous avons considérés. Toutefois, l'affectation des pièces orphelines est modifiée à 30 % d'augmentation.

5.3.3.2 Scénario 2 : Variation des coûts variables

Dans ce scénario, nous avons augmenté les coûts variables relatifs à la sous-traitance des composantes, des modules, des pièces orphelines ainsi que d'approvisionnement de matières premières. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau XV.

Tableau XV

Effet de l'augmentation des coûts variables sur le coût total

Scénario 2 : augmentation des coûts variables			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
10	6 612 837 \$	8%	190
20	7 076 280 \$	15%	1 385
30	7 539 586 \$	23%	86
40	8 002 869 \$	30%	151
50	8 466 152 \$	38%	75

Ces résultats montrent que le coût total de la chaîne d'approvisionnement est très sensible aux coûts variables d'approvisionnement et de sous-traitance. En effet, une augmentation d'un pas de 10 % des coûts variables a pour effet d'augmenter le coût total de la chaîne logistique de 8 %, et ce sans modifier la structure optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement pour l'ensemble des valeurs des paramètres injectés dans le modèle. Toutefois, l'affectation des pièces orphelines est modifiée à 30 % d'augmentation.

5.3.3.3 Scénario 3 : Variation des coûts de transport

Dans une chaîne d'approvisionnement, les coûts de transport sont un élément de coût très important, et devraient par conséquent faire l'objet d'une considération bien particulière. Pour voir l'effet de ces coûts sur notre cas de chaîne d'approvisionnement, nous avons fait varier les coûts de transport en les accroissant d'un pas de 10 % jusqu'à 50 % de leurs valeurs initiales. Les résultats sont donnés dans le tableau XVI.

Tableau XVI

Effet de l'augmentation des coûts de transport sur le coût total

Scénario 3 : augmentation des coûts de transport			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
10	6 273 122 \$	2 %	676
20	6 396 832 \$	4 %	88
30	6 520 530 \$	6 %	95
40	6 644 211 \$	8 %	51
50	6 767 884 \$	10 %	62

Ces résultats montrent que le coût total de la chaîne d'approvisionnement est sensible aux coûts de transport. En effet, sans changer la structure du réseau, une augmentation d'un pas de 10 % des coûts unitaires de transport a pour effet d'augmenter le coût total de la chaîne d'approvisionnement de 2 %. De plus, nous avons souligné précédemment que le transport吸orbe près de 20 % du coût total de la chaîne logistique. Cela veut dire que les coûts de transport sont une composante de très haute importance qu'il faut donner avec le plus de précision possible, car une mauvaise estimation pourrait compromettre les plans financiers d'une entreprise.

5.3.3.4 Scénario 4 : Variation des temps de fabrication de la sous-traitance

Dans le but de voir l'impact des temps de fabrication sur les produits chez les sous-traitants, nous avons augmenté ces temps d'un pas de 10 % par rapport à leurs valeurs initiales. Les résultats de cette analyse sont synthétisés dans le tableau XVII.

Tableau XVII
Effet de l'augmentation des temps de fabrication

Scénario 4 : augmentation des temps de fabrication			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
10	6 152 587 \$	0,052 %	73
20	6 159 906 \$	0,171 %	315
30	infaisable	-	-
40	infaisable	-	-
50	infaisable	-	-

Même si elle ne change pas significativement le coût total de la chaîne d'approvisionnement, l'augmentation des temps de fabrication sur les produits fabriqués chez les sous-traitants a un effet significatif sur la configuration du réseau. En effet, une augmentation de 10 % de ce temps n'augmente le coût total que de 0.052 %, alors qu'une augmentation de 20 % n'accroît le coût total que de 0.171 %. Nous remarquons, selon les résultats de l'allocation des produits, que la structure du réseau change par rapport à la configuration initiale (21 sous-traitants au lieu de 20). Le modèle de programmation linéaire en nombres mixtes devient toutefois infaisable pour une augmentation de plus de 30 % des temps de fabrication. Ceci s'explique par le dépassement de capacité temporelle chez les sous-traitants exprimé par les contraintes (4.8). Les temps de fabrication sont donc des paramètres qu'il faudrait estimer avec le plus de précision possible car une surestimation conduirait à un problème infaisable qui nécessiterait une augmentation des capacités chez les sous-traitants et par conséquent donnerait lieu à des investissements inutiles.

5.3.3.5 Scénario 5 : Variation des capacités des fournisseurs de matières premières

Ce scénario vise à voir l'impact de la variation des capacités des fournisseurs de matières premières sur la configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Nous avons augmenté ces capacités d'un pas de 10 % jusqu'à une valeur de 50 % de leurs valeurs initiales. Les résultats sont rassemblés dans le tableau XVIII.

Tableau XVIII

Effet de l'augmentation des capacités des fournisseurs de matières premières

Scénario 5 : augmentation de la capacité des fournisseurs de matières premières			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
10	6 148 706 \$	-0,0112 %	98
20	6 148 368 \$	-0,0167 %	311
30	6 148 091 \$	-0,0212 %	150
40	6 147 811 \$	-0,0257 %	89
50	6 147 280 \$	-0,0344 %	412

Le tableau XVIII suggère que l'augmentation de la capacité des fournisseurs de matières premières d'un pas de 10 % réduirait le coût total de la chaîne d'approvisionnement de 0,0112 %. Nous expliquons ce résultat par le fait qu'il existe un ensemble de fournisseurs de matières premières qui offrent des coûts très compétitifs par comparaison à d'autres fournisseurs, mais qui ne disposent pas de suffisamment de capacité pour satisfaire les demandes en matières premières. Ce résultat peut servir aux décideurs comme argument pour justifier, par exemple, des investissements supplémentaires chez les fournisseurs de matières premières en vue d'augmenter leurs capacités, et réduire ainsi le coût global de la chaîne d'approvisionnement. Soulignons

au passage que la structure du réseau est modifiée pour une augmentation de 50 % où on n'a besoin que d'un seul fournisseur de matières premières au lieu de deux.

5.3.3.6 Scénario 6 : Variation du pourcentage minimal d'occupation de capacité chez les sous-traitants

Le pourcentage de capacité minimale à occuper chez un sous-traitant est un élément d'une importance particulière dans l'établissement d'un contrat. En effet, si une entreprise n'occupe que 1 % de la capacité totale sur la ligne d'assemblage d'un sous-traitant, elle n'est considérée qu'un petit client chez le sous-traitant. Plus la part de capacité qu'occupe l'entreprise chez le sous-traitant est grande, plus importante sera sa position, et sera ainsi considérée comme un client privilégié.

Pour étudier l'impact du pourcentage d'occupation de la capacité chez les sous-traitants, nous avons augmenté ses valeurs d'un pas de 2.5 % de 0 à 15 %. Le tableau XIX synthétise les résultats obtenus.

Une augmentation de 2.5 % du pourcentage de la capacité minimale à utiliser a pour effet d'augmenter le coût total de la chaîne logistique d'à peu près 1 000 \$. Soulignons au passage que les cas de base que nous avons résolus précédemment correspondent à un pourcentage de 15 %. La considération d'un pourcentage de la capacité minimale modifie la structure du réseau de la chaîne logistique. En effet, on passe d'une configuration de 27 sous-traitants dans le cas où il n'y a aucune contrainte de ce type, à une configuration de 21 sous-traitants lorsque ce pourcentage est de 2.5 %. À partir d'un pourcentage de 5 %, le nombre de sous-traitants impliqués dans la chaîne passe à 20. Pour des valeurs plus grandes que 15 %, le problème devient infaisable. Ceci s'explique par le fait que certains sous-traitants sont contraints à surproduire certains produits, alors que leur capacité à produire ceux-ci est limitée. Nous en déduisons que, malgré que l'effet d'un changement du pourcentage de capacité minimale à utiliser ne soit pas très

perceptible au niveau du coût total, c'est un paramètre très important car une mauvaise estimation conduirait à un problème impossible à résoudre.

Tableau XIX

Impact de la variation du pourcentage minimal de capacité agrégée à utiliser chez les sous-traitants

Scénario 6 : augmentation du pourcentage minimal de capacité à utiliser			
Pourcentage d'augmentation (%)	Coût total optimal de la chaîne logistique	Variation du coût total (%)	Temps de résolution (sec)
0	6 142 193 \$	-	43
2.5	6 143 953 \$	0,029 %	4 776
5.0	6 145 093 \$	0,047 %	1 407
7.5	6 146 029 \$	0,062 %	1 612
10.0	6 147 135 \$	0,080 %	38 761
12.5	6 148 241 \$	0,098 %	133
15.0	6 149 394 \$	0,117 %	212

5.4 Conclusion

Le modèle linéaire en nombres mixtes nous a permis de trouver la configuration optimale du réseau de la chaîne d'approvisionnement d'une entreprise œuvrant dans le secteur aéronautique, et ce à partir de la nomenclature de produits tout en introduisant la notion de modularité dans la production des composantes. Il nous a permis de :

- Déterminer la localisation des fournisseurs de matières premières et des sous-traitants des autres composantes fabriquées ;
- Déterminer l'affectation des différents produits aux sites ainsi choisis ;
- Déterminer l'affectation des pièces orphelines aux modules ;
- Déterminer les quantités des produits à fournir et à fabriquer dans chacun des sites choisis ;

- e. Déterminer les quantités des différents produits transportées entre les noeuds du réseau.

Nous avons aussi effectué plusieurs expérimentations sur le modèle d'optimisation afin de tester l'influence de changement de quelques paramètres du réseau sur sa configuration optimale et sur le coût total de la chaîne. Il ressort de cette étude que les coûts de sous-traitance et les coûts de transport unitaires sont les composantes-clés de la structure de coût de la chaîne logistique. En effet, ces coûts doivent être injectés dans le modèle le plus précisément possible car le coût total est très sensible à ces éléments. Une erreur dans leur estimation pourrait conduire à une grande variation par rapport au plan financier initial. Les temps de fabrication doivent également être estimés avec précision car ils peuvent faire en sorte que le modèle d'optimisation ne soit plus faisable. Les résultats ont été présentés et analysés, ce qui permet de conclure que notre modèle est fiable et qu'on peut le prendre en considération pour mettre en œuvre une démarche stratégique basée sur la modularisation.

D'un point de vue pratique, le modèle permet d'exécuter divers scénarios en vue de faire des analyses (*what if analysis*). Les exemples traités dans ce mémoire soulignent l'importance de l'incorporation de la nomenclature de produits et de la modularité dans la conception des chaînes d'approvisionnement. Le modèle permet d'avoir de la flexibilité à travers le concept de modularité, et donne une formulation globale du problème de design du réseau des chaînes logistiques grâce à l'intégration de la nomenclature de produits, de l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit fini.

Le prochain chapitre présente une autre méthode de résolution de notre problème. Si le solveur utilisé (ILOG CPLEX en mode interactif) se base sur un algorithme général et robuste de la méthode de séparation et d'évaluation progressive (*Branch-and-Bound*), cette catégorie de problèmes peut être classée dans la famille des modèles difficiles à

résoudre. Pour pouvoir comparer les résultats et dans le but de voir s'il y a un gain notable en utilisant d'autres approches de résolution, nous avons mis en œuvre la méthode de décomposition de Benders pour le premier cas résolu précédemment (turbine HP).

CHAPITRE 6

RÉSOLUTION DU MODÈLE AVEC LA MÉTHODE DE DÉCOMPOSITION DE BENDERS

6.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous explorons une autre méthode pour la résolution de notre modèle mathématique linéaire en nombres mixtes proposé au chapitre 4, pour le design du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Les résultats obtenus par cette méthode seront ensuite comparés à ceux obtenus par ILOG CPLEX. Il s'agit de la méthode de décomposition de Benders.

La question de recherche posée à ce stade est la suivante : est-ce qu'une méthode de relaxation, telle que la décomposition de Benders, peut accélérer la résolution du problème, surtout pour des instances de grande taille?

Nous présentons tout d'abord la théorie de la méthode de décomposition de Benders. Ensuite, nous expliquons comment nous l'avons implantée. Nous concluons ce chapitre en faisant une étude comparative des résultats obtenus par les deux méthodes dans un cas simple.

6.2 Théorie de la méthode

La modélisation d'un problème décisionnel sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers présente le plus souvent une structure bien particulière suggérant l'application de techniques de décomposition qui, couplées avec des solveurs plus puissants, rendent possible la résolution de problèmes de grande taille. La méthode de décomposition de Benders est caractéristique de cet état de fait.

6.2.1 Présentation générale

La méthode de décomposition de Benders a été présente dans les agendas de la recherche opérationnelle depuis les années 1960 (Benders, 1962). Elle exploite le fait que dans plusieurs problèmes, l'assignation de valeurs aux variables qui rendent le problème difficile à résoudre, simplifie énormément le problème. La méthode consiste à résoudre un problème en énumérant des valeurs de ces variables, et à résoudre les sous-problèmes résultants dans chacun des cas. Ceci implique la résolution de plusieurs sous-problèmes, toutefois, ceux-ci sont « faciles » à résoudre.

L'approche de Benders est en fait plus astucieuse que cela (Hooker, 2000). Au lieu d'énumérer aléatoirement les valeurs des variables « difficiles », elle résout un « problème-maître » pour trouver ces valeurs. À chaque fois que le problème-maître est résolu, la solution du sous-problème génère une « coupe de Benders » qui est ajoutée au problème-maître. Cette coupe a pour effet d'exclure la solution déjà obtenue par le problème-maître. En pratique, les coupes de Benders ajoutées excluent un grand nombre de solutions qui ne peuvent être meilleures que les solutions déjà obtenues. La solution optimale est souvent trouvée après qu'un petit nombre de coupes de Benders soient générées (Hooker, 2000). Évidemment, la clé de cette approche est la génération des coupes de Benders. Par ailleurs, la méthode résout les problèmes duals des sous-problèmes.

L'énorme avantage de la méthode de décomposition de Benders est le fait de pouvoir distinguer entre quelques variables « compliquantes » et plusieurs variables « faciles ». Plus précisément, le problème devient facile après avoir fixé les valeurs des variables « compliquantes ». L'exemple classique par excellence de ce type de problème est le modèle en nombres mixtes où il y a quelques variables entières « difficiles » et plusieurs variables continues « faciles » ; dans un tel cas, le sous-problème est un large problème linéaire, alors que le problème-maître est un petit programme entier pur.

Une des difficultés potentielles est toutefois la possibilité qu'un très grand nombre d'itérations soit nécessaire. Dans ce cas, le problème-maître pourrait devenir de très grande taille en accumulant, lors des itérations successives, une grande liste de coupes de Benders. Ceci étant, ces coupes permettent d'exclure un grand nombre de valeurs des variables « compliquantes », ce qui veut dire que la méthode tire des leçons des solutions déjà trouvées.

En résumé, l'idée de la méthode de Benders est d'obtenir la solution optimale du problème de départ en résolvant alternativement et itérativement les programmes maître et dual, le maître proposant des valeurs pour les variables entières et le dual définissant, soit les valeurs des variables continues si c'est possible, soit de nouvelles contraintes restreignant les valeurs des variables entières. Pour appliquer une telle méthode, il est nécessaire de disposer de solveurs permettant de résoudre efficacement le programme maître (Gabrel, 2005).

6.2.2 La reformulation de Benders

Proposée en 1962 dans (Benders, 1962), la méthode de décomposition de Benders a pour objet de décomposer et de résoudre un programme mathématique comportant des variables entières et des variables continues. Dans ce qui suit, nous présentons la méthode en nous basant sur les travaux de (Kalvelagen, 2002) qui montrent l'implantation de la méthode dans GAMS. Nous allons adopter les mêmes notations.

Un programme en nombres mixtes peut être formulé de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimize}_{x,y} & f^T y + c^T x \\
 & \left\{ \begin{array}{l} By + Ax \geq b \\ y \in Y \\ x \geq 0 \end{array} \right.
 \end{array} \tag{6.1}$$

Où :

x : colonne des variables continues ;

y : colonne des variables entières ;

c : colonne des coefficients des variables continues ;

f : colonne des coefficients des variables entières ;

A : matrice des contraintes de la partie continue ;

B : matrice des contraintes de la partie entière ;

b : colonne des membres de droite des contraintes ;

Y : domaine entier des variables y .

Si les variables entières y sont fixées à une valeur entière faisable \bar{y} , le modèle (6.1) devient :

$$\begin{array}{ll}
 \min_x & c^T x \\
 & \left\{ \begin{array}{l} Ax \geq b - B \bar{y} \\ x \geq 0 \end{array} \right.
 \end{array} \tag{6.2}$$

Le problème de minimisation complet peut alors être réécrit de la façon suivante :

$$\min_{y \in Y} \left[f^T y + \min_{x \geq 0} \{c^T x \mid Ax \geq b - By\} \right] \tag{6.3}$$

Le problème dual du problème (6.2) est le suivant :

$$\begin{array}{ll}
 \max_u (b - B \bar{y})^T u \\
 & \left\{ \begin{array}{l} A^T u \leq c \\ u \geq 0 \end{array} \right.
 \end{array} \tag{6.4}$$

Dans la méthode de décomposition de Benders, deux problèmes sont résolus : un problème-maître et un sous-problème dual. Le problème-maître est de la forme :

$$\begin{aligned} \min_y z \\ \left\{ \begin{array}{l} z \geq f^T y + (b - By)^T \bar{u}_k, k = 1, \dots, K \\ (b - By)^T \bar{u}_l \leq 0, l = 1, \dots, L \\ y \in Y \end{array} \right. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Dans le problème (6.5), les premières contraintes sont des contraintes d'optimalité, dans lesquelles les $\bar{u}_k, k = 1, \dots, K$ sont les points extrêmes du problème dual. Les secondes contraintes sont des contraintes de faisabilité dans lesquelles les $\bar{u}_l, l = 1, \dots, L$ sont les rayons extrêmes du problème dual si celui-ci est non-borné.

Quant aux sous-problèmes duals, ils s'écrivent sous la forme :

$$\begin{aligned} \max_u f^T \bar{y} + (b - B \bar{y})^T u \\ \left\{ \begin{array}{l} A^T u \leq c \\ u \geq 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Remarquons que pour les sous-problèmes duals (6.6), nous conservons le terme $f^T \bar{y}$ pour préserver la dualité forte (Kalvelagen, 2002).

Le sous-problème est un problème dual linéaire, tandis que le problème-maître est un problème linéaire entier pur (aucune variable continue n'est impliquée). La décomposition de Benders est intéressante dans la mesure où les sous-problèmes duals et le problème-maître sont faciles à résoudre. Dans le paragraphe suivant, nous donnons l'algorithme de décomposition de Benders.

6.2.3 L'algorithme de Benders

L'algorithme de décomposition de Benders peut être énoncé de la façon suivante :

{Initialisation}

y := solution entière initiale faisable du problème initial

$LB := -\infty$ (initialiser la borne inférieure à $-\infty$)

$UB := +\infty$ (initialiser la borne supérieure à $+\infty$)

$\varepsilon := 0.001$ (valeur du petit écart toléré entre les bornes inférieure et supérieure, cet écart constitue le critère d'arrêt)

TANT QUE $UB-LB > \varepsilon$

{Résoudre le sous-problème dual}

$$\max_u \left\{ f^T \bar{y} + (b - B \bar{y})^T u \mid A^T u \leq c, u \geq 0 \right\}$$

SI sous-problème dual NON BORNÉ ALORS

- Trouver le rayon extrême \bar{u}_l
- Ajouter la coupe de faisabilité $(b - B\bar{y})^T \bar{u}_l \leq 0$ au problème-maître

SINON

- Trouver le point extrême \bar{u}_k
- Ajouter la coupe d'optimalité $z \geq f^T y + (b - B\bar{y})^T \bar{u}_k$ au problème-maître
- Actualiser la valeur de la borne supérieure

$$UB := \min \left\{ UB, f^T \bar{y} + (b - B\bar{y})^T \bar{u}_k \right\}$$

FIN SI

{Résoudre le problème-maître}

$$\min_y \left\{ z \mid coupes, y \in Y \right\}$$

- Actualiser la valeur de la borne inférieure.

$$LB := \bar{z}$$

FIN TANT QUE

Le diagramme de la figure 17 donne l'algorithme de décomposition de Benders tel que nous l'avons présenté.

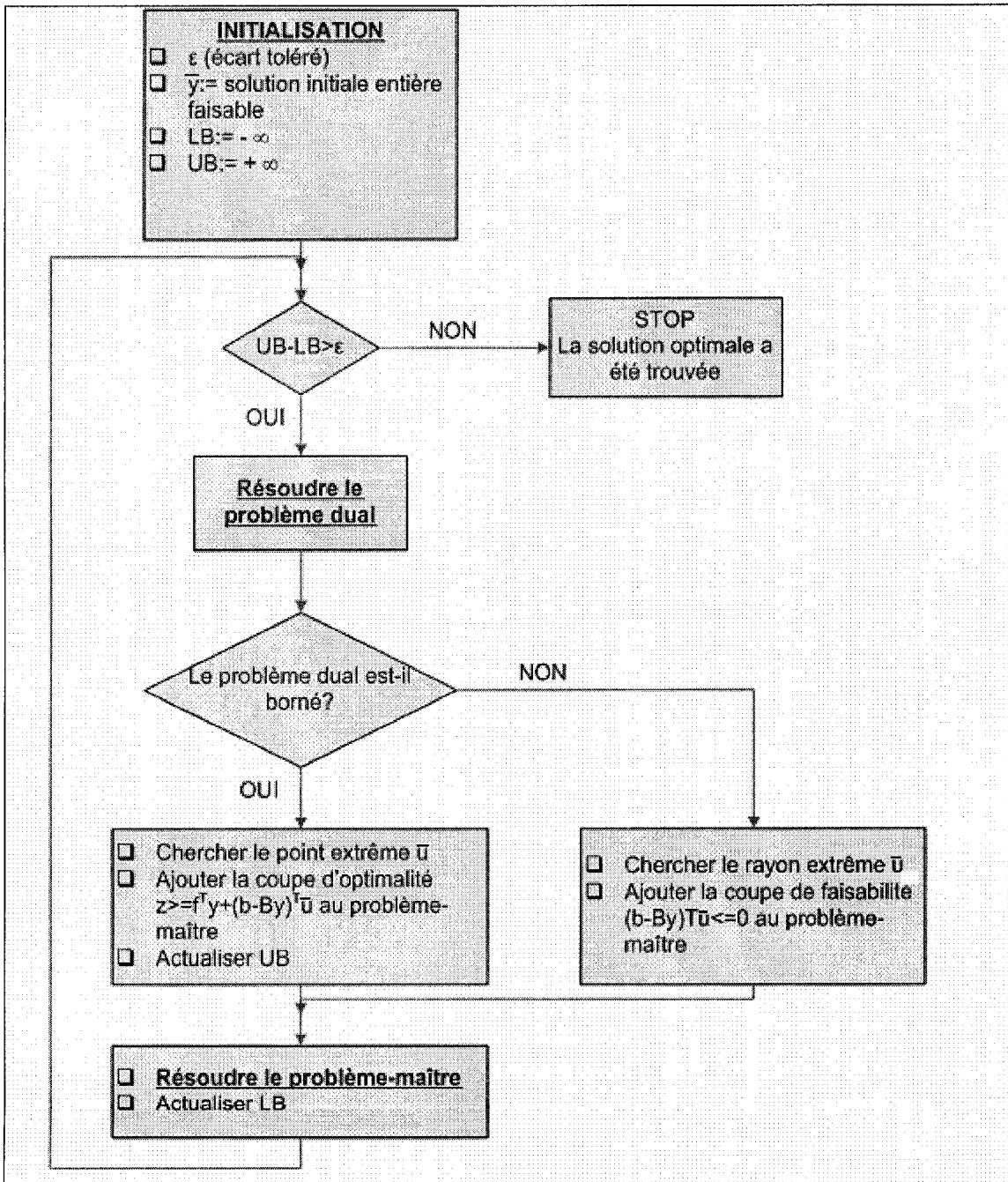


Figure 17 Algorithme de la méthode de décomposition de Benders

6.3 Implantation de la méthode

Dans le présent paragraphe, nous détaillons la manière dont nous avons implanté la méthode de décomposition de Benders, telle que décrite à la figure 17, et ce pour le premier problème de design du réseau de la chaîne d'approvisionnement correspondant à la nomenclature de produit et au réseau potentiel présentés aux figures 12 et 13 : turbine HP (Nomenclature à quatre niveaux, 99 variables dont 35 binaires et 103 contraintes). Rappelons que pour ce cas, nous n'avons pas pris en considération les contraintes notées (4.8), (4.9) et (4.11).

Rares sont les recherches qui détaillent la façon d'appliquer la méthode de décomposition de Benders. Ceci étant, la méthode pourrait être développée dans plusieurs environnements. Kalvelagen (2002) résout un problème linéaire en nombres mixtes en utilisant la décomposition de Benders dans GAMS. Pour ce qui nous concerne, nous avons utilisé Microsoft Visual Basic .NET vu que l'on disposait des librairies nécessaires à la construction et à la résolution de modèles : il s'agit des librairies ILOG.Concert.dll et ILOG.CPLEX.dll fournies avec CPLEX 10.0.

Notre modèle mathématique présente toutefois quelques particularités par rapport à la formulation standard (6.1). En effet, les contraintes (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.16), (4.17) et (4.18) n'impliquent que des variables binaires. Nous pouvons ainsi reformuler notre modèle de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \underset{x,y}{\text{minimize}} \quad & f^T y + c^T x \\ & \left\{ \begin{array}{l} Ly \geq d \\ By + Ax \geq b \\ y \in Y \\ x \geq 0 \end{array} \right. \end{aligned} \tag{6.7}$$

Où :

L : matrice des contraintes n'impliquant que des variables binaires ;

d : colonne des membres de droite des contraintes n'impliquant que des variables binaires.

La considération particulière des contraintes n'impliquant que des variables binaires est d'une extrême importance, car celles-ci doivent être ajoutées au problème-maître, avant de commencer sa résolution. De cette façon, la résolution du problème-maître ne générera que des solutions entières admissibles pour le problème initial (Paquet *et al.*, 2004). Par ailleurs, nous avons ajouté au problème-maître des coupes valides afin d'assurer que l'on dispose de suffisamment de capacité pour chaque produit. Ces coupes n'impliquent, elles aussi, que des variables binaires, et sont par conséquent intégrées dans la formulation (6.7) dans les contraintes $Ly \geq d$. Ces coupes peuvent être formulées sous la forme de la contrainte suivante :

$$\sum_{i \in V_p \cup S_p} \bar{b}_{ip} Y_{ip} \geq d_p, \forall p \in M' \cup R \quad (6.8)$$

Où

d_p : demande en produit p tenant compte de la nomenclature de produits et de la demande en produit fini.

L'ajout des contraintes (6.8) permet également d'éviter d'avoir à calculer les rayons extrêmes quand le problème dual est non borné. En effet, ces coupes contraignent le problème-maître à générer des solutions binaires admissibles pour le problème initial, par conséquent, le problème dual sera toujours borné. Autrement dit, nous n'aurons jamais à chercher le rayon extrême ni d'ajouter d'autres contraintes de faisabilité au problème-maître. Ceci est bénéfique dans la mesure où la recherche du rayon extrême n'est pas documentée dans la littérature.

Quant au code développé pour la mise en œuvre de la méthode de décomposition de Benders, nous avons décidé de conserver la formulation matricielle des problèmes (6.5) et (6.6). Pour ce faire, nous avons commencé par extraire les matrices L , A et B ainsi que les colonnes f , c , d et b du problème initial (6.7). Par la suite, nous avons initialisé tous les paramètres de résolution de la méthode de décomposition de Benders (bornes supérieure et inférieure et écart toléré) avant de construire le problème-maître en y ajoutant sa fonction-objectif et les contraintes n’impliquant que des variables binaires.

Après cette étape, nous commençons l’algorithme de la méthode de décomposition de Benders à proprement parler. Tout d’abord en construisant le problème dual et en le résolvant lorsqu’il est borné (ce qui est toujours le cas avec les coupes valides). À l’issue de cette résolution, la borne supérieure est mise à jour et les contraintes d’optimalité sont ajoutées au problème-maître. Ensuite, celui-ci est résolu, la borne inférieure est mise à jour et une solution entière est proposée. Il est nécessaire, lors de la résolution du problème-maître, de guider le solveur en lui imposant de chercher la solution entière optimale. Ces étapes sont répétées tant que la différence entre les bornes supérieure et inférieure est supérieure à l’écart toléré.

Lorsque le critère d’arrêt est satisfait, le code reconstruit le problème initial en y injectant les valeurs de la solution binaire optimale et procède à son optimisation, le problème à résoudre dans ce cas est un problème linéaire « facile ». À l’issue de la résolution, les valeurs de toutes les variables ainsi que la fonction-objectif sont affichées.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les résultats obtenus par la méthode de décomposition de Benders. Nous les comparerons ensuite avec les résultats déjà obtenus par ILOG CPLEX.

6.4 Présentation des résultats

La méthode de décomposition de Benders résout le problème « turbine HP » en faisant 11 itérations. Le temps nécessaire est de 3.50 secondes. Il est toutefois important de mentionner que ce temps comprend aussi la construction des problèmes duals et maîtres de chaque itération, ainsi que l'extraction de la matrice du problème initial et la construction de celui-ci, en plus de l'affichage des résultats. ILOG CPLEX résout le même problème en 0.01 secondes en faisant 17 itérations, cependant, CPLEX ne fait que résoudre le problème sans avoir à en construire un. Rappelons que le temps de génération du modèle pour ce cas était de trois secondes.

Les deux méthodes de résolution conduisent à la même valeur optimale de la fonction-objectif 791 361 011 \$ et des variables de décision. Le tableau XX résume les résultats obtenus par la méthode de décomposition de Benders lors des itérations :

Tableau XX

Résultats obtenus par la décomposition de Benders

Itération	Fonction-objectif		Bornes		UB-LB
	Problème dual	Problème maître	Borne supérieure (UB)	Borne inférieure (LB)	
1	836 996 929 \$	779 575 478 \$	836 996 929 \$	779 575 478 \$	57 421 450 \$
2	1 801 319 381 \$	779 575 678 \$	836 996 929 \$	779 575 678 \$	57 421 250 \$
3	1 401 788 248 \$	779 576 378 \$	836 996 929 \$	779 576 378 \$	57 420 550 \$
4	1 051 663 287 \$	779 576 978 \$	836 996 929 \$	779 576 978 \$	57 419 950 \$
5	994 729 139 \$	779 576 978 \$	836 996 929 \$	779 576 978 \$	57 419 950 \$
6	918 275 112 \$	779 577 678 \$	836 996 929 \$	779 577 678 \$	57 419 250 \$
7	921 669 365 \$	779 578 078 \$	836 996 929 \$	779 578 078 \$	57 418 850 \$
8	791 362 011 \$	779 578 678 \$	791 362 011 \$	779 578 678 \$	11 783 332 \$
9	791 362 611 \$	791 361 011 \$	791 362 011 \$	791 361 011 \$	1 000 \$
10	999 722 793 \$	791 361 011 \$	791 362 011 \$	791 361 011 \$	1 000 \$
11	791 361 011 \$	791 361 011 \$	791 361 011 \$	791 361 011 \$	-

Étant donné que la méthode de décomposition de Benders prend plus de temps que ILOG CPLEX pour un tel petit problème, et étant donné les difficultés rencontrées lors de la résolution du modèle « BOM 10 », nous avons décidé de ne pas poursuivre les expérimentations à l'aide de cette méthode.

6.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons résolu le premier problème de design du réseau de la chaîne d'approvisionnement, présenté au chapitre 5, en utilisant la méthode de décomposition de Benders. Dans un premier temps, nous avons présenté la théorie de la méthode avant d'expliquer la manière dont nous l'avons implantée. Par la suite, nous avons présenté les résultats et quelques statistiques rendant compte de la performance de la méthode.

Toutefois, l'application de la méthode de décomposition de Benders nécessite l'ajout de coupes valides au problème afin d'éviter de calculer le rayon extrême dans le cas où le problème dual n'est pas borné. En effet, la procédure de calcul de tels rayons est quasiment absente de la littérature, et dans les rares études qui la traitent, aucune indication n'est donnée pour la mettre en pratique. De plus, trouver des coupes valides n'est pas toujours évident. C'est d'ailleurs l'une des raisons pour lesquelles nous ne l'avons pas appliquée pour le problème réaliste dans le cadre de ce mémoire. Cependant, ceci fera l'objet de nos prochains travaux de recherche.

La méthode de décomposition de Benders nécessite un effort supplémentaire, car elle requiert la construction et la résolution de deux modèles mathématiques à chaque itération, ce qui augmente la difficulté avec la taille grandissante des modèles.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1 Conclusions

L'objectif principal du travail que nous avons présenté dans ce mémoire est de proposer un modèle d'optimisation des chaînes d'approvisionnement spécifique à l'industrie aéronautique. Le modèle a la particularité d'inclure la nomenclature de produits ainsi que la notion de modularité dans le design du réseau de la chaîne d'approvisionnement. Le problème a été formulé en modèle de programmation linéaire en nombres mixtes. Il est statique et déterministe et permet de regrouper l'ensemble des ressources d'approvisionnement en matières premières, de production et de distribution de la chaîne logistique; il permet également d'optimiser le flux de matières entre les différentes entités de la chaîne. Les décisions d'ordre stratégique sont traduites par des variables binaires (affectation des produits aux sites, affectation des pièces orphelines aux modules et aux sous-traitants, *etc.*), alors que les variables d'ordre tactique sont représentées par des variables continues (quantités de produits à fabriquer, quantités à transporter d'un site à l'autre, *etc.*)

Dans le premier chapitre, nous avons dressé une revue de littérature avant de situer le problème dans son contexte. Dans le second chapitre, nous avons expliqué la notion de modularité et la manière dont nous entendions l'utiliser dans notre problème. Une présentation du problème étudié et des hypothèses qu'on a prises a fait l'objet du troisième chapitre. La formulation mathématique a été développée au quatrième chapitre.

La validation du modèle a été faite au cinquième chapitre où nous avons résolu deux problèmes de tailles différentes, et où notamment, une analyse de sensibilité a été

conduite. Le solveur ILOG CPLEX a été très utile pour la résolution des problèmes, le temps alloué est très acceptable, le problème appelé « BOM 10 » a été résolu en 212 secondes.

Le sixième chapitre a présenté et mis en œuvre une autre méthode pour la résolution de ce type de problèmes. Il s'agit de la méthode de décomposition de Benders qui a été efficacement appliquée dans le cas d'un modèle de petite taille. Sa mise en œuvre sur le problème réaliste (de grande taille) sera présente dans nos travaux de recherche futurs.

Notre travail de recherche dans le présent mémoire a permis de démontrer que l'on pourrait utiliser un modèle intégré pour la conception optimale d'un réseau de chaîne d'approvisionnement en prenant en considération la nomenclature de produits et la modularité.

7.2 Perspectives de recherche

L'un des points forts de notre modèle est le fait qu'il pourrait être facilement adapté à d'autres secteurs industriels. D'autre part, divers aspects peuvent y être ajoutés. À titre d'exemple, nous pouvons l'étendre pour qu'il devienne multi-période auquel cas il faudrait ajouter des variables de stocks et des contraintes d'équilibre à la fin de chaque période de l'horizon de planification. Il s'apprête bien à la prise en compte de plusieurs autres considérations telles que les stocks de sécurité, l'économie d'échelle et d'envergure en intégrant d'autres contraintes dans la modélisation, *etc.*

Le modèle que nous avons proposé est un modèle déterministe, il suppose que tous les paramètres du problème sont connus avec certitude. Cependant, dans la réalité, les industriels n'ont que peu de connaissance de l'environnement dont lequel ils œuvrent. Par conséquent, une des pistes intéressantes de recherche serait d'intégrer l'aspect aléatoire des paramètres du réseau en utilisant la programmation stochastique.

L'une des perspectives de recherche qui nous intéresse particulièrement pour les travaux futurs est l'optimisation de la structure de la nomenclature de produit dans une optique d'ingénierie simultanée, en prenant en considération les différentes contraintes de fabrication, ainsi que d'autres aspects tels que le taux de production désiré ou le temps d'assemblage. Il serait davantage plus intéressant de proposer une approche intégrée pour l'optimisation simultanée de la structure de la nomenclature de produit et du réseau de la chaîne d'approvisionnement.

ANNEXE 1

Génération automatique du modèle

Dans cette annexe, nous allons proposer un cadre de travail pour la génération de modèles de taille réelle pour le type de problèmes qui nous intéresse. Tout d'abord, un modèle relationnel de données (MRD) a été développé dans *SILVERRUN-RDM 2.7.2.0*. Ceci permet de générer un gabarit pour la base de données *Access*; celle-ci sera utilisée pour peupler le modèle avec les données et les paramètres que nous avons explicités au chapitre 4 de ce mémoire. Une fois la base de données complétée, le modèle mathématique est généré à l'aide d'un programme développé dans *Visual Basic 6.0*. Le code est capable de se connecter à la base de données et de créer un fichier « LP » contenant la fonction-objectif et les différentes contraintes; ce fichier est écrit sous une forme particulière compréhensible par le solveur commercial; celui-ci fera la lecture du fichier puis procèdera à l'optimisation du modèle mathématique. Dans notre cas, le solveur que nous utilisons est *CPLEX 10.0*. Les paragraphes suivants élucident les étapes de génération du modèle. Le tableau XXI résume les étapes suivies pour la génération automatique du modèle ainsi que les outils informatiques utilisées lors de chacune de ces étapes :

Tableau XXI

Étapes de génération et de résolution du modèle

Génération du MRD	Développement de la base de données	Génération du modèle	Résolution du modèle
SILVERRUN-RDM	Microsoft Access	Visual Basic	CPLEX

Modèle relationnel de données

Si la modélisation conceptuelle de données vise à exprimer les liens sémantiques fondamentaux entre les données, la modélisation relationnelle, quant à elle, a pour objectif d'établir la structure de stockage des données pour un système de gestion de

base de données (SGBD). Son but est donc de permettre de communiquer une structure à un ordinateur utilisant un logiciel basé sur les concepts relationnels fondamentaux tels que : table, colonne, clé primaire, clé étrangère ou domaine.

Sans nous attarder sur les détails de la modélisation relationnelle, nous allons décrire brièvement les composantes d'un schéma / modèle de base de données relationnelle. Dans un souci de simplification, nous n'allons décrire que les éléments que nous avons utilisés dans le cadre de notre modèle.

a. Les tables

Une table est le principal composant d'une base de données relationnelle. Elle peut être définie par son type décrivant les caractéristiques communes à toutes les occurrences. Une table est composée d'une ou de plusieurs colonnes.

b. Les colonnes

Toute colonne d'une table doit être simple, c'est-à-dire qu'elle ne doit avoir qu'une seule valeur pour chaque ligne. Toutes les valeurs d'une colonne doivent satisfaire au même ensemble de règles définies par un domaine ; celui-ci détermine les conditions de validité des valeurs des colonnes.

c. Les clés

Dans un modèle relationnel de données, une clé doit respecter un certain nombre de règles. En effet, une clé doit être obligatoire (non nulle), discriminatoire (une seule clé par ligne de la table), stable (ne change pas pour la même occurrence) et minimale.

d. Les connecteurs

Un connecteur est la matérialisation de la relation entre deux tables. Dépendamment du type de liaison entre les tables (un à un, un à plusieurs ou plusieurs à plusieurs), ces connecteurs peuvent être implantés par des clés

étrangères, en copiant la clé primaire d'une table dans une autre table, ou en ayant recours à une troisième table dite « table d'intersection » dans le cas des liens « plusieurs à plusieurs » qui contient les copies des clés primaires des deux autres tables.

e. La spécialisation

La spécialisation est utilisée pour représenter les relations entre un concept générique en même temps que plusieurs cas spécifiques du concept générique. Les relations sont de type « un à un » et la table de choix est dépendante de la table générique. De ce fait, la table de choix « hérite » des colonnes de la table générique.

Afin de créer un modèle relationnel de données (MRD) qui prend en compte les éléments que nous avons mentionnés, nous avons utilisé le progiciel SILVERRUN-RDM. En outre, celui-ci permet de valider l'intégrité du modèle et de générer un gabarit de la base de données Microsoft Access qui sera utilisée lors de la prochaine étape.

Les points suivants résument ce qu'on peut faire avec SILVERRUN-RDM :

- a. Sélectionner un système cible Microsoft Access ;
- b. Générer les domaines (*Integer, text, double, ...*) ;
- c. Créer les tables ;
- d. Créer les colonnes ;
- e. Créer les relations entre les tables ;
- f. Générer automatiquement les clés étrangères ;
- g. Générer les noms codés du système cible ;
- h. Générer le script pour créer le gabarit de la base de données Microsoft Access.

La figure 18 présente le modèle relationnel de données que nous avons créé dans SILVERRUN-RDM.

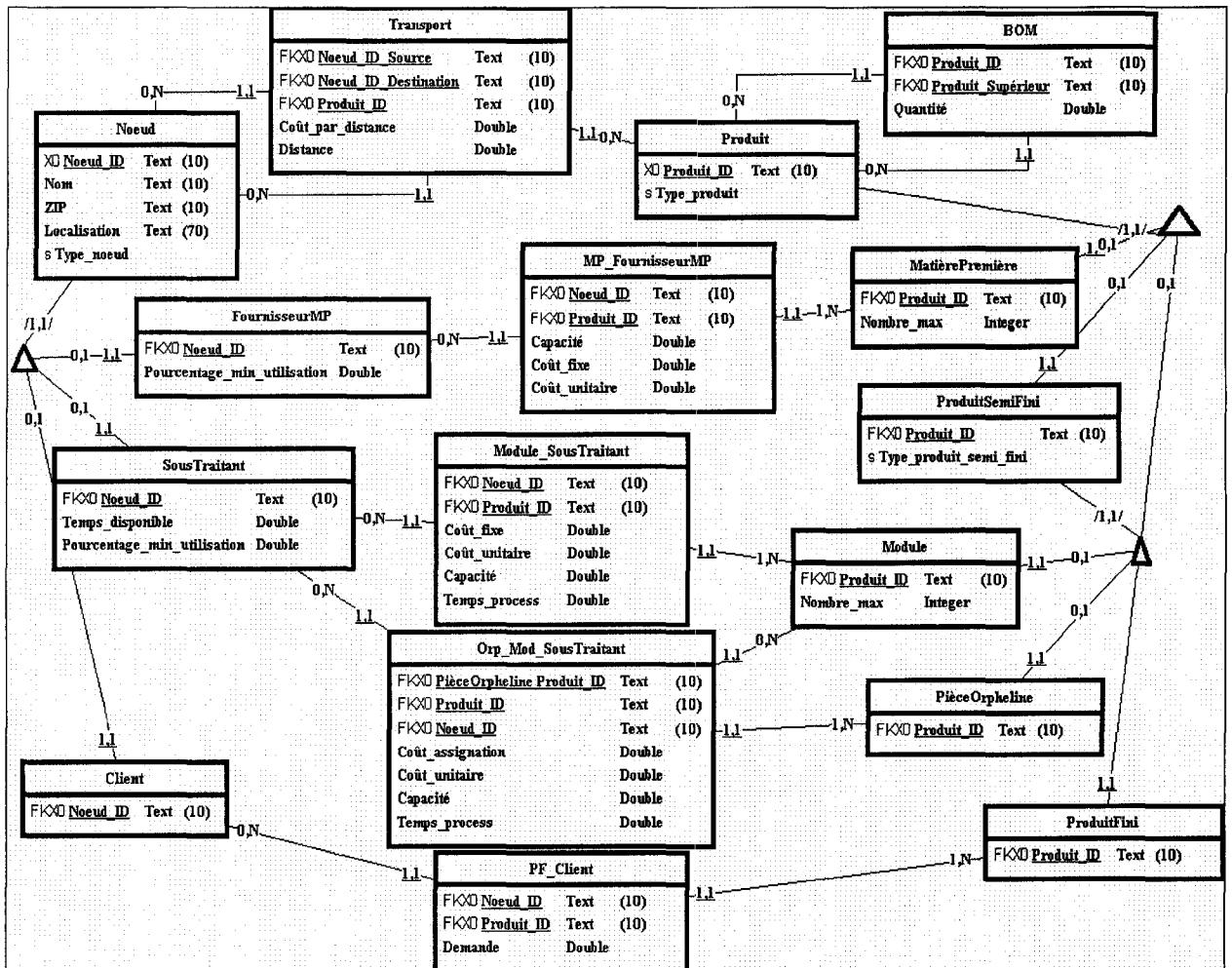


Figure 18 Modèle relationnel de données (MRD)

Le modèle relationnel de données adopté met en évidence un ensemble de tables, constituées d'une ou de plusieurs colonnes, ainsi que les relations existantes entre les différentes tables.

Les tables « Nœud » et « Produit » sont d'une importance particulière, puisque toutes les autres tables ont au moins une clé étrangère qui provient de ces deux tables. Notons

aussi l'utilisation de la spécialisation. En effet, un nœud peut être un fournisseur de matières premières, un sous-traitant ou un client. De ce fait, les tables « FournisseurMP », « Sous-traitant » et « Client » héritent la clé primaire de la table « Nœud ». De la même façon, les tables « MatièrePremière », « ProduitSemiFini » et « ProduitFini » sont des spécialisations de la table « Produit » et par conséquent elles héritent la clé primaire de celle-ci. Notons au passage qu'on considère une autre spécialisation de la table « ProduitSemiFini » en « Module » et « PièceOrpheline ».

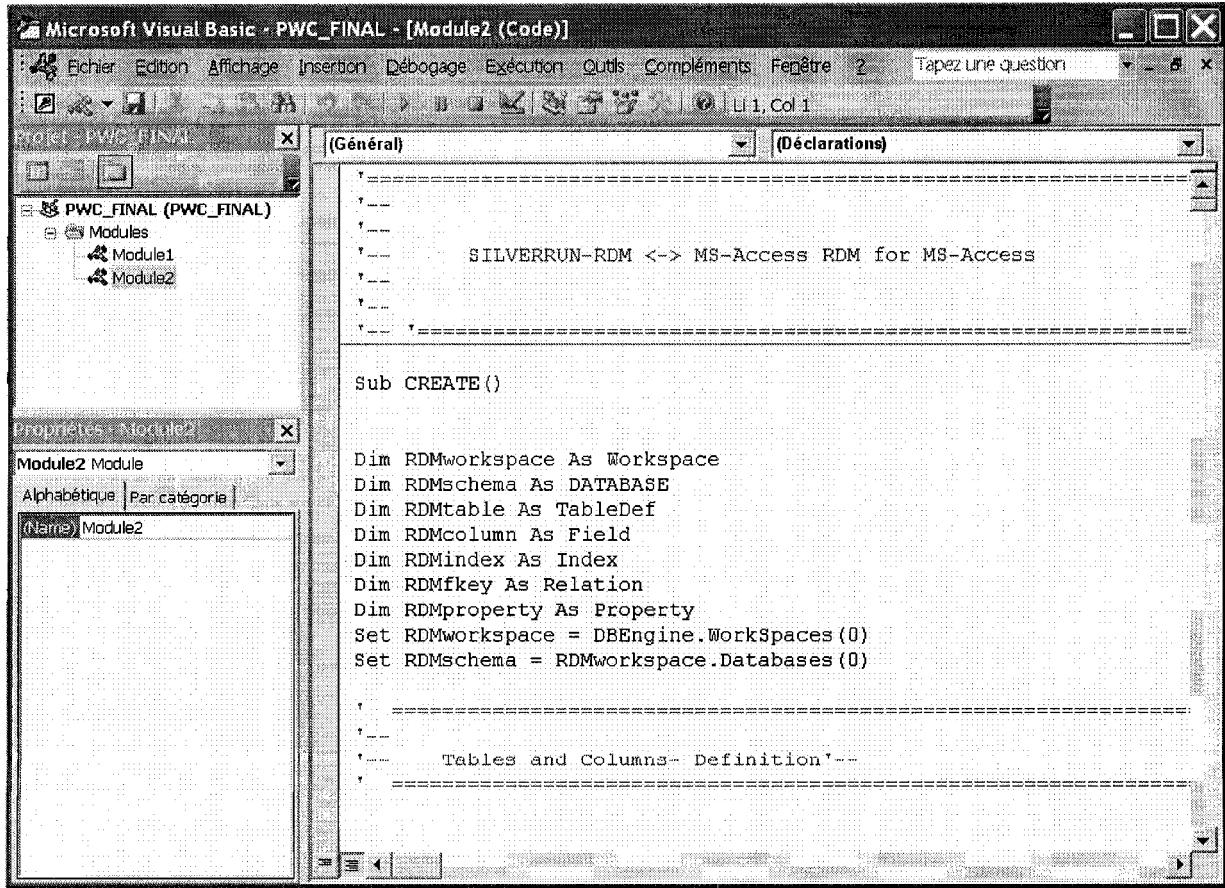
Pour rendre compte de la nomenclature de produits, nous avons créé la table « BOM ». Comme la hiérarchie des produits dans une nomenclature est une relation du type « plusieurs à plusieurs », il est nécessaire de créer une table d'intersection qui contiendra deux clés étrangères (deux fois la clé primaire de la table « Produit »). Quant à la table « Transport », elle relie les produits aux nœuds. En effet, un produit donné est transporté d'un nœud à un autre. Il est nécessaire de souligner que la relation entre la table « Produit » et la table « Nœud » est une relation de type « plusieurs à plusieurs », d'où la nécessité de considérer la table « Transport » comme une table d'intersection entre les deux.

Les tables restantes sont aussi des tables d'intersection :

- a. « MP_FournisseurMP » résulte de la relation « plusieurs à plusieurs » entre les tables « MatièrePremière » et « FounisseurMP » ;
- b. « PF_Client » résulte de la relation « plusieurs à plusieurs » entre les tables « Client » et « ProduitFini » ;
- c. « Module_SousTraitant » résulte de la relation « plusieurs à plusieurs » entre les tables « Module » et « SousTraitant » ;
- d. « Orp_Mod_SousTraitant » résulte de la relation « plusieurs à plusieurs » entre les tables « Module », « PièceOrpheline » et « SousTraitant ».

Le MRD présenté à la figure 18 présente aussi les domaines auxquels appartiennent les colonnes de chaque table (texte, entier, décimal, ...) ; dans le cas particulier du texte, la longueur de la chaîne de caractères est spécifiée. Il est à noter que les domaines précédés des caractères « FXX0 » sont des clés étrangères générées automatiquement par SILVERRUN-RDM.

Par la suite, SILVERRUN-RDM permet de vérifier l'intégrité du modèle, puis de générer un fichier contenant du code en Visual Basic, celui-ci sera utilisé pour la génération des tables et des relations de la base de données dans Microsoft Access. La figure 19 montre le début du « script » généré lors de cette étape.



The screenshot shows the Microsoft Visual Basic IDE interface. The title bar reads "Microsoft Visual Basic - PWC_FINAL - [Module2 (Code)]". The menu bar includes "Fichier", "Edition", "Affichage", "Insertion", "Débogage", "Exécution", "Outils", "Compléments", "Fenêtre". The status bar says "Tapez une question" and "Li 1, Col 1".

The code editor window displays the following VBScript code:

```

'-----
'-----
'-----      SILVERRUN-RDM <-> MS-Access RDM for MS-Access
'-----
'-----
```

Sub CREATE()

```

Dim RDMworkspace As Workspace
Dim RDMSchema As DATABASE
Dim RDMtable As TableDef
Dim RDMcolumn As Field
Dim RDMindex As Index
Dim RDMfkey As Relation
Dim RDMPROPERTY As Property
Set RDMworkspace = DBEngine.WorkSpaces(0)
Set RDMSchema = RDMworkspace.Databases(0)

' -----
'-----      Tables and Columns- Definition'---
```

A tool window titled "Propriétés (Module2)" is visible on the left, showing "Module2 Module" and "Alphabétique" selected. A status bar at the bottom indicates "Li 1, Col 1".

Figure 19 Script généré par SILVERRUN-RDM

Développement de la base de données

Dans le paragraphe précédent, nous avons mis l'accent sur la modélisation relationnelle de données pour notre problème d'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Cette modélisation est faite dans l'environnement SILVERRUN-RDM qui permet de vérifier l'intégrité du modèle et de générer un fichier contenant le code Visual Basic, qui sera par la suite utilisé pour la génération du gabarit de la base de données Microsoft Access.

Le développement de la base de données se fait en deux phases majeures. La phase « création » qui va permettre de générer les tables de la base de données, ainsi que les relations qui existent entre elles ; et ce en important le script dans un module et en l'exécutant. Et la phase « développement » à proprement parler qui consiste à saisir les valeurs de chacun des paramètres considérés dans le modèle, et à créer les requêtes nécessaires pour la génération automatique du modèle que nous aurons l'occasion de discuter au paragraphe suivant. Le schéma de la figure 20 résume les tâches exécutées lors de chacune des étapes.

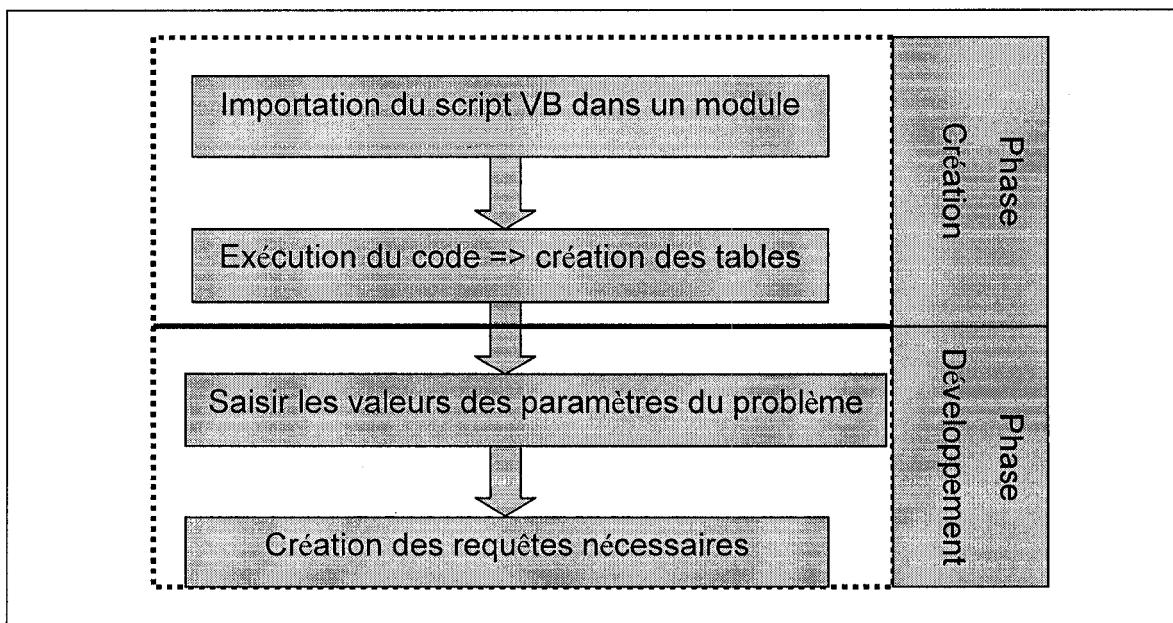


Figure 20 Phases de développement de la base de données

Après que l'étape de développement de la base de données est achevée, nous développerons un code en Microsoft Visual Basic 6.0 qui va permettre d'exploiter la base de données et de prendre en compte la formulation mathématique du modèle pour générer un fichier du modèle avec la fonction-objectif et les contraintes.

Création du fichier contenant le modèle mathématique

À partir de la base de données remplie et de la formulation présentée au chapitre 4, nous devons être en mesure de générer le modèle mathématique. Nous verrons ultérieurement que pour le petit cas de « la turbine haute pression » que nous avons présenté au chapitre 3 (figure 12 et figure 13), le modèle contient 99 variables et 103 contraintes. Ceci nous a poussé à considérer, dès le départ, la nécessité de développer un générateur de modèles, d'autant plus que le but dans le cadre ce mémoire est de traiter des problèmes de grande taille relevant de l'industrie aéronautique où la nomenclature peut contenir jusqu'à des milliers de composantes.

Plusieurs générateurs commerciaux sont offerts et permettent de générer des modèles mathématiques (GAMS, AMPL, OPL Studio, *etc.*). D'autres librairies peuvent être utilisées telles que EZMOD ou encore CONCERT de ILOG. Cependant, il y a une liberté totale quant au choix de l'environnement de développement. En ce qui nous concerne, nous avons opté pour Microsoft Visual Basic 6.0, d'une part pour la facilité du langage de programmation, et d'autre part pour la configuration aisée de la connexion à la base de données.

La programmation doit toutefois respecter le format « LP » fonctionnant avec CPLEX. En effet, comme nous avons envisagé d'utiliser CPLEX 10.0 en mode interactif pour l'optimisation, il était nécessaire que le fichier contenant le modèle soit écrit sous un format particulier de façon à ce qu'il soit compréhensible par CPLEX. Dans ce qui suit,

nous allons présenter le format « LP » avant d'expliquer les grandes lignes du code développé pour générer le modèle.

Le format dit « LP » d'un fichier est la forme la plus naturelle d'un modèle mathématique. Il est composé de cinq sections distinctes :

a. La fonction-objectif

Cette section précise le critère d'optimisation. Dépendamment qu'il s'agit d'un problème de minimisation ou de maximisation, elle commence par l'une des expressions « Minimize » ou « Maximize ». Le nom de la fonction-objectif est spécifié puis suivi de son expression mathématique, celle-ci s'écrit de la même manière que lorsque développée à la main. Il est nécessaire qu'un espace sépare les coefficients et les variables de décision car CPLEX ne reconnaît pas l'opérateur de multiplication « * ».

b. Les contraintes

Cette section contient toutes les contraintes du modèle. Elle doit commencer par l'expression « Subject to ». Des noms peuvent être donnés aux contraintes.

c. Les bornes

Les intervalles auxquels appartiennent les variables de décision sont spécifiés dans cette section. Elle doit commencer par l'expression « Bounds ».

d. Les types de variables

Les variables entières sont listées après l'expression « Generals ». Les variables binaires sont listées après l'expression « Binaries ».

e. La fin de la description du problème

Le fichier doit se terminer par l'expression « End ».

Dans le fichier « LP », il est souhaitable de mettre des commentaires, toutefois, il est nécessaire qu'ils soient précédés du symbole « \ ». La figure 21 montre un exemple de fichier écrit en format « LP ».

```

Minimize
ObjectiveName: +2 X1_2 +3 X1_3 +...
+2000 Z12_7
Subject to
\Comment1
Constraint1_1: +2 X1+2 X2 >= 25
Bounds
0 <= Y1 <= 1
0 <= X1_2 <= +INF
Generals
Y1
Y2
End

```

Figure 21 Format LP du fichier

En ce qui concerne le code en Microsoft Visual Basic 6.0, il se base sur une idée directrice principale qui consiste à construire la fonction-objectif et les contraintes à l'aide de boucles (*for*, *while*, *repeat*) et de requêtes contenant les données pertinentes. Une étape cruciale avant de commencer le code générateur est d'assurer la connexion à la base de données ; Microsoft Visual Basic 6.0 offre cette possibilité en utilisant les contrôles « Microsoft ADO Data Control (OLEDB) », un tel contrôle doit être utilisé et configuré pour chaque table et pour chaque requête de la base de données. La configuration de ces contrôles se fait à l'aide de deux propriétés : « ConnectionString » qui permet de donner un nom au contrôle et d'assurer la connexion à la base de données, et « RecordSource » qui permet de choisir la table ou la requête de la base de données. La figure 22 montre l'interface utilisée pour la génération automatique du modèle :

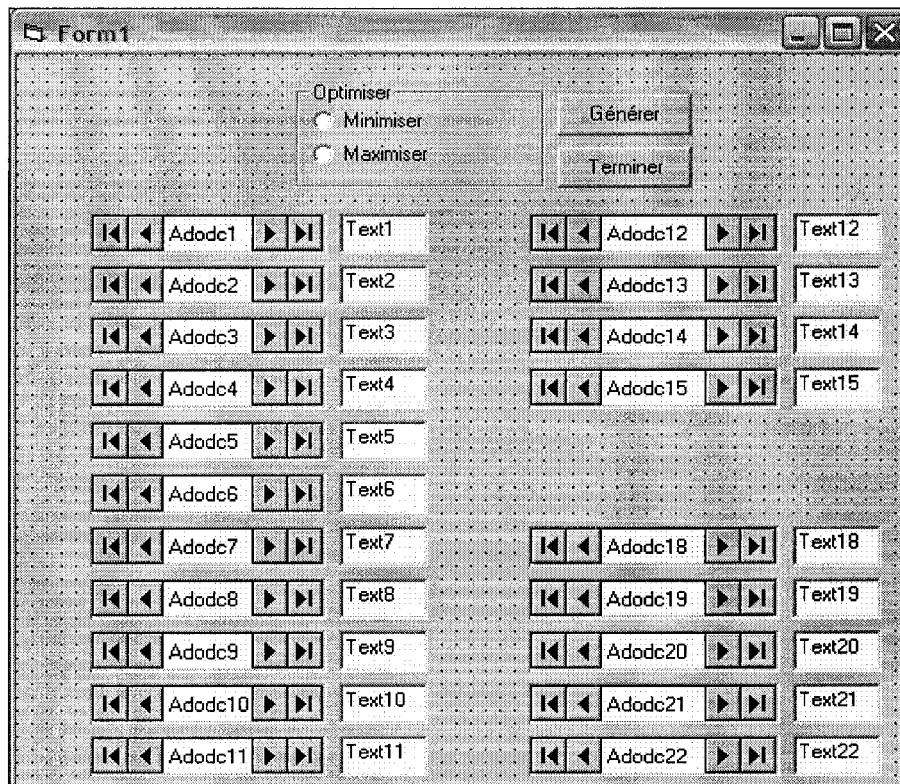


Figure 22 Interface utilisée pour la génération automatique dans *Visual Basic*

La première partie du code développé en Microsoft Visual Basic 6.0 consiste à déclarer toutes les collections d'objets utilisées pour la génération du modèle. Elle sert également à spécifier le chemin pour le fichier qui sera généré. Ensuite, toutes les tables et toutes les requêtes sont chargées dans la mémoire dans des tableaux (*Array*) avec des noms significatifs ; ceci permet d'optimiser le code de façon à ce que toute la base de données soit disponible dans la mémoire au lieu de lire les valeurs des enregistrements à chaque fois sur le disque, de plus, cela permet de réduire considérablement le temps de génération.

La partie suivante du code sert à générer la fonction-objectif et les contraintes du modèle à partir de la modélisation et de la base de données chargée. En ce qui concerne la fonction-objectif, il faudrait la générer par morceaux, car les enregistrements auxquels

elle fait appel apparaissent dans des tables et des requêtes différentes : c'est ainsi que les coûts fixes d'affectation des matières premières aux fournisseurs sont générés en parcourant la requête « start_up_fourmp » et que les coûts fixes d'affectation de modules et d'autres composantes aux sous-traitants sont générés en parcourant les enregistrements de la requête « start_up_sstrt », etc. Pour ce qui est des contraintes, elles sont générées de façon similaire; certaines contraintes nécessitent de parcourir plusieurs tables et /ou requêtes tout en ayant recours à des structures de décision « *If...End If* ». La dernière partie du code sert à déclarer les domaines et les types des variables et à marquer la fin du fichier qui comporte le modèle.

ANNEXE 2

Outil de résolution du modèle : ILOG CPLEX 10.0

Le modèle de design du réseau de la chaîne d'approvisionnement élaboré a été testé à l'aide du solveur ILOG CPLEX 10.0. Celui-ci fournit les librairies en C, C++, Java et .NET pour résoudre les problèmes de programmation linéaire. Plus spécifiquement, il résout des problèmes d'optimisation avec des contraintes linéaires ou quadratiques, et où l'objectif à optimiser peut être formulé comme une fonction linéaire ou comme une fonction linéaire convexe. Les variables du modèle peuvent être déclarées comme continues ou comme variables entières.

ILOG CPLEX peut être utilisé de trois manières pour répondre aux besoins des utilisateurs :

- a. **ILOG CPLEX Interactive optimizer** est un programme exécutable qui peut lire un problème de façon interactive ou à partir de fichiers dans un certain format standard, résoudre le problème et fournir les résultats de façon interactive ou dans des fichiers textes ;
- b. **ILOG CONCERT Technology** est un ensemble de librairies offrant aux utilisateurs la possibilité d'inclure la modélisation dans les programmes codés en C++, Java ou dans les applications .NET ;
- c. **ILOG CPLEX Callable Library** est une librairie en C qui permet au programmeur d'utiliser le solveur ILOG CPLEX dans des applications écrites en C, Visual Basic, Fortran ou tout autre langage faisant appel aux applications développées dans C.

ILOG CPLEX est un outil pour la résolution des problèmes d'optimisation linéaire. Dans leur forme la plus fondamentale dans un problème d'optimisation, les variables de la fonction-objectif sont continues au sens mathématique du terme. Pour résoudre de tels problèmes, ILOG CPLEX implémente des méthodes d'optimisation basées essentiellement sur l'algorithme du simplexe. Certains problèmes quadratiques peuvent aussi être résolus, cependant, cette famille de problèmes ne nous intéresse pas dans le cadre de ce mémoire dans la mesure où nous ne traiterons que des problèmes en

nombres mixtes pour lesquels ILOG CPLEX a démontré une grande efficacité. La résolution dans ce cas se base sur un algorithme très général et très robuste de la méthode de séparation et d'évaluation progressive (*Branch-and-Bound*). Cette famille de problèmes a la particularité d'être beaucoup plus difficile à résoudre comparativement aux problèmes linéaires. C'est la raison pour laquelle un effort considérable a été déployé afin d'établir un réglage efficace des paramètres par défaut pour accomplir l'optimisation d'une grande variété des modèles en nombres mixtes. L'algorithme de séparation et d'évaluation progressive utilisé se base sur la résolution d'une série de sous-problèmes continus. Pour résoudre un problème mixte en nombres entiers, ILOG CPLEX construit un arbre où chaque sous-problème représente un nœud. La racine de l'arbre étant la relaxation continue du problème mixte initial. Il est probable qu'ILOG CPLEX essaye de trouver des coupes qui sont des contraintes découplant la région des solutions faisables, et qui ont l'avantage d'accélérer la recherche de la solution optimale.

En ce qui nous concerne, nous utilisons ILOG CLEX en mode interactif. Nous nous servons essentiellement de trois commandes pour la lecture, l'optimisation et l'affichage des résultats. Ces commandes sont :

- a. "**read**" *nom_fichier.lp* qui permet de lire le fichier (appelé *nom_fichier* et écrit sous le format « LP »). À l'issue de cette étape, ILOG CPLEX informe l'utilisateur que la lecture du fichier est terminée et affiche le temps qu'il lui a fallu pour l'accomplir ;
- b. "**optimize**" qui permet de procéder à l'optimisation en appliquant l'algorithme de séparation et d'évaluation progressive sur le modèle ainsi lu. À l'issue de l'optimisation, ILOG CPLEX informe l'utilisateur qu'une solution entière optimale a été trouvée et le cas échéant, affiche la valeur de la fonction-objectif ainsi que le temps de résolution, le nombre d'itérations et le nombre de nœuds explorés ;
- c. "**display solution variables -**" qui permet d'afficher les valeurs de toutes les variables non nulles.

ANNEXE 3

SSA Supply Chain Design

SSA Supply Chain design est un outil d'aide à la décision pour le design et l'optimisation des chaînes logistques.

Dans cette annexe, nous présentons les caractéristiques principales de SSA Supply Chain Design. Ensuite, nous donnons un bref aperçu du processus de modélisation avec cet outil. L'information contenue dans la présente annexe se base essentiellement sur le guide de l'utilisateur accompagnant l'outil.

Principales caractéristiques de SSA Supply Chain Design

- a. **Technologies d'optimisation** qui permettent à SSA Supply Chain Design d'utiliser conjointement des heuristiques ainsi que l'optimisation. Les heuristiques permettent d'obtenir rapidement des solutions optimales ou quasi-optimales. Avec l'outil d'optimisation incorporé CPLEX, il est possible de résoudre des modèles linéaires en nombres mixtes pour trouver des solutions optimales ;
- b. **Interface graphique** qui permet à l'utilisateur d'avoir un environnement de modélisation visuel et de représenter l'étendue géographique de la chaîne d'approvisionnement ;
- c. **Gabarit d'entrée de données** qui permet de construire et de réutiliser facilement les données du modèle de la chaîne à l'aide du *Supply Chain Data Input Template* (SCDIT) ;
- d. **Catalogue géographique** qui permet l'accès à un large éventail de cartes et de fichiers de routes ;
- e. **Partage de données** qui permet de partager les données avec d'autres applications. Ceci permet notamment de faire des va-et-vient avec Microsoft Excel et Microsoft Access ;
- f. **Technologies de géocodage** ;

- g. **Modélisation des coûts** qui permet de modéliser divers coûts tels que les coûts de production, de livraison, les coûts fixes et variables, *etc* ;
- h. **Scenario Manager** qui permet d'exécuter des scénarios de type « *what-if* » ;
- i. **Contraintes** qui permettent de modéliser plusieurs stratégies logistiques telle que la fourniture exclusive ;
- j. **Rapports et graphiques** qui permettent d'analyser et de présenter les données et les solutions.

Processus de modélisation dans SSA Supply Chain design

La modélisation d'une chaîne d'approvisionnement est une tâche complexe. Pour ce faire, SSA Supply Chain Design a été développé en vue de faciliter les étapes de modélisation qui consistent à préparer les données logistiques, définir les stratégies logistiques, générer des alternatives et évaluer celles-ci.

Pour le design et le développement d'une chaîne logistique optimale dans SSA Supply Chain Design, les phases suivantes sont nécessaires :

a. Configuration de l'environnement du système

Cette phase consiste à créer un environnement de travail qui répond le mieux aux besoins de l'utilisateur. Les tâches qui sont reliées à cette phase sont :

- Création d'un nouveau système ;
- Configuration des propriétés du système, telles que les unités de distance, de temps, *etc* ;
- Création d'un nouveau projet ;
- Ouverture des cartes requises pour la représentation ;
- Ouverture des réseaux routiers à utiliser ;
- Définition des méthodes de géocodage.

b. Préparation des données

L'objectif de cette phase est de rendre les données requises disponibles au projet SSA Supply Chain Design. Les étapes majeures de cette phase sont :

- Définition des types de sites ;
- Préparation et validation des données avec le gabarit SCDIT ;
- Transfert des données de SCDIT à SSA Supply Chain Design ;
- Géocodage des sites.

c. Définition des canaux (*lanes*), coûts et contraintes

Les tâches relatives à cette phase sont :

- Définition des propriétés des canaux ;
- Définition des composantes de coûts et calcul des coûts ;
- Définition des contraintes.

Dans notre cas, nous avons utilisé SSA Supply Chain Design uniquement pour la représentation graphique de la chaîne logistique, l'optimisation étant faite par ILOG CPLEX. Pour cela, nous avons préparé au préalable les résultats obtenus en utilisant le gabarit SCDIT.

BIBLIOGRAPHIE

1. Arnheiter, E. D., & Harren, H. (2005). A typology to unleash the potential of modularity. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(7), 699-711.
2. Arnheiter, E. D., & Harren, H. (2006). Quality management in a modular world. *The TQM Magazine*, 18(1), 87-96.
3. Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., & Trafton, L. L. (1995). Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces*, 25(1), 69-93.
4. Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (1997, Septembre-octobre 1997). Managing in an age of modularity. *Harvard Business Review*, 84-93.
5. Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (2000). *Design rules: The power of modularity*. Boston: MIT Press.
6. Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281-294.
7. Benders, J. F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4, 238-252.
8. Breitman, R. L., & Lucas, J. M. (1987). PLANETS: A Modeling System for Business Planning. *Interfaces*, 17, 94-106.
9. Calcagno, M. Dynamics of modularity. A critical approach. Università Ca' Foscari di Venezia - Dipartimento di Economia e Direzione Aziendale.
10. Cheng, S., Chan, C. W., & Huang, G. H. (2003). An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16, 543-554.
11. Chopra, S., & Meindl, P. (2001). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation* (2 ed.): Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
12. Christy, D. P., & Grout, J. R. (1994). Safeguarding supply chain relationships. *International journal of Production Economics*, 36, 233-242.
13. Cordeau, J. F., Pasin, F., & Solomon, M. M. (2007). An Integrated Model for Logistics Network Design. *Annals of Operations Research*.

14. Dasci, A., & Verter, V. (2001). A continuous model for production-distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 129, 287-298.
15. Dogan, K., & Goetschalckx, M. (1999). A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. *IIE Transactions*, 31, 1027-1036.
16. Ernst, R., & Kamrad, B. (2000). Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement. *European Journal of Operational Research*, 124, 495-510.
17. Fine, C. H. (1998). *Clockspeed - Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage*. Perseus Books, Reading, Massachusetts.
18. Frayret, J.-M., D'Amours, S., Montreuil, B., & Cloutier, L. (2001). A network approach to operate agile manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 74, 239-259.
19. Gabrel, V. (2005). *Résolution de programmes linéaires en nombres entiers de grande taille : décomposition et renforcement pour une résolution exacte et approchée*. Université Paris Dauphine, Paris.
20. Garavelli, A. C. (2003). Flexibility configurations for the supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 85, 141-153.
21. Geoffrion, A. M., & Graves, G. W. (1974). Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. *Management Science*, 20(5), 822-844.
22. Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143, 1-18.
23. Gunasekaran, A., & Ngai, E. W. T. (2004). Information systems in supply chain integration and management. *European Journal of Operational Research*, 159, 269-295.
24. Gunasekaran, A., Patel, C., & McGaughey, R. E. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, 87, 333-347.
25. Hadj-Hamou, K. (2002). *Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique: une approche par contraintes*. Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, France.

26. Hammer, M., & Champy, J. (1992). *Reengineering the corporation: A manifest for business revolution*. New York. Harper Collins Publishers.
27. Hooker, J. (2000). *Logic-based methods for optimization: combining optimization and constraint satisfaction*: Wiley-Interscience Series in discrete Mathematics and optimization, John Wiley & Sons, Inc.
28. Johnson, M. E., & Pyke, D. F. (1999). Supply chain management: The Tuck School of Business.Dartmouth College.Hanover, NH 03755.
29. Jung, J. Y., Blau, G., Pekny, J. F., Reklaitis, G. V., & Eversdyk, D. (2004). A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 2087-2106.
30. Kalvelagen, E. (2002). Benders decomposition with GAMS (pp. 1-15): GAMS Development Corp., Washington.
31. Lakhal, S., Martel, A., Kettani, O., & Oral, M. (2001). On the optimization of supply chain networking decisions. *European Journal of Operational Research*, 129, 259-270.
32. Min, H., & Zhou, G. (2002). Supply chain modeling:past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 231-249.
33. Montreuil, B., Frayret, J.-M., & D'amours, S. (2000). A strategic framework for networked manufacturing. *Computers in Industry*, 42, 299-317.
34. Muckstadt, J. A., Murray, D. H., Rappold, J. A., & Collins, D. E. (2001). Guidelines for collaborative supply chain system design and operation. *Information systems frontiers*, 3(4), 427-453.
35. OQLF. Office québécois de la langue française. « Le grand dictionnaire terminologique ». In Office québécois de la langue française. *Site de l'office québécois de la langue française*, [En ligne]. <http://www.granddictionnaire.com> (Page consultée le 25 août 2006).
36. Paquet, M., Martel, A., & Desaulniers, G. (2004). Including technology selection decisions in manufacturing network design models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(2), 117-125.
37. Pine, B. J. (1993). *Mass customization: The new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press.
38. Ramudhin, A., & Pronovost, J. (2006). *Including Kitting Decisions in the Design of Supply Chains for the Aeronautic Industry*. Paper presented at the 12th IFAC

Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM), St-Etienne, France.

39. Salerno, M. S., & Dias, A. V. C. (2000). Product design modularity, modular production, modular organization: the evolution of modular concepts. *Actes du GERPISA* (33), 61-73.
40. Sen, W., Pokharel, S., & YuLei, W. (2004). Supply chain positioning strategy integration, evaluation, simulation, and optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 46, 781-792.
41. Slats, P. A., Bhola, B., Evers, J. J. M., & Dijkhuizen, G. (1995). Logistic chain modelling. *European Journal of Operational Research*, 87, 1-20.
42. Starr, M. K. (1965). Modular production: a new concept. *Harvard Business Review*, 43(6), 131-142.
43. Talluri, S., Baker, R. C., & Sarkis, J. (1999). A framework for designing efficient value chain networks. *International Journal of Production Economics*, 62, 133-144.
44. Talluri, S., & Narasimhan, R. (2003). Vendor evaluation with performance variability: A max-min approach. *European Journal of Operational Research*, 146, 543-552.
45. Tsiakis, P., Shah, N., & Pantelides, C. C. (2001). Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 3585-3604.
46. Tu, Q., Vonderembse, M. A., Ragu-Nathan, T. S., & Ragu-Nathan, B. (2004). Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: a customer-driven perspective. *Decision Sciences*, 35(2), 147-168.
47. Ulrich, K. T. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3), 419-440.
48. Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98, 1-18.
49. Wolters, D. M. J. J. (1999). *The business of modularity and the modularity of business*. Faculteit Bedrijfskunde, Erasmus Universiteit Rotterdam, Rotterdam.

50. Yan, H., Yu, Z., & Cheng, T. C. E. (2003). A strategic model for supply chain design with logical constraints: formulation and solution. *Computers & Operations Research*, 30, 2135-2155.
51. Yildirim, I., Tan, B., & Karaesmen, F. (2005). A multiperiod stochastic production planning and sourcing problem with service level constraints. *OR Spectrum*, 27, 471-489.
52. Yusuf, Y. Y., Gunasekaran, A., Adeleye, E. O., & Sivayoganathan, K. (2004). Agile supply chain capabilities: Determinants of competitive objectives. *European Journal of Operational Research*, 159, 379-392.