

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  
MERYAM CHELLY

CONCEPTION ET CONTRÔLE DES CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT  
TENANT COMPTE DES PHÉNOMÈNES ALÉATOIRES

MONTRÉAL, LE 24 JANVIER 2005

(c) droits réservés de Meryam Chelly

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Claude Olivier, codirecteur de mémoire  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

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

M. Robert Pellerin, professeur  
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 21 DÉCEMBRE 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **CONCEPTION ET CONTRÔLE DES CHAÎNES D'APPROVISIONNEMENT, TENANT COMPTE DES PHÉNOMÈNES ALÉATOIRES**

Meryam Chelly

## **SOMMAIRE**

Ce projet porte sur la conception et le contrôle d'un réseau manufacturier fiable tenant compte des phénomènes aléatoires. Notre objectif est de trouver et implanter les bons modes de gestion afin d'améliorer la fiabilité du réseau manufacturier qui subit différentes perturbations, ce qui permet de changer la conception initiale du réseau et donner une configuration optimale.

La résolution de ce problème nécessite l'utilisation d'une approche hybride qui combine la programmation linéaire mixte en nombres entiers avec la simulation par événements discrets. Une telle approche est utilisée pour déterminer, à l'aide du modèle d'optimisation, la configuration optimale du réseau ainsi que le plan de planification, le programme linéaire sera par la suite suivi par la simulation à événements discrets pour valider, en premier lieu, les résultats mathématiques et donner, en deuxième lieu, une configuration et une planification plus réalistes et fiables en considérant les aspects aléatoires du réseau manufacturier.

# **RELIABLE SUPPLY CHAIN DESIGN AND CONTROL ACCOUNT OF RANDOM PHENOMENA**

Meryam Chelly

## **ABSTRACT**

This project deals with the design and control of reliable manufacturing network subject to random phenomena. Our objective is to find and establish the best management modes in order to improve the reliability of the considered manufacturing network. The consideration of various management modes makes it possible to change the initial design of the network and to give an optimal configuration.

To solve the considered problem a hybrid approach is employed. It combines mathematical programming with discrete events simulation. This approach is used in our object to identify, using one mixed integer linear programming, the optimal configuration of the network and the planning plan. The linear programming will be followed by discrete events simulation. The simulation is employed to validate mathematical results and to give more realistic planning and configuration by considering random phenomena.

## **REMERCIEMENTS**

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire de Conception et Contrôle des Systèmes de Production (LCCSP) du département Génie de la Production Automatisée à l'École de Technologie Supérieure.

En premier lieu, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à mes deux directeurs de recherche, le Professeur Ali Gharbi et le Professeur Claude Olivier pour leurs disponibilités, leurs apports et pour toute la confiance qu'ils m'ont accordé. Leurs compétences et leurs conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Je leur suis également reconnaissante pour leur facilité d'approche et leurs qualités humaines qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Que tous les membres du LCCSP trouvent l'expression de mes sincères remerciements, et plus particulièrement un grand merci à mes collègues et amis Adnène, Patrick, Samia, Rachid, Javad et Gorge.

Merci à tous mes amis, à mon cher fiancé Walid, à mes parents, à mon frère Mohamed et à mon oncle, qui m'ont soutenu en toutes circonstances et sans qui, ce travail n'aurait pu arriver à terme. Merci pour la confiance qu'ils ont placé en moi.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE .....	i
ABSTRACT .....	ii
REMERCIEMENT .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	v
LISTE DES FIGURES .....	vi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique et objectif de la recherche.....	1
1.3 Revue de la littérature .....	5
1.3.1 Les réseaux manufacturier et logistiques.....	6
1.3.2 Risques et perturbations.....	7
1.3.3 Approches de modélisation.....	11
1.4 Plan de lecture.....	22
CHAPITRE 2 GESTION DE CHAÎNES LOGISTIQUES.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Gestion des chaînes logistiques .....	25
2.2.1 Définition de la chaîne logistique .....	25
2.2.2 Gestion de la chaîne logistique .....	27
2.2.3 Planification de la chaîne logistique .....	28
2.3 Risques et perturbations.....	31
2.3.1 Fluctuation de la demande .....	31
2.3.2 Manque d'approvisionnement .....	32
2.3.3 Pannes au niveau des ressources.....	33
2.3.4 Commande urgente .....	33
2.4 Accélérateurs de performance .....	33
2.4.1 Capacité de rattrapage.....	34
2.4.2 Sous-traitance.....	34
2.4.3 Stock de sécurité .....	35
2.5 Conclusion .....	36
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU RÉSEAU ÉTUDIÉ .....	38
3.1 Introduction.....	38

3.2	Réseau potentiel.....	39
3.3	Hypothèses de travail.....	43
3.4	Conclusion.....	44
CHAPITRE 4	APPROCHE MATHÉMATIQUE.....	45
4.1	Introduction.....	45
4.2	Définition des éléments intervenants dans les coûts.....	46
4.3	Modèle d'optimisation.....	48
4.3.1	Formulation mathématique.....	49
4.4	Exemple numérique.....	57
4.4.1	Résolution.....	59
4.4.2	Données du problème.....	59
4.4.3	Présentation et interprétation des résultats.....	63
4.5	Analyse de sensibilité.....	69
4.5.1	Scénario 1 : variation aléatoire de la demande du produit $p_{113}$ .....	69
4.5.2	Scénario 2 : Augmentation du coût fixe de l'activité $Act_{13}$ .....	72
4.5.3	Scénario 3 : Augmentation du coût de la sous-traitance.....	74
4.5.4	Scénario 5 : Réduction du délai de livraison.....	76
4.6	Conclusion.....	76
CHAPITRE 5	APPROCHE EXPÉRIMENTALE.....	78
5.1	Introduction.....	78
5.2	Outil de modélisation.....	79
5.3	Méthodologie et hypothèses.....	80
5.3.1	Initialisation.....	86
5.3.2	Première assignation du plan de production.....	88
5.3.3	Deuxième assignation du plan de production au niveau de la production interne.....	92
5.3.4	Deuxième assignation du plan de production au niveau de la sous-traitance.....	94
5.3.5	Troisième assignation du plan de production.....	96
5.3.6	Production interne.....	97
5.3.7	Sous-traitance.....	99
5.3.8	Livraison au client.....	101
5.3.9	Lecture des résultats.....	103
5.4	Validation du modèle d'optimisation.....	104
5.5	Résultats de la simulation.....	108
5.5.1	Résultats dynamiques du modèle de validation.....	108
5.5.2	Résultats de la simulation considérant les phénomènes aléatoires.....	114
5.6	Conclusion.....	123
CHAPITRE 6	CONCLUSION.....	124
6.1	Approche hybride.....	124

6.2	Perspectives de recherche .....	126
ANNEXES :		
1.	Résultats du modèle linéaire pour les centres de production 1 et 2.....	128
2.	Modèle de simulation par événements discrets .....	135
3.	Résultats du modèle de simulation (validation).....	150
4.	Résultats du modèle de simulation par événements discrets .....	157
BIBLIOGRAPHIE.....		164



## LISTE DES TABLEAUX

		Pages
Tableau I	Tableau récapitulatif des modèles d'optimisation.....	16
Tableau II	Tableau récapitulatif des modèles de simulation .....	20
Tableau III	Définition des coûts selon les différentes situations.....	47
Tableau IV	Données relatives aux coûts fixes et variables.....	59
Tableau V	Données relatives aux coûts de stockage et de pénurie .....	60
Tableau VI	Données relatives au délai de livraison et aux temps de traitement .....	60
Tableau VII	Données relatives à la prévision de la demande .....	60
Tableau VIII	Données relatives aux sous-traitants potentiels .....	62
Tableau IX	Données relatives à la nomenclature du produit fini .....	62
Tableau X	Quantités en pénurie dans le réseau manufacturier .....	63
Tableau XI	Répartition des demandes du centre de production 3 .....	64
Tableau XII	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 3 .....	67
Tableau XIII	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ .....	70
Tableau XIV	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ .....	109
Tableau XV	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 2 .....	111
Tableau XVI	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ .....	113
Tableau XVII	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 2 .....	115
Tableau XVIII	Répartition des demandes pour le centre de production 1 .....	123
Tableau XIX	Répartition des demandes pour le centre de production 2.....	124
Tableau XX	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 1 .....	126
Tableau XXI	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 2 .....	127
Tableau XXII	Répartition de la demande du produit $p_{111}$ .....	145
Tableau XXIII	Répartition de la demande du produit $p_{112}$ .....	146
Tableau XXIV	Répartition de la demande du produit $p_{122}$ .....	147
Tableau XXV	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 1 .....	148

Tableau XXVI	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 2 .....	149
Tableau XXVII	Répartition de la demande du produit $p_{111}$ .....	152
Tableau XXVIII	Répartition de la demande du produit $p_{112}$ .....	153
Tableau XXIX	Répartition de la demande du produit $p_{122}$ .....	154
Tableau XXX	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 1 .....	155
Tableau XXXI	Taux d'occupation des activités appartenant au centre 2 .....	156

## LISTE DES FIGURES

		Pages
Figure 1	Processus de gestion du réseau manufacturier.....	4
Figure 2	Accélérateurs internes.....	10
Figure 3	Démarche à suivre .....	24
Figure 4	Représentation de la chaîne logistique (Bouchriha, 2002) .....	27
Figure 5	Systèmes hiérarchiques de planification (Stadler, 2000).....	30
Figure 6	Réseau manufacturier initial .....	39
Figure 7	Représentation d'une activité interne .....	41
Figure 8	Réseau manufacturier potentiel .....	42
Figure 9	Réseau initial (exemple numérique) .....	57
Figure 10	Réseau potentiel (exemple numérique).....	58
Figure 11	Variation de la demande du produit fini pendant les cinq périodes.....	61
Figure 12	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ .....	65
Figure 13	Taux d'occupation des activités $Act_{13}$ et $Act - sup_{13}$ .....	67
Figure 14	Configuration finale du réseau manufacturier .....	69
Figure 15	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ (demande aléatoire).....	71
Figure 16	Production interne par rapport à la sous-traitance ( $Cf_{13} = 50000\$$ ).....	73
Figure 17	Production interne par rapport à la sous-traitance ( $Cf_{13} = 200000\$$ ).....	73
Figure 18	Production interne par rapport à la sous-traitance .....	75
Figure 19	Production interne par rapport à la sous-traitance .....	75
Figure 20	Diagramme général de simulation pour un seul type de produit .....	81
Figure 21	Diagramme du réseau d'initialisation .....	87
Figure 22	Diagramme du réseau de la première assignation .....	90
Figure 23	Diagramme du réseau de la deuxième assignation production interne....	94
Figure 24	Diagramme du réseau de la deuxième assignation au niveau de la sous-traitance.....	95

Figure 25	Diagramme du réseau de la troisième assignation.....	97
Figure 26	Diagramme du réseau de la production interne .....	98
Figure 27	Diagramme du réseau de la sous-traitance .....	100
Figure 28	Diagramme du réseau de livraison finale pour chaque type de produit.	102
Figure 29	Diagramme de lecture des résultats .....	103
Figure 30	Diagramme général du modèle de validation .....	104
Figure 31	Diagramme du réseau d'assignation et de production en interne et en externe.....	106
Figure 32	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{113}$ .....	110
Figure 33	Taux d'occupation des activités $Act_{13}$ et $Act - sup_{13}$ .....	112
Figure 34	Répartition de la demande du produit $p_{113}$ .....	116
Figure 35	Taux d'occupation des activités $Act_{13}$ et $Act - sup_{13}$ .....	118
Figure 36	Configuration finale du réseau manufacturier .....	123
Figure 37	Répartition de la demande du produit $p_{111}$ .....	129
Figure 38	Répartition de la demande du produit $p_{112}$ .....	130
Figure 39	Répartition de la demande du produit $p_{122}$ .....	131
Figure 40	Taux d'occupation des activités $Act_{11}$ et $Act - sup_{11}$ .....	132
Figure 41	Taux d'occupation des activités $Act_{12}$ et $Act - sup_{12}$ .....	133
Figure 42	Taux d'occupation des activités $Act_{22}$ et $Act - sup_{22}$ .....	134
Figure 43	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{111}$ .....	151
Figure 44	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{112}$ .....	152
Figure 45	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{122}$ .....	153
Figure 46	Taux d'occupation des activités $Act_{11}$ et $Act - sup_{11}$ .....	154
Figure 47	Taux d'occupation des activités $Act_{12}$ et $Act - sup_{12}$ .....	155
Figure 48	Taux d'occupation des activités $Act_{22}$ et $Act - sup_{22}$ .....	156
Figure 49	Répartition de la demande du produit $p_{111}$ .....	158
Figure 50	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{112}$ .....	159

Figure 51	Répartition en interne et en externe de la demande du produit $p_{122}$ ....	160
Figure 52	Taux d'occupation des activités $Act_{11}$ et $Act - sup_{11}$ .....	161
Figure 53	Taux d'occupation des activités $Act_{12}$ et $Act - sup_{12}$ .....	162
Figure 54	Taux d'occupation des activités $Act_{22}$ et $Act - sup_{22}$ .....	163

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Introduction

Sous la pression de la compétition globale, l'augmentation de la complexité, l'évolution rapide de la technologie et la variabilité de la demande, les entreprises cherchent de plus en plus à changer leurs formes d'organisation pour faire partie de réseaux logistiques. Ainsi, les entreprises ne sont plus directement en compétition entre elles, mais plutôt par l'intermédiaire des divers réseaux logistiques auxquelles elles appartiennent.

Cette évolution vers les réseaux logistiques a entraîné de nouveaux changements puisqu'il a fallu intégrer tous les acteurs de la chaîne logistique afin de produire et distribuer les bonnes quantités de produits aux bons endroits et aux bons moments, d'où la création d'un nouvel environnement qui considère la fiabilité et la réactivité comme des bon éléments de compétitivité.

De nos jours, concevoir une chaîne d'approvisionnement fiable capable de satisfaire les clients est un des éléments pour le succès. En effet, la chaîne logistique est souvent sujette à différents risques et perturbations pouvant nuire à sa fiabilité de livraison (respect des délais et des quantités exigés par le client). Pour cela il a fallu considérer différents modes de gestion dans la planification stratégique de la chaîne pour faire face aux perturbations et suggérer des modifications afin de configurer un réseau logistique fiable capable de répondre aux exigences des clients.

### 1.2 Problématique et objectif de la recherche

Plusieurs approches sont développées pour concevoir et planifier des chaînes d'approvisionnements dans le but d'optimiser et d'améliorer leurs performances [Camm et al. (1997), Sabri et Beamon (2000)]. Cependant la plupart des approches présentées

dans la littérature s'éloignent de la réalité en se basant sur une forte hypothèse : les firmes sont fiables à 100% et capables de livrer les quantités nécessaires comme prévu. Mais si ce n'est pas le cas ? Comment les firmes perturbées peuvent-elles surmonter leur échec ?

Afin de répondre à ces questions, nous allons concevoir et planifier un réseau logistique fiable en tenant compte des phénomènes aléatoires auxquelles le réseau peut faire face et évaluer sa performance.

On considère un réseau logistique est fiable, lorsqu'il peut assurer aux clients les bonnes quantités aux bons moments tout en étant capable d'être réactif pour confronter les risques et les aléas qui peuvent surgir à n'importe quelle position de la chaîne. Dans ce travail la fiabilité ne sera pas considérée comme une mesure de performance quantitative [Bundschuh et al. (2003), Mirabedini et al. (2001)], mais elle va être évaluée indirectement en utilisant d'autres mesures de performances (exemple : stock en pénurie, quantités produites en interne et en externe) qui nous garantiront que les clients ont reçu les quantités désirées dans les délais.

Le réseau logistique qu'on considère est un réseau manufacturier multi échelons composé de plusieurs entreprises manufacturières, chacune des entreprises possède différentes activités ayant comme rôle de transformer un ou plusieurs produits en entrée en un ensemble de produits en sortie.

En cas d'un manque de capacité interne provoqué par différents types de perturbations comme une augmentation imprévue de la demande ou un manque de disponibilité d'une ou plusieurs activités, nous aurons recourt à différents modes de gestion planifiés à l'avance et reconfigurables dynamiquement. Ces modes de gestion sont également appelées des accélérateurs de performance, à savoir la sous-traitance de capacité et

l'augmentation de la capacité interne afin d'améliorer la fiabilité du réseau globale et satisfaire les exigences des clients [Cavory et al. (2000)].

L'objectif de cette recherche est donc de proposer une approche permettant de configurer un réseau manufacturier fiable en sélectionnant ses nœuds internes et externes et ce, selon les besoins de la chaîne et les coûts associés aux différents modes de gestion. Le procédé de gestion du réseau manufacturier est schématisé à la figure 1. À l'arrivée d'une commande à une période donnée, chaque centre de production appartenant au réseau doit être capable de déterminer si sa capacité interne est suffisante pour produire à l'interne les quantités voulues en respectant le délai de livraison exigé. En cas d'un manque de capacité, les usines en question devront se décider sur le choix du mode de gestion à adopter, soit :

- l'augmentation de leurs propres capacités en ajoutant une ou plusieurs activités supplémentaires. Dans ce cas, le centre de production ne pourra pas éliminer les activités supplémentaires d'une période à l'autre et sera dans l'obligation de les garder pour les périodes suivantes.
- L'appel à des sous-traitants de capacité, sachant que le réseau a déjà sélectionné un ensemble de sous-traitants potentiels pouvant intervenir en cas de capacité insuffisante.
- L'utilisation simultanée des deux options (augmentation de la capacité interne et de la sous-traitance).

L'option choisie est celle qui réalise des économies des coûts.



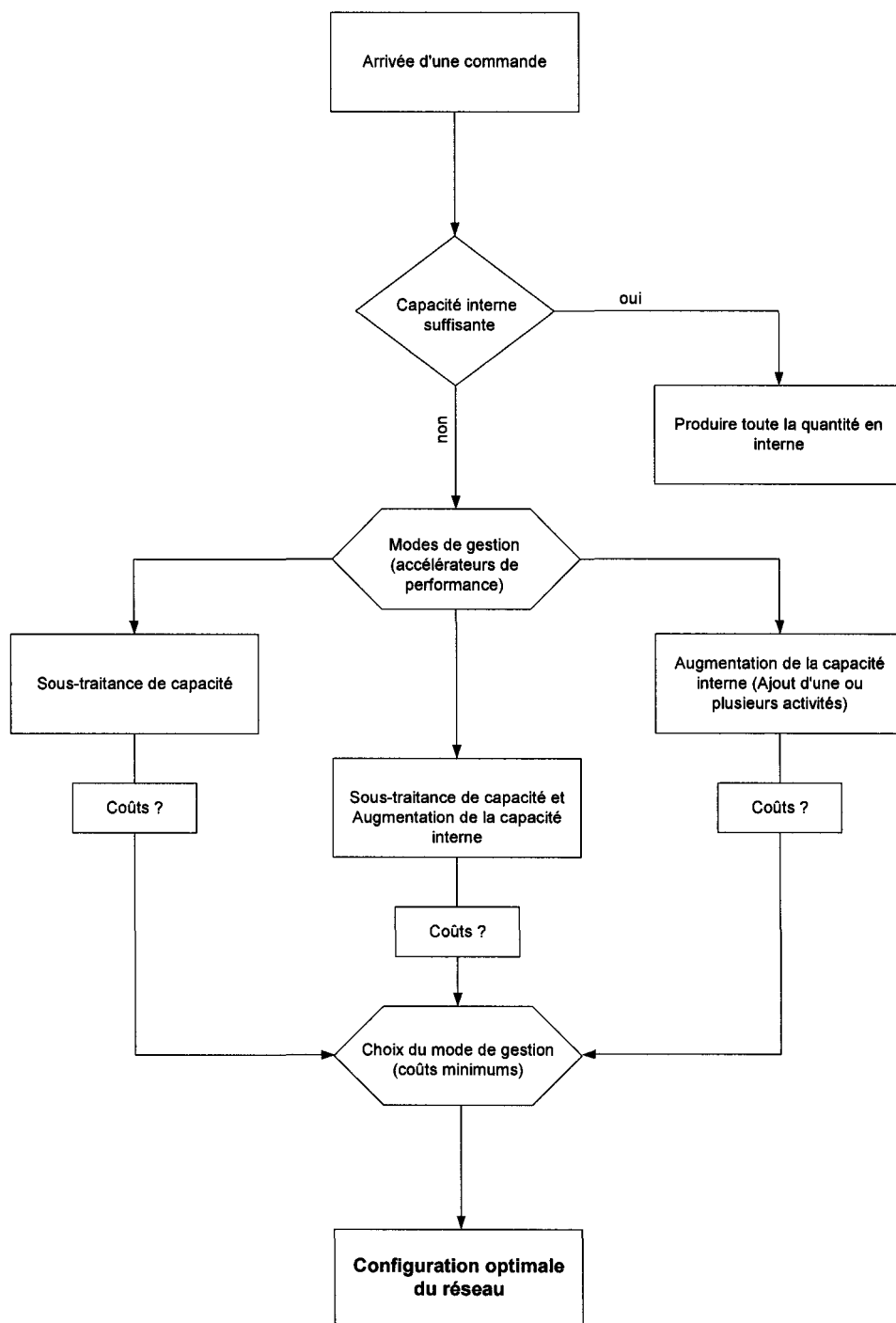


Figure 1 Processus de gestion du réseau manufacturier

Notre problématique suscite donc plusieurs questions d'ordre stratégique et opérationnelle à savoir : Pour quelle activité on va ajouter une ou plusieurs activités supplémentaires? Pour quelle activité on fera appel à des sous-traitants et à quel sous-traitants potentiels doit-on se confier? Combien doit-on produire en interne et en externe pour combler les besoins du réseau et du client final?

Pour répondre à ces questions ou pour y contribuer, il a fallu déterminer la bonne approche à adopter et ce, en choisissant entre plusieurs outils de modélisation et d'analyse existant pour ce type de problème [Min et Zhou (2002)].

Dans notre travail, nous avons opté pour un compromis entre la puissance de la modélisation mathématique et la possibilité de valider le modèle et analyser le comportement du système. Pour cela, nous allons proposer une approche hybride. Cette approche sera une combinaison d'un modèle de programmation linéaire mixte en nombre entier capable d'optimiser notre système en terme de coûts et d'une approche expérimentale basée sur la simulation qui va valider en premier lieu les résultats du modèle mathématique et évaluer en deuxième lieu le comportement du réseau en éliminant les hypothèses de simplification et en tenant compte des phénomènes aléatoires qui peuvent intervenir. La combinaison du modèle linéaire mixte avec la simulation, nous permettra de mieux planifier notre réseau et de déterminer ses configurations optimales tout en considérant ses caractéristiques réelles.

À notre connaissance, l'application d'une telle approche hybride dans la conception et la planification d'un réseau logistique réactif afin d'améliorer sa fiabilité n'a pas été abordée jusqu'à date.

### **1.3 Revue de la littérature**

Cette section présente une revue de littérature qui touche les réseaux logistiques, les risques et perturbations qui peuvent les affecter et les travaux qui ont proposé des

solutions contre ces perturbations. Finalement, la dernière partie présente un état de l'art des approches de modélisation mathématique et expérimentale utilisées dans la conception et la planification des chaînes d'approvisionnement.

### **1.3.1 Les réseaux manufacturier et logistiques**

La fin des monopoles et aussi les rapides changements technologiques ont entraîné une modification du champ concurrentiel des entreprises, ce qui a poussé un nombre d'entre eux et même les plus grandes firmes de s'orienter vers d'autres approches compétitives [Mile et Snow (1986)]. Cet accroissement de la turbulence et par le fait même de l'incertitude, est à l'origine d'un glissement paradigmatique, menant les entreprises à changer leurs modes d'organisation vers la coopération. Elles ont en effet pris conscience de la difficulté à pouvoir mener seules une bataille sur tous les fronts de la concurrence.

En 1985, Poter a développé une analyse des relations inter-organisationnelles en intégrant à son modèle les relations d'interdépendance en amont et en aval. Il développe alors les notions de coopération entre les entreprises. Depuis, plusieurs travaux sont allés plus loin [Morvan Y. (1991), (Gomes-Casseres B. (1994), (Brandenburger et Nalebuff (1995))].

Plus récemment, les chaînes d'approvisionnement et les réseaux manufacturiers sont devenus un champ fertile pour la recherche. On remarque qu'il y a plusieurs groupes de recherche qui développent des approches et des outils traitant différents aspects des réseaux logistiques dont le Centre de recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau (CENTOR)<sup>1</sup> et le Laboratoire de Conception et Contrôle des Systèmes de Production (LCCSP)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Affilié à l'Université Laval, Sainte-Foy (Québec)

<sup>2</sup> Affilié à l'École de Technologie Supérieure, Université de Québec, Montréal (Québec)

Parmi les chercheurs impliqués, Frayret, D'Amours et Montreuil (1999, 2000a, 2000b) ont développé plusieurs approches sur la conception, la modélisation et la gestion des opérations des réseaux manufacturiers généralement dans des environnements dynamiques. Ils ont aussi implanté des structures d'informations collaboratives pour des fins de coordination et d'intégration dans les réseaux.

Alain Martel a travaillé avec d'autres chercheurs [Kissani et Martel (2003), Vila et al. (2003), Paquet et al. (2004)] sur la conception des réseaux logistiques où ils se sont intéressés aux entreprises de pâte et papier ainsi qu'à l'industrie de bois d'œuvre. Dans leurs derniers travaux, ils se sont concentrés sur l'importance de sélection des technologies dans les modèles de conception des réseaux manufacturiers.

Ramudhin et al. (1994, 1996) ont étudié le problème de la distribution d'un groupe d'activités ayant des contraintes de présence de la forme d'un arbre d'assemblage, parmi un groupe de firmes concurrentes, avec l'objectif de minimiser le coût total.

Il y a aussi Olivier et al. (1994, 1996, 1998) qui ont proposé une approche pour l'évaluation d'alternatives d'aménagement, dépendamment des coûts et du flux, pour des systèmes manufacturiers organisés en réseaux agiles et ils ont introduits des concepts pour la planification et le contrôle des réseaux manufacturiers virtuels.

### **1.3.2 Risques et perturbations**

Les réseaux logistiques sont sujets à différents types de perturbations qui affectent leur fonctionnement normal et diminuent leur performance. On présentera dans cette partie une revue de littérature sur les recherches qui ont traité les risques auxquels le réseau est confronté en général et les perturbations qui affectent les composants du réseau en particulier. On mettra aussi l'accent sur les travaux qui ont proposé différentes solutions qui aident les chaînes d'approvisionnement à être mieux réactives afin de réduire l'impact des perturbations et des incertitudes sur leur performance.

Davis (1993), montre dans sa recherche que l'une des sources majeures de risque est la performance des fournisseurs. En effet, l'incapacité d'un fournisseur de livrer les bonnes quantités dans les délais affectera négativement la performance de la chaîne globale en général et le partenaire en aval en particulier. Il ajoute aussi que la fluctuation de la demande est aussi une importante source de perturbation.

Encore dans le contexte de l'évaluation et l'analyse des risques dans les chaînes d'approvisionnement, Hallikas et al. (2002) ont mentionné que les importants risques qui affectent la fiabilité de livraison sont le manque de fiabilité des fournisseurs qui livrent en retard les quantités prévues, la fluctuation de la demande qui cause des problèmes de prévisions et enfin les problèmes au niveau de la planification de production.

Les risques encourus de variation de la demande et de perturbation de l'information sont des problèmes classiques dans la gestion des chaînes logistiques. Forrester (1961) était le premier à découvrir l'effet de la fluctuation de la demande appelé communément « Bullwhip effect ». Ce problème a été ensuite élaboré par Lee et al. (1997), Mason-Jones et Towill (2000), Meixell et al. (2002).

Frizelle et al. (1998) ont étudié les différents types de perturbations menaçant la fiabilité des systèmes manufacturiers telles que les problèmes liés aux fournisseurs et au processus de transformation.

Dans la littérature sur la gestion des chaînes d'approvisionnement, les risques et les incertitudes sont traités au niveau de planification tactique en s'intéressant surtout aux incertitudes liées à la demande et au délai de livraison. Pour réduire l'effet de ces perturbations, différentes solutions ont été optées.

Axsäter (1993), Inderfurth (1994) et Diks et al. (1996) ont étudié l'effet du stock de sécurité sur la réduction de l'effet de la variabilité de la demande et le délai.

Voudouris (1996) suggère de maximiser la capacité des ressources existantes pour la production ainsi que l'espace de stockage pour améliorer les opérations et éliminer les goulots d'étranglement. Il propose même une simulation d'implantation d'une autre ligne de production.

Ahmadi et Tang (1994) ont opté pour la sous-traitance de capacité comme solution à court terme en cas d'une capacité insuffisante causée par l'augmentation inattendue de la demande. Pour cela, ils ont construit un modèle d'allocation de produit entre la production interne et les sous-traitants et le modèle permet de déterminer l'affectation optimale des produits aux moindres coûts.

La démarche proposée par Sabri et Beamon (2000) met en évidence l'impact du niveau tactique dans la conception de la chaîne logistique. L'approche proposée par les auteurs devrait permettre la conception efficace d'une chaîne logistique flexible tout en considérant les incertitudes et les perturbations liées à la production, à la livraison et à la demande. Ils ont construit des sous modèles stochastiques prenant en compte différentes sources d'incertitudes (variables aléatoires) tels que la demande du client, le délai de production et le délai de livraison. À partir de la chaîne initialement configurée, les données relatives aux coûts variables et aux délais moyens sont estimées en tenant compte des incertitudes. Ces paramètres sont déterminés en minimisant les fonctions analytiques des coûts de stockage et en déterminant ainsi la taille optimale du lot de commande ainsi que le point de commande.

Dans le contexte de l'amélioration de la performance globale des chaînes d'approvisionnement considérant la fiabilité, Cavory et al. (2000) ont proposé une méthode de mesure de la fiabilité dans les réseaux manufacturiers et logistique ainsi qu'une planification des accélérateurs de performance en cas de retard. Le concept

d'accélérateurs est présenté comme un ensemble de mécanismes planifiés à l'avance et reconfigurables dynamiquement, visant à gérer certaines perturbations pouvant diminuer la fiabilité des réseau logistiques. Il existe deux sortes de mécanismes d'accélération.

Les mécanismes internes à la firme (Figure 2) présentés sous forme de :

- a) Utilisation d'un stock de sécurité de produits en amont de la production.
- b) Utilisation d'une capacité de production supplémentaire.
- c) Utilisation d'un stock de sécurité de produits en aval de la production.

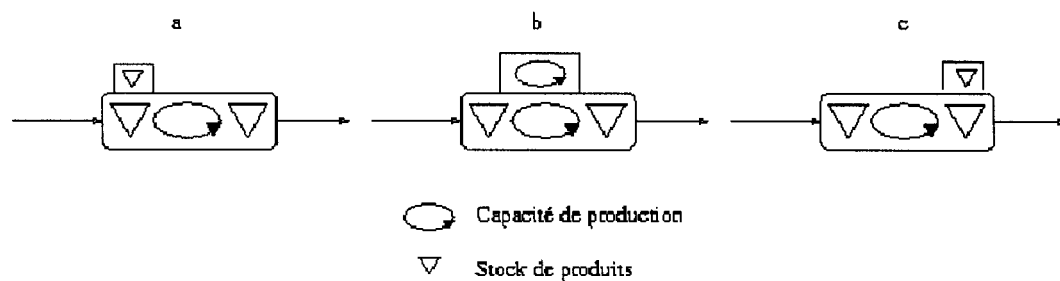


Figure 2 Accélérateurs internes

Les mécanismes externes sont identiques aux mécanismes internes à la différence près qu'une firme en échec fera appel à une autre firme pour résoudre le problème. L'utilisation de ces mécanismes peut être seule ou combinée.

Dans ce qui suit on présentera un état de l'art des approches mathématiques basées sur la programmation linéaire mixte pour fin d'optimisation, des approches expérimentales basées sur la simulation et quelques travaux qui ont employé une approche hybride combinant la programmation linéaire à la simulation.

### **1.3.3 Approches de modélisation**

#### **1.3.3.1 Approche mathématique**

Les problèmes de conception et planification des chaînes d'approvisionnement sont à la base des problèmes d'optimisation dont la plupart sont résolus par la programmation linéaire mixte, ce qui est confirmé par Ballou (1995). Le chercheur postule qu'une étude des logiciels, qui s'intéressent aux problèmes de niveau stratégique et tactique des chaînes logistiques, montre que la majorité des modèles développés se basent sur la programmation linéaire mixte.

Dans ce qui suit, nous présentons une synthèse des modèles principaux de conception et de planification des réseaux logistiques qui ont eu recours à des modèles mathématiques d'optimisation. En effet, dans les travaux traitant la gestion à long et moyen terme d'une chaîne logistique, nous trouvons une littérature abondante qui traite des problèmes de la localisation (choix des sites de production, distribution..) de sélection des partenaires et d'allocation (affectation des produits) dans le but d'optimiser les chaînes d'approvisionnement.

Geoffrion et Graves (1974) ont proposé un des premiers modèles de conception de réseaux logistiques multi-articles. Le but principal du modèle est d'optimiser les flux annuels des articles finis. Le réseau modélisé est constitué des sites de production, des centres de distribution et des clients. Le problème d'optimisation consiste à identifier les centres de distribution à ouvrir, leurs tailles et quel clients chaque centre de distribution doit approvisionner en produits finis. Ce problème a été modélisé sous la forme d'un programme linéaire mixte en nombres entiers. La fonction objectif à minimiser regroupe les différents coûts fixes et variables des sites et de transport et les contraintes regroupent les capacités disponibles dans chaque site, la satisfaction de la demande de chaque client, la livraison d'un article à partir d'un seul centre de distribution. Enfin les bornes inférieures et supérieures de consommation dans les centres de distribution.



Brown et al. (1987) ont développé un programme linéaire mixte multi-produits qui permet de prendre des décisions d'ouverture ou de fermeture d'un site, d'affectation des produits et d'équipements aux différents sites de production. La fonction objectif est une combinaison de coûts variables et fixes de production et de transport sous les contraintes de satisfaction des demandes des clients, de conservation des flux de matière et des capacités de production des sites et des équipements.

Le modèle de programmation linéaire mixte développé par Cohen et Lee (1989) pour la conception d'un réseau international de production / distribution, maximise la valeur ajoutée de la chaîne avant et après les taxes. Le modèle permet de déterminer l'affectation des produits aux sites de production, l'affectation des vendeurs aux sites de distribution, la quantité de produits à acheminer aux clients et aux centres de distribution et enfin la quantité de produits à fabriquer par chaque site de production d'où la détermination des flux entre les installations. Pour illustrer le modèle, un exemple issu d'une application industrielle de fabrication d'ordinateurs est représenté.

Pour optimiser la chaîne logistique globale de DEC (Digital Equipment Corporation), Arntzen et al. (1995) ont développé un modèle de la chaîne logistique globale (GSCM : Global Supply Chain Model), son but principal était de comparer différentes stratégies de configuration des réseaux de production et de distribution existants de DEC. Le GSCM est un programme linéaire en nombres entiers dynamique et multi-articles et il permet de réaliser un équilibre entre les paramètres coût, délais et capacité. En effet, la fonction objectif à minimiser est une combinaison linéaire d'un coût et d'un délai. L'intérêt principal de ce modèle est de prendre en compte les taxes dues à l'importation. Ce modèle permet également de modéliser la nomenclature globale de chaque article. D'Amours et al. (1996) ont développé un modèle de planification et d'ordonnancement des commandes de différents produits dans le cadre des réseaux manufacturiers symbiotiques. Le modèle déterministe est basé sur la programmation linéaire et sa

fonction objectif minimise les coûts de production, de stockage et de transport à travers le réseau. Les résultats donnés identifient les firmes sélectionnées permettant de donner la configuration optimale pour chaque commande. Comme extension à ce travail et afin de considérer la fiabilité des partenaires potentiels, Mirabedini et al. (2001) ont construit un modèle linéaire mixte pour la planification et la configuration d'un réseau manufacturier et aussi l'évaluation de sa fiabilité globale dans un environnement dynamique. Ils définissent la fiabilité d'un réseau comme la probabilité de livraison à temps au client final.

Dogan et Goetschalcks (1999) ont étudié un problème de conception de réseau logistique aux niveaux stratégique et tactique. Ils proposent une formulation par un programme linéaire en nombres entiers et une méthode de résolution basée sur la décomposition primale de Benders. Ils ont introduit le choix de lignes de production qui se distinguent par leur technologie et / ou leur capacité de production.

Le modèle est décomposé en deux sous-modèles : un modèle de localisation de sites, de dimensionnement des flux de transport et d'affectation de production et un modèle de dimensionnement des flux de transport. Les auteurs ont étudié deux applications numériques correspondant aux deux cas : statique et dynamique.

Martel et al. (2001) ont proposés un modèle général qui permet d'optimiser la structure d'un réseau logistique, de configurer les installations et de préciser leur mission. Ils proposent une approche pour modéliser les technologies de production, de stockage et de réception-livraison des installations, leur modèle d'optimisation tient compte des nomenclatures des articles et des économies d'échelle. Dans l'article de Martel et Vankatadri (1999), ils ont modélisé des problématiques d'expansion de la capacité par type de technologie en prenant compte des économies d'échelle (les coûts sont des fonctions concaves).

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 recherche, 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, en 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 de planification stratégique de réseaux multi-sites de production et de distribution qui est dynamique (multi-périodes de planification), multi-articles et déterministe.

Pour la conception des chaînes logistiques fiables et robustes, Bundschuch et al. (2003) ont exploré des approches mathématiques en programmation linéaire mixte afin d'évaluer la performance des réseaux en termes de coûts, fiabilité et robustesse. Dans leur travail, ils définissent la fiabilité comme étant la probabilité que le réseau exécute ses fonctions comme prévu dans un horizon donné de temps.

Dans le cadre des réseaux manufacturiers, Viswanadham et Gaonkar (2003) ont étudié la configuration optimale dynamique d'un réseau et sa performance en développant un modèle linéaire mixte qui aborde la question de la sélection des partenaires et la planification pour la maximisation des profits avec la prise en compte des contraintes de production et logistique. Les auteurs ont supposé que tous les nœuds du réseau partagent l'information sur leur capacité, leur planification et la structure des coûts.

Nous pouvons constater que tous ces travaux qui traitent des problèmes de localisation, d'allocation et de planification permettent d'avoir une vision globale de toute la chaîne.

Dans la majorité des travaux, un seul critère d'optimisation est considéré : soit il s'agit de minimiser les coûts, soit de maximiser les profits. Les éléments du coût modélisés par les auteurs sont :

- le coût de production (fixe et variable);
- le coût de possession des stocks;
- le coût de transport entre les différentes installations de la chaîne;
- le coût fixe d'ouverture d'une installation;
- et éventuellement les charges douanières.

Toutefois, la plupart des auteurs cités ci-dessus supposent que leurs systèmes sont fiables à 100% et les problématiques traitées sont soit de natures déterministe et statique soit très restrictives (pas de phénomènes aléatoires). Vidal et Goetschalckx (1996) ont discuté des rôles et des limites de l'utilisation de la programmation linéaire mixte dans la conception de la chaîne logistique globale. Les auteurs mettent l'accent sur l'impact des incertitudes dans la conception et dans l'optimisation de la chaîne logistique. Ceci a été prouvé grâce à des analyses de sensibilité qui ont été faites sur le modèle linéaire mixte proposé pour construire la chaîne logistique globale de l'entreprise. En réalité, on doit considérer la dynamique du système et les phénomènes aléatoires qui y interviennent et qui peuvent perturber la performance de la chaîne globale. Pour notre cas, la prise en compte des phénomènes aléatoires causés par des incertitudes et de la dynamique n'est pas figée.

Nous synthétisons dans le tableau I les éléments pris en compte dans la formulation des principaux modèles de conception et planification de chaîne logistique.

La dernière colonne du tableau récapitulatif correspond aux caractéristiques de notre modèle d'optimisation qui fera l'objet de la première étape de notre approche de modélisation hybride.

Tableau I

Tableau récapitulatif des modèles d'optimisation de conception et planification des chaînes logistiques

<b>Caractéristiques des modèles</b>	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
<b>Problème étudié</b>										
Localisation et / ou allocation	X	X		X		X	X	X		
Configuration										X
Planification					X				X	X
<b>Le nombre de produit</b>										
Un produit										
Multi-produits	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Horizon de planification</b>										
Statique (une période)	X	X	X			X				
Dynamique (multi-périodes)				X	X	X	X	X	X	X
<b>Objectif</b>										
Minimisation des coûts	X	X			X	X	X	X		X
Maximisation des profits			X						X	
Fonction multicritères				X						
<b>Contraintes de Capacité</b>										
Capacité des sites de production	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Capacité des lignes de production						X	X	X		
Capacité des centres de distribution	X			X	X	X	X	X		
Capacité des liens de transport					X	X			X	X
Capacité des fournisseurs ou sous-traitants			X			X	X			X
<b>Contraintes liées au service client</b>										
Satisfaction de la demande	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Délai de livraison	X					X			X	X
<b>Paramètres aléatoires</b>										
Demande						X				X

[1] Geoffrion et Graves (1974), [2] Brown et al. (1987), [3] Cohen et Lee (1989), [4] Arntzen et al. (1995), [5] D'Amours et al. (1996), [6] Dogan et Goetschalcks (1999), [7] Martel et al. (2001), [8] Hadj-Hamou (2002), [9] Viswanadham et al. (2003), [10] Chelly et al. (2004).

### **1.3.3.2 Approche expérimentale**

Bien que les modèles d'optimisation aient l'avantage d'être efficaces pour donner des solutions optimales, ces modèles fournissent des mesures de performance statiques et ils sont basés sur plusieurs approximations, notamment en ce qui concerne la structure des coûts et certains aspects liés à la dynamique et aux incertitudes [Lee et Billington (1992)].

Pour tenir compte de la variabilité et la complexité des systèmes réels, une des techniques la plus utilisée dans la littérature est la simulation par événement discret. C'est une technique descriptive selon laquelle le modèle représentant un système réel est développé puis des essais sont testés sur le modèle afin d'évaluer son comportement sous diverses conditions.

Face à la complexité des réseaux logistiques, la simulation est considérée comme un outil puissant d'aide à la décision utilisé dans la conception, la planification et le contrôle des chaînes d'approvisionnement. A l'aide de la simulation, nous pouvons étudié en détail le comportement dynamique du réseau et évaluer sa performance. En plus, on peut facilement modifier les conditions de fonctionnement du réseau et comparer les mesures de performance qui nous intéressent d'un scénario à l'autre. Pour un non spécialiste, la simulation est plus proche du système réel que les modèles mathématiques puisqu'elle nécessite moins de simplifications et quasiment pas d'hypothèse spécifiques.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'apport de la simulation dans le contexte des réseaux manufacturiers et logistiques, Geller et al. (1995) décrivent dans leur travail l'application de la simulation à événements discrets pour la modélisation et l'analyse des chaînes d'approvisionnement ainsi que des usines virtuelles. En effet, ils montrent

l'importance de la simulation dans le choix des ressources et de l'ordonnancement pour mieux planifier les délais de livraison avant le lancement des commandes.

Terzi et Cavalieri (2004) s'intéressent aussi dans leur travail de recherche à la simulation comme étant une meilleure technique de prise de décision et d'évaluation des mesures de performance quantitatives dans les chaînes logistiques. On trouve dans leur article une description sous formes de revue de littérature des paradigmes de simulation utilisés dans différents systèmes logistiques.

Depuis le début des années 90, l'application de la simulation à événements discrets est très répandue. Parmi les travaux qui se sont basées sur la simulation pour gérer les perturbations et les incertitudes, Towill (1991) et Towill et al. (1992) ont utilisé les techniques de simulation pour évaluer différentes stratégies permettant de diminuer l'effet de l'amplification de la demande sur une chaîne logistique. Parmi les stratégies proposées on note l'élimination de l'échelon de distribution en l'incluant dans l'échelon manufacturier, l'intégration du flux d'information à travers toute la chaîne, l'implantation d'une politique d'inventaire juste à temps et enfin améliorer le mouvement des produits intermédiaires et du matériels en modifiant les procédures des commandes.

L'objectif de la simulation dans leur travail est de déterminer quelle est la stratégie à retenir pour diminuer l'effet de la variation de la demande. Effectivement, en simulant les différents scénarios proposés, les résultats ont montré que la stratégie d'une politique juste à temps est la plus efficace.

En travaillant sur la même problématique, Wikner et al. (1991), ont testé à leur tour cinq stratégies d'amélioration. Les résultats de la simulation ont démontré que la meilleure stratégie à choisir est l'amélioration du flux d'information dans la chaîne ensuite la

séparation des commandes réelles (Les demandes du marché) des commandes de couverture du stock de sécurité.

Dans le travail de Cavory et al. (2000), pour l'amélioration de la fiabilité des réseaux manufacturier dans un environnement dynamique stochastique, les auteurs ont eu recours à la simulation pour évaluer leur système et comme outil de simulation Pro Model. Suites aux résultats obtenus par la simulation des différents scénarios, il était possible de déterminer les retards associés, les décideurs pourraient ensuite décider quels partenaires constitueront le réseau ainsi que les mécanismes d'accélération à mettre en place.

Nous présentons dans le tableau II un bref survol de l'état de l'art des approches expérimentales basées sur la simulation dans le cadre de conception et planification des chaînes logistique.

La dernière colonne du tableau II correspond aux caractéristiques de notre modèle de simulation qui fait l'objet de la deuxième étape de notre approche de modélisation hybride.

La plupart des travaux cités ont employé la simulation comme un outil d'aide à la décision pour modéliser le comportement et la performance des systèmes étudiés. Mais il reste que la décision à prendre peut ne pas être optimale parce qu'elle n'est pas basée sur un modèle d'optimisation. D'où la nécessité d'une approche hybride qui combine un modèle d'optimisation à la simulation. Cette combinaison sera une meilleure approche permettant de fournir une solution optimale tout en respectant l'aspect réaliste du réseau.



Tableau II

Tableau récapitulatif des modèles de simulation de conception et planification des chaînes logistiques

<b>Caractéristiques des modèles</b>	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
<b>Problème étudié</b>									
<b>Niveau stratégique</b>									
Conception et configuration du réseau		X	X	X	X	X		X	X
<b>Niveau tactique et opérationnel</b>									
Planification des demandes				X	X		X		X
Planification des stocks	X	X	X	X	X	X			
Planification de la distribution et du transport			X	X					
Planification de la production et Ordonnancement	X	X		X		X	X		X
<b>Mesures de performance</b>									
Délai de livraison total	X		X		X	X	X	X	X
Mesures liées à Inventaire (Niveau d'inventaire, WIP..)	X	X	X	X	X	X		X	X
Niveau de service	X	X			X				
Mesures liés à la qualité						X			
Quantités produites						X			X
Temps de transport				X					
Temps d'attente dans la file								X	X
Coût total									X
Profit				X					
Coût d'inventaire				X		X			
<b>Outil ou langage de simulation utilisé</b>	Dynamo	Dynamo	ModSim	IBM SCA	Arena	Taylor II	Osim	NA	Awesim

[1] Berry et Naim (1996), [2] Hafeez et al. (1996), [3] Alfieri et Brandimarte (1997), [4] Archibald et al. (1999), [5] Jain et al. (2001), [6] Persson et Olhager (2002), [7] Zulch (2002), [8] Caravelli (2003), [9] Chelly et al. (2004)

### 1.3.3.3 Approche hybride

Pour s'assurer que les résultats générés par les modèles mathématiques sont toujours valides quand on prend en compte la variabilité et la dynamique du réseau manufacturier, on a choisit d'appliquer ensuite la simulation par événements discrets. Cette approche hybride est très avantageuse puisqu'elle combine l'efficacité du modèle linéaire mixte avec la flexibilité de la simulation.

Différentes structures de combinaison entre la programmation linéaire et la simulation ont été décrite par Hseih (2002), dans la catégorie où la simulation est utilisée pour valider le programme linéaire. Certains travaux peuvent être cités.

Dans le contexte de la planification stratégique d'une chaîne logistique, Hicks (1999) cherche dans ce travail à trouver la bonne décision entre plusieurs décisions caractérisées par la complexité, l'interdépendance et l'incertitude. Pour résoudre ce problème il propose une méthodologie à quatre étapes montrant la force de combinaison de l'optimisation à la simulation afin de trouver la décision optimale et l'améliorer.

Truong et Azadivar (2003) ont aussi utilisé une approche hybride pour prendre des décisions stratégiques assez importantes au niveau de la localisation des usines et des entrepôts, la capacité de production, les modes de distribution et de transport et enfin la sélection des partenaires de la chaîne logistique. Leur approche hybride est composée des algorithmes génétiques pour l'optimisation des variables qualitatives, d'un programme linéaire mixte pour l'optimisation des variables quantitatives et finalement de la simulation pour l'évaluation de la performance de chaque configuration en considérant l'aspect réel du système.

Dans le cas de notre problématique de recherche, les approches utilisées dans la littérature, pour planifier et configurer les réseaux manufacturiers ou logistiques en faisant face aux perturbations, sont basées soit sur des modèles d'optimisation soit sur la

simulation. L'utilisation d'une telle approche hybride sera, à notre connaissance, un nouvel outil qui n'a pas été abordé dans la littérature.

#### 1.4 Plan de lecture

L'apport de ce travail de recherche est d'améliorer la fiabilité d'un réseau manufacturier en appliquant différents modes de gestion capables de faire face aux perturbations qui peuvent intervenir dans le réseau telle la variabilité de la demande. Les décisions à prendre sur le choix des modes de gestion nous permettent de trouver les bonnes configurations du réseau afin qu'il soit plus fiable. Pour répondre à la problématique posée, nous avons structuré notre mémoire en deux parties.

Partie 1 : Elle se compose en un seul chapitre (**chapitre 2**) où nous proposons, en premier lieu, quelques notions sur la gestion des chaînes logistiques ainsi que les différentes décisions à prendre pour la conception et la planification d'un réseau manufacturier ou logistique. On présente en deuxième lieu les types de perturbations qui peuvent affecter les réseaux dépendamment de leurs positions dans le réseau.

Enfin, et afin de considérer la fiabilité, nous décrivons les modes de gestion appelés encore les mécanismes d'accélération qui peuvent être implantés dans les réseaux affectés pour diminuer l'effet des perturbations sur leur performance.

Partie 2 : elle est constituée de trois chapitres décrivant la démarche proposée (voir figure 3). Dans le **chapitre 3**, on présente le réseau manufacturier étudié, soit un réseau composé de trois centres de production où chaque centre possède une ou plusieurs activités produisant des produits différents. En cas de manque de capacité, on peut implémenter différents mécanismes d'accélération planifiés à l'avance afin de s'assurer que la fiabilité du réseau soit maximale, et ce en livrant les bonnes quantités demandées dans les délais. Ce chapitre sera suivi d'une approche hybride.

En effet, dans le **chapitre 4**, nous effectuons une première modélisation de notre réseau basée sur un programme linéaire mixte en nombres entiers avec l'objectif de minimiser le critère coût. Nous introduisons dans le modèle une demande variable.

Le modèle d'optimisation nous permet d'optimiser notre réseau en nous donnant les configurations optimales intégrant les bons modes de gestion choisis pour l'amélioration de la fiabilité du réseau aux moindres coûts.

Une analyse de sensibilité est employée après la modélisation mathématique pour contrôler le comportement du réseau étudié sous différents scénarios. On essaye à chaque scénario de changer un ou plusieurs paramètres puis regarder l'impact de chaque changement sur le choix des mécanismes d'accélération et la configuration finale du réseau.

Dans le **chapitre 5**, deux modèles de simulation par événements discrets sont conçus, d'une part, pour valider les résultats générés par le modèle linéaire mixte et, d'autre part, pour tenir compte de la variabilité et la dynamique du réseau.

Ainsi, nous concluons notre mémoire en présentant un bilan final de notre travail et en ouvrant quelques perspectives de recherche.

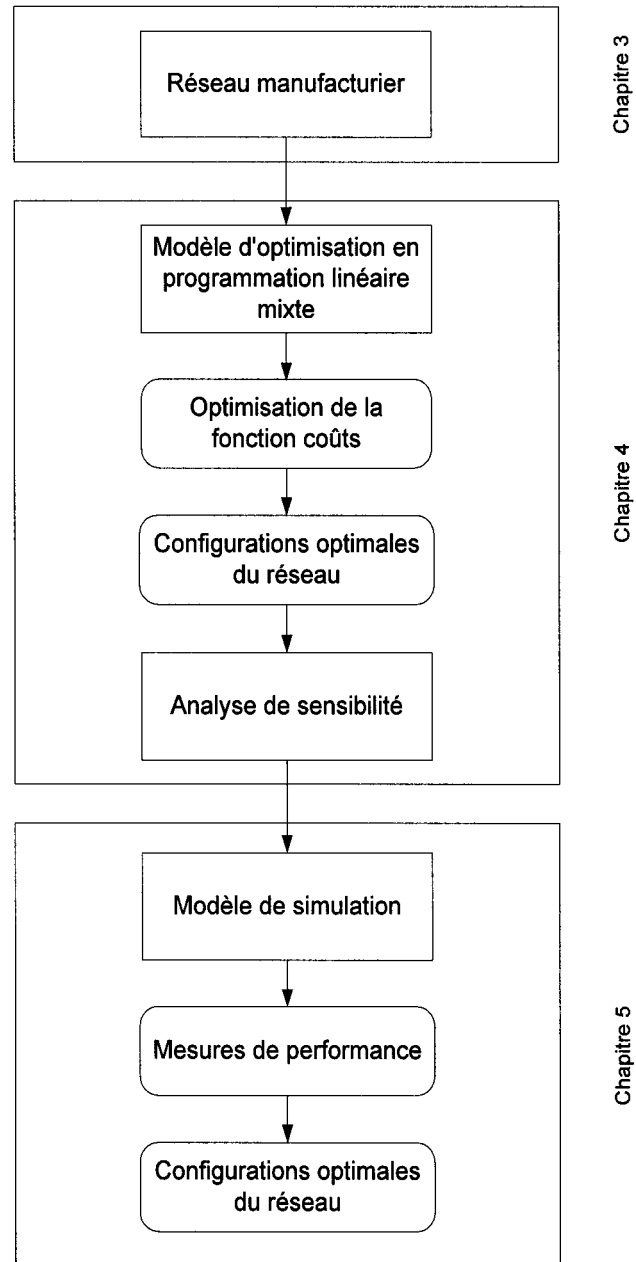


Figure 3 Démarche à suivre

## **CHAPITRE 2**

### **GESTION DE CHAÎNES LOGISTIQUES**

#### **2.1 Introduction**

Dans ce second chapitre, nous abordons la gestion de la chaîne logistique et les perturbations auxquelles elle est confrontée. Nous présentons, dans un premier temps, ce que nous entendons par « gestion de chaînes logistiques » en donnant quelques définitions de la chaîne logistique et présentant les différentes décisions relatives à la gestion et à la planification à fin de situer notre problème de planification et configuration des réseaux manufacturiers.

Nous nous intéressons ensuite aux risques et aux incertitudes qui peuvent perturber le bon fonctionnement de la chaîne et qui ont un impact fort sur le processus dynamique de planification et sur la fiabilité des acteurs de la chaîne logistique.

Enfin, ce deuxième chapitre s'achèvera par une présentation des modes de gestion qui peuvent diminuer l'impact des différentes perturbations sur les chaînes et les réseaux logistiques.

#### **2.2 Gestion des chaînes logistiques**

##### **2.2.1 Définition de la chaîne logistique**

La chaîne logistique d'un produit se définit comme l'ensemble des entreprises qui interviennent dans le processus de fabrication, de distribution et de vente du produit, du premier fournisseur au client final. Cette notion de chaîne logistique est ainsi très complexe car les fournisseurs ont eux-mêmes leurs propres fournisseurs et les clients sont souvent fournisseurs d'autres clients (Bouchriha, 2002).

En définissant la chaîne logistique comme étant l'ensemble des processus logistiques de l'acquisition de la matière première jusqu'à la distribution des produits finis aux clients

ultimes (Slats et al., 1997), les auteurs soulignent la présence de plusieurs acteurs dans la chaîne logistique ; d'où la nécessité de considérer l'ensemble des entreprises impliquées dans la fabrication et la distribution d'un produit.

Selon Lee et Billington (1993), la chaîne logistique est un réseau d'installations qui assurent les fonctions d'approvisionnement de matières premières, de transformation de ces matières en produits intermédiaires et en produits finis, et de distribution des produits finis aux clients. Cette définition met en évidence trois fonctions principales dans la chaîne logistique qui sont : l'approvisionnement, la transformation et la distribution. De plus elle considère la chaîne logistique comme étant un ensemble d'installations et non plus d'entreprises.

Comme l'entreprise s'étend sur plusieurs sites organisés sur de multiples niveaux, la notion de chaîne logistique devient de plus en plus complexe. Ainsi une installation peut représenter :

- un fournisseur,
- un centre de production (producteur, assembleur, etc.),
- une unité de stockage,
- un centre de production et stockage,
- un centre de distribution (entrepôt),
- un client.

Le lien entre les différentes installations se fait par des opérations de transport.

En se basant sur les définitions citées de chaîne logistique, nous présentons un exemple de schématisation ci-dessous d'une chaîne logistique (figure 4).

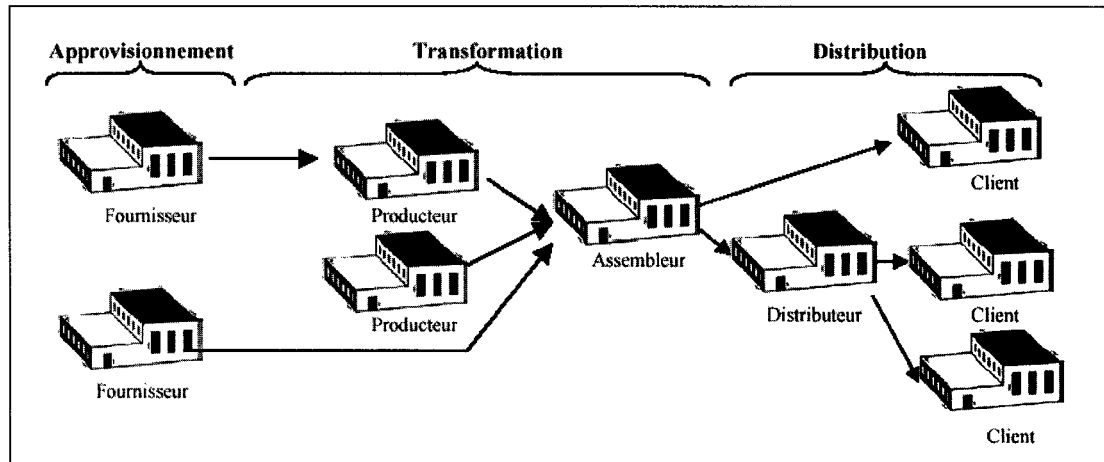


Figure 4 Représentation de la chaîne logistique (Bouchriha, 2002)

### 2.2.2 Gestion de la chaîne logistique

La gestion de la chaîne logistique consiste à piloter l'ensemble des installations qui concourent à la réalisation et à la mise à disposition des produits. Elle vise d'une part à fabriquer les articles en s'appuyant sur les informations issues des prévisions de la demande des clients et d'autre part, à minimiser les différents coûts d'approvisionnement, de production, de stockage et de livraison.

Elle comprend généralement deux principales composantes, l'intégration du réseau d'installations et de coordination des différents flux de matières et d'information.

Pour évaluer le niveau de gestion d'une chaîne logistique, un certain nombre de mesures de performance de la chaîne logistique ont été proposées par Narahari et Biswas (2000). D'un côté des mesures qualitatives permettant d'évaluer la qualité des produits et le niveau de satisfaction des clients de la chaîne, et d'un autre côté, des mesures quantitatives qui peuvent être soit financières (par exemple le chiffre d'affaire de la chaîne, le coût de stockage, le coût de transport, le coût de retard de livraison) ou non financières (tels que le temps de cycle, le niveau de service, les niveau de stock, l'utilisation des ressources).



Toutefois, c'est au niveau de gestion à long terme que s'intéresse notre problématique de conception et planification d'un réseau manufacturier.

### **2.2.3 Planification de la chaîne logistique**

La planification de la chaîne logistique consiste à optimiser les activités d'approvisionnement, de production et de distribution des produits, en se basant sur la demande prévisionnelle des clients. Les objectifs principaux de la planification sont de satisfaire la demande des clients dans les délais et d'utiliser de façon optimale les moyens.

La planification d'une chaîne logistique nécessite de prendre un ensemble de décisions à des niveaux différents. Les différentes décisions de planification de la chaîne logistique sont classées selon un horizon temporel.

#### **2.2.3.1 Décisions stratégiques (long terme)**

Les décisions stratégiques d'une chaîne logistique sont celles qui déterminent la structure de la chaîne. Elles permettent d'évaluer les alternatives de configuration de la chaîne. Elles sont prises pour un horizon de planification à long terme sur la base des prévisions de demandes annuelles.

Ce type de planification vise à prendre des décisions qui concernent principalement :

- l'ouverture ou la fermeture de certaines installations dans la chaîne.
- l'existence de relation entre certaines installations de la chaîne.
- le nombre, la localisation et la capacité des sites manufacturiers.
- l'affectation des produits et des équipements aux installations ouvertes de la chaîne.
- la sélection des fournisseurs ou des sous-traitants.
- les moyens de transport à utiliser.
- la quantité de matière nécessaire pour chaque installation de la chaîne.

### **2.2.3.2 Décisions tactiques (moyen terme)**

La planification tactique reflète les décisions à prendre sur un horizon de quelques jours à quelques mois. Les décisions prises à moyen terme permettent de fournir les différentes ressources physiques et informationnelles nécessaires à la production et à la distribution (main d'œuvre, équipement et matières).

Les décisions tactiques reposent sur les modalités de circulation des produits dans le réseau logistique conçu au niveau stratégique. Elles regroupent :

- l'affectation des fournisseurs ou sous-traitants aux sites de production.
- l'allocation des articles aux centres de production.
- l'allocation des centres de distribution aux clients.
- le dimensionnement des niveaux de stocks.

### **2.2.3.3 Décisions opérationnelles (court terme)**

Les décisions opérationnelles assurent, à court terme, la gestion des moyens de la chaîne logistique au sein de chaque installation et entre les différentes installations. Elles reflètent le fonctionnement journalier des opérations logistiques.

Les décisions opérationnelles les plus importantes sont :

- la gestion et le contrôle de stock.
- le dimensionnement des lots.
- l'affectation des stocks aux clients.
- l'ordonnancement de la production.
- la définition des programmes de transport et de livraison.

Contrairement aux niveaux tactique et stratégique, peu de travaux qui se sont basés sur la planification multi-sites ont été développés au niveau opérationnel. Ceci résulte du fait que les décisions opérationnelles sont spécifiques à la configuration du processus de production dans chaque site (flow shop. Job shop).

Les différents systèmes hiérarchiques de modélisation d'une chaîne logistique sont représentés dans la figure 5. Pour chaque fonction du réseau, les trois niveaux hiérarchiques de planification (stratégique, tactique et opérationnel) peuvent être définis. Par exemple pour la fonction transport, d'après Ballou (1992), la planification stratégique consiste à identifier les modes de transport, la planification tactique s'intéresse au calcul de la taille de la flotte et la planification opérationnelle traite le problème d'affectation des véhicules.

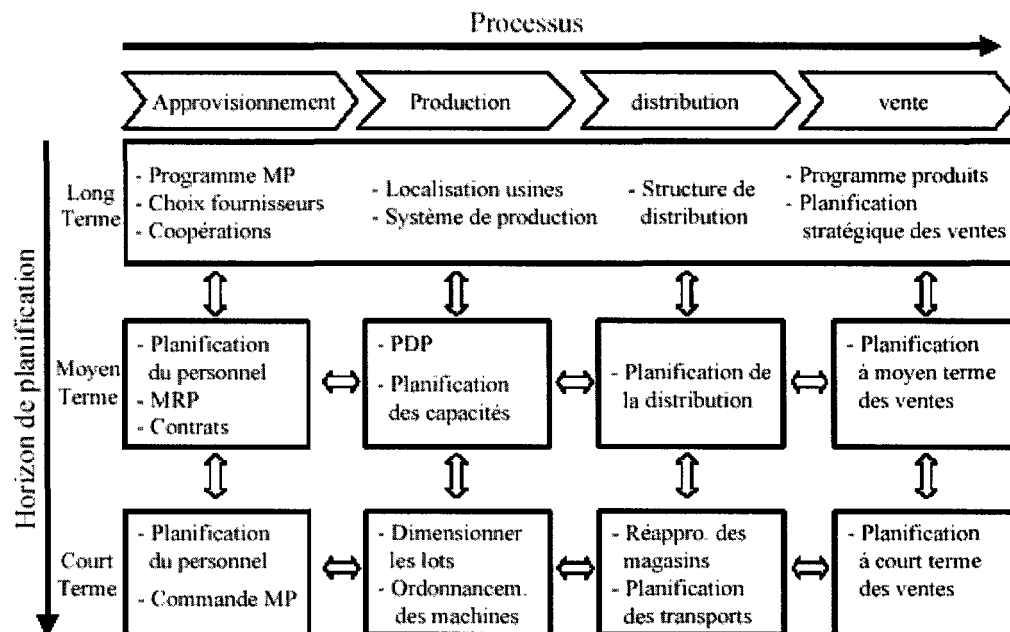


Figure 5 Systèmes hiérarchiques de planification (Stadler, 2000)

Nous avons constaté que l'aspect multi-sites n'est considéré que dans les décisions à long et moyen terme. Du fait de la taille des problèmes à résoudre et du niveau de détail des données à traiter, cela est impossible sur un horizon court terme.

Par conséquent, nous situons nos travaux dans un contexte de planifications stratégique et tactique des réseaux manufacturiers.

## **2.3 Risques et perturbations**

La gestion de chaînes logistiques est confrontée au problème de la gestion des incertitudes et des perturbations au niveau de toutes les fonctions d'approvisionnement, de production et de distribution de la chaîne. Ces perturbations ont un impact négatif sur le processus dynamique de planification et sur la réactivité des acteurs de la chaîne logistique.

Baillet (1994) définit une perturbation comme étant toute information qui contredit une prévision faite aussi bien sur le fonctionnement du système opérant que sur l'évolution des objectifs élaborés à partir de la prévision de l'évolution de l'environnement.

Dans le contexte des chaînes d'approvisionnement, les perturbations sont considérées comme des événements aléatoires qui peuvent toucher un seul maillon, plusieurs ou toute la chaîne. Il s'agit alors d'une perturbation locale ou propagée. Ils sont difficiles à planifier à cause de leur nature stochastique.

Généralement la présence d'une perturbation dans une installation du réseau affecte tout l'ensemble des installations puisqu'il s'agit d'une chaîne composée de plusieurs maillons qui interagissent ensemble. Donc une seule perturbation est susceptible de dégrader la fiabilité de toute la chaîne logistique.

Dans ce qui suit, nous présentons les différents types de perturbations qui peuvent affecter les différentes installations d'une chaîne logistique.

### **2.3.1 Fluctuation de la demande**

La demande est l'un des phénomènes aléatoires à prendre en considération dans la conception d'une chaîne d'approvisionnement. En effet, les aléas de la demande jouent un rôle important dans la perturbation des prévisions. Ces perturbations sont souvent à l'origine de problèmes liés à l'apparition momentanée des stocks excédentaires (surstock) qui pèsent sur la performance des entreprises et par conséquent sur la

performance du réseau, ou aussi l'apparition des ruptures du stock qui perturbent la relation avec le consommateur final qui va être non satisfait (Gaucher et al. 2000).

La gravité de l'effet de la fluctuation de la demande dépend généralement de la position de l'élément de la chaîne à considérer à cause de l'amplification de la variabilité de la demande « Bullwhip Effect » du client vers le producteur qui ne pourra pas suivre exactement la demande du client à cause du retard du transfert d'information et le long temps de réaction. La fluctuation de la demande augmente en allant du client jusqu'au fournisseur affectant les différents niveaux de stock d'un maillon à un autre ce qui va affecter l'inventaire dans la chaîne (sur stock ou rupture).

L'effet *Bullwhip* influence la fiabilité de livraison en affectant les délais de livraison prévus et provoquant des heures supplémentaires de travail. Il peut aussi mener à l'appel des entreprises extérieures en cas de manque de capacité, d'où des augmentations des coûts dans toute la chaîne.

### **2.3.2 Manque d'approvisionnement**

On peut avoir un dysfonctionnement dans la chaîne due à un manque de matière dans l'un des maillons. Cette situation a lieu si le client fait affaire avec un fournisseur non fiable qui n'a pas pu livrer la commande dans les délais prévus ou qui a envoyé une commande de mauvaise qualité ou non conforme aux spécifications du donneur d'ordre.

Le manque de matières est une perturbation qui cause une déviation du plan planifié à l'avance par les acteurs de la chaîne, d'où un changement de délais de livraison dans le plus part des nœuds. Ce phénomène engendre aussi des surcoûts (coût de pénurie, appel à d'autres entreprises pour rattraper le manque).

### **2.3.3 Pannes au niveau des ressources**

Le système de transformation, quelque soit au niveau de la production ou du transport, est sujet à différentes perturbations qui peuvent nuire à l'acheminement du flux de matières a travers toute la chaîne.

Ces perturbations se manifestent essentiellement sous formes de pannes au niveau des ressources de production, de manutention et aussi au niveau des véhicules de transport entre les différents nœuds de la chaîne logistique.

Les pannes peuvent avoir de lourdes conséquences en provoquant l'arrêt de l'équipement et par conséquent l'arrêt des postes qui sont situés en aval.

L'arrêt du travail va affecter négativement la capacité et la disponibilité du nœud en question qui va avoir des difficultés à tenir ses promesses au client.

### **2.3.4 Commande urgente**

L'arrivée d'une commande urgente d'un client privilégié est considérée aussi comme une perturbation interne au réseau logistique.

La commande urgente provoque généralement l'arrêt d'une partie ou de l'ensemble du travail afin de consacrer des ressources et de la main d'œuvre pour la nouvelle commande qui doit être livrée juste à temps. Ceci provoque un retard de livraison des autres commandes surtout en cas de manque de capacité.

## **2.4 Accélérateurs de performance**

Dans cette partie, nous présentons les modes de gestion à considérer pour faire face aux incertitudes et aux perturbations pouvant diminuer la fiabilité des réseaux logistiques.

Il s'agit d'un ensemble de mécanismes planifiés à l'avance et reconfigurables dynamiquement, tels que la capacité de rattrapage, la sous-traitance et les stocks de sécurité.

### **2.4.1 Capacité de rattrapage**

Ce type de mécanisme peut être employé généralement par les entreprises de production ou de transport, où il peuvent ajouter les ressources comme des machines et des équipement de manutention au niveau des centres de production ou des véhicules de transport pour atténuer le manque de capacité. L'ajout aussi de main d'œuvre supplémentaire est considéré aussi comme une solution pour combler le manque de capacité. La capacité de rattrapage permet d'aider d'une façon partielle ou totale la capacité existante dépendamment de sa capacité d'absorption.

### **2.4.2 Sous-traitance**

Selon Berrayre (1991) la sous-traitance est définie comme l'opération par laquelle une entreprise confie à une autre le soin d'exécuter pour elle et selon un cahier des charges préétabli, une partie des actes de production ou de service dont elle conservera la responsabilité économique totale. Cette définition met l'accent sur le volet opérationnel de la sous-traitance.

Parmi les multiples formes de la sous-traitance, la sous-traitance de capacité a été plus souvent appliquée dans le monde industriel. La sous-traitance est dite de capacité lorsque la firme requérante a recours à une autre firme soit occasionnellement, soit de manière conjoncturelle, pour écrêter les pointes saisonnières ou les soubresauts de la demande ou de façon habituelle dans une relation structurelle (Hafsi et Toulouse, 1996).

L'entreprise en échec envisage de faire appel à un ou plusieurs sous-traitants de capacité pour pallier les insuffisances momentanées ou imprévues de capacité. À ce moment un processus de négociation s'instaure entre le donneur d'ordre et le sous-traitant au cours duquel le sous-traitant va devoir planifier la fabrication d'une commande dont la quantité est mal connue au moment de la négociation. En effet, le sous-traitant doit tenir compte que la quantité qui est demandée au début de la négociation qui est sujette à des

changements en raison des incertitudes liées aux donneurs d'ordre comme la variation de la demande.

Pour sélectionner les sous-traitants potentiels, plusieurs méthodes ont été utilisées dans la littérature. Si on considère les sous-traitants d'un réseau comme des fournisseurs externes, Weber et al. (1991) ont classé les méthodes de classification en trois catégories :

- Méthodes de pondération linéaire : en attribuant un poids à chaque critère de sélection, un score est calculé pour chaque sous-traitant en effectuant la somme des performances des sous-traitants relatives à chaque critère multipliées par le facteur de pondération associé.
- Modèles de programmation mathématique : les techniques les plus utilisées sont la programmation linéaire, la programmation mixte en nombre entiers et la programmation mathématique multi-objectifs.
- Des approches statiques probabilistes : le principe de cette approche est basé sur la définition d'un ensemble de scénarios représentant les comportements futurs du sous-traitant.

A cette classification, Bouchriha (2002) rajoute d'autres techniques telles que :

- Méthodes de classements multi-critères : c'est la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Son principe de base consiste en une comparaison par paire des différents fournisseurs externes pour déterminer la position relative d'un fournisseurs ou d'un sous-traitant par rapport à un critère donné.
- Une approche par processus basée sur l'évaluation des coûts par la méthode ABC (*Activity Based Costing*).

### **2.4.3 Stock de sécurité**

L'un des modes de gestion qui permet aux entreprises d'être réactives face aux événements imprévus est le stock de sécurité.



Le stock de sécurité ou appelé encore stock de protection correspond à la quantité destinée à palier les aléas enregistrés sur la loi de consommation tels que les augmentations imprévues de la consommation ou les retards de livraison des fournisseurs.

Le stock de sécurité peut aussi concerner les articles intermédiaires dans la production en cas de panne au niveau d'une ou plusieurs activités. Son volume est fonction de l'importance des fluctuations des ventes et de la production.

L'utilisation de ce mécanisme d'accélération peut être en amont ou en aval de la capacité de production et elle peut apporter un complément partiel ou total au manque de matière premières ou de produits finis dépendamment de sa capacité d'absorption de la perturbation.

## **2.5 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques notions liées à la gestion des chaînes logistiques où on a définis les différentes décisions de planification de la chaîne logistique qui sont classées selon un horizon temporel. Ces décisions nous permettent de situer notre sujet.

En effet, dans le cadre de conception d'un réseau manufacturier fiable nous situons nos travaux dans un contexte de planification stratégique et tactique.

Nous avons ensuite présenté les différents types de perturbations auxquelles le réseau manufacturier peut faire face et qui peuvent surgir d'une façon aléatoire à n'importe quel niveau du réseau. Ces perturbations sont variées : la fluctuation de la demande, le manque d'approvisionnement du au manque de fiabilité des fournisseurs, les pannes au niveau des machines et des véhicules de transport et finalement l'arrivée d'une commande urgente d'un client privilégié.

Pour faire face à ces différentes perturbations, nous avons montré dans la dernière partie de ce chapitre les modes de gestion appelés aussi des accélérateurs de performance, qui peuvent atténuer l'effet des conséquences des perturbations sur la fiabilité totale du réseau. L'utilisation de ces modes de gestion peut être seule ou combinée.

## CHAPITRE 3

### PRÉSENTATION DU RÉSEAU ÉTUDIÉ

#### 3.1 Introduction

Le réseau manufacturier proposé n'est pas tiré d'un exemple de réseau réel. Dans notre travail de recherche, nous avons considéré un réseau flexible, capable de fonctionner avec différents types de produits dont la demande est variable d'une année à l'autre.

Nous avons choisi d'étudier un réseau manufacturier multi-échelons qui présente plusieurs nœuds. Les nœuds correspondent à des centres de production et des sous-traitants potentiels et les arcs aux flux des produits à travers tout le réseau. Le réseau manufacturier initial qui est présenté à la figure 6 se compose de plusieurs centres de production possédant chacun différentes activités  $Act_{kn}$ . Le rôle d'une activité est de transformer un ou plusieurs produits en entrée en un ensemble de produits en sortie. Elle peut être présentée sous forme d'une machine ou d'un poste manuel. On associe un type de produit  $p$  à une activité  $k$  et à un centre de production  $n$ .

Notre travail consiste à modifier le réseau manufacturier initial pour faire en sorte qu'il soit fiable. On qualifie un réseau de fiable lorsqu'il est apte à assurer aux clients internes appartenant au réseau et aux clients externes les bonnes quantités demandées aux bons moments tout en étant capable de confronter les risques et les aléas qui peuvent surgir à n'importe quels moment et position du réseau.

Cela nous amène à dire, pour que notre réseau soit fiable, il faut que chaque quantité livrée soit égale à la quantité demandée du produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$  du centre de production  $n$ .

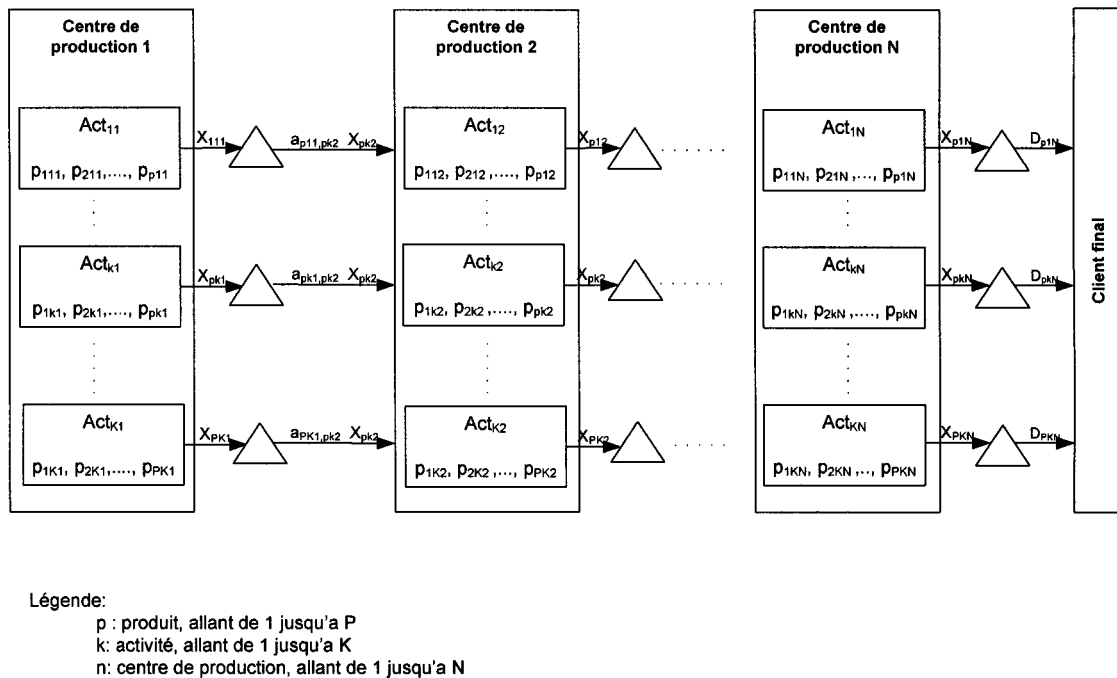


Figure 6 Réseau manufacturier initial

En cas de perturbations au niveau d'un ou plusieurs centres du réseau manufacturier entraînant un manque de disponibilité des activités, les centres de production en question seront dans la situation d'insuffisance de capacité d'où la quantité qui va être fabriquée  $X_{pkn}$  dans un délai bien déterminé ne sera pas conforme à la demande  $D_{pkn}$ .

Pour éviter le retard de livraison, le centre de production qui souffre d'un manque de capacité peut avoir recours à plusieurs solutions pour faire face aux aléas imprévus, comme la variabilité de la demande ou les pannes qui affectent les ressources internes.

### 3.2 Réseau potentiel

En se basant sur les mécanismes d'accélération définis dans le chapitre 2, nous avons opté pour quelques solutions pouvant faire face aux perturbations qui peuvent affecter la fiabilité du réseau.

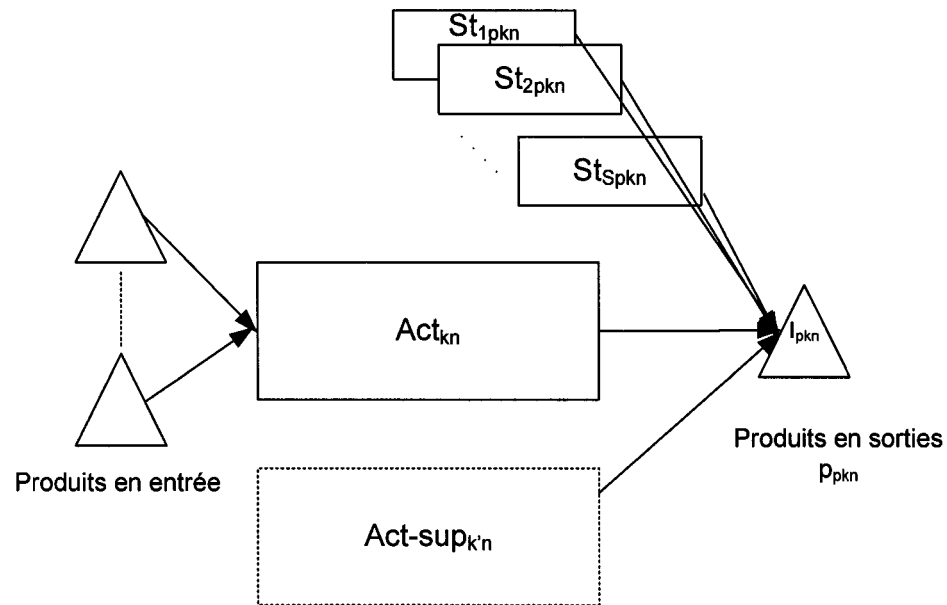
En effet, dans le cas où un centre de production appartenant au réseau manufacturier dispose d'une capacité interne insuffisante pour répondre à la demande du client, l'usine aura le choix entre les trois alternatives suivantes, soit :

- Avoir recours à une capacité de rattrapage en ajoutant une ou plusieurs activités supplémentaires équivalentes à l'activité qui manque de capacité.
- Avoir recours à la sous-traitance de capacité en confiant une proportion de la demande à un ou plusieurs sous-traitants.
- Combiner la sous-traitance avec la capacité de rattrapage interne.

Le choix de la meilleure alternative dépendra des capacités et des coûts associés à chaque activité et sous-traitant.

La considération des nouveaux accélérateurs de performance va modifier la configuration initiale du réseau initial (figure 6) qui sera élargie, puisque chaque type de produit peut être traité en interne par plusieurs activités, et en externe par des sous-traitants.

Chaque activité interne  $k$  du centre de production  $n$  possède un stock en aval  $I_{pkn}$ , qui sera alimenté conjointement par l'activité en interne  $k$ , par une ou plusieurs activités supplémentaires  $k'$  équivalentes à  $k$ , ainsi que par plusieurs sous traitants potentiels  $St_{spkn}$ . La représentation d'une activité interne est montrée à la figure 7.



Légende:

- $k$  : Activité, allant de 1 jusqu'à  $K$
- $k'$  : Activité supplémentaire, allant de 1 jusqu'à  $K'$
- $s$  : Sous-traitant, allant de 1 jusqu'à  $S$
- $p$  : Produit, allant de 1 jusqu'à  $P$
- $n$  : Centre de production, allant de 1 jusqu'à  $N$

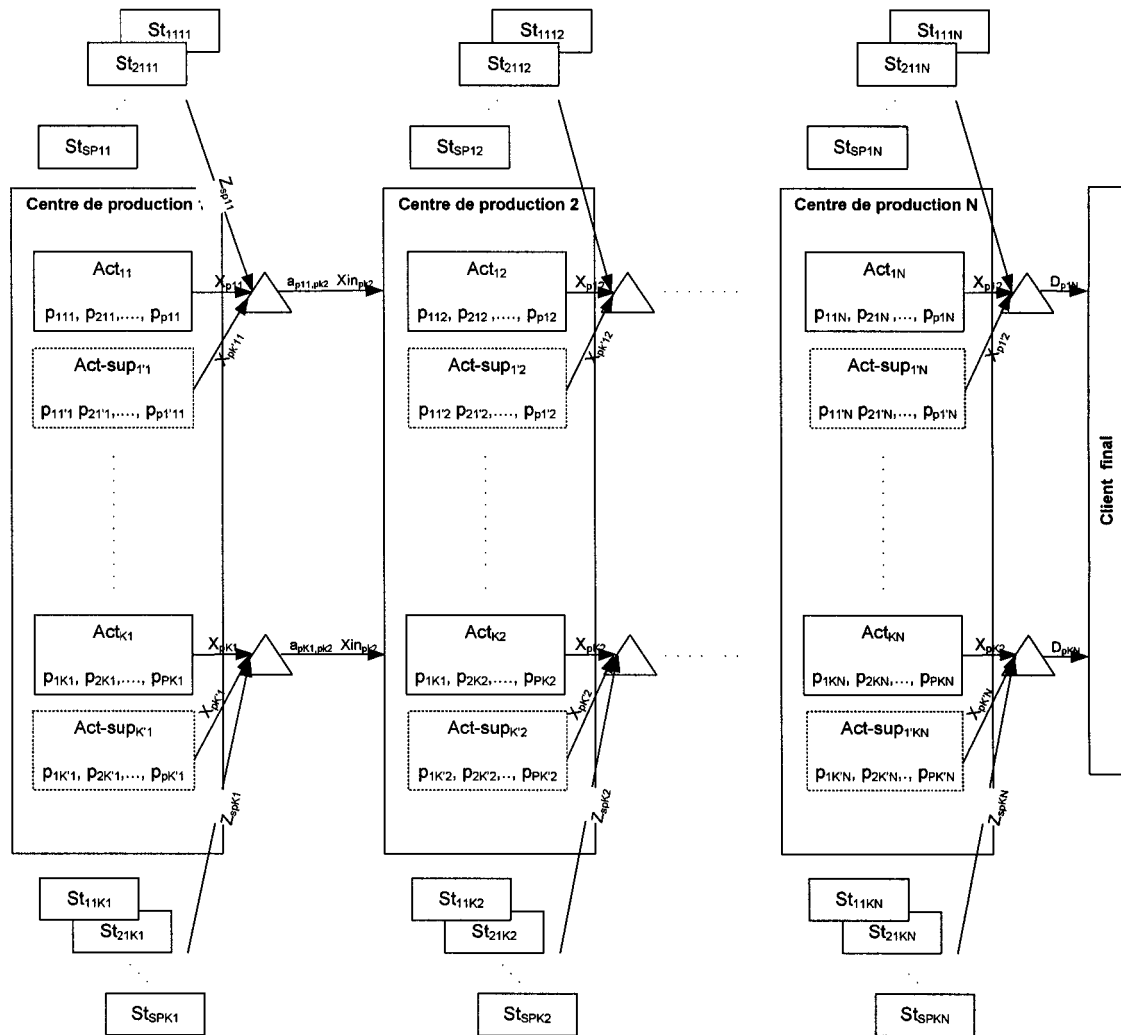
Figure 7 Représentation d'une activité interne

Chaque produit  $p$ , fabriqué par l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$ , possède différents sous-traitants  $s$  potentiels.

Les produits en sortie de l'activité  $k$  seront consommés par une ou plusieurs activités des centres de productions en aval de l'activité.

Ainsi notre réseau manufacturier potentiel qui est schématisé dans la figure 8 est plus élargi que le réseau initial (figure 6). Il reste maintenant à sélectionner à partir du réseau potentiel les nœuds nécessaires pour produire les commandes à temps, et ce, pour

chaque période considérée. Les nœuds sélectionnés permettent à la fin de configurer notre réseau final.



**Légende:**

- k : Activité, allant de 1 jusqu'à K
- k' : Activité, supplémentaire allant de 1 jusqu'à K
- s : Sous-traitant, allant de 1 jusqu'à S
- p : Produit, allant de 1 jusqu'à P
- n : Produit, allant de 1 jusqu'à N

Figure 8 Réseau manufacturier potentiel

Pour la modélisation de notre réseau manufacturier, nous présentons un modèle mixte en nombres entiers permettant de choisir les meilleures alternatives pour la production des quantités demandées aux temps voulus, suivi d'un modèle de simulation qui considère les phénomènes aléatoires figés dans le modèle d'optimisation.

### **3.3 Hypothèses de travail**

Dans notre recherche, nous avons posé différentes hypothèses liées à la structure du réseau manufacturier, l'indication de ces hypothèses est nécessaire pour la validité des résultats qui seront présentés dans le reste du rapport.

Certaines hypothèses ont été mentionnées explicitement ou implicitement dans ce chapitre. Voici une liste des principales hypothèses posées.

- La demande pour chaque type de produit est variable d'une année à l'autre.
- Les différents coûts et temps de traitement sont fixes.
- Les délais de livraison sont fixes et ils ne dépendent pas des quantités commandées.
- Les temps de transport sont aussi fixes et ne dépendent pas des quantités livrées.
- Chaque produit est traité sur une seule activité.
- Les activités ne peuvent traiter plus d'une pièce à la fois.
- Les activités peuvent tomber en panne.
- Les activités supplémentaires qui jouent le rôle de capacité de rattrapage possèdent les mêmes caractéristiques que les activités déjà existantes.
- La capacité interne de production est limitée.
- La capacité de chaque sous-traitant potentiel est limitée.
- La main d'œuvre est fiable.
- Le temps de mise en course est suffisamment court pour être négligé.
- Les produits fabriqués sont toujours acceptables et aucun rejet n'est considéré.



### **3.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le réseau manufacturier initial, soit un réseau composé de plusieurs centres de production où chaque centre possède une ou plusieurs activités produisant des produits différents (produits finis ou semi-finis). Nous avons aussi présenté le réseau manufacturier potentiel à étudier qui prend en considération les mécanismes d'accélération implantés.

Les deux prochains chapitres présentent notre approche hybride, qui se compose d'un modèle d'optimisation basée sur la programmation linéaire mixte en nombre entier, suivi d'un modèle de simulation par événements discrets.

## **CHAPITRE 4**

### **APPROCHE MATHÉMATIQUE**

#### **4.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous procédons à l'optimisation du réseau manufacturier, et ce, à partir du réseau potentiel (figure 8). Cela consiste à déterminer les installations internes et externes qui vont être utilisées pour répondre à la demande des clients dans les délais.

Nous présentons tout d'abord une modélisation mathématique afin de configurer un réseau manufacturier fiable à moindre coût. En effet, nous effectuons une formulation mathématique générale du problème qui minimise le coût global de production en interne, de sous-traitance, de stockage et de pénurie ainsi que de livraison, ce qui amène les centres de production à déterminer pour chacun de leurs produits les quantités à produire en interne et les quantités à sous-traiter, en précisant à quels activités et sous-traitants s'adresser à cet effet pour chaque période de planification considérée.

Notre formulation mathématique tient compte d'un réseau manufacturier global qui présente plusieurs centres de production, activités et produits finis ainsi que la prévision des demandes annuelles. Nous validons ensuite le modèle général en considérant un exemple de réseau manufacturier.

Enfin nous effectuons une analyse de sensibilité sur notre modèle d'exploitation où nous testons plusieurs scénarios où nous faisons varier différents paramètres qui ont un impact significatif sur le réseau.

## **4.2 Définition des éléments intervenants dans les coûts**

A l'arrivée d'une commande pour un type de produit, le centre de production en question devra se décider sur le choix entre plusieurs solutions pour livrer la commande à temps. Il peut, soit :

- Produire toute la demande en interne si le centre de production dispose d'une capacité interne suffisante,
- Augmenter sa propre capacité en ajoutant une ou plusieurs activités supplémentaires,
- Avoir recours à la sous-traitance.

La structure des coûts diffère selon la situation considérée. Les éléments du coût pouvant correspondre à chaque situation sont présentés dans le tableau III.

Tableau III  
Définition des coûts selon les différentes situations

CAPACITÉ INTERNE SUFFISANTE	CAPACITÉ INTERNE NON SUFFISANTE
<p><b>Production en interne</b></p> <p><i>Coût fixe (pour une seule activité) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût d'acquisition</li> <li>- Coût d'énergie</li> <li>- Coût d'entretien</li> <li>- Coût d'outillage</li> <li>- Coût d'amortissement</li> </ul> <p><i>Coûts variables :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût de main d'œuvre directe</li> <li>- Coût de matière première</li> <li>- Coût de fabrication (transformation)</li> <li>- Coût de manutention</li> </ul>	<p><b>1- Ajout d'activités supplémentaire</b></p> <p>Les coûts fixes et variables sont identiques à ceux considérés dans le cas de la production en interne.</p> <p><b>2- Sous-traitance</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix d'achat</li> <li>- Coût de transport et de manutention</li> <li>- Coût de réception et d'inspection</li> </ul>

Dans le cas où l'activité  $k$  est considérée comme une machine, son coût fixe est calculé comme suit :

$$C_k = \left( \frac{a(1+a)^n}{(1+a)^n - 1} \right) I_k + D_k - VR_k \left( \frac{a}{(1+a)^n - 1} \right) \quad (4.1)$$

Avec,

$C_k$  : Coût de la machine  $k$  par année de fonctionnement.

$I_k$  : Investissement pour l'achat de la machine  $k$ .

$D_k$  : Coût d'opération annuel de la machine  $k$  (coût d'énergie, d'outillage, opérateur, entretien).

$VR_k$  : Valeur de récupération à la fin de la vie de la machine  $k$ .

$N$  : Durée de vie de la machine  $k$ .

$\alpha$  : Taux d'actualisation.

### 4.3 Modèle d'optimisation

Le modèle utilisé pour effectuer la planification et la configuration du réseau manufacturier consiste en un modèle d'optimisation linéaire mixte en nombres entiers. Il était basé sur les modèles linéaires développés par Bouchriha (2002) et par Lee et Kim (2000). Le modèle de Bouchriha est construit dans le but de réaliser un outil d'aide à la décision pour la conception d'une chaîne logistique en considérant la décision Faire ou Faire-Faire, tandis que le modèle de Lee et Kim a pour objectif d'obtenir une planification optimale de production et de distribution dans une chaîne logistique.

Dans notre modèle, on utilise des variables entières pour déterminer le nombre d'activités supplémentaires et les autres variables sont des nombres réels. Le fait d'utiliser des nombres réels plutôt que des nombres entiers ceci rend le modèle bien plus rapide à résoudre.

L'objectif du modèle serait de minimiser le coût total de fabrication en interne, le coût de sous-traitance, le coût de stockage et de pénurie ainsi que le coût de livraison pour le client.

Les contraintes à respecter sont relatives à la nomenclature des produits finis, à la satisfaction des demandes, aux capacités internes des centres de production, aux capacités des sous-traitants ainsi qu'au délai à respecter pour chaque type de produit.

On tient à signaler que notre modèle d'optimisation tient compte de la plupart des hypothèses décrites dans le chapitre 3, à l'exception de celles qui considèrent des demandes et des pannes stochastiques. En effet, dans notre modèle mathématique on suppose que les demandes sont variables mais déterministes et que les activités ne peuvent pas tomber en panne.

Ceci veut dire que durant notre approche mathématique on tient compte que de l'aspect statique du problème, l'aspect stochastique sera traité dans le chapitre 5.

#### 4.3.1 Formulation mathématique

Dans cette partie nous présentons en premier lieu les indices utilisés, les variables de décisions et les données du problème. En deuxième lieu on se concentre sur le modèle mathématique et les contraintes qui seront expliqués au fur et à mesure.

##### **Indices :**

$n$  : Indice relatif à un centre de production,  $\forall n \in (1,2,3\dots N)$ .

$av(n)$ : Indice relatif à un centre de production en aval de  $n$ ,  
 $\forall av(n) \in (av(1), av(2)\dots av(N-1))$ .

$k$  : Indice relatif à une activité interne,  $\forall k \in (1,2,3\dots K)$ .

$k'$ : Indice relatif aux activités supplémentaires.

$av(k)$ : Indice relatif à une activité en aval de  $k$ ,  $\forall av(k) \in (av(1), av(2)\dots av(K-1))$ .

$p$  : Indice relatif aux produits fabriqués en interne ou en externe,  $\forall p \in (1,2,3\dots P)$ .

$p_f$  : Indice relatif aux produits finis,  $\forall p_f \in (1,2,3\dots P_f)$ .

$p_{av(k)}$  : Indice relatif à un produit de l'activité  $av(k)$  nécessitant l'utilisation du produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$ ,  $\forall p_{av(k)} \in (1_{av(k)}, 2_{av(k)}, \dots, P_{av(k)})$ .

$s$  : Indice relatif aux sous traitants,  $\forall s \in (1,2,3,\dots,S)$ .

$t$  : Indice des périodes,  $\forall t \in (1,2,3,\dots,T)$ .

**Variables de décision :**

$X_{pknt}$  : Quantité de produit  $p$  fabriquée en interne par l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

$\alpha_{pknt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  fabriquée par l'activité  $k$  du centre de production  $n$  durant la période  $t$  ( $0 \leq \alpha_{pknt} \leq 1$ ).

$OC_{knt}$  : Taux d'occupation de l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

$X_{pk'nt}$  : Quantité de produit  $p$  fabriquée en interne par les activités supplémentaires  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

$\alpha_{pk'nt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  fabriqué par les activités  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$  ( $0 \leq \alpha_{pk'nt} \leq 1$ ).

$W_{k'nt}$  : Variable entière relative au nombre d'activités supplémentaires  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  et dont le centre de production  $n$  pourra avoir recourt en cas de capacité insuffisante durant la période  $t$ .

$OC_{k'nt}$  : Taux d'occupation des activités  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

$Z_{spknt}$  : Quantité de produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$ , achetée en externe par le sous-traitant  $s$  pendant la période  $t$ .

$\alpha_{spknt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  achetée chez le sous-traitant  $s$  choisit par le centre de production  $n$  pendant la période  $t$  ( $0 \leq \alpha_{spknt} \leq 1$ ).

$I_{pknt}$  : Stock du produit  $p$  en aval de l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

$I_{pkn}^+$  : Quantité du produit  $p$  en aval de l'activité  $k$  appartenant au centre de production  $n$  en inventaire à la fin de période  $t$ .

$I_{pkn}^-$  : Quantité du produit  $p$  en aval de l'activité  $k$  appartenant au centre de production  $n$  en pénurie à la fin de la période  $t$ .

**Données :**

$Cv_{pkn}$  : Coût variable de production en interne du produit  $p$  par l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$ , ce coût est le même pour les produits fabriqués par les activités supplémentaires  $k'$  (\$/unité).

$Cf_{pkn}$  : Coût fixe annuelle de production en interne du produit  $p$  par l'activité  $k$  appartenant au centre de production  $n$ , ce coût est le même pour chaque activité supplémentaire  $k'$  (\$/an).

$C_{spkn}$  : Coût d'achat en externe du produit  $p$  chez le sous traitant  $s$  sélectionné pour la fabrication des produits de l'activité  $k$  du centre de production  $n$  (\$/unité).

$CS_{pkn}$  : Coût unitaire de stockage du produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$  (\$/unité).

$CP_{pkn}$  : Coût unitaire de pénurie du produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$  dans le centre de production  $n$  (\$/unité).

$Tt_{pkn}$  : Temps de traitement du produit  $p$  par l'activité  $k$  du centre de production  $n$ , ce temps est le même pour les produits fabriqués par les activités supplémentaires  $k'$  et par les sous-traitants  $s$  (Heure/unité).

$CapMax_{pkn}$  : Capacité de production du produit  $p$  par l'activité  $k$  du centre de production  $n$ , cette capacité est la même pour chaque activité supplémentaire  $k'$  (heures).

$TTrans_{pkn}$  : Temps de transport interne du produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$  du centre de production  $n$  (Heure/unité).



$CapTprod_{pkn}$  : Capacité de Temps de production du produit  $p$  par l'activité  $k$  du centre de production  $n$ , cette capacité est la même pour chaque activité supplémentaire  $k'$  (heures).

$TTrans_{spkn}$  : Temps de transport du produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  du sous-traitant  $s$  vers centre de production  $n$  (heure/unité).

$CapTransMax_{spkn}$  : Capacité maximale de transport du sous-traitant  $s$  qui est chargé de fabriquer le produit  $p$  de l'activité  $k$  du centre de production  $n$  (unité).

$DL_{pkn}$  : Délais exigé par le client pour livrer la quantité désirée du produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  (heure).

$D_{pknt}$  : Quantité demandée de produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pour la période  $t$  (unité).

$a_{pknt, p_{av(k)'nt}}$  : Quantité de produit  $p$  fabriqué par l'activité  $k$  du centre de production  $n$  durant la période  $t$ , utilisée pour la fabrication d'une unité de produit  $p$  de l'activité en aval  $av(k)$  (unité).

**Objectif** : Minimiser le coût total :

$$\text{Min} \sum_t \sum_p \sum_k \sum_n \left[ \begin{aligned} & (Cv_{pkn} \times X_{pknt} + Cf_{pkn} + CS_{pkn} \times I^+_{pknt} + CP_{pkn} \times I^-_{pknt}) \\ & + Cv_{pkn} \times X_{pk'nt} + Cf_{pkn} \times W_{pk'nt} \\ & + Ctrans_{pkn} \times D_{pknt} + \sum_s C_{spkn} \times Z_{spknt} \end{aligned} \right] \quad (4.2)$$

Cet objectif a pour but de minimiser pour un horizon multi périodes les coûts en interne et en externe. Les coûts internes sont représentés par les coûts variables de production des quantités fabriquées en interne, ainsi que les coûts fixes des activités déjà existantes et des activités supplémentaires utilisées comme capacité de rattrapage. On considère aussi les coûts de possession et de pénurie de stock ainsi que les coûts de transport des

différents produits. Les coûts en externe sont représentés par les coûts d'achat des produits chez les sous-traitants.

**Contraintes :**

- Conservation de flux pour la période considérée:

Pour  $p \neq p_f$

$$I_{pknt-1} + X_{pknt} + X_{pk'nt} + \sum_s Z_{spknt} = I_{pknt} + \sum_{P_{av(k)}} (a_{pknt, P_{av(k)av(k)av(n)t}} \times Xin_{P_{av(k)av(k)av(n)t}}) \quad \forall p, k, s, n, t \quad (4.3)$$

$$\text{Avec, } Xin_{P_{av(k)av(k)av(n)t}} = X_{P_{av(k)av(k)av(n)t}} + X_{P_{av(k)av(k')av(n)t}} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.4)$$

$Xin_{P_{av(k)av(k)nt}}$  : Quantité fabriquée en interne du produit  $p_{av(k)}$  par les activités internes  $av(k)$  et  $av(k')$  appartenant au centre de production en aval du centre  $n$  pendant la période  $t$ .

Pour  $p = p_f$

$$I_{p_fknt-1} + X_{p_fknt} + X_{p_fk'nt} + \sum_s Z_{sp_fknt} = I_{p_fknt} + D_{p_fknt} \quad \forall p_f, k, s, n, t \quad (4.5)$$

Cet ensemble de contraintes permet de prendre en compte la conservation des flux de matières au niveau des en-cours (4.3) et des produits finis (4.5).

Dans ces contraintes, nous avons modélisé deux paramètres :

- la nomenclature des produits finis où la consommation des stocks d'en-cours dépend des activités en aval.
- La demande des produits finis où la consommation des stocks des produits finis est déterminée par la demande du client final.

- Inventaire net des produits :

$$I_{pknt} = I_{pknt}^+ - I_{pknt}^- \quad \forall p, k, n, t \quad (4.6)$$

Le stock net du produit  $p$  en aval de l'activité  $k$  appartenant au centre de production  $n$  doit être égale à la quantité en inventaire moins la quantité en pénurie à la fin de la période  $t$ .

- Capacité interne de production :

$$X_{pknt} \leq CapMax_{pkn} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.7)$$

La contrainte (4.7) permet de tenir compte que la quantité de produit  $X_{pknt}$ , produite en interne pendant la période  $t$  par l'activité  $k$  du centre de production  $n$ , doit être inférieure à la capacité de production maximale de l'activité.

- Capacité interne de production des activités supplémentaires :

$$X_{pk'nt} \leq CapMax_{pkn} \times W_{k'nt} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.8)$$

A chaque période où un centre de production a recours à une ou plusieurs activités supplémentaires, la quantité produite par ces dernières doit être inférieure à la capacité de production maximale de l'activité multipliée par le nombre d'activités supplémentaires utilisées.

- Capacité de temps de production :

$$Tt_{pkn} \times X_{pknt} \leq CapTprod_{pkn} \times 90\% \quad \forall p, k, n, t \quad (4.9)$$

Cette contrainte tient compte de la capacité en temps de traitement des activités  $k$ . En effet, le nombre d'heures requis à la fabrication du produit  $p$  pendant la période  $t$ , doit être inférieur au temps disponible de l'activité  $k$  en question. On considère ici une disponibilité de 90% pour chaque activité  $k$ .

- Capacité des temps de traitement des activités supplémentaires :

$$Tt_{pkn} \times X_{pk'nt} \leq CapTprod_{pkn} \times 90\% \times W_{k'nt} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.10)$$

La contrainte (4.10) prend en considération la capacité de temps de traitement des activités supplémentaires  $k'$  pour la période  $t$  en considérant une disponibilité de 90% pour chaque activité  $k'$ .

- Capacité des sous-traitants :

$$Z_{spknt} \leq CapTransMax_{spkn} \quad \forall p, k, s, n, t \quad (4.11)$$

Cette contrainte permet d'exprimer que la quantité de produit  $Z_{spknt}$  achetée chez le sous-traitant  $St_{spkn}$  doit être inférieure à la capacité de transport maximale du sous-traitant en question.

- satisfaction du délai de livraison :

$$Tt_{pkn} \times X_{pknt} \leq DL_{pkn} - TTrans_{pkn} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.12)$$

$$Tt_{pkn} \times X_{pk'nt} \leq [DL_{pkn} - TTrans_{pkn}] \times W_{pk'n} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.13)$$

$$Tt_{pkn} \times Z_{spknt} \leq DL_{pkn} - TTrans_{pkn} - TTrans_{spkn} \quad \forall p, k, s, n, t \quad (4.14)$$

$$\text{Avec, } DL_{pkn} = CapTprod_{pkn} + TTrans_{pkn} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.15)$$

Les contraintes (4.12), (4.13) et (4.14) prennent en compte la satisfaction des délais de livraison exigés pour les clients internes appartenant au réseau et les clients externes, et ce pour chaque période traitée.

- Satisfaction de la demande :

$$\alpha_{pknt} + \alpha_{pk'nt} + \sum_s \alpha_{spknt} = 1 \quad \forall p, k, s, n, t \quad (4.16)$$

- L'activité supplémentaire installée pendant la période  $t$ , doit rester en place durant les périodes de planification suivantes. Ceci veut dire qu'aucun vente n'est permise à la fin de la période.

$$W_{k'nt} \geq W_{k'nt-1} \quad \forall k, n, t \quad (4.17)$$

- Variables entières

$$W_{k'nt} \text{ variable entières} \quad \forall k, n, t \quad (4.18)$$

La variable entière suivante est introduite pour déterminer le nombre d'activités supplémentaires à ajouter dans le système, si nécessaire.

- Cette contrainte, qui est reliée au nombre des activités supplémentaires requis, peut ne pas être associée à tous les centres de production. Son utilisation dépendra de l'espace disponible dans chaque usine.

$$W_{k'nt} \leq 1 \quad (4.19)$$

À partir des résultats des variables de décision  $X_{pknt}$ ,  $X_{pk'nt}$  et  $Z_{spknt}$ , le modèle calcule directement :

- Les proportions des demandes produites en interne et externe pour chaque période :

$$\alpha_{pknt} = \frac{X_{pknt}}{D_{pknt}} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.20)$$

$$\alpha_{pk'nt} = \frac{X_{pk'nt}}{D_{pknt}} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.21)$$

$$\alpha_{spknt} = \frac{Z_{spknt}}{D_{pknt}} \quad \forall p, k, s, n, t \quad (4.22)$$

- Les taux d'occupation des activités internes du réseau durant chaque période:

$$OC_{knt} = \frac{\sum_p Tt_{pkn} \times X_{pknt}}{\sum_p CapTprod_{pkn}} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.23)$$

$$OC_{k'nt} = \frac{\sum_p Tt_{pkn} \times X_{pk'nt}}{\sum_p CapTprod_{pkn}} \quad \forall p, k, n, t \quad (4.24)$$

#### 4.4 Exemple numérique

Le réseau à modéliser est composé de trois centres de production à chacun des centres une ou deux activités traitant des produits différents. Le premier centre de production dispose de deux activités, la deuxième usine possède aussi deux activités. Enfin le troisième centre ne dispose qu'une seule activité. Chaque activité dans le réseau ne traite qu'un produit à la fois.

Initialement, le réseau se base seulement sur la production interne en ne disposant seulement que des activités internes (figure 9)

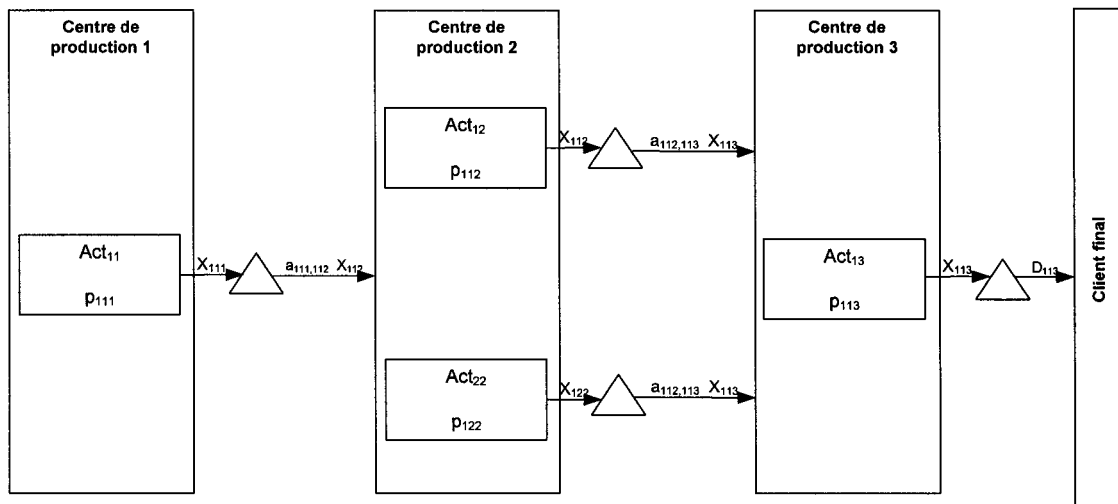


Figure 9 Réseau initial (exemple numérique)

En cas d'insuffisance de capacité, chaque activité peut avoir recours à deux solutions pour répondre à la demande, soit ajouter une capacité de rattrapage en mettant en place une ou plusieurs activités supplémentaires équivalentes à l'activité en question, soit acheter une proportion de la demande chez des sous-traitants, sachant que chaque produit possède deux sous-traitants potentiels (figure 10). Le choix de la meilleure alternative dépendra des coûts associés à chaque activité et sous-traitant.

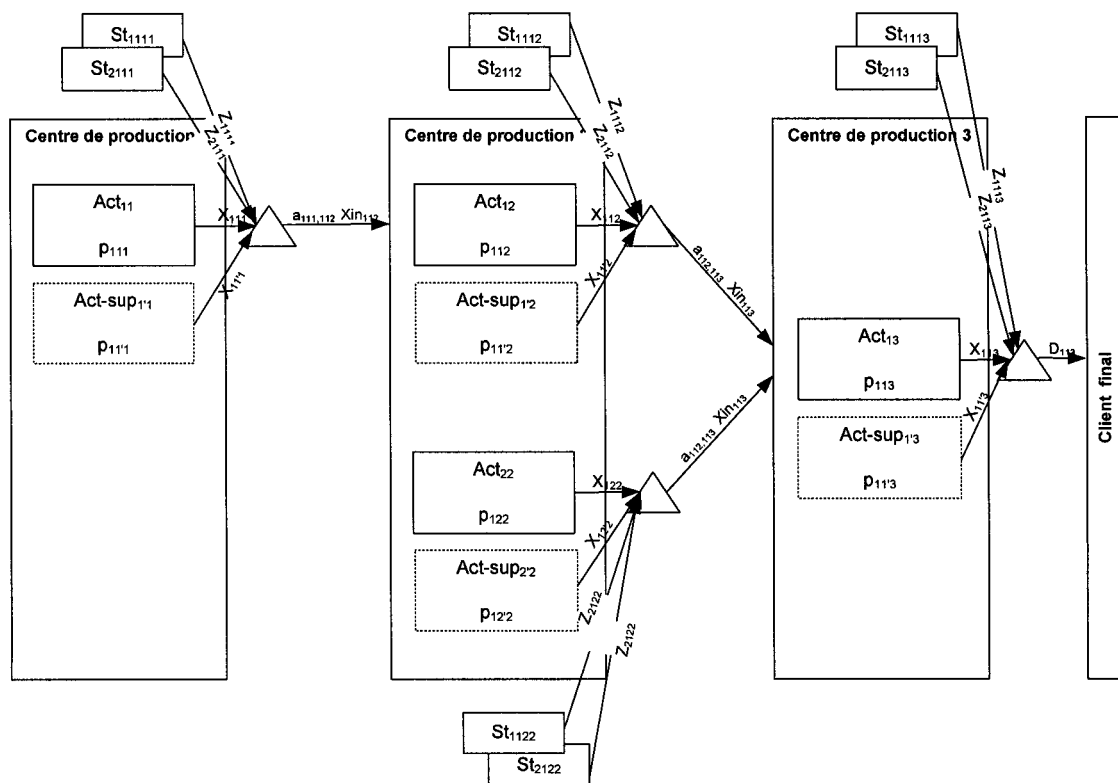


Figure 10 Réseau potentiel (exemple numérique)

Hypothèse sur le nombre des activités supplémentaires :

En raison de manque d'espace dans les centres de production 1 et 2, on sera obligé de limiter le nombre d'activités supplémentaires  $Act_{11}$  et  $Act_{22}$  équivalentes aux activités  $Act_{11}$  et  $Act_{22}$ . Les équations présentant ces deux contraintes sont :

$$W_{11t} \leq 1 \quad , \quad W_{22t} \leq 1$$

#### 4.4.1 Résolution

Le modèle de planification et de configuration de réseau manufacturier ainsi élaboré a été programmé et testé à l'aide du logiciel LINGO *version 3.0*. Il s'agit d'un langage de modélisation mathématique qui permet une résolution optimale des modèles mathématiques linéaires et non-linéaires.

LINGO est un outil facile à manipuler. Il permet d'exprimer le problème d'une manière naturelle qui est similaire à la notation mathématique standard, comme il peut aussi décrire une série de contraintes similaires en une seule contrainte.

Pour notre application, le programme linéaire généré comporte 219 contraintes, 300 variables réelles et 20 variables entières. Il a été résolu en 4 secondes. La solution optimale obtenue est discutée dans les paragraphes suivants.

#### 4.4.2 Données du problème

##### 4.4.2.1 Les données relatives à la production interne

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



Tableau IV

Données relatives aux coûts fixes et variables de production et au coût de transport

Centre de production	Activité	Produit	Coût variable de production (\$/unité)	Coût fixe de production (\$)	Coût de transport (\$/unité)
1	1	1	30	70 000	10
2	1	1	22	100 000	8
	2	1	30	120 000	4
3	1	1	40	50 000	8

Tableau V

Données relatives aux coûts de stockage et de pénurie ainsi que la capacité de production

Centre de production	Activité	Produit	Coût de stockage (\$/unité)	Coût de pénurie (\$/unité)	Capacité de production (unité/an)
1	2	1	2	4	13 500
2	1	1	2	3	27 000
	2	1	1.5	3	18 000
3	1	1	4	6	13 500

Tableau VI

Données relatives au délai de livraison et aux temps de traitement et de transport

Centre de production	Activité	Produit	Délai de livraison (heure)	Temps de traitement (heure/unité)	Temps de transport (heure)
1	2	1	2600	0.2	24
2	1	1	2700	0.1	38
	2	1	2700	0.15	38
3	1	1	2500	0.2	25

Tableau VII

Données relatives à la prévision de la demande pour cinq périodes de planification

Moyennes des Demandes annuelles		Périodes (an)				
Centre de production	Produits	1	2	3	4	5
3	p <sub>113</sub>	17200	20000	22400	18500	15700

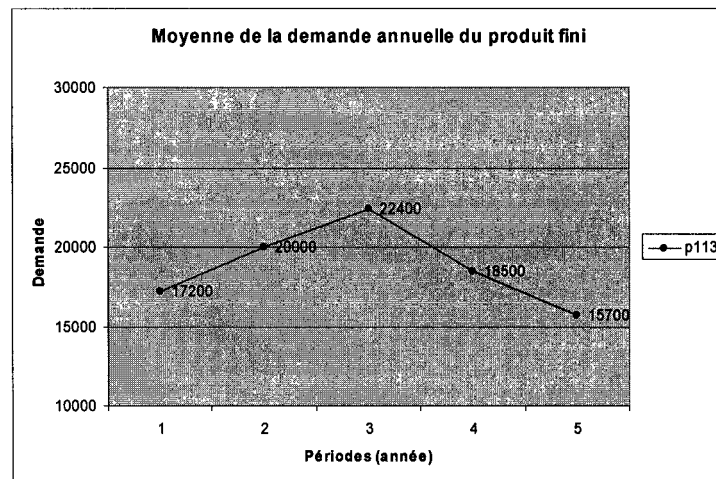


Figure 11 Variation de la demande du produit fini pendant les cinq périodes de planification

#### 4.4.2.2 Les données relatives à la sous-traitance

Tableau VIII  
Données relatives aux sous-traitants potentiels

Centre de production	Activité	Produit	Coûts d'achat (\$/unité)		Capacités externes (unité/an)		Temps de transport (heure)	
			Sous-traitant 1	Sous-traitant 2	Sous-traitant 1	Sous-traitant 2	Sous-traitant 1	Sous-traitant 2
1	1	1	95	92	5 000	6 500	10	12
2	1	1	80	85	10 000	25 000	20	15
	2	1	93	95	12 000	10 000	22	13
3	1	1	100	113	6 000	7 000	18	20

#### 4.4.2.3 Les données relatives à la nomenclature du produit fini

Tableau IX  
Données relatives à la nomenclature du produit fini

Routage	Produit1, Activité1, Centre de production 1 (p <sub>111</sub> )	Produit1, Activité1, Centre de production 2 (p <sub>112</sub> )	Produit1, Activité 2, Centre de production 2 (p <sub>122</sub> )	Produit1, Activité1, Centre de production 3 (p <sub>113</sub> )
Produit1, activité1, centre de production 1 (p <sub>111</sub> )	0	1	0	0
Produit1, activité1, centre de production 2 (p <sub>112</sub> )	0	0	0	1
Produit1, activité2, centre de production 2 (p <sub>122</sub> )	0	0	0	2
Produit1, activité1, centre de production 3 (p <sub>113</sub> )	0	0	0	0

Les données relatives à la nomenclature du produit fini sont définies dans le tableau IX. Par exemple, au niveau de l'activité 1 du deuxième centre de production, une unité du produit p<sub>111</sub> est nécessaire pour la fabrication d'une unité de produit p<sub>112</sub>.

### 4.4.3 Présentation et interprétation des résultats

#### 4.4.3.1 Sans utilisation des accélérateurs de performance

Avant l'utilisation des accélérateurs de performance (activités supplémentaires et soustraitance), les résultats nous ont montré que notre réseau n'est pas fiable puisqu'il n'est pas capable de satisfaire toutes les demandes. Le tableau X montre les quantités en pénurie pour chaque type de produit.

Tableau X  
Quantités en pénurie dans le réseau manufacturier

Centre de production	Produits	Périodes	Quantités en pénurie
1	p <sub>121</sub>	1	5609
		2	8409
		3	10683
		4	6909
		5	4109
2	p <sub>112</sub>	1	0
		2	0
		3	0
		4	0
		5	0
	p <sub>122</sub>	1	18428
		2	11972
		3	28576
		4	21028
		5	15428
3	p <sub>113</sub>	1	6063
		2	8863
		3	11263
		4	7363
		5	4563

#### **4.4.3.2 Avec utilisation des accélérateurs de performance**

Notre modèle d'optimisation nous a permis de construire le réseau final en considérant les mécanismes de rattrapage potentiel. En effet, le modèle linéaire mixte en nombres entiers a pu donner, pour chaque période, une configuration fiable et optimale de notre réseau manufacturier en sélectionnant les activités et les sous-traitants nécessaires pour produire toutes les demandes dans les délais exigés et aux moindres coûts.

Nous considérons dans cette partie, les résultats associés au produit fini du troisième centre de production. Les en-cours appartenant aux centres de production 1 et 2 seront indiqués par la suite en annexe 1.

Les résultats du produit fini sont reportés dans les tableaux ci-dessous. Ils nous indiquent la proportion de la demande desservie par chaque activité et sous-traitant sélectionnés et le taux d'occupation.

##### **➤ Répartition des demandes :**

L'assignation de chaque demande entre la production interne et la sous-traitance est présentée dans les tableaux XI ainsi que dans la figure 12. Les résultats indiqués sont sous formes de proportions dont la formule est indiquée dans la formulation mathématique de notre problème. Afin de contrôler si les répartitions données assurent un réseau manufacturier fiable, on peut vérifier que la somme des proportions associées à chaque demande doit être égale à (1).

Tableau XI  
Répartition des demandes du centre de production 3 générée par  
le modèle d'optimisation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance				Activités internes		Sous-traitance
Centre de production	Produits	Périodes	Demande	$Act_{13}$	$Act - sup_{13}$	
3	$p_{113}$	1	17200	0.64	0.36	0
		2	20000	0.56	0.44	0
		3	22400	0.49	0.49	0.02
		4	12000	0.6	0.4	0
		5	8500	0.71	0.29	0

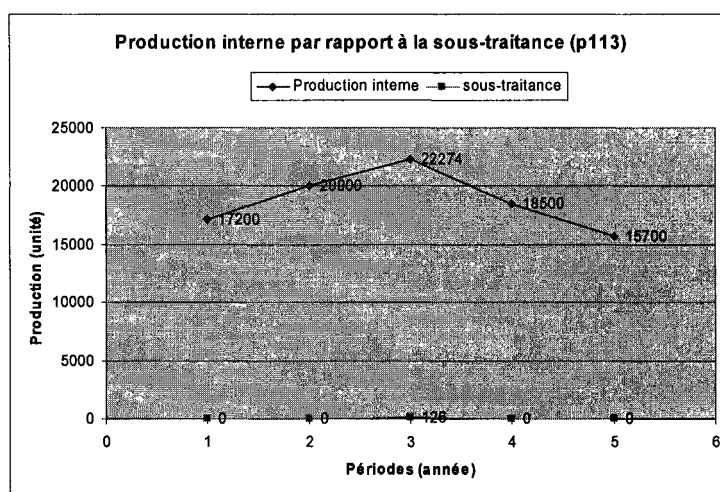


Figure 12 Répartition de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle d'optimisation

Les résultats associés à la répartition des demandes du centre de production 3 montrent que durant les cinq années de planification, une grande proportion des quantités fabriquées a été produites en interne par les activités déjà existantes et les activités supplémentaires ont joué le rôle de capacité de rattrapage.

L'appel unique à la sous-traitance dans les cinq années de planification s'explique par le coût élevé de la sous-traitance.

Dans le cas du produit fini  $p_{113}$ , sans avoir recourt aux mécanismes d'accélération, le centre de production 3 est capable de livrer dans la troisième période seulement 49 % de la demande. Alors pour combler toute la demande le centre a différentes solutions, soit :

- Produire toute la demande en interne en ajoutant deux activités supplémentaires puisque chaque activité ne peut produire que 49 % de la demande.
- Acheter toute la quantité manquante (51% de la demande) chez des sous-traitants.
- Partager la demande entre les activités internes et la sous-traitance.

Pour satisfaire une demande de 22 400 unités du produit  $p_{113}$  pendant la troisième période de planification, la meilleure alternative donnée par notre modèle d'optimisation est de produire 98 % de la demande (22 274 unités) en interne en utilisant l'activité interne  $Act_{13}$  déjà existante pour produire 49 % et une activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$  afin de produire aussi 49 % de la demande. Les 2 % manquant doivent être achetés chez un sous-traitant au lieu de les fabriquer en interne et ajouter dans ce cas une deuxième activité supplémentaire qui va engendrer un coût élevé et sera occupée seulement à 1 % de sa capacité de temps de traitement. Donc cette alternative permet d'utiliser au maximum les activités internes et de minimiser les coûts.

On peut remarquer aussi à partir du tableau XI et la figure 12, que le centre de production 3 a été en manque de capacité interne dès la première période ce qui lui a ramené à installer une activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$  équivalente à  $Act_{13}$  qui a été utilisée tout au long des cinq années de planification.

Le centre a eu recourt à la sous-traitance de capacité une seule fois pendant la troisième période, et ce, pour sous-traiter 126 unités du produit  $p_{113}$ .

➤ **Taux d'occupation :**

Dans cette partie, on montre les taux d'utilisation de chaque activité interne du centre de production 3, soit l'activité déjà existante  $Act_{13}$  et l'activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$ . Les résultats sont présentés dans les tableaux XII ainsi que dans la figure 13. On indique dans le tableau, le taux d'occupation des activités internes ainsi que le taux d'occupation moyen durant les cinq périodes considérées dans notre modélisation.

Tableau XII

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 3 générés par le modèle d'optimisation

Centre de production	Périodes	$Act_{13}$	$Act - sup_{13}$
3	1	0.9	0.49
	2	0.9	0.72
	3	0.9	0.9
	4	0.9	0.59
	5	0.9	0.37
Taux d'occupation moyen		0.9	0.61

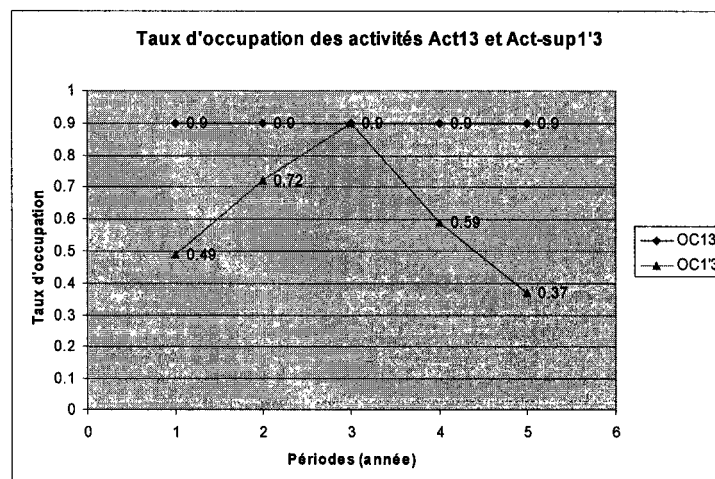


Figure 13 Taux d'occupation des activités  $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$  générés par le modèle d'optimisation



Si on regarde les résultats associés au taux de production des activités internes  $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$ , on voit bien que l'activité  $Act_{13}$  a été occupée à 90 % durant les cinq périodes, ce qui signifie qu'elle a été utilisée au maximum puisque la disponibilité de l'activité est de 90 %.

L'activité  $Act - sup_{13}$  a été utilisée comme activité supplémentaire pour combler le manque de capacité du centre. Son taux d'occupation moyen est de 61% ce qui nous montre que le centre de production 3 a eu un manque de capacité élevé pendant les cinq périodes.

Après la validation de notre modèle pour cinq périodes, on a constaté que le coût total engendré est de **37 777 760 \$**, ce coût comporte les coûts variables de production, les coûts fixes des installations, les coûts de transport des différents produits à travers le réseau et vers le client final ainsi que les coûts de sous-traitance.

Finalement, on aboutit à configurer notre réseau pour chaque période étudiée en sélectionnant les activités internes et les sous-traitants qui seront considérés pour la production des produits.

La figure 14 présente la configuration finale de réseau manufacturier à la fin de la cinquième période ainsi que les taux d'occupation moyen des activités internes durant les cinq périodes étudiées.

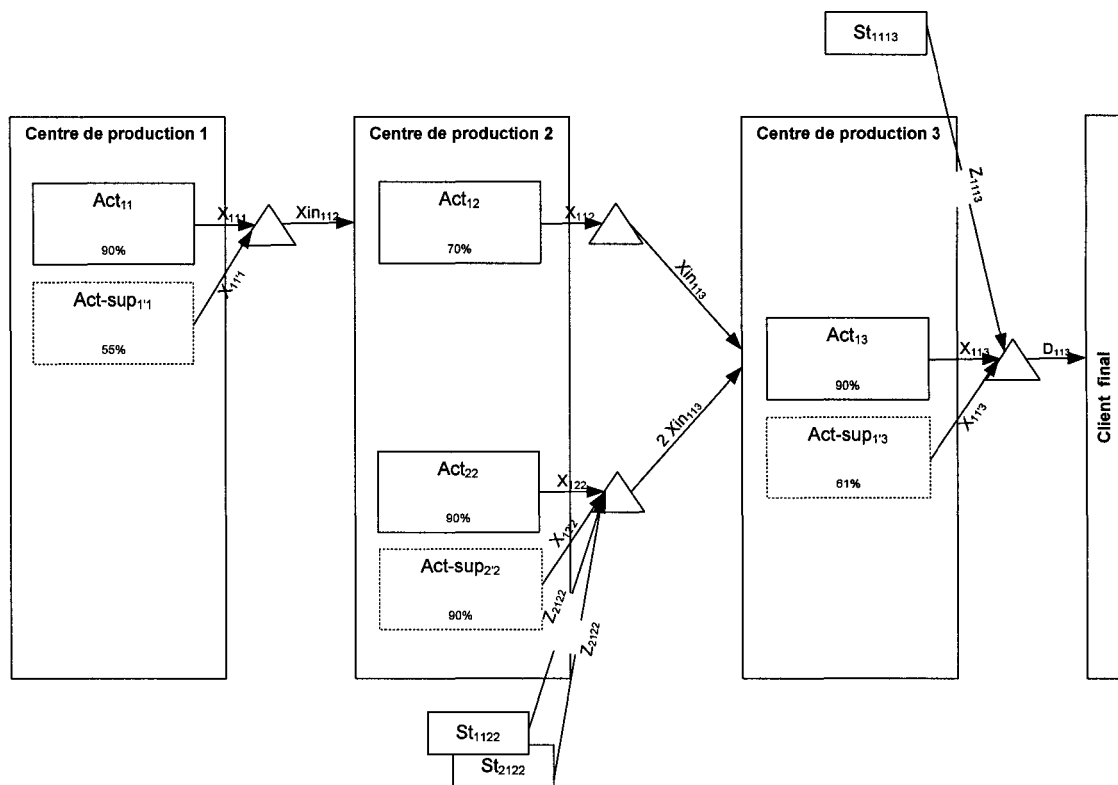


Figure 14 Configuration finale du réseau manufacturier à la fin de la cinquième période de planification donnée par le modèle d'optimisation

#### 4.5 Analyse de sensibilité

Dans le but de voir le comportement de notre réseau manufacturier, nous avons testé plusieurs scénarios où on a essayé de varier différents paramètres qui ont un impact significatif sur le réseau tels que la demande, le coût fixe des activités, le coût de sous-traitance et enfin le délai de livraison.

##### 4.5.1 Scénario 1 : variation aléatoire de la demande du produit $p_{113}$

Le modèle linéaire mixte en nombre entier nous a permis de configurer le réseau manufacturier étudié en considérant la prévision de la demande du produit final, alors

qu'en réalité la demande varie aléatoirement en suivant des distributions normales. Pour le cas étudié dans notre approche mathématique, les moyennes considérées dans la prévision ne représentent pas efficacement la demande réelle ce qui peut donner une configuration erronée du réseau manufacturier.

Pour voir l'impact de la variation de la demande du produit final  $p_{113}$ , appartenant au centre de production 3 sur notre configuration et assignation, nous avons essayé de changer les moyennes des demandes utilisées dans notre modélisation par des demandes générées aléatoirement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau XIII et la figure 15.

Tableau XIII

Répartition de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle d'optimisation considérant des demandes aléatoires

<b>Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance</b>					Activités internes		Sous-traitance
Centre de production	Produits	Périodes	Distribution normale de la demande finale	Demande finale générée aléatoirement	$Act_{13}$	$Act - sup_{13}$	
3	$p_{113}$	1	(17200,800)	16589	0.67	0.33	0
		2	(20000,2200)	21744	0.51	0.49	0
		3	(22400,500)	21980	0.51	0.49	0
		4	(18500,1000)	18675	0.6	0.4	0
		5	(15700,1100)	13831	0.81	0.19	0

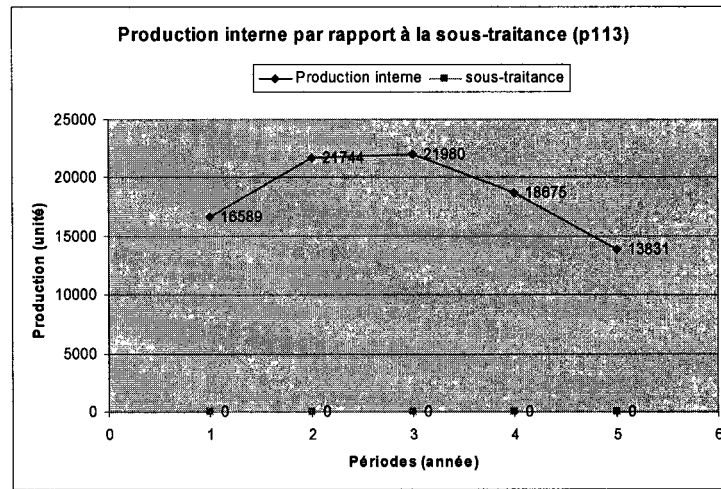


Figure 15 Répartition de la demande du produit  $p_{113}$  entre la production interne et la sous-traitance dans le cas où on considère une demande aléatoire

*Exemple :* Si on prend le cas de la période 3, en prenant 22 400 comme demande du produit  $p_{113}$  pour l'année 3, le modèle initiale nous suggère de produire 98 % de la demande en interne et sous-traité 2 % chez le sous-traitant  $St_{1113}$ . Alors si la quantité commandée est de 21 980 unités, le centre de production 3 n'aura pas recourt à la sous-traitance et il va pouvoir produire toute la demande en interne avec la capacité existante.

Dans ce cas, la négociation, qui a été faite avec le sous-traitant et qui est basée sur la prévision, n'était pas nécessaire réellement le centre de production n'aura pas besoin d'avoir recourt à la sous-traitance.

La considération d'une demande aléatoire ne donne pas le coût prévu pour la production et la livraison de la demande. En effet, en considérant seulement les prévisions de la demande, le modèle linéaire nous a donné un coût de 1 182 760 \$ pour la production et la livraison du produit  $p_{113}$  pendant la troisième période, alors qu'en introduisant dans notre modèle des demandes générées aléatoirement comme le montre le tableau XIII, on

obtient des répartitions de la production différentes ainsi qu'un coût de production et distribution de 1 155 040 \$, qui est inférieure au coût donnée initialement par le modèle d'optimisation.

#### **4.5.2 Scénario 2 : Augmentation du coût fixe de l'activité $Act_{13}$**

Dans ce scénario, on a essayé d'augmenter le coût fixe ( $Cf_{13}$ ) de l'activité  $Act_{13}$  qui traite le produit final  $p_{113}$  ainsi que des activités supplémentaires  $Act-sup_{13}$  dont le centre manufacturier 3 aura besoin en cas de manque de capacité. L'augmentation de ce coût va nous permettre de voir son effet sur le changement des quantités produites en interne et celles sous-traitées dépendamment de la variation de la demande  $D_{113r}$ .

En comparant les figures 16 et 17, qui représentent la production en interne par rapport à la sous-traitance et considérant respectivement des coûts fixes de 50 000\$ et 200 000\$, on déduit que l'augmentation du coût fixe des postes internes engendre une baisse de la production en interne et une augmentation de la sous-traitance du produit  $p_{113}$ . Ceci signifie que le coût d'acquisition des activités joue un rôle important pour la décision d'ajout de capacité supplémentaire ou de sous-traitance : plus que ce coût est élevé plus il est rentable de produire les quantités manquantes en externe.

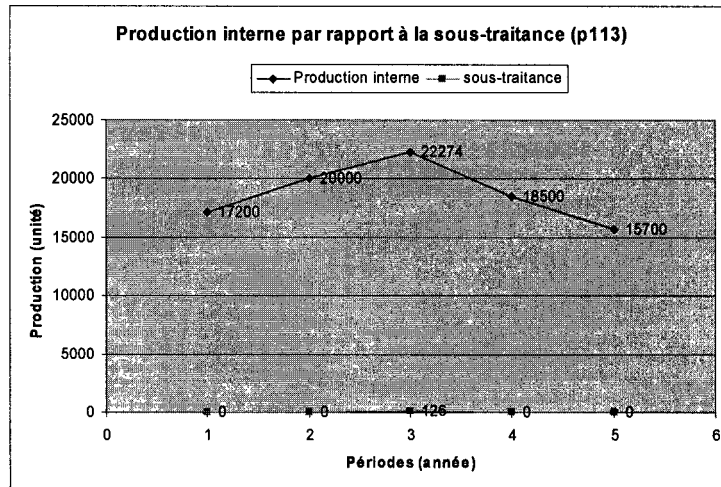


Figure 16 Production interne par rapport à la sous-traitance ( $Cf_{13} = 50000\$$ )

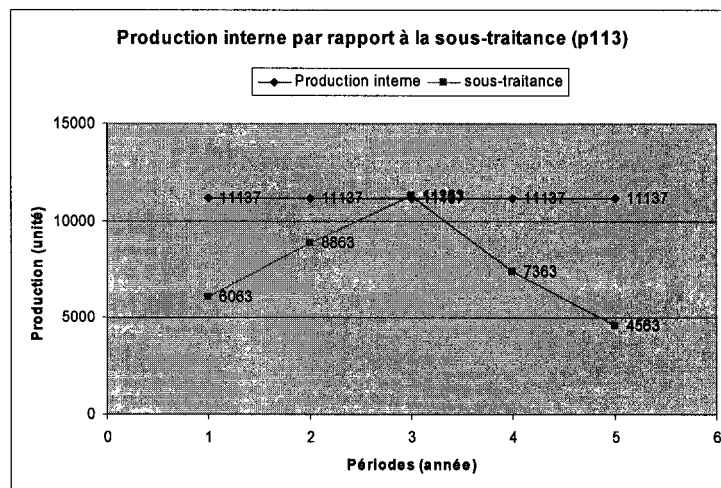


Figure 17 Production interne par rapport à la sous-traitance ( $Cf_{13} = 200000\$$ )

Si on prend l'exemple d'une commande de 17 200 unités du produit  $p_{113}$  pendant la première période, les résultats de notre exemple de validation, qui considère un coût fixe de 50 000\$ (figure 16), nous montre que le centre de production 3 produit toute la quantité en interne. On remarque alors d'après la figure 17, qu'en augmentant le coût fixe des activités internes à 200 000\$, l'allocation du produit change. Effectivement, le centre doit produire 65 % de la demande en interne et sous-traiter 35 % pour lui permettre de livrer la quantité requise au moindre coût.

#### **4.5.3 Scénario 3 : Augmentation du coût de la sous-traitance**

Pour ce cas, nous avons essayé de voir l'influence de l'augmentation des coûts d'achat chez les sous-traitants potentiels sur notre modèle initial.

*Exemple :* si on fait une comparaison entre les figures 18 et 19, on constate qu'en augmentant les coûts d'achat associés aux sous-traitants potentiels du produit  $p_{113}$ , les quantités sous-traitées se sont éliminées dans le cas de la troisième période.

En effet, en augmentant le coût de sous-traitance associé aux sous-traitants potentiels du produit  $p_{113}$ , on remarque que pendant la troisième période, le centre de production 3 n'a pas eu recours à la sous-traitance. Au lieu d'acheter la quantité manquante de 126 unités, le centre a préféré acheter une deuxième activité supplémentaire pour produire le reste puisque c'est plus rentable pour lui. Dans ce cas, le coût est passé de 1 226 800 \$ à 1 225 200 \$.

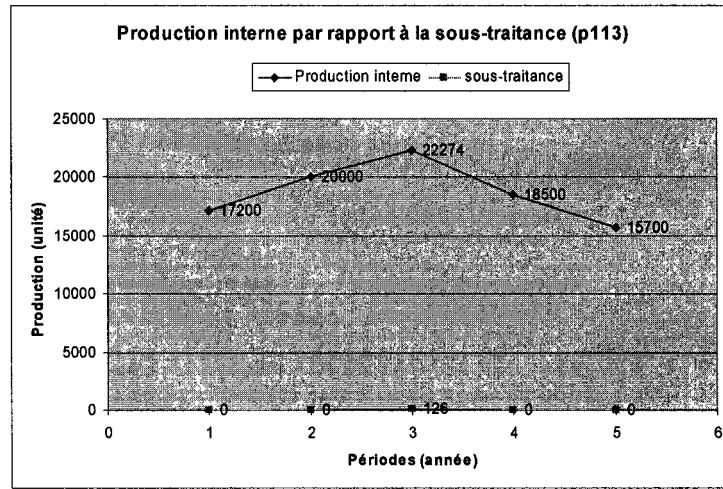


Figure 18 Production interne par rapport à la sous-traitance  
 ( $Cst_{1113} = 100\$$ ,  $Cst_{2113} = 113\$$ )

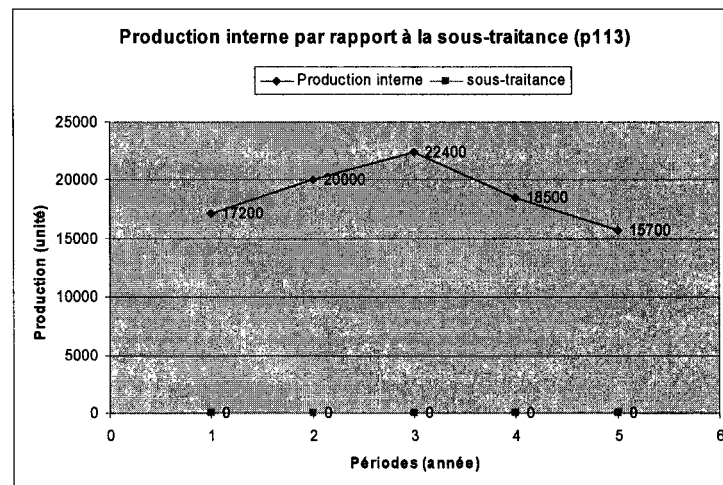


Figure 19 Production interne par rapport à la sous-traitance  
 ( $Cst_{1113} = 450\$$ ,  $Cst_{2113} = 465\$$ )



#### 4.5.4 Scénario 5 : Réduction du délai de livraison

Pour ce scénario, nous avons réduit le délai de livraison du produit  $p_{113}$  de 2500 heures à 2000 heures, cette modification nous a donné des résultats complètement différents du modèle initial. Effectivement, la diminution du délai a provoqué une diminution de la capacité de production de l'activité  $Act_{13}$  et celle de l'activité supplémentaire  $Act^{sup}_{13}$  en plus à engendrer une augmentation considérable des quantités sous-traitées.

Si on prend l'exemple de la période 2, où la demande est de 20 000 unités, la proportion de la production en interne est passé de 100 % à 89 % faute de manque de capacité en temps de production qui est liée directement au délai de livraison par l'équation (4.25)

$$DL_{pkn} = CapTprod_{pkn} + TTrans_{pkn} \quad (4.25)$$

Pour la quantité manquante le centre de production 3 a eu recours à la sous-traitance pour produire 11 % de la demande.

#### 4.6 Conclusion

Le modèle linéaire mixte en nombres entiers nous a permis de configurer notre réseau manufacturier afin qu'il soit fiable, et ce, en nous donnant un plan de planification fiable des demandes ainsi que les nœuds intervenant pour chaque période.

Nous avons aussi effectué plusieurs expériences à l'aide du modèle d'optimisation pour tester l'influence du changement de quelques paramètres du réseau sur le plan de planification et ainsi sur la configuration du réseau manufacturier.

Le prochain chapitre présente notre deuxième partie de notre approche hybride. Il expose comment le réseau manufacturier est modélisé à l'aide de la simulation par événements discrets afin de valider en premier lieu le plan de planification donné par

l'approche mathématique et donner en deuxième lieu une planification et une configuration plus réalistes en considérant les aspects aléatoires du réseau manufacturier.

## CHAPITRE 5

### APPROCHE EXPÉRIMENTALE

#### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles de simulation par événements discrets, qui permettent de simuler plusieurs scénarios du réseau manufacturier et donner des mesures de performances dynamiques de notre système.

On montre d'abord comment la simulation est appliquée pour valider les résultats générés par l'approche mathématique et pour tenir compte des phénomènes aléatoires qui perturbent le réseau en se basant sur les résultats donnés par le modèle d'optimisation.

On désire simuler cinq périodes de planification pour lesquelles la demande des produits varie aléatoirement en suivant des distributions normales.

Pour s'assurer que le plan de production donné par le modèle de simulation soit réalisable, on valide à l'aide du modèle de simulation la configuration ainsi que le plan de production donnés par le modèle d'optimisation.

Puisque le modèle linéaire ne fournit pas de renseignements sur l'aspect stochastique du système, on considère ensuite des phénomènes aléatoires tels que les demandes et les pannes qui perturbent le réseau manufacturier et qui donnent des plans différents à celles donnés par le modèle d'optimisation.

Dans la section suivante, on explique comment sont construits les modèles de simulation. Puis les modèles sont exécutés dans le but de valider les résultats mathématiques et obtenir des mesures dynamiques.

## 5.2 Outil de modélisation

Le modèle de simulation a été développé à l'aide du langage de simulation *Awesim!* Version 3.0. Il s'agit d'un outil de simulation par événements discrets fonctionnant sur une plate forme Windows et qui permet de simuler des systèmes réels dans différents domaines (ingénierie, science, affaires, etc.)

Les modèles de simulation ont une structure définitive. Cela permet une analyse automatique par la simulation une fois le modèle établi réussi les conditions expérimentales dans lesquelles la simulation doit être exécutée sont définies (Pritsker et O'Reilly, 1999).

Chaque modèle de simulation est conçu à l'aide de deux fichiers distincts. Le premier fichier représente le réseau des activités et le second est un fichier de contrôle, qui définit les constantes ainsi que les variables utilisées. Ce dernier établit l'état initial du modèle.

Le modèle construit dans VISUAL SLAM tient compte :

- Des changements dynamiques du modèle dans le temps ;
- Des éléments stochastiques pour présenter diverses distributions ;
- Des possibilités probabilistes pour représenter l'environnement ;
- Des conditions logiques pour représenter les politiques de décisions et les règles générales d'exploitation du système.

### **5.3 Méthodologie et hypothèses**

Les réseaux que nous avons construits comportent chacun quatre blocs principaux, chacun corportant des sous-réseaux. On tient à préciser que dans notre modèle on reproduit le fonctionnement de la chaîne manufacturière qui a pour but de produire et livrer la quantité du produit fini à temps. La figure 20 montre le diagramme général de simulation pour chaque type de produit (fini ou semi-fini) et pour une période donnée.

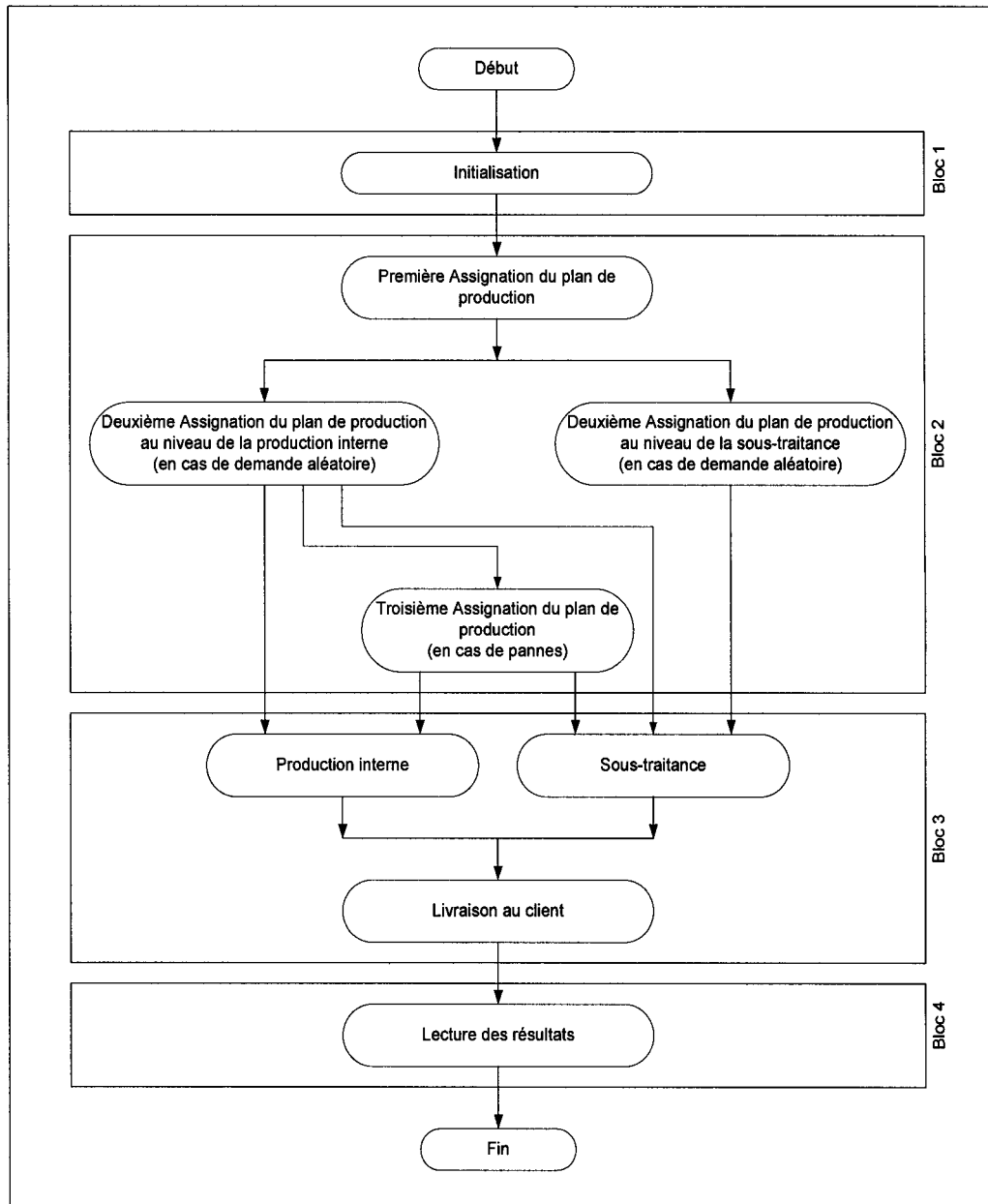


Figure 20 Diagramme général de simulation pour un seul type de produit (fini ou semi-fini)

Dans le premier bloc on initialise les données de lecture et les paramètres de fonctionnement du système.

Le second bloc comporte la planification pour la production de chaque commande et il tient compte des perturbations qui peuvent surgir d'une façon aléatoire et nuire à la fiabilité du réseau manufacturier.

On trouve en premier lieu, la première assignation de la production donnée par le modèle d'optimisation puis les deuxièmes assignations de la production en interne et en externe (sous-traitance). Ces plans auront lieu pour faire face à la variation de la demande. Enfin, et en cas de pannes aléatoires au niveau des activités internes, il y aura une troisième assignation du plan de production.

Le troisième bloc concerne l'exécution des différents plans de production. Ce bloc comporte trois sous-réseaux : un sous-réseau de production interne, un sous-réseau de sous-traitance et finalement un sous-réseau de livraison que ce soit à un client interne du réseau ou au client final. Finalement on trouve le sous-réseau de lecture des résultats.

Dans ce qui suit, nous montrons et expliquons en détail les diagrammes qui schématisent le procédé de simulation de chacun des sous-réseaux en utilisant la notation qui suit.

### **Notation des diagrammes de simulation :**

#### ***Indices :***

- n : Indice relatif à un centre de production
- k : Indice relatif à une activité interne
- k' : Indice relatif aux activités supplémentaires
- p : Indice relatif aux produits fabriqués en interne ou en externe
- s : Indice relatif aux sous traitants
- t : Indice des périodes

**Variables :**

- $A1_{pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le premier plan de production à l'activité **k** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $A1_{pk'nt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le premier plan de production à l'activité supplémentaire **k'** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $B1_{1pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le premier plan de production au sous-traitant potentiel **1** choisit par le centre de production **n** durant la période **t**.
- $B1_{2pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le premier plan de production au sous-traitant potentiel **2** choisit par le centre de production **n** durant la période **t**.
- $A2_{pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le deuxième plan de production à l'activité **k** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $A2_{pk'nt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le deuxième plan de production à l'activité supplémentaire **k'** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $B2_{1pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le deuxième plan de production (au niveau de la sous-traitance) au sous-traitant potentiel **1** choisit par le centre de production **n** durant la période **t**.
- $B2_{2pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le deuxième plan de production (au niveau de la sous-traitance) au sous-traitant potentiel **2** choisit par le centre de production **n** durant la période **t**.
- $A3_{pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le troisième plan de production à l'activité **k** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $A3_{pk'nt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** assigné par le troisième plan de production à l'activité supplémentaire **k'** du centre de production **n** pendant la période **t**.
- $X_{pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** fabriquée en interne par l'activité **k** dans le centre de production **n** pendant la période **t**.
- $X_{pk'nt}(t)$  : Quantité cumulée de produit **p** fabriquée en interne par l'activité supplémentaire **k'** dans le centre de production **n** pendant la période **t**.



- $Z_{1pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  fabriqué en externe par le sous-traitant potentiel 1 pendant la période  $t$ .
- $Z_{2pknt}(t)$  : Quantité cumulée de produit  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  fabriqué en externe par le sous-traitant potentiel 2 pendant la période  $t$ .
- $T_{now}$  : Moment présent de la simulation.
- $OC_{knt}$  : Taux d'occupation de l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .
- $OC_{k'nt}$  : Taux d'occupation de l'activité supplémentaire  $k'$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ .

**Paramètres :**

- $D_{pknt}$  : Quantité demandée de produit fini  $p$  appartenant à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pour la période  $t$  (unité).
- $\alpha_{pknt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  à fabriquer par l'activité  $k$  du centre de production  $n$  durant la période  $t$ , elle est donnée par le modèle d'optimisation ( $0 \leq \alpha_{pknt} \leq 1$ ).
- $\alpha_{pk'nt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  à fabriquer par les activités  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  du centre de production  $n$  pendant la période  $t$ , elle est donnée par le modèle d'optimisation ( $0 \leq \alpha_{pk'nt} \leq 1$ ).
- $\beta_{1pknt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  achetée chez le sous-traitant 1 choisit par le centre de production  $n$  pendant la période  $t$ , elle est donnée par le modèle d'optimisation ( $0 \leq \beta_{1pknt} \leq 1$ ).
- $\beta_{2pknt}$  : Proportion de la demande du produit  $p$  achetée chez le sous-traitant 2 choisit par le centre de production  $n$  pendant la période  $t$ , elle est donnée par le modèle d'optimisation ( $0 \leq \beta_{2pknt} \leq 1$ ).
- $W_{k'nt}$  : Nombre d'activités supplémentaires  $k'$  équivalentes à l'activité  $k$  et dont

le centre de production **n** pourra avoir recours en cas de capacité insuffisante durant la période **t**.

- $C_{1pkn}$  : Coût d'achat chez le sous traitant potentiel **1** sélectionné pour la fabrication du produit **p** de l'activité **k** appartenant au centre de production **n** (\$/unité).
- $C_{2pkn}$  : Coût d'achat chez le sous traitant potentiel **2** sélectionné pour la fabrication du produit **p** de l'activité **k** appartenant au centre de production **n** (\$/unité).
- $T_{tpkn}$  : Temps de traitement du produit **p** par l'activité **k** du centre de production **n**, ce temps est le même pour les produits fabriqué par les activités supplémentaires **k'** (Heure/unité).
- $t_{spkn}$  : Temps de traitement du produit **p** appartenant à l'activité **k** du centre de production **n**, par les sous-traitants **s** (Heure/unité).
- $CapMax_{pkn}$  : Limite de capacité de l'activité **k** du centre de production **n** à fabriquer les produits de type **p**, cette capacité est la même pour chaque activité supplémentaire **k'** (unité).
- $T_{trans_{pkn}}$  : Temps de transport des quantités produites en interne et en externe du produit **p** fabriqué par l'activité **k** du centre de production **n** (Heures).
- $T_{trans_{1pkn}}$  : Temps de transport du produit **p** du sous-traitant potentiel **1** vers le centre de production **n** (unité).
- $T_{trans_{2pkn}}$  : Temps de transport du produit **p** du sous-traitant potentiel **2** vers le centre de production **n** (unité).
- $CapTprod_{pkn}$  : Capacité de Temps de production du produit **p** par l'activité **k** du centre de production **n**, cette capacité est la même pour chaque activité supplémentaire **k'** (heures).
- $CapMax_{1pkn}$  : Capacité maximale du sous-traitant **1** à produire les quantités demandées du produit **p** par le centre de production **n** (unité).
- $CapMax_{2pkn}$  : Capacité maximale du sous-traitant **2** à produire les quantités demandées du produit **p** par le centre de production **n** (unité).

- $DL_{pkn}$  : Capacité maximale du sous-traitant **2** à produire les quantités demandées du produit **p** par le centre de production **n** (unité).
- $MTBF_{kn}$  : Temps moyen entre les pannes qui peuvent perturber l'activité **k** du centre de production **n**, ce temps est le même pour l'activité supplémentaire **k'** équivalente à l'activité **k**.
- $MTTR_{kn}$  : Temps moyen de réparation de l'activité **k** du centre de production **n**, ce temps de réparation est le même pour l'activité supplémentaire **k'** équivalente **k**.

***Autres notations :***

- $Act_{kn}$  : Activité interne **k** appartenant au centre de production **n**.
- $Act-sup_{k'n}$  : Activité supplémentaire **k'** équivalente à l'activité interne **k** appartenant au centre de production **n**.
- $St_{1pkn}$  : Sous-traitant potentiel **1** choisit par le centre de production **n** pour sous-traiter le produit **p** fabriqué en interne par l'activité **k**.
- $St_{2pkn}$  : Sous-traitant potentiel **2** choisit par le centre de production **n** pour sous-traiter le produit **p** fabriqué en interne par l'activité **k**.

### **5.3.1 Initialisation**

Le premier sous-réseau d'initialisation sert à lire les données liées au réseau manufacturier, le diagramme schématisant ce réseau est montré à la figure 21. Le modèle peut lire les données de différentes sources, soit du fichier de contrôle ou d'un fichier externe (Excel).

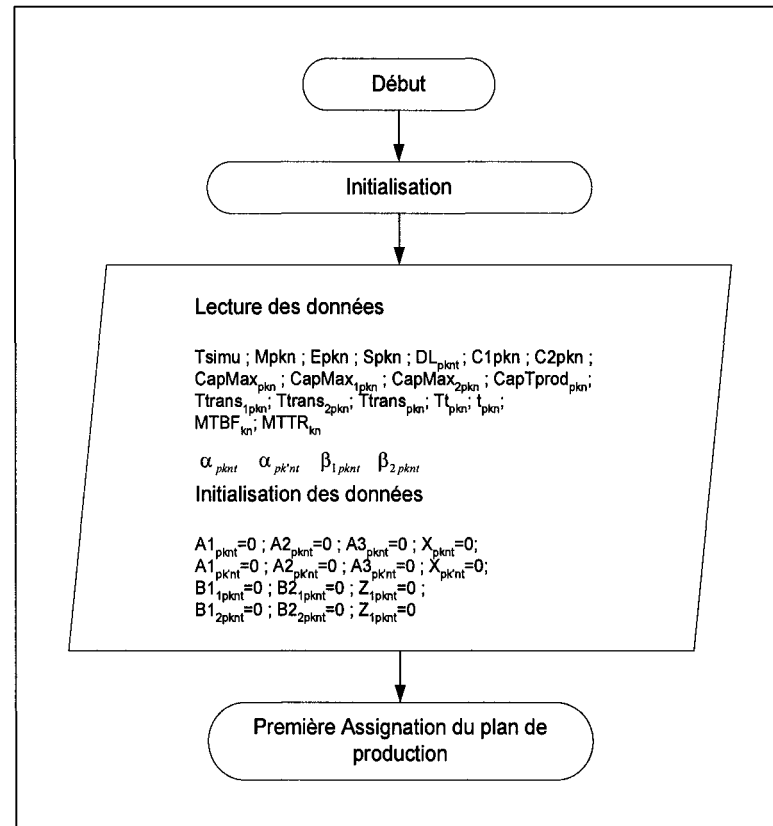


Figure 21 Diagramme du réseau d'initialisation

Les données indiquées dans le fichier de contrôle de simulation sont fixes et ne varient pas d'une période à l'autre. Ces paramètres correspondants aux délais de livraison des commandes ( $DL_{pkn}$ ), aux temps de traitement ( $Tt_{pkn}$ ,  $t_{spkn}$ ), aux capacités internes et externes ( $CapMax_{pkn}$ ,  $CapTprod_{pkn}$ ,  $CapMax_{1pkn}$ ,  $CapMax_{2pkn}$ ), aux temps de transport ( $Ttrans_{pkn}$ ,  $Ttrans_{1pkn}$ ,  $Ttrans_{2pkn}$ ), aux coûts de sous-traitance ( $C_{1pkn}$ ,  $C_{2pkn}$ ), à la fréquence des pannes et aux temps de réparation ( $MTBF_{kn}$ ,  $MTTR_{kn}$ ) qui suivent des distributions exponentielles.

Les données provenant du fichier externe sont modifiables d'une période à l'autre et elles sont liées aux quantités demandées générées aléatoirement à partir des distributions normales. La génération des demandes du produit final pour une seule période se fait par

l'indication de la moyenne  $M_{pknt}$  de chaque demande, d'un écart type  $E_{pknt}$  et d'un nombre source « Stream number »  $S_{pknt}$ .

Le nombre source sera modifié d'une réplification à l'autre à partir du fichier externe. L'utilisation des différents nombres source pour une série d'essais permet de générer des demandes différentes.

Note : En ce qui concerne les produits en-cours, la quantité demandée n'est pas fixée à chaque période mais sera égale, dépendamment de la nomenclature du produit fini, à la quantité produite en interne par les activités en aval ( $X_{pknt}(t) + X_{pk'nt}(t)$ ) produisant le produit suivant de la nomenclature.

Parmi les données externes, on trouve aussi le nombre d'activités supplémentaires utilisées pour chaque période pour les différents types de produit ( $W_{k'nt}$ ) ainsi que les répartitions des demandes entre la production interne et externe qui sont données par le modèle linéaire mixte en nombres entiers ( $\alpha_{pknt}, \alpha_{pk'nt}, \beta_{1pknt}, \beta_{2pknt}$ ).

Après la lecture des données, il y a l'initialisation des variables liés aux quantités assignées à la production en interne ( $A1_{pknt}(t), A1_{pk'nt}(t), A2_{pknt}(t), A2_{pk'nt}(t), A3_{pknt}(t), A3_{pk'nt}(t)$ ) et à la sous-traitance ( $B1_{1pknt}(t), B1_{2pknt}(t), B2_{1pknt}(t), B2_{2pknt}(t)$ ) ainsi qu'au quantités produites ( $X_{pknt}(t), X_{pk'nt}(t), Z_{1pknt}(t), Z_{2pknt}(t)$ ). Toutes ces variables sont mises initialement à zéro.

Cette étape est essentielle avant de commencer à répartir les commandes de chaque type de produit p en suivant les plans d'assignation.

### 5.3.2 Première assignation du plan de production

A partir de ce deuxième sous-réseau de simulation, on commence les plans de planification. La première assignation du plan de production reproduit le plan de planification généré par le modèle d'optimisation qui nous indique la répartition de

chaque moyenne des demandes entre les différentes activités internes et la sous-traitance. La figure 22 montre cette première assignation.

On note que la construction de notre modèle de simulation dépend initialement de la configuration donnée par le modèle linéaire en nombre entier. À partir du modèle d'optimisation, nous avons remarqué que pour chaque type de produit la commande est répartie généralement entre une activité interne  $Act_{kn}$ , une seule activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  et entre deux sous-traitants potentiels  $St_{1pkn}$  et  $St_{2pkn}$ . Cela nous amène à considérer durant la simulation une limite de deux activités internes ( $Act_{kn}$  et  $Act-sup_{k'n}$ ) et deux sous-traitants ( $St_{1pkn}$  et  $St_{2pkn}$ ) pour chaque commande.

Pendant la durée de la simulation, notre réseau est simulé pendant une seule période. Puisqu'on doit reproduire plusieurs périodes avec différents scénarios, on a construit un réseau flexible qui contient pour chaque type de commande les quatre destinations possibles de la demande même si des activités ou des sous-traitants seront inoccupés pendant certaines périodes.

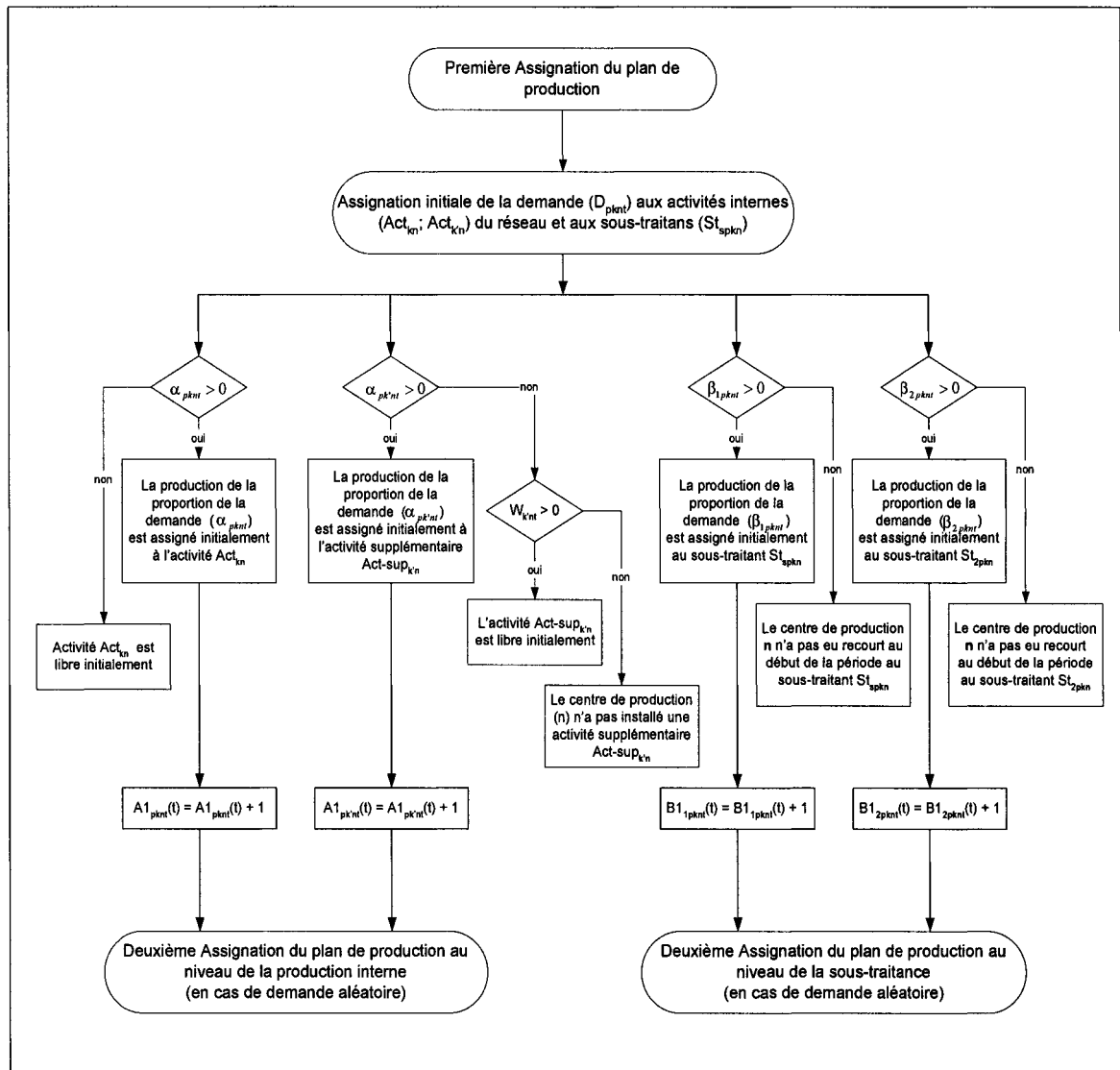


Figure 22 Diagramme du réseau de la première assignation

Afin de reproduire le plan de planification donné par notre modèle d'optimisation, on considère les proportions de chaque type de demande réparties en interne ( $\alpha_{pkn(t)}$ ,  $\alpha_{pk'n(t)}$ ) et entre les deux sous-traitants ( $\beta_{1pkn(t)}$ ,  $\beta_{2pkn(t)}$ ) pour la période  $t$ .

Le modèle vérifie la valeur des proportions à partir du fichier externe avant d'effectuer la répartition. En effet, si par exemple la proportion  $\alpha_{pknt}$  est positive, l'entité entrée dans le système aura une chance d'être assignée à l'activité  $Act_{kn}$  qui est déjà existante dans le centre de production. Mais si cette proportion est nulle alors l'activité sera libre au début de la production ainsi le lot assigné à l'activité  $Act_{kn}$  à l'instant  $t$  est  $A1_{pknt}(t)$ .

En ce qui concerne la proportion  $\alpha_{pk'nt}$  donnée par le modèle d'optimisation, si elle est positive, cela veut dire que le centre de production  $n$  a fait appel à l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  équivalent à celle qui est déjà sur le plancher. Dans le cas contraire où cette proportion vaut zéro, cela signifie deux choses : soit que cette activité n'existe pas dans le cas où la variable donnée par le modèle d'optimisation ( $W_{k'nt}$ ) est nulle, soit dans le cas contraire ( $W_{k'nt} > 0$ ) elle existe mais elle sera inoccupée pendant le début de la période. Elle sera peut être occupée ultérieurement en cas de manque de capacité de l'activité  $Act_{kn}$ . La quantité assignée dans le temps à cette activité est  $A1_{pk'nt}(t)$ .

La même procédure se réalise en cas de sous-traitance. La demande est assignée au sous-traitant  $St_{1pkn}$  ou  $St_{2pkn}$  seulement si les proportions  $\beta_{1pknt}$  ou  $\beta_{2pknt}$  est différente de zéro. Dans le cas contraire, il n'y aura pas recours à la sous-traitance. Ainsi les quantités destinées par le premier plan à être sous-traitées sont assignées dans des variables globales  $B1_{1pknt}(t)$  et  $B1_{2pknt}(t)$ .

Avant d'exécuter cette première planification de production, il va falloir mettre en place une deuxième assignation des quantités  $A1_{pknt}(t)$ ,  $A1_{pk'nt}(t)$  au niveau de la production interne et des quantités  $B1_{1pknt}(t)$  et  $B1_{2pknt}(t)$  au niveau de la sous-traitance, et ce pour faire face à la variation aléatoire de la demande.



### 5.3.3 Deuxième assignation du plan de production au niveau de la production interne

Cette deuxième assignation de la production dans les centres de production s'effectue entre les activités internes  $Act_{kn}$  et  $Act-sup_{k'n}$ . Elle ne sera pas effectuée en cas de validation du modèle d'optimisation puisque les demandes sont déterministes. Cette assignation est essentielle en cas de variation de la demande de façon aléatoire. Elle permet au réseau manufacturier de surmonter l'effet de variabilité surtout quand il s'agit d'arrivée d'une commande plus grande que la prévision la demande considérée initialement.

Comme le montre la figure 23, le modèle vérifie si la quantité déjà assignée à chaque activité interne est inférieure ou égale à sa limite de capacité. Dans le cas positif, l'entité est assignée directement à l'activité correspondante. La quantité destinée à l'activité  $Act_{kn}$  après la deuxième assignation est cumulée dans la variable  $A2_{pknt}(t)$ , alors que celle assignée à l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  est cumulée dans la variable  $A2_{pk'nt}(t)$ .

Dans la situation où la condition n'est pas vérifiée pour n'importe quelle activité à cause d'une demande élevée les entités vont être dirigées ailleurs. Le cheminement des entités va dépendre d'autres conditions. Si on prend l'exemple où l'activité  $Act_{kn}$  n'est pas capable d'accepter des nouvelles entités à cause d'un manque de capacité, il va falloir transférer les autres entités vers l'activité supplémentaire ou en sous-traitance.

On doit considérer en premier lieu l'activité supplémentaire et voir si elle satisfait aux exigences. L'activité  $Act-sup_{k'n}$  en question doit être :

- Présente sur le plancher ( $W_{k'nt} > 0$ )
- Libre
- En bon état de fonctionnement

Si ces trois conditions sont satisfaites, l'entité passe dans la file d'attente de l'activité  $Act-sup_{k'n}$ . Sinon, il faut vérifier à quel sous-traitant il faut envoyer l'entité. On commence par voir le sous-traitant potentiel 1  $St_{1pkn}$  si :

- Il a encore de capacité pour traiter l'entité ;
- Son coût d'achat est inférieur à celui du deuxième sous-traitant.

Si ces deux conditions ne sont pas vérifiées, l'entité passera directement dans la file d'attente du deuxième sous-traitant  $St_{2pkn}$ .

La même procédure se répète si la quantité assignée initialement à l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  est supérieure à sa capacité de production. Pour cela, on peut vérifier encore les conditions d'acheminement indiquées à la figure 23.



Figure 23 Diagramme du réseau de la deuxième assignation au niveau de la production interne

### 5.3.4 Deuxième assignation du plan de production au niveau de la sous-traitance

En regardant le diagramme de la figure 24 montrant la deuxième assignation pour la sous-traitance, on constate que l'assignation se base sur le niveau de la production interne sur les capacités de production des sous-traitants, à la différence qu'en sous-

traitance on a seulement deux choix d'acheminement des entités puisque chaque produit possède deux sous-traitants potentiels  $St_{1pkn}$  et  $St_{2pkn}$ .

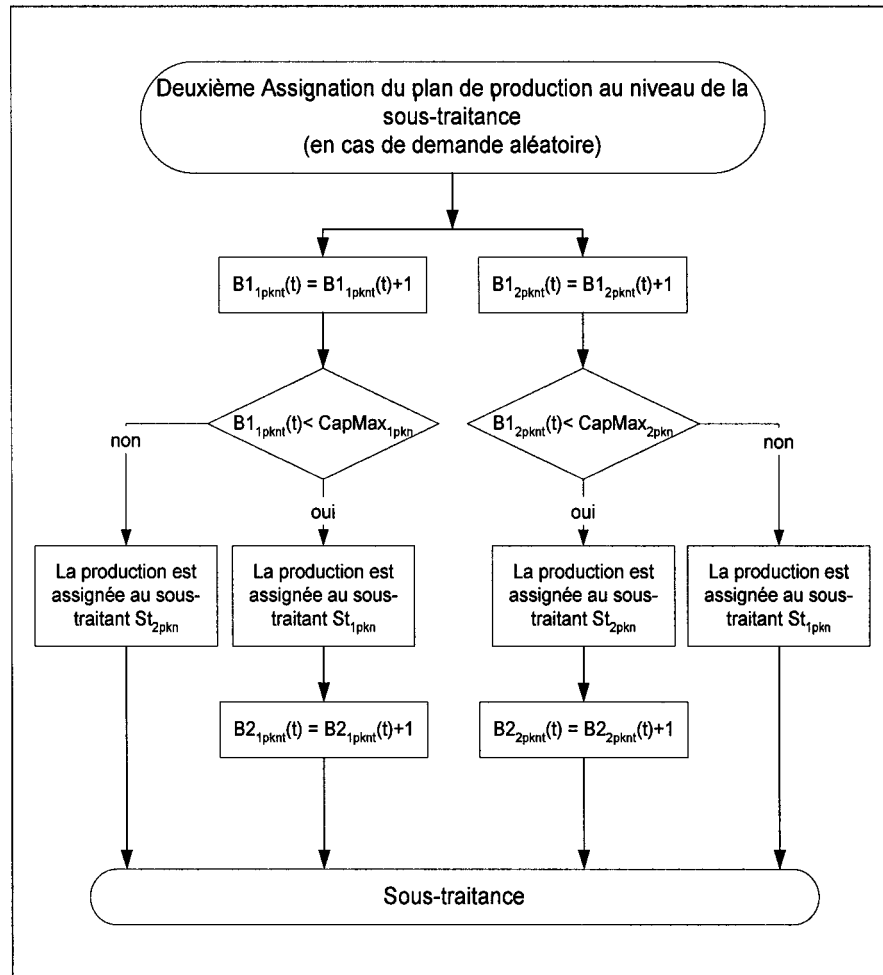


Figure 24 Diagramme du réseau de la deuxième assignation au niveau de la sous-traitance

Les quantités  $B1_{1pknt}(t)$  et  $B1_{2pknt}(t)$  assignées aux sous-traitants ne doivent pas dépasser les capacités de la fabrication des sous-traitants. Si une entité de type  $p$  est assignée au sous-traitant  $St_{1pkn}$ , cette entité ne peut réellement prendre la direction du même sous-traitant seulement si la quantité  $B1_{1pknt}(t)$ , est inférieure à sa capacité maximale de sous-

traitance du produit  $p$ . Au-delà de cette capacité, l'entité prendra le chemin vers la file d'attente du deuxième sous-traitant  $St_{2pkn}$ . Ainsi, après l'application de cette deuxième assignation, la quantité de produit  $p$  assignée au sous-traitant  $St_{1pkn}$  est accumulée dans la variable  $B2_{1pknt}(t)$ , de même la quantité de produit  $p$  assignée au deuxième sous-traitant  $St_{2pkn}$  sera accumulée dans la variable  $B2_{2pknt}(t)$ .

### 5.3.5 Troisième assignation du plan de production

Cette troisième assignation, est effectuée en cas où les activités internes  $Act_{kn}$  et  $Act-sup_{k'n}$  tombent en panne. Elle permet d'intervenir rapidement pour trouver des solutions fiables contre le manque de capacité des activités, et ce pour réussir à produire les quantités commandées au temps voulu. Lors de la validation du modèle d'optimisation, cette assignation ne sera pas réalisée puisque on ne considère pas les pannes dans notre approche mathématique.

Avant d'assigner une entité à une activité quelconque  $Act_{kn}$  ou  $Act-sup_{k'n}$ , il faut regarder si l'activité en question est en bon état de fonctionnement. Si elle est en panne, cela signifie que l'activité est en réparation et qu'il faut assigner l'entité ailleurs comme le montre le diagramme de la figure 25.

Les quantités assignées aux activités internes, après application de cette troisième assignation, seront calculées à partir des variables  $A3_{pknt}(t)$  et  $A3_{pk'nt}(t)$ . Cette assignation du plan de production s'effectue en dernière position avant de passer aux sous-réseaux d'exécution de la production interne et la sous-traitance.

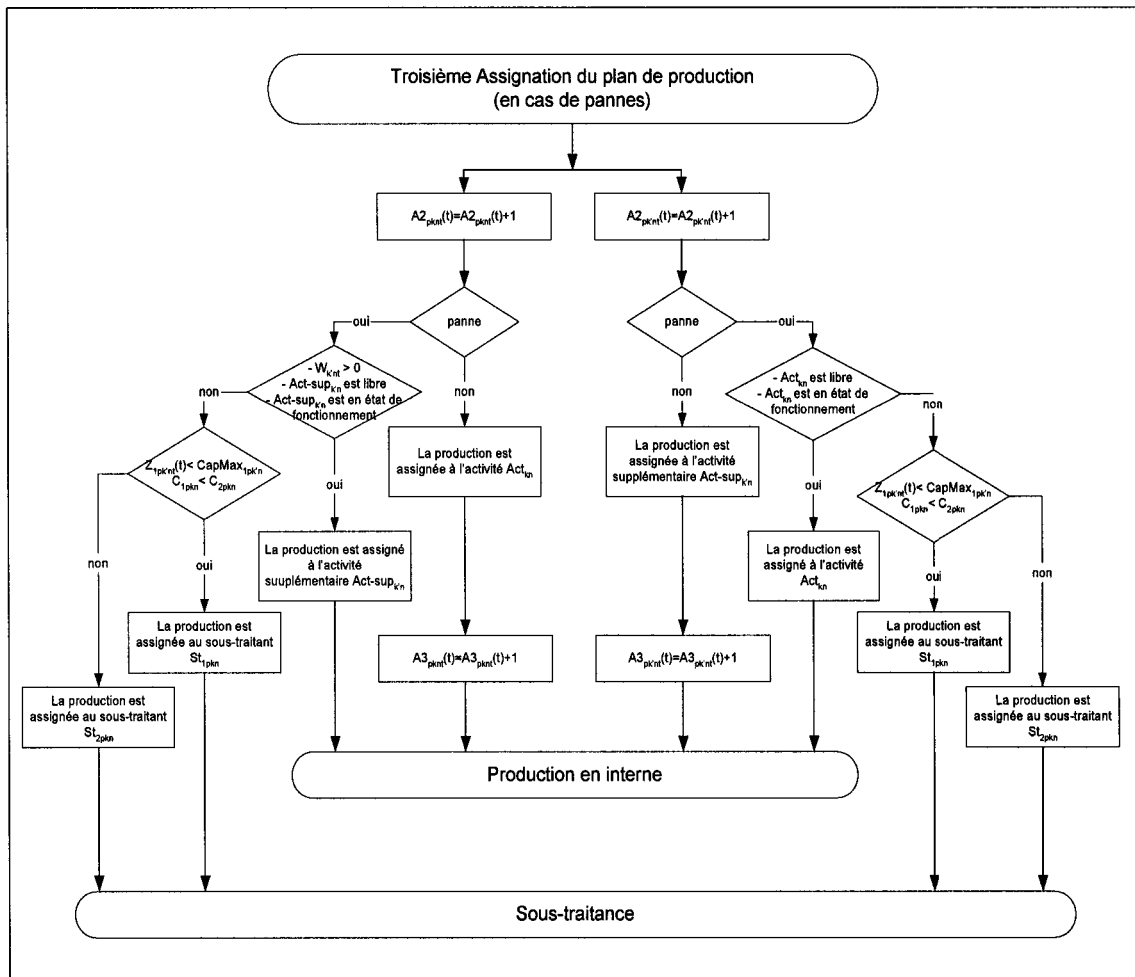


Figure 25 Diagramme du réseau de la troisième assignation

### 5.3.6 Production interne

Ce sous-réseau de simulation sert à produire (fabriquer ou assembler dépendamment du type de produit) les quantités assignées aux activités internes par les différents plans d'assignation. Le diagramme montrant ce sous-réseau est présenté à la figure 26. À partir de cette partie du modèle un délai est imputé au déplacement des entités à travers le réseau. Cela fait augmenter le temps de simulation ce qui permet au modèle de tenir compte de l'aspect dynamique du système.

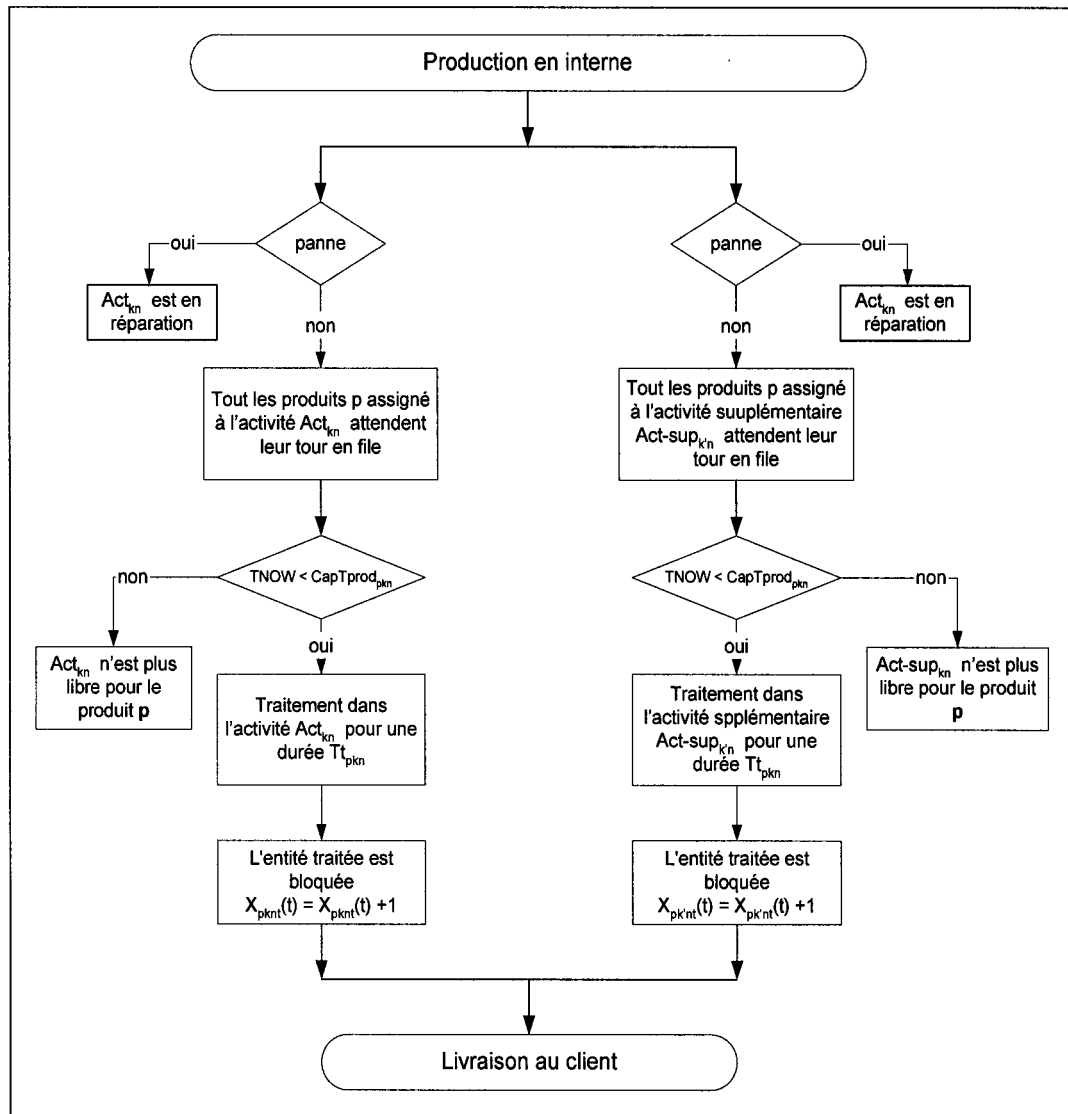


Figure 26 Diagramme du réseau de la production interne

La production est effectuée par l'une des activités seulement si ces dernières ne sont pas défectueuses. Dans le cas contraire elles seront inoccupées pendant un temps de réparation moyen  $MTTR_{kn}$ . Durant cette période aucune entité n'est assignée à une activité en panne.

Le traitement d'une entité sur une activité doit être réalisé pendant la durée de temps de production de l'activité  $CapTprod_{pkn}$ , qui est calculé à partir du fichier de contrôle et il est égal au délai de livraison moins le temps de transport requis pour livrer la demande de type p ( $CapTprod_{pkn} = DL_{pkn} - Ttrans_{pkn}$ ). Au de las de la limite  $CapTprod_{pkn}$ , l'activité ne sera plus libre pour produire le même type de produit.

L'activité traite les entités une à la fois et l'ordre de traitement est celui du premier arrivé premier servi. Les entités demeurent dans la file jusqu'à ce que leur tour arrive et que l'entité précédente a libéré l'activité. Quand l'activité se libère, l'entité qui est en tête de la file d'attente l'accapare pour la durée requise à son traitement. Le temps requis pour la production d'une entité est  $Tt_{pkn}$ , ce temps a été défini dans l'énoncé de contrôle et il est égal au temps réel de traitement  $t_{pkn}$  divisé par 90% qui est la disponibilité de l'activité pendant sa durée de production maximale  $CapTprod_{pkn}$ .

Après le temps de traitement, l'activité est libérée ce qui permet à la pièce suivante dans la file de l'accaparer à son tour. L'entité traitée est ensuite bloquée jusqu'à ce que la durée de simulation atteint le temps  $CapTprod_{pkn}$ .

Les entités traitées par l'activité interne  $Act_{kn}$  sont cumulées dans la variable  $X_{pknt}(t)$  et ceux traitées par l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  sont à leur tour cumulées dans la variable  $X_{pk'nt}(t)$ . Après que la durée maximale de production soit écoulée, toutes les quantités produites sont prêtes à être transportées.

### 5.3.7 Sous-traitance

Le diagramme symbolisant le sous-réseau de la sous-traitance est présenté à la figure 27. Toute entité assignée à un sous-traitant attend son tour de traitement dans une file d'attente.



Dans cette partie on a considéré que chaque sous-traitant est capable de traiter deux produits à la fois. À cause de leurs importantes capacités par rapport à la capacité de temps de production en interne, on a considéré qu'ils sont disponibles à 100%.

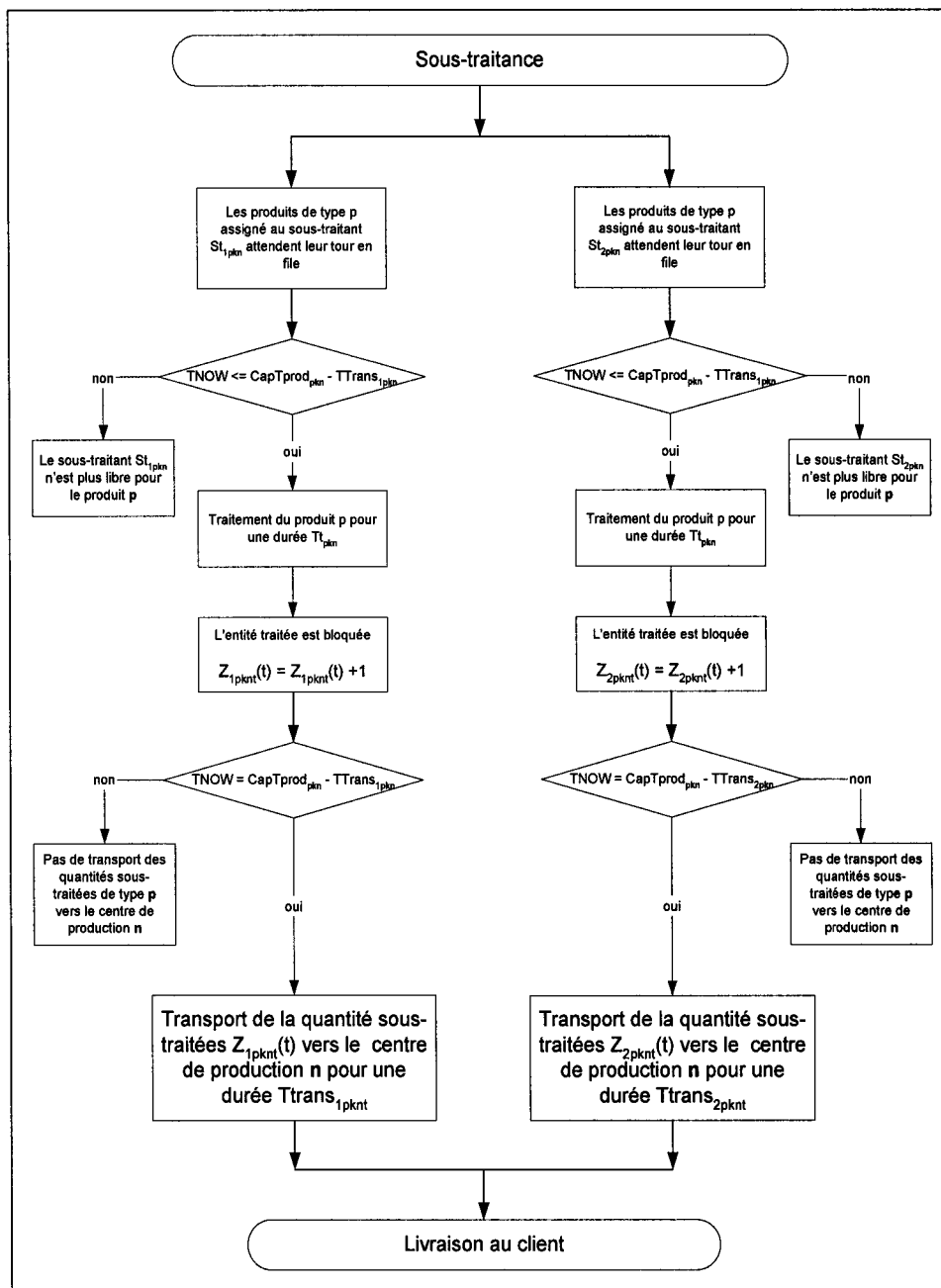


Figure 27 Diagramme du réseau de la sous-traitance

L'ordre de traitement est par défaut premier arrivé premier servi. L'entité qui prend sa place dans la ressource associée au sous-traitant  $St_{1pk_n}$  ou  $St_{2pk_n}$  est traitée pendant une durée de  $t_{pk_n}$  qui est le temps de traitement réel du produit de type  $p$ .

Les entités assignées à chaque sous-traitant sont traitées dans une durée limitée qui est égale à la durée maximale de production en interne moins le temps de transport requis pour transporter les quantités sous-traitées vers le centre de production donneur d'ordre ( $CapTprod_{pk_n} - Ttrans_{spk_n}$ ). Au de là de cette durée de sous-traitance, le sous-traitant en question n'est plus libre pour les produits de type  $p$ . Toutes les entités sous-traitées seront ensuite bloquées et comptées dans les variables  $Z_{1pknt}(t)$  s'il s'agit du sous-traitant  $St_{1pk_n}$  et  $Z_{2pknt}(t)$  s'il s'agit du deuxième sous-traitant  $St_{2pk_n}$ . Quand la simulation atteint le moment où  $Tnow$  égale à ( $CapTprod_{pk_n} - Ttrans_{spk_n}$ ), la quantité sous-traitée  $Z_{spknt}$  sera ensuite transportée au centre de production donneur d'ordre pour une durée  $Ttrans_{spk_n}$ .

### 5.3.8 Livraison au client

Ce dernier sous-réseau consiste à regrouper à l'instant où la moment de la simulation  $Tnow$  atteint la durée  $CapTprod_{pk_n}$  toutes les quantités produites en interne ( $X_{pknt}(t)$ ,  $X_{pk'nt}(t)$ ) et les quantités livrées par les sous-traitants ( $Z_{1pknt}(t)$ ,  $Z_{2pknt}(t)$ ), pour être ensuite transportées en une seule opération d'une durée  $Ttrans_{pk_n}$  vers le client.

On tient à signaler de nouveau qu'un client peut être un centre de production appartenant au réseau manufacturier ou un client final externe du réseau. Le diagramme appartenant à ce dernier sous-réseau est présenté à la figure 28.

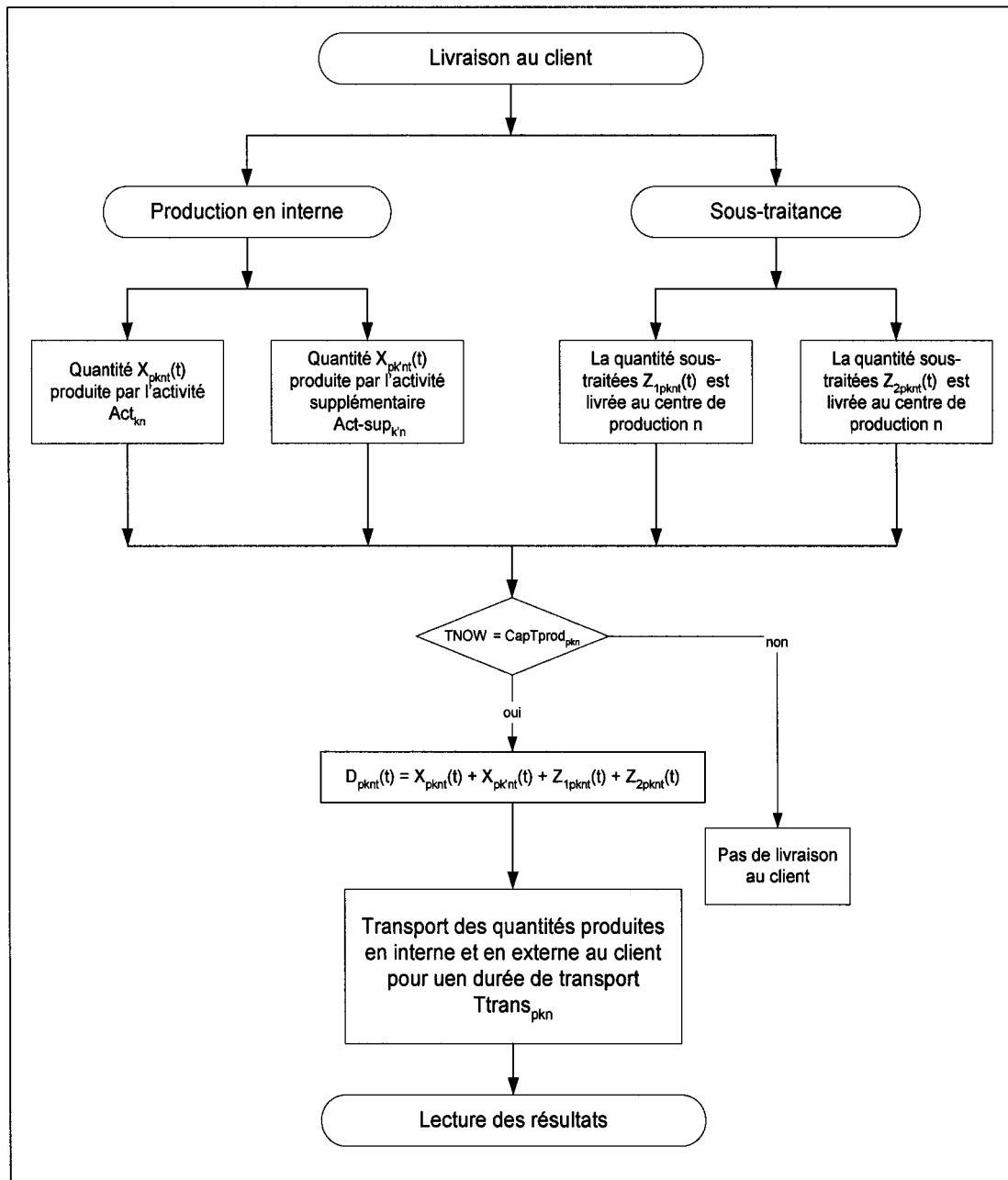


Figure 28 Diagramme du réseau de livraison finale pour chaque type de produit

### 5.3.9 Lecture des résultats

Le modèle de simulation a été conçu pour générer des informations liées aux quantités produites en interne et en externe qui nous permettront de calculer par la suite le coût total engendré ainsi que les taux d'occupation des activités internes.

Le sous-réseau lié à la lecture des résultats est présenté dans la figure 29. Il indique la dernière étape de notre modélisation et il est associé au sous-réseau d'initialisation des données. Après l'achèvement de la durée de simulation ( $T_{simu}$ ), les informations liées aux quantités produites ( $X_{pknt}(t)$ ,  $X_{pk'nt}(t)$ ,  $Z_{1pknt}(t)$ ,  $Z_{2pknt}(t)$ ) et aux taux d'utilisation ( $OC_{knt}$ ,  $OC_{k'nt}$ ) seront affichés dans un fichier externe.

On tient à signaler que le modèle de simulation nous permet aussi d'obtenir d'autres mesures de performance telle que le temps que passe chaque entité dans le système ainsi le temps passé dans la file d'attente.

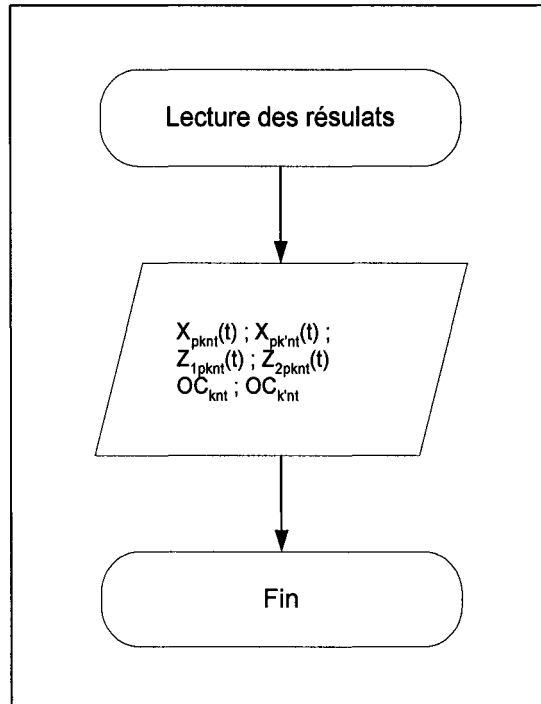


Figure 29 Diagramme de lecture des résultats

#### 5.4 Validation du modèle d'optimisation

Afin de valider notre approche mathématique, nous avons essayé de reproduire le plan de planification générée par le modèle linéaire mixte en nombres entiers.

Le modèle de simulation qu'on a construit est capable de reproduire les configurations du réseau manufacturier données par le modèle d'optimisation. Il tient compte aussi de la dynamique du système. Ceci nous permet de vérifier si le plan de répartition des demandes est capable de donner pour chaque période considérée des quantités fabriquées et achetées similaires à celle données par le modèle linéaire. Dans le réseau de simulation, on tient compte des contraintes de capacités internes et externes ainsi qu'aux délais de livraison des différents produits du réseau. Le diagramme montrant le modèle de validation est présenté à la figure 30.

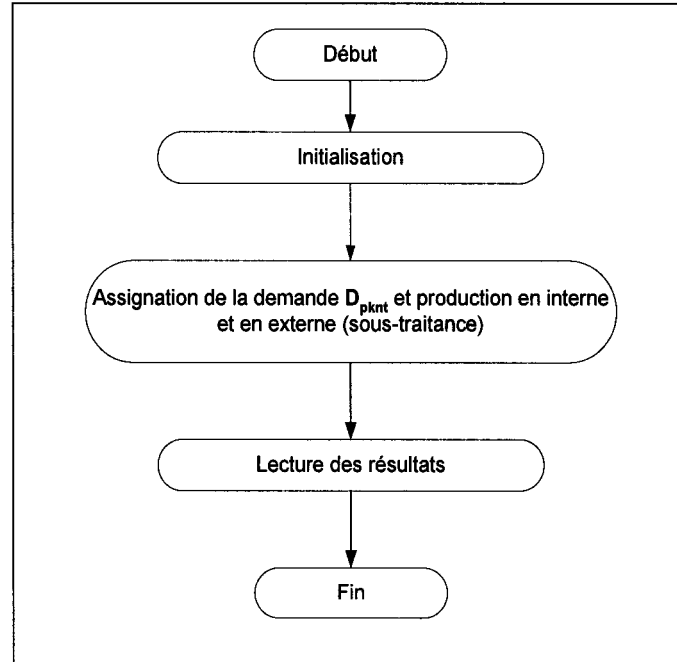


Figure 30 Diagramme général du modèle de validation

Ce modèle est composé d'un sous-réseau d'initialisation par lequel le modèle peut accéder aux données liées aux proportions des demandes ( $\alpha_{pknt}, \alpha_{pk'nt}, \beta_{1pknt}, \beta_{2pknt}$ ) qui sont données par le modèle linéaire, aux moyennes des demandes ( $D_{pknt}$ ) pour chaque période, aux délais de livraison ( $DL_{pkn}$ ), aux temps de traitement ( $Tt_{pkn}, t_{spkn}$ ), aux capacités internes ( $CapTprod_{pkn}$ ) et aux temps de transports ( $Ttrans_{pkn}, Ttrans_{1pkn}, Ttrans_{2pkn}$ ).

Le deuxième sous-réseau (figure 31) s'occupe de l'assignation de la demande entre les activités internes et la sous-traitance ainsi que la production interne et externe.

Afin de reproduire le plan de planification donné par notre modèle d'optimisation, on considère les proportions de chaque type de demande réparties en interne ( $\alpha_{pknt}, \alpha_{pk'nt}$ ) et entre les deux sous-traitants ( $\beta_{1pknt}, \beta_{2pknt}$ ).

Avant d'effectuer la répartition, le modèle lit la valeur des proportions à partir d'un fichier externe. Si la proportion  $\alpha_{pknt}$  est positive, l'entité entrée dans le système aura une chance d'être assignée à l'activité  $Act_{kn}$ , mais si cette proportion est nulle alors l'activité sera libre. Pour la proportion  $\alpha_{pk'nt}$ , si elle est positive, cela veut dire que le centre de production n a fait appel à l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  équivalente à  $Act_{kn}$ . Dans la situation où cette proportion vaut zéro, cela signifie soit que cette activité n'existe pas dans le cas où la variable donnée par le modèle d'optimisation ( $W_{k'nt}$ ) est nulle, soit dans le cas contraire ( $W_{k'nt} > 0$ ) elle existe mais elle sera inoccupée pour la période considérée.

La même procédure se réalise en cas de sous-traitance. La demande est assignée au sous-traitant  $St_{1pkn}$  ou  $St_{2pkn}$  seulement si les proportions  $\beta_{1pknt}$  ou  $\beta_{2pknt}$  est différente de zéro dans le cas contraire il n'y aura pas recours à la sous-traitance. Après l'assignation de la demande, on passe à la production des quantités demandées soit en interne ou en externe.

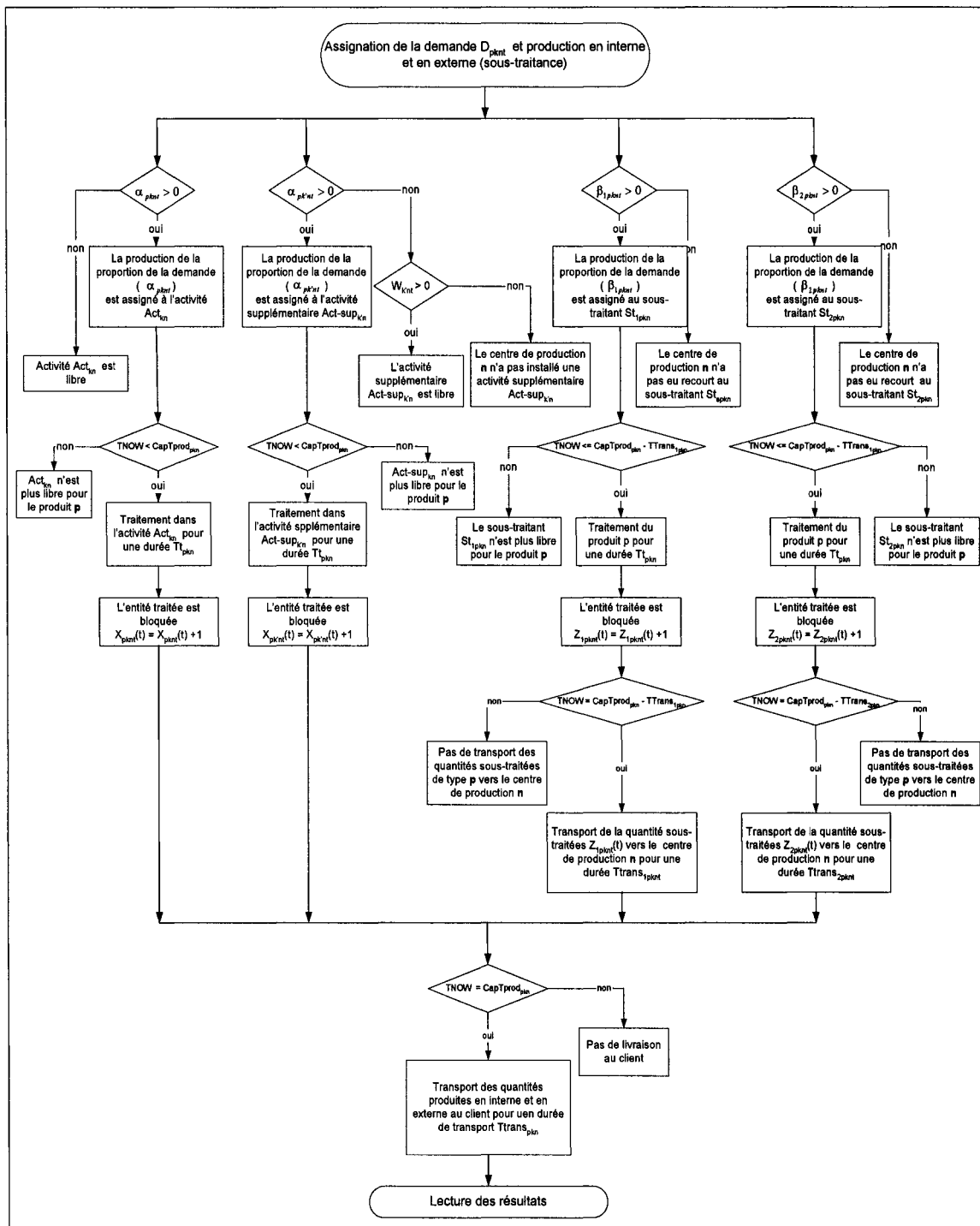


Figure 31 Diagramme du réseau d'assignation et de production en interne et en externe

Le traitement d'une entité sur une activité interne doit être réalisé pendant la durée de temps de production  $CapTprod_{pkn}$  associé à chaque activité. Au delà de la limite  $CapTprod_{pkn}$ , l'activité ne sera plus libre pour produire le même type de produit. Le temps requis pour la production d'une entité est  $Tt_{pkn}$ . Ce temps prend en considération le fait que l'activité est disponible à 90%, ce qui lui rend supérieure au temps réel de traitement  $t_{pkn}$ . L'entité traitée est ensuite bloquée jusqu'à ce que la durée de simulation atteigne le temps  $CapTprod_{pkn}$ .

Les entités traitées par l'activité interne  $Act_{kn}$  sont cumulées dans la variable  $X_{pknt}(t)$  et ceux traitées par l'activité supplémentaire  $Act-sup_{k'n}$  sont à leur tour comptées dans la variable  $X_{pk'nt}(t)$ . Après que la durée maximale de production s'est écoulée, toutes les quantités produites sont prêtes à être transportées.

En ce qui concerne la sous-traitance, toutes les entités assignées à un sous-traitant attendent leur tour dans la file d'attente appropriée à chaque sous-traitant.

Pour être fidèle au modèle d'optimisation, on considère que chaque sous-traitant est disponible à 100%.

L'entité qui prend sa place dans la ressource associée au sous-traitant  $St_{1pkn}$  ou  $St_{2pkn}$  est traitée pendant une durée de  $t_{pkn}$  qui est le temps de traitement réel du produit de type p. Les entités sont traitées pendant une durée limitée qui est égale à la durée maximale de production en interne moins le temps de transport requis pour transporter les quantités sous-traitées vers le centre de production donneur d'ordre ( $CapTprod_{pkn} - Ttrans_{spkn}$ ). Au delà de cette durée de sous-traitance, le sous-traitant en question n'est plus libre pour les produits de type p.

Toutes les entités sous-traitées seront ensuite bloquées et cumulées dans les variables  $Z_{1pknt}(t)$  s'il s'agit du sous-traitant  $St_{1pkn}$  et  $Z_{2pknt}(t)$  s'il s'agit du deuxième sous-traitant  $St_{2pkn}$ .



Quand la simulation atteint le moment où  $T_{now}$  égale à  $(CapT_{prod_{pkn}} - T_{trans_{spkn}})$ , la quantité sous-traitée  $Z_{spknt}$  sera ensuite transportée au centre de production donneur d'ordre pour une durée  $T_{trans_{spkn}}$ .

Le sous-réseau s'achève avec la livraison des quantités groupées. En effet, au moment où la simulation atteint la durée  $CapT_{prod_{pkn}}$  toutes les quantités produites en interne ( $X_{pknt}(t)$ ,  $X_{pk'nt}(t)$ ) et les quantités livrées par les sous-traitants ( $Z_{1pknt}(t)$ ,  $Z_{2pknt}(t)$ ) seront transportées en une seule opération d'une durée  $T_{trans_{pkn}}$  vers le client.

Finalement, après l'achèvement de la durée de simulation ( $T_{simu}$ ) les informations liées aux quantités produites  $X_{pknt}(t)$ ,  $X_{pk'nt}(t)$ ,  $Z_{1pknt}(t)$ ,  $Z_{2pknt}(t)$  et aux taux d'utilisation ( $OC_{knt}$ ,  $OC_{k'nt}$ ) seront affichés dans un fichier externe. A partir des quantités produites on sera capable de vérifier si elles sont compatibles avec celles données par le modèle d'optimisation et ensuite calculer le coût total.

## **5.5 Résultats de la simulation**

### **5.5.1 Résultats dynamiques du modèle de validation**

Le modèle de validation a été construit pour générer des informations liées aux quantités fabriquées par les activités internes ( $X_{pknt}(t)$ ,  $X_{pk'nt}(t)$ ) et par les sous-traitants potentiels ( $Z_{1pknt}(t)$ ,  $Z_{2pknt}(t)$ ) ainsi qu'au taux d'occupation de chaque activité ( $OC_{knt}$ ,  $OC_{k'nt}$ ). Après la détermination des quantités fabriquées en interne et en externe, nous serons capable d'estimer le coût total.

Les résultats du modèle de validation nous permettent de valider le plan d'assignation donnée par le modèle linéaire en nombre entier.

### 5.5.1.1 Quantités produites en interne et en externe

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats du modèle de validation liés aux quantités produites en interne et en externe (sous-traitance) pour le produit final durant les cinq périodes de planification considérées. Les résultats associés aux produits semi-finis sont présentés en annexe.

Le tableau des résultats présentent la moyenne des quantités passées par chaque activité et sous-traitant ainsi que l'écart type associé et ce, en considérant une série de dix essais pour chaque simulation. La dernière colonne des tableaux montre la somme des moyennes des quantités traitées pour chaque période.

Tableau XIV

Répartition de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle de validation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance		Activités internes						Moyennes des quantités livrées
		$Act_{13}$		$Act - sup_{13}$		$St_{2113}$		
Périodes	Demande	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Écart Type	
1	<b>17200</b>	11085	45	6114	45	0	0	<b>17199</b>
2	<b>20000</b>	11095	76	8899	80	0	0	<b>19994</b>
3	<b>22400</b>	11141	55	11092	11	126	9	<b>22359</b>
4	<b>18500</b>	11120	12	7365	21	0	0	<b>18485</b>
5	<b>15700</b>	11132	28	4566	0	0	0	<b>15698</b>

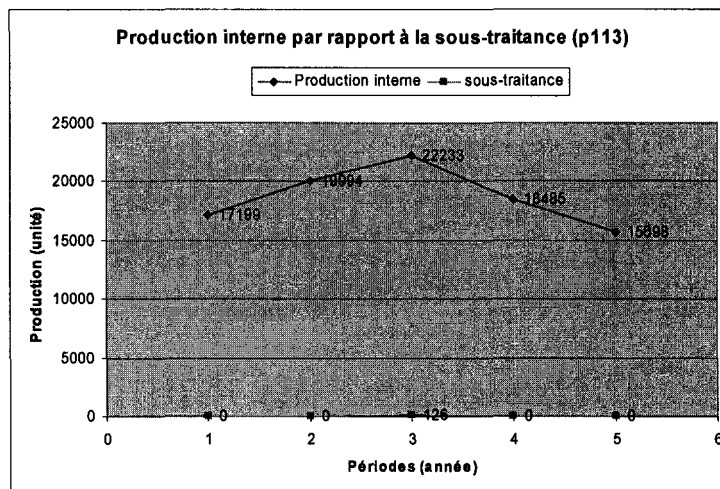


Figure 32 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle de validation

Le tableau et le graphique des quantités produites présentent le nombre d'entités passées par chaque ressource représentant les activités internes ( $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$ ) ainsi que les sous-traitants  $St_{1113}$ .

Après exécution d'une série de réplifications, le modèle de simulation transfère les résultats liés aux quantités produites. Avec ses résultats, on peut trouver la moyenne des unités produites par chaque ressource durant les cinq périodes ainsi que l'écart type et les bornes inférieure et supérieure en considérant un intervalle de confiance de 95%. Si on compare les résultats des quantités produites trouvés par le modèle de simulation avec ceux trouvés mathématiquement, on remarque qu'elles sont semblables avec un écart maximal de 41 unités.

### 5.5.1.2 Taux d'occupation

Le taux d'occupation des activités est une mesure du degré d'emploi d'une ressource qu'on obtient en faisant le rapport entre le temps productif d'une activité et le temps disponible.

Dans cette partie, on montre les taux d'utilisation générés par le modèle de validation pour les activités internes du centre de production 3, soit l'activité déjà existante  $Act_{13}$  ou les activités supplémentaires  $Act - sup_{13}$  appartenant aux différents centres de production. Les résultats associés aux activités internes des centres de production 1 et 2 sont montrés dans l'annexe 3.

Le tableau ci-dessous présente le taux d'occupation des activités associées au centre de production 3 pour les périodes considérées dans notre simulation. On indique aussi le taux d'occupation moyen durant les cinq périodes.

Tableau XV

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 3 générés par le modèle de validation

Centre de production	Périodes	$Act_{13}$		$Act - sup_{13}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type
3	1	0.89	0.004	0.49	0.004
	2	0.89	0.006	0.71	0.006
	3	0.89	0.005	0.9	0.001
	4	0.89	0.002	0.59	0.002
	5	0.89	0.003	0.37	0
Taux d'occupation moyen		0.89		0.61	

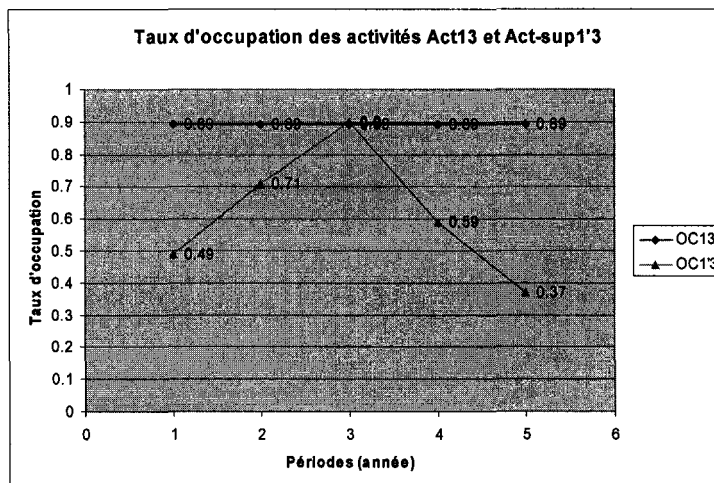


Figure 33 Taux d'occupation des activités  $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$  générés par le modèle de validation

À partir des résultats donnés par la simulation du modèle de validation, nous avons déterminé le taux d'occupation moyen ainsi que l'écart type pour chaque activité pour une seule période ainsi que le taux d'occupation moyen des activités internes, et ce, pour toutes les années d'utilisation. Les résultats trouvés sont équivalents aux résultats donnés par notre approche mathématique avec un écart maximal de 0.1%

La section suivante présente les résultats de la simulation concernant le temps que passe chaque produit dans le système.

### 5.5.1.3 Temps dans le système

Parmi les mesures de performance qui nous renseignent sur l'aspect dynamique du réseau, figure le temps dans le système. Ce temps représente le délai passé par un produit dans le système. Dans notre cas, il correspond au délai de production, de transport et d'attente dans les files d'attente. Rappelons que le délai de production est la durée de traitement du produit depuis le lancement de l'ordre de production.

Le tableau XVI montre le temps que le produit  $p_{113}$  a passé dans le système depuis le lancement de la production jusqu'à la livraison au client. Il montre aussi le temps d'attente dans les files correspondantes aux deux activités internes  $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$ .

Tableau XVI

Temps dans le système du produit  $p_{113}$

Périodes	Temps moyen dans le système (min)	Écart type du temps dans le système (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité $Act_{13}$ (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité supplémentaire $Act - sup_{13}$ (min)
1	1512.87	743.201	0.680	0.075
2	1512.87	743.201	1.708	1.069
3	1512.87	743.201	1.708	1.069
4	1512.87	743.201	1.708	1.069
5	1512.87	743.201	0.65	0.046

Suites aux résultats, on remarque bien que la livraison finale du produit  $p_{113}$  s'effectue bien au tour de 1512 minutes ce qui correspond à la somme du temps de traitement du produit (12 minutes) et au temps de livraison (25 heures). Le temps passé dans les files d'attente est négligeable ce qui explique, qu'en simulant le réseau manufacturier sans considérer son aspect stochastique, le temps dans le système coïncide avec le temps de traitement additionné au temps de transport.

Comme on a reproduit le plan de production généré par le modèle d'optimisation, on s'attend à ce que les coûts de production et de distribution de la simulation soient semblables à ceux du modèle linéaire.

En effet, le coût total donné par le modèle de validation est de **37 776 984 \$** comparé à

37 777 76 \$ donné par le modèle d'optimisation. La différence provient simplement du fait que le modèle de simulation répartit les entités entrées dans le système selon des probabilités qui donnent des assignations différentes d'un essai à l'autre à cause de leur aspect aléatoire.

Pour un niveau de confiance de 95%, le coût déterminé à partir des résultats donnés par le modèle de simulation, se trouve dans l'intervalle [37 769 561 \$, 37 790 553 \$].

Finalement, on remarque qu'en tenant compte d'un niveau de confiance de 95 %, les résultats obtenus avec la simulation sont identiques à ceux donnés par le modèle linéaire en nombres entiers. Ce qui nous permet de dire que la planification donnée par le modèle d'optimisation est bien réalisable. Il reste maintenant à considérer les phénomènes aléatoires tels que les pannes et la variabilité aléatoire des demandes. Ces phénomènes peuvent causer des changements au niveau de la répartition des demandes et des coûts engendrés. La prise en compte des phénomènes aléatoires nous permet de respecter la réalité et donner une configuration réaliste de notre réseau manufacturier.

## **5.5.2 Résultats de la simulation considérant les phénomènes aléatoires**

Ce modèle de simulation, qui tient compte des phénomènes aléatoires tels que les demandes et les pannes, est employé pour générer un complément d'informations sur les mesures de performance du système liés aux quantités fabriquées par les activités internes et les sous-traitants ainsi qu'aux taux d'utilisation. Il nous permet aussi d'avoir d'autres types de performance dynamiques tel que le temps dans le système pour chaque produit. Les principaux résultats sont résumés dans ce qui suit.

### **5.5.2.1 Quantités produites en interne et en externe**

Le tableau présenté ci-dessous fournit la répartition des demandes du produit  $p_{113}$  entre la production interne et la sous-traitance, et ce en considérant des demandes aléatoires

qui suivent des distributions normales ainsi que des pannes qui suivent des lois de probabilité exponentielles.

Le tableau de répartition fournit la moyenne des quantités passées par chaque activité et sous-traitant, la somme des moyennes des quantités traitées pour chaque période ainsi que les moyennes des limites inférieures et supérieures de production pour chaque période et ce, en considérant une série de dix essais pour chaque simulation.

On considère ici que chaque activité supplémentaire possède les mêmes distributions de temps entre les pannes et de temps de réparation que son équivalente.

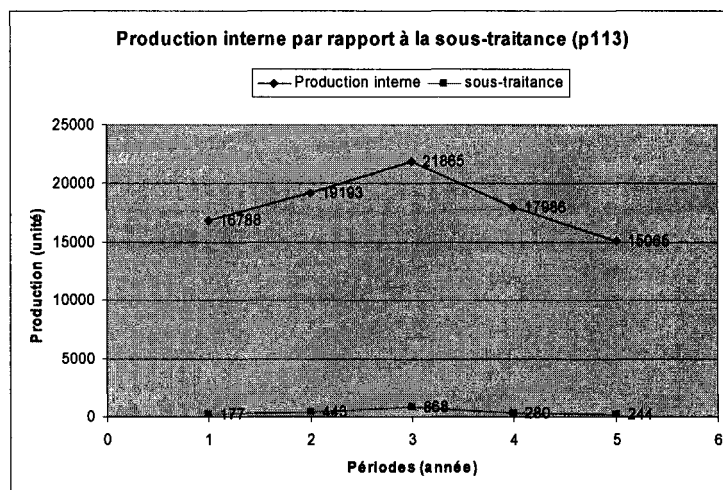
La figure 34 présente aussi la production effectuée par les activités internes par rapport aux quantités sous-traitées pour le produit  $p_{113}$ .



Tableau XVII

Répartition de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle de simulation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance		Activités internes		Sous-traitance	Moyennes des quantités livrées	Bornes inf	Bornes sup
		$Act_{13}$	$Act - sup_{13}$	$St_{2113}$			
Périodes	Distribution normale de la demande	Moyenne	Moyenne	Moyenne			
1	(17200,800)	10628	6160	177	<b>16966</b>	16230	17701
2	(20000,2200)	10520	8673	443	<b>19635</b>	18126	21144
3	(22400,500)	10896	10969	868	<b>22734</b>	22261	23206
4	(18500,1000)	10644	7342	280	<b>18266</b>	17356	19177
5	(15700,1100)	10524	4541	244	<b>15308</b>	14330	16287

Figure 34 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{113}$  générée par le modèle de simulation

On remarque qu'à partir du tableau et la figure ci-dessus qu'il y a de plus en plus recourt à la sous-traitance, ce qui signifie un manque considérable de la disponibilité des ressources internes lié à l'apparition des pannes qui peuvent surgir d'une façon aléatoire.

### 5.5.2.2 Taux d'occupation

Dans cette partie, on montre les taux d'utilisation générés par le modèle de simulation pour chaque activité interne du troisième centre, soit l'activités déjà existante  $Act_{13}$  ou l'activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$ . Les résultats sont présentés dans le tableau XVI ainsi dans la figure 35.

On indique aussi, dans le tableau XVII, le taux d'occupation moyen pour les activités internes  $Act_{13}$  durant les cinq années et pour les activités supplémentaires  $Act - sup_{13}$  durant les périodes où elles étaient installées.

Les résultats des taux d'occupations des activités appartenant aux centres de production 1 et 2 sont présentés en annexe 4.

Tableau XVIII

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 3 générés par le modèle de simulation

Centre de production	Périodes	$Act_{13}$		$Act - sup_{13}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type
3	1	0.82	0.03	0.47	0.02
	2	0.82	0.06	0.67	0.07
	3	0.85	0.01	0.85	0.01
	4	0.83	0.03	0.57	0.04
	5	0.82	0.05	0.35	0.04
Taux d'occupation moyen		0.83		0.58	

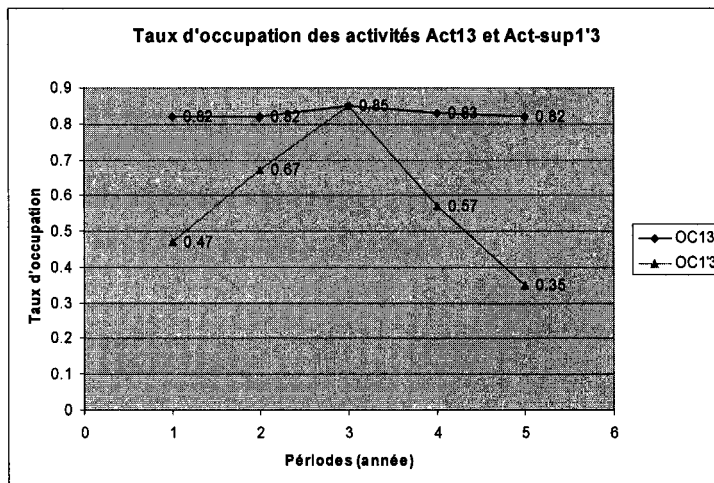


Figure 35 Taux d'occupation des activités  $Act_{13}$  et  $Act - sup_{13}$  générés par le modèle de simulation

L'activité interne  $Act_{13}$  du centre de production 3 a été utilisée au maximum durant les cinq périodes. Dès le début de la première période, le centre a installé une activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$  afin de surmonter le manque de capacité pour la production du produit final. L'activité ajoutée a été occupée à 58 % durant les cinq périodes de son utilisation.

Les taux d'utilisation de l'activité  $Act_{13}$  durant les cinq périodes de planification, varient entre 82 % et 85 % alors que les résultats générés par le modèle linéaire montrent que cette activité est utilisée à 90 % pendant toutes les périodes de planification.

En comparant les taux d'utilisation donnés par le modèle de simulation et ceux donnés par le modèle d'optimisation, on peut dire que la différence est due à la considération des pannes qui diminuent la disponibilité des activités internes.

En effet, durant la phase de simulation, les activités internes sont sujettes à des pannes aléatoires qui ne font que diminuer la disponibilité des ressources ce qui contribue à la

perturbation du bon fonctionnement du système et engendre un manque de capacité et une réduction des taux d'utilisation des activités.

La section suivante présente les résultats de la simulation concernant le temps que passe chaque produit dans le système.

### 5.5.2.3 Temps dans le système, tenant compte des règles d'acheminement

Dans cette partie, on montre les résultats associés au temps passé dans le système pour le produit  $p_{113}$ . On considère initialement les règles d'acheminement qui permettent de faire face aux phénomènes perturbateurs. Les résultats seront présentés dans le tableau XIX.

Tableau XIX

Temps dans le système du produit  $p_{113}$  (avec considération des règles d'acheminement)

Périodes	Temps moyen dans le système (min)	Écart type du temps dans le système (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité $Act_{13}$ (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité supplémentaire $Act - sup_{13}$ (min)
1	2004.274	635.453	1123.194	1026.186
2	1990.963	668.794	1116.143	1108.452
3	2064.565	530.024	1213.766	1244.076
4	1903.241	730.409	1009.183	1019.183
5	1914.603	680.043	1128.601	1019.442

On remarque à partir des résultats donnés dans le tableau XIX, que le temps moyen passé dans le système pour le produit  $p_{113}$  durant les cinq périodes de planification est de 2350 minutes. Ce temps comprend le temps de traitement du produit, le temps passé dans les files d'attentes des activités internes ainsi que le temps de livraison au client final.

Ici on constate que le temps d'attente est supérieur à celui donné par le modèle de validation. Ceci est dû au fait qu'on tient compte, dans cette partie de modélisation, de l'aspect aléatoire du réseau. En effet, la considération des phénomènes aléatoires tels que l'augmentation inattendue de la demande et l'apparition des pannes provoque généralement un manque de capacité au niveau des activités internes ainsi qu'un temps d'attente considérable.

Dans le cas où l'activité  $Act_{13}$  tombe en panne, le modèle devra respecter des règles d'acheminement pour envoyer les produits en attente au bon endroit, soit vers l'activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$  ou vers l'un des deux sous-traitants.

Pour suivre les règles d'acheminement, on doit considérer en premier lieu l'activité supplémentaire et voir si elle satisfait aux exigences. L'activité  $Act - sup_{13}$  en question doit être :

- Présente sur le plancher ( $W_{1'3t} > 0$ )
- Libre
- En bon état de fonctionnement

Si ces trois conditions sont satisfaites, l'entité passe dans la file d'attente de l'activité  $Act - sup_{13}$ . Sinon, il faut vérifier à quel sous-traitant il faut envoyer l'entité. On commence par voir le sous-traitant potentiel 1  $St_{113}$  si :

- Il a encore de la capacité disponible pour traiter l'entité ;
- Son coût de sous-traitance est inférieur à celui du deuxième sous-traitant.

Si ces deux conditions ne sont pas vérifiées, l'entité passera directement dans la file d'attente du deuxième sous-traitant  $St_{213}$ . La même procédure se répète si la quantité assignée initialement à l'activité supplémentaire  $Act - sup_{13}$  est supérieure à sa capacité de production ou si l'activité tombe en panne.

Dans la partie précédente, on a pu constater que lorsque le système tombe en panne, le recours aux règles d'acheminement permet de faire face à ce type de perturbation et ainsi améliorer le temps que les produits passent dans le système. Dans la partie suivante nous allons évaluer le temps dans le système sans considérer les règles d'acheminement, ce qui va nous permettre de voir l'impact de ces règles sur notre système. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau XX.

Tableau XX

Temps dans le système du produit  $p_{113}$  (sans considération des règles d'acheminement)

Périodes	Temps moyen dans le système (min)	Écart type du temps dans le système (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité $Act_{13}$ (min)	Temps passé dans la file d'attente de l'activité supplémentaire $Act - sup_{13}$ (min)
1	2503.600	62.184	1425.410	1367.055
2	2511.751	51.078	1426.759	1432.474
3	2288.201	543.489	1432.115	1447.143
4	2511.909	53.399	1460.655	1435.501
5	2480.351	81.868	1428.601	1321.996

On voit bien que le temps dans le système est plus élevé comparé à celui trouvé en considérant les règles d'acheminement. L'augmentation de ce temps est liée au temps d'attente dans les files, qui s'est élevé considérablement. En effet, lorsque l'activité tombe en panne, les entités en attente devront rester dans la file jusqu'à ce que l'activité en question reprend son fonctionnement normal.

On conclut donc que le recours aux règles d'acheminement dans le modèle de simulation permet de faire face aux phénomènes perturbateurs et ainsi améliorer le temps que les produits passent dans le système. Cette amélioration met en évidence l'apport de la simulation par rapport à la modélisation mathématique qui ne peut résoudre que des systèmes de nature déterministe.

Finalement, on peut dire que les résultats donnés par ce modèle de simulation sont plus réalistes que ceux donnés par le modèle d'optimisation puisqu'on considère les aspects aléatoires du réseau manufacturier.

En tenant compte de la variation de la demande et des pannes, cela nous a permis de déterminer un plan de planification fiable qui permet aux centres de production de livrer les commandes à temps sans retard.

Le coût total moyen engendré par le modèle de simulation est de **37 875 948 \$**, pour un niveau de confiance de 95%. Ce coût moyen se trouve dans l'intervalle [37 798 750 \$, 38 021 442 \$]. L'augmentation du coût total à travers le réseau est due à l'augmentation des quantités sous-traitées.

Finalement, à partir du modèle de simulation on obtient une configuration finale de notre réseau manufacturier. Cette configuration nous donne les nœuds sélectionnés pour la conception d'un réseau manufacturier fiable qui tient compte des perturbations et incertitudes.

La figure 36 présente le réseau manufacturier finale à la cinquième période ainsi que les taux d'occupation moyen des activités internes pour les cinq périodes de planification.

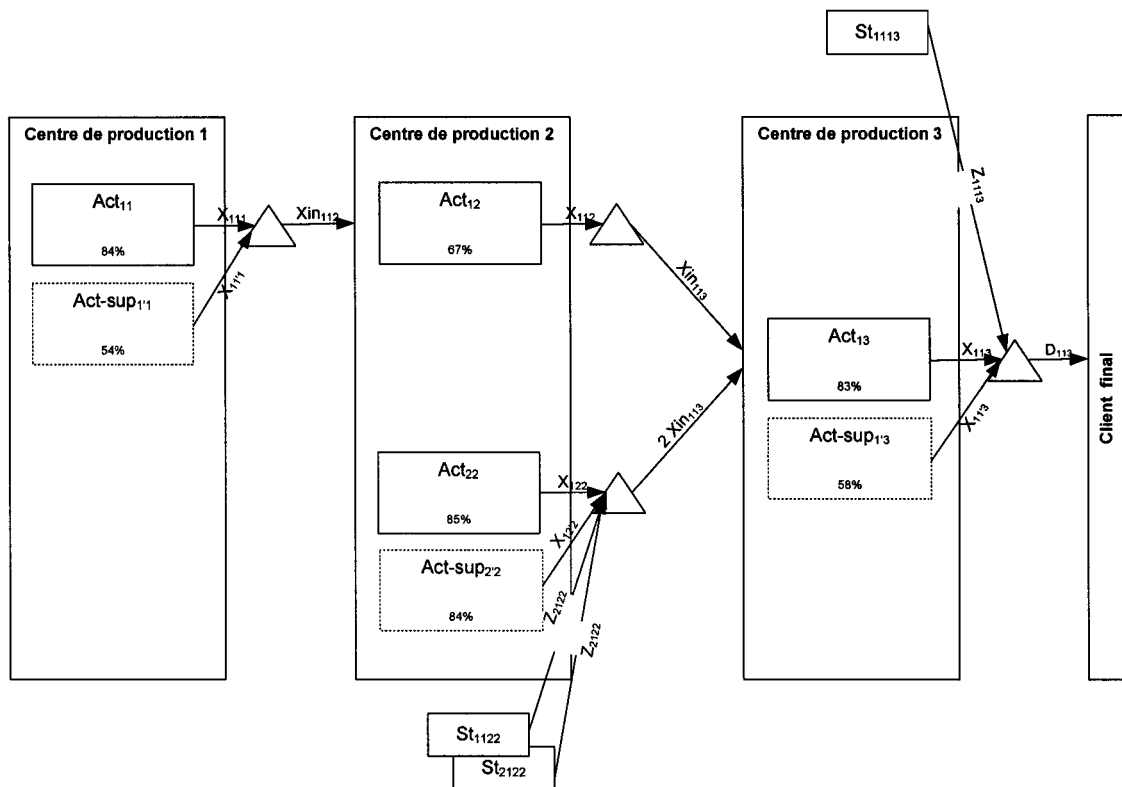


Figure 36 Configuration finale du réseau manufacturier à la fin de la cinquième période de planification donnée par l'approche hybride

## 5.6 Conclusion

Ce chapitre a décrit les modèles de simulation construits pour modéliser le réseau manufacturier étudié. Il comprend un modèle de validation du plan de planification donné par le modèle d'optimisation et un deuxième modèle qui considère initialement des résultats mathématiques mais qui tient compte aussi de l'aspect aléatoire du réseau. Enfin, les résultats des deux modèles sont exposés et interprétés.

Le modèle dynamique stochastique nous a permis de modifier le plan de production initiale afin de donner un autre plan plus fiable qui tient compte des perturbations qui peuvent surgir d'une façon aléatoire.



## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

Ce mémoire résume les activités de recherche portant la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour la conception et la planification des réseaux manufacturiers fiables en tenant comptes des perturbations. Cet outil est basé sur une approche hybride composée d'un modèle mathématique d'optimisation et d'un modèle de simulation par événements discrets.

#### **6.1 Approche hybride**

L'objectif de notre approche hybride est de combiner la précision du modèle linéaire mixte avec la flexibilité de la simulation par événements discrets.

Le modèle linéaire mixte en nombres entiers est employé pour donner une configuration fiable du réseau et ce, aux moindres coûts. La fiabilité du réseau est défini dans notre travail comme étant la capacité de chaque nœud appartenant au réseau à assurer aux clients les quantités voulues aux moments appropriés tout en étant capables d'être réactif aux perturbations aléatoires.

Le modèle d'optimisation sert, en premier lieu, à minimiser le coût global de production interne, de sous-traitance, de stockage et de pénurie ainsi que le coût de livraison. Il permet, en deuxième lieu, de déterminer la répartition de chaque demande entre la production interne et la sous-traitance ainsi que le taux d'occupation de chaque activité durant chaque période. Le modèle permet de sélectionner les bonnes activités et les bons sous-traitants qui vont participer à la production de la demande. Celle-ci basée sur les

prévisions annuelles. Les renseignements fournis par l'approche mathématique sont accumulés sur un horizon de cinq ans.

Pour satisfaire les demandes, le modèle mathématique donne les meilleures alternatives. Dans la plus part des cas, il propose de produire une grande quantité en interne en utilisant en priorité les activités déjà existantes dans les centres de production, ensuite les activités supplémentaires. La sous-traitance est utilisée pour combler le manque de capacité des activités internes. Le recours à la sous-traitance n'est pas fréquent à cause de son coût élevé.

Une analyse de sensibilité a suivi le modèle linéaire mixte dans le but de tester plusieurs scénarios où nous avons varié différents paramètres qui ont un impact sur le comportement du réseau. Malgré la précision de l'outil d'optimisation, le modèle mathématique n'est pas capable de générer que des résultats statiques qui ne permettent pas d'évaluer l'incertitude du système, comme la variabilité aléatoire de la demande et les pannes qui peuvent affecter les activités internes des centres de production.

La deuxième étape de notre approche hybride est la simulation par événements discrets. La simulation est considérée comme un outil puissant d'aide à la décision avec lequel on peut étudier en détail le comportement dynamique stochastique du réseau manufacturier et évaluer sa performance.

Dans notre travail de recherche, nous avons utilisé la simulation pour valider le plan de planification généré par l'approche mathématique et vérifier s'il est réalisable. En effet, pour un niveau de confiance de 95 %, les résultats obtenus par le modèle de validation sont identiques à ceux donnés par le modèle linéaire mixte. Le modèle de simulation a été employé aussi pour tenir compte des phénomènes aléatoires qui interviennent dans le système tels que la demande et les pannes.

Le modèle de simulation se base initialement sur les répartitions et la configuration donnés par le modèle d'optimisation. En introduisant les phénomènes aléatoires, le modèle de simulation a été capable de modifier les répartitions des demandes, et même dans certains cas, la configuration globale afin de garder un réseau fiable. En effet, l'augmentation inattendue de la demande engendre un manque de capacité des activités, d'où le recours fréquent à la sous-traitance. L'apparition des pannes cause aussi un manque de disponibilité au niveau des ressources ainsi qu'une réduction des taux d'utilisation des activités.

Finalement, on peut dire que c'est intéressant de combiner la programmation linéaire à la simulation qui sont ici complémentaires pour donner des résultats précis et réels dans la conceptions des chaînes logistiques et l'amélioration de leur fiabilité.

## **6.2 Perspectives de recherche**

Dans notre travail de recherche, nous avons considéré comme mécanismes d'accélération la sous-traitance et la capacité de rattrapage. Il serait intéressant de tenir compte d'autres mécanismes comme le stock de sécurité et l'augmentation de la main d'œuvre. Ceci donnerait plus de flexibilité à notre modèle.

Afin de rendre notre approche plus réaliste encore, on peut considérer la qualité dans nos contraintes en tenant compte d'un taux de rejet associé à chaque activité interne. La considération de ce type de perturbation rend notre approche plus réaliste.

On remarque à partir des résultats associés aux taux d'occupation que pendant certaines périodes des activités sont sous utilisées. Ceci nous a donnée l'idée d'optimiser le taux d'occupation des ressources, et ce, en ajoutant un autre objectif dans notre modélisation linéaire. Dans ce cas on a affaire à un modèle linéaire multi-objectifs où on minimise les coûts d'une part et on maximise l'utilisation des activités d'autre part.

Puisque la simulation est basée sur les résultats mathématiques, il serait avantageux d'automatiser l'échange de données entre le modèle d'optimisation et le modèle de simulation à partir d'un fichier commun. Cela réduirait la quantité de données à manipuler et diminuerait le risque d'erreur.

## **ANNEXE 1**

**Résultats du modèle linéaire mixte en nombres entiers pour les centres  
de production 1 et 2**

## Répartition des demandes pour les centres de production 1 et 2 :

Centre de production 1 :

Tableau XXI

Répartition des demandes pour le centre de production 1 générée par le modèle d'optimisation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes		Sous-traitance
Centre de production	Produits	Périodes	$Act_{11}$	$Act - sup_{11}$	
1	$p_{111}$	1	0.67	0.33	0
		2	0.58	0.42	0
		3	0.52	0.48	0
		4	0.62	0.38	0
		5	0.74	0.26	0

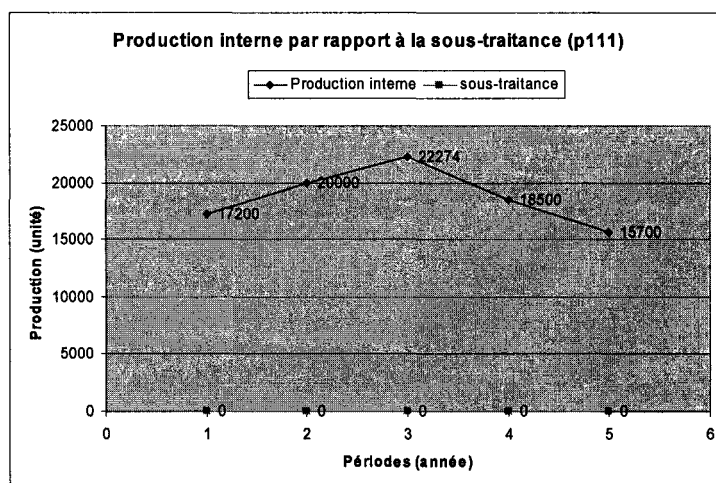


Figure 37 Répartition de la demande du produit  $p_{111}$  générée par le modèle d'optimisation

Centre de production 2 :

Tableau XXII

Répartition des demandes pour le centre de production 2 générée par le modèle d'optimisation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes				Sous-traitance	
Centre de production	Produits	Périodes	$Act_{12}$	$Act - sup_{12}$	$Act_{22}$	$Act - sup_{22}$		
2	p <sub>112</sub>	1	1	0				
		2	1	0				
		3	1	0				
		4	1	0				
		5	1	0				
	p <sub>122</sub>	1				0.46	0.46	0.08
		2				0.4	0.4	0.2
		3				0.36	0.36	0.28
		4				0.43	0.43	0.14
		5				0.51	0.49	0

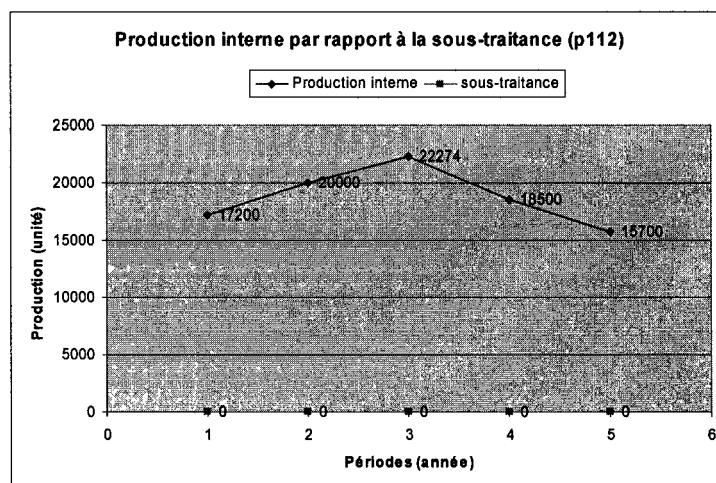


Figure 38 Répartition de la demande du produit  $p_{112}$  générée par le modèle d'optimisation

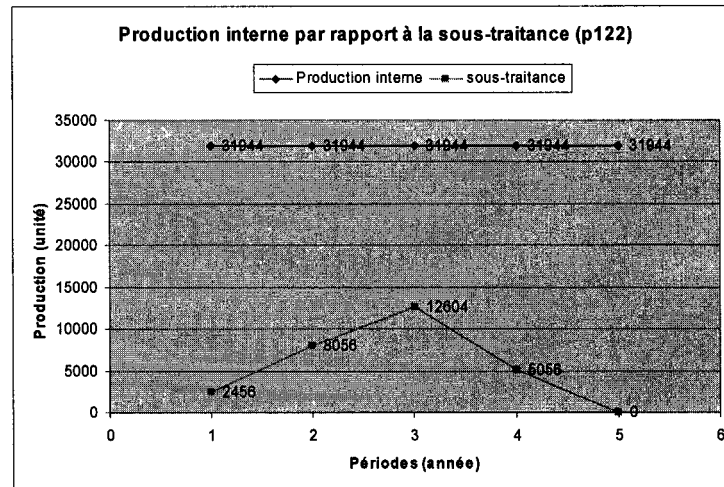


Figure 39 Répartition de la demande du produit  $p_{122}$  générée par le modèle d'optimisation



## Taux d'occupations pour les centres de production 1 et 2 :

### Centre de production 1 :

Tableau XXIII

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 1 générés par le modèle d'optimisation

Centre de production	Périodes	$Act_{11}$	$Act - sup_{11}$
1	1	0.9	0.43
	2	0.9	0.65
	3	0.9	0.83
	4	0.9	0.54
	5	0.9	0.32
Taux d'occupation moyen		0.9	0.55

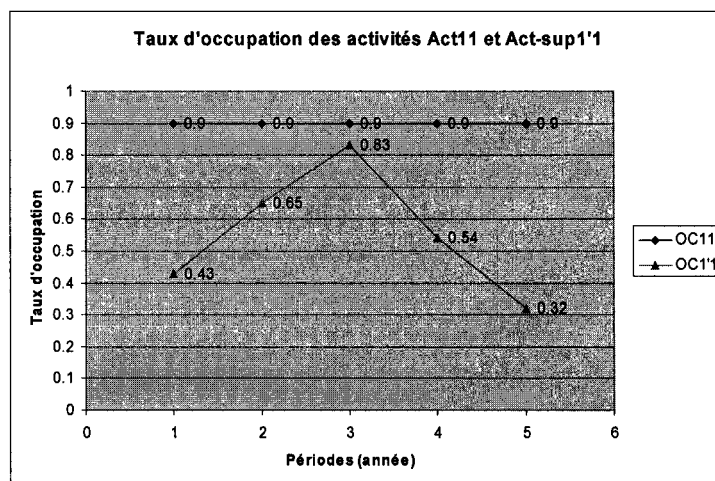


Figure 40 Taux d'occupation des activités  $Act_{11}$  et  $Act - sup_{11}$  générés par le modèle d'optimisation

Centre de production 2 :

Tableau XXIV

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 2 générés par le modèle d'optimisation

Centre de production	Périodes	$Act_{12}$	$Act - sup_{1'2}$	$Act_{22}$	$Act - sup_{2'2}$
2	1	0.65	0	0.9	0.9
	2	0.75	0	0.9	0.9
	3	0.84	0	0.9	0.9
	4	0.7	0	0.9	0.9
	5	0.59	0	0.9	0.9
Taux d'occupation moyen		0.7	0	0.9	0.9

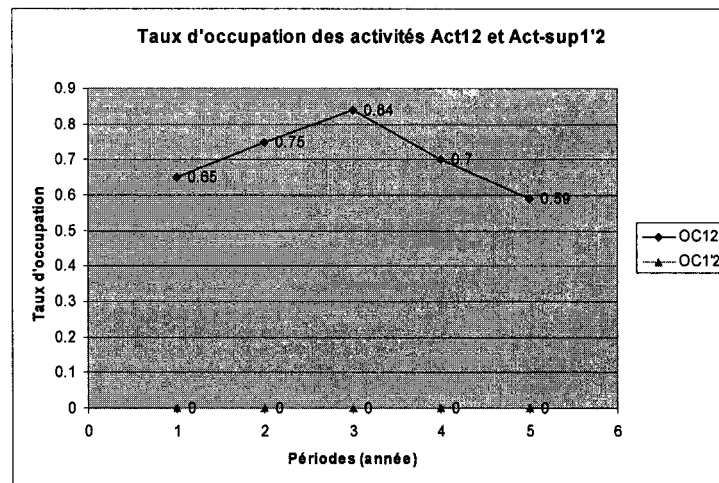


Figure 41 Taux d'occupation des activités  $Act_{12}$  et  $Act - sup_{1'2}$  générés par le modèle d'optimisation

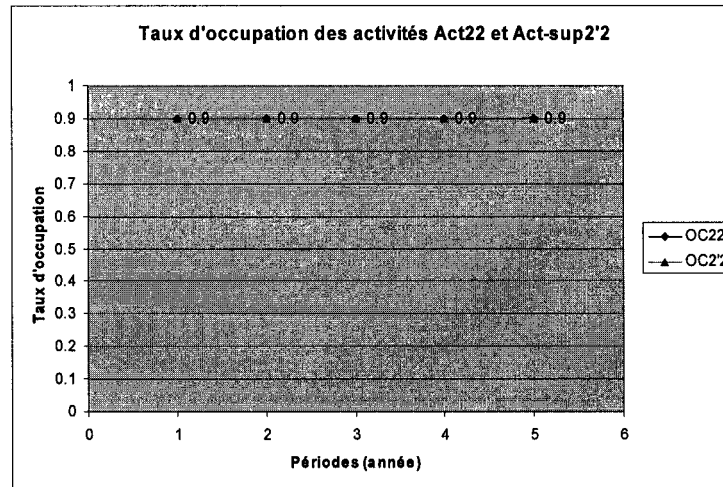


Figure 42 Taux d'occupation des activités  $Act_{22}$  et  $Act - sup_{2'2}$  générés par le modèle d'optimisation

## **ANNEXE 2**

### **Modèle de simulation par événements discrets**

**Fichier de contrôle :**

**GEN,"Chelly, Gharbi, Olivier","Conception d'un réseau manufacturier  
fiable",10/2004,10,YES,YES;**

**LIMITS,250,50,,50;**

**NETWORK,READ;**

**-----**

**;Durée de simulation**

**;**

**EQUIVALENCE,{{Tsimu,7800}};**

**INITIALIZE,0.0,Tsimu,YES,,NO;**

**-----**

**;Demandes: Moyenne - Ecart type - Stream**

**;**

**EQUIVALENCE,{{M1,LL[21]}};**

**EQUIVALENCE,{{M4,LL[24]},{M5,LL[25]},{M6,LL[26]}};**

**;**

**EQUIVALENCE,{{E6,LL[36]}};**

**;**

**EQUIVALENCE,{{S1,LL[13]}};**

**EQUIVALENCE,{{S4,LL[14]},{S5,LL[15]},{S6,LL[16]}};**

**;**

**EQUIVALENCE,{{P1,S1+10}};**

**EQUIVALENCE,{{P4,S4+10},{P5,S5+10},{P6,S6+10}};**

**-----**

**;Délais de livraison**

**;**

**EQUIVALENCE,{{delai1,XX[9]},{delai4,XX[10]},{delai5,XX[11]},{delai6,XX[12]**

**}};**

**INTLC,{{delai1,2500},{delai4,2700},{delai5,2700},{delai6,2600}};**

**-----**

**;Temps de traitement**

**;**

**EQUIVALENCE,{{t1,XX[80]},{t4,XX[81]},{t5,XX[82]},{t6,XX[83]}};**

**INTLC,{{t1,0.2},{t4,0.1},{t5,0.15},{t6,0.2}};**

**-----**

**;Temps de traitement tenant compte d'une disponibilité des activités de 90%**

**;**

**EQUIVALENCE,{{Tt1,XX[15]},{Tt4,XX[16]},{Tt5,XX[17]},{Tt6,XX[18]}};**

**INTLC,{{Tt1,0.215},{Tt4,0.111},{Tt5,0.166},{Tt6,0.222}};**

**-----**

**;Temps de transport interne**

**;**

**EQUIVALENCE,{{Ttrans1,XX[21]}};**

**EQUIVALENCE,{{Ttrans4,XX[22]},{Ttrans5,XX[23]},{Ttrans6,XX[24]}};**

**INTLC,{{Ttrans1,24},{Ttrans4,38},{Ttrans5,38},{Ttrans6,25}};**

**-----**

**;Temps de transport entre les sous-traitants et le réseau**

**;**

**EQUIVALENCE,{{Ttrans1\_ST1,XX[29]},{Ttrans1\_ST2,XX[30]},{Ttrans4\_ST1,XX[31]},{Ttrans4\_ST2,XX[32]}};**

**EQUIVALENCE,{{Ttrans5\_ST1,XX[33]},{Ttrans5\_ST2,XX[34]},{Ttrans6\_ST1,XX[35]},{Ttrans6\_ST2,XX[36]}};**

**;**

**INTLC,{{Ttrans1\_ST1,10},{Ttrans1\_ST2,12},{Ttrans4\_ST1,20},{Ttrans4\_ST2,15}};**

**INTLC,{{Ttrans5\_ST1,22},{Ttrans5\_ST2,13},{Ttrans6\_ST1,18},{Ttrans6\_ST2,20}};**

```

;-----
;Capacité de temps de production
;
EQUIVALENCE,{{CapTprod1,XX[39]}};
EQUIVALENCE,{{CapTprod4,XX[40]},{CapTprod5,XX[41]},{CapTprod6,XX[4
2]}};
;
INTLC,{{CapTprod1,delai1-Ttrans1}};
INTLC,{{CapTprod4,delai4-Ttrans4},{CapTprod5,delai5-
Ttrans5},{CapTprod6,delai6-Ttrans6}};
;-----
;Temps inter arrivée
;
EQUIVALENCE,{{Arrivee1,CapTprod1*0.9/XX[141]},{Arrivee4,CapTprod4*0.9
/XX[140]}};
EQUIVALENCE,{{Arrivee5,CapTprod5*0.9/XX[140]}};
EQUIVALENCE,{{Arrivee6,CapTprod6*0.9/RNORM(M6,E6,S6)}};
;-----
;Blockage des entités
;
;PRODUIT P111
EQUIVALENCE,{{BLOC6,XX[54]},{BLOC7,XX[55]},{BLOC17,XX[114]}};
INTLC,{{BLOC6,0},{BLOC7,0},{BLOC17,0}};
;
;PRODUIT P112
EQUIVALENCE,{{BLOC8,XX[56]},{BLOC9,XX[57]},{BLOC18,XX[115]}};
INTLC,{{BLOC8,0},{BLOC9,0},{BLOC18,0}};
;
;PRODUIT P122

```

**EQUIVALENCE,{{BLOC10,XX[58]},{BLOC11,XX[59]},{BLOC12,XX[60]},{BLOC13,XX[61]}};**  
**INTLC,{{BLOC10,0},{BLOC11,0},{BLOC12,0},{BLOC13,0}};**  
**;**  
**;PRODUIT P113**  
**EQUIVALENCE,{{BLOC14,XX[62]},{BLOC15,XX[63]},{BLOC19,XX[116]}};**  
**INTLC,{{BLOC14,0},{BLOC15,0},{BLOC19,0}};**  
**;**  
**-----**  
**;Répartition des demandes**  
**;**  
**;PRODUIT P111**  
**EQUIVALENCE,{{X111,XX[90]},{X111,XX[91]},{Z211,XX[92]}};**  
**;**  
**;PRODUIT P112**  
**EQUIVALENCE,{{X112,XX[93]},{X112,XX[94]},{Z212,XX[95]}};**  
**;**  
**;PRODUIT P122**  
**EQUIVALENCE,{{X122,XX[96]},{X122,XX[97]},{Z112,XX[98]},{Z212,XX[99]}};**  
**;**  
**;PRODUIT P113**  
**EQUIVALENCE,{{X113,XX[100]},{X113,XX[101]},{Z213,XX[102]}};**  
**;**  
**-----**  
**;Pannes**  
**;**  
**;ACT11**  
**EQUIVALENCE,{{MTBF11,EXPON(500,S1)},{MTTR11,EXPON(20,S1)}};**  
**EQUIVALENCE,{{MTBF11,EXPON(500,P1)},{MTTR11,EXPON(20,P1)}};**  
**;**



**;ACT12**

**EQUIVALENCE,{{MTBF12,EXPON(650,S4)},{MTTR12,EXPON(10,S4)}};**

**EQUIVALENCE,{{MTBF112,EXPON(650,P4)},{MTTR112,EXPON(10,P4)}};**

**;**

**;ACT22**

**EQUIVALENCE,{{MTBF22,EXPON(800,S5)},{MTTR22,EXPON(7,S5)}};**

**EQUIVALENCE,{{MTBF122,EXPON(800,P5)},{MTTR122,EXPON(7,P5)}};**

**;**

**;ACT13**

**EQUIVALENCE,{{MTBF13,EXPON(800,S6)},{MTTR13,EXPON(5,S6)}};**

**EQUIVALENCE,{{MTBF113,EXPON(800,P6)},{MTTR113,EXPON(5,P6)}};**

**;**-----

**;Nombre d'activité sup**

**;**

**EQUIVALENCE,{{W11,XX[117]},{W21,XX[118]},{W12,XX[119]}};**

**EQUIVALENCE,{{W22,XX[130]},{W13,XX[121]}};**

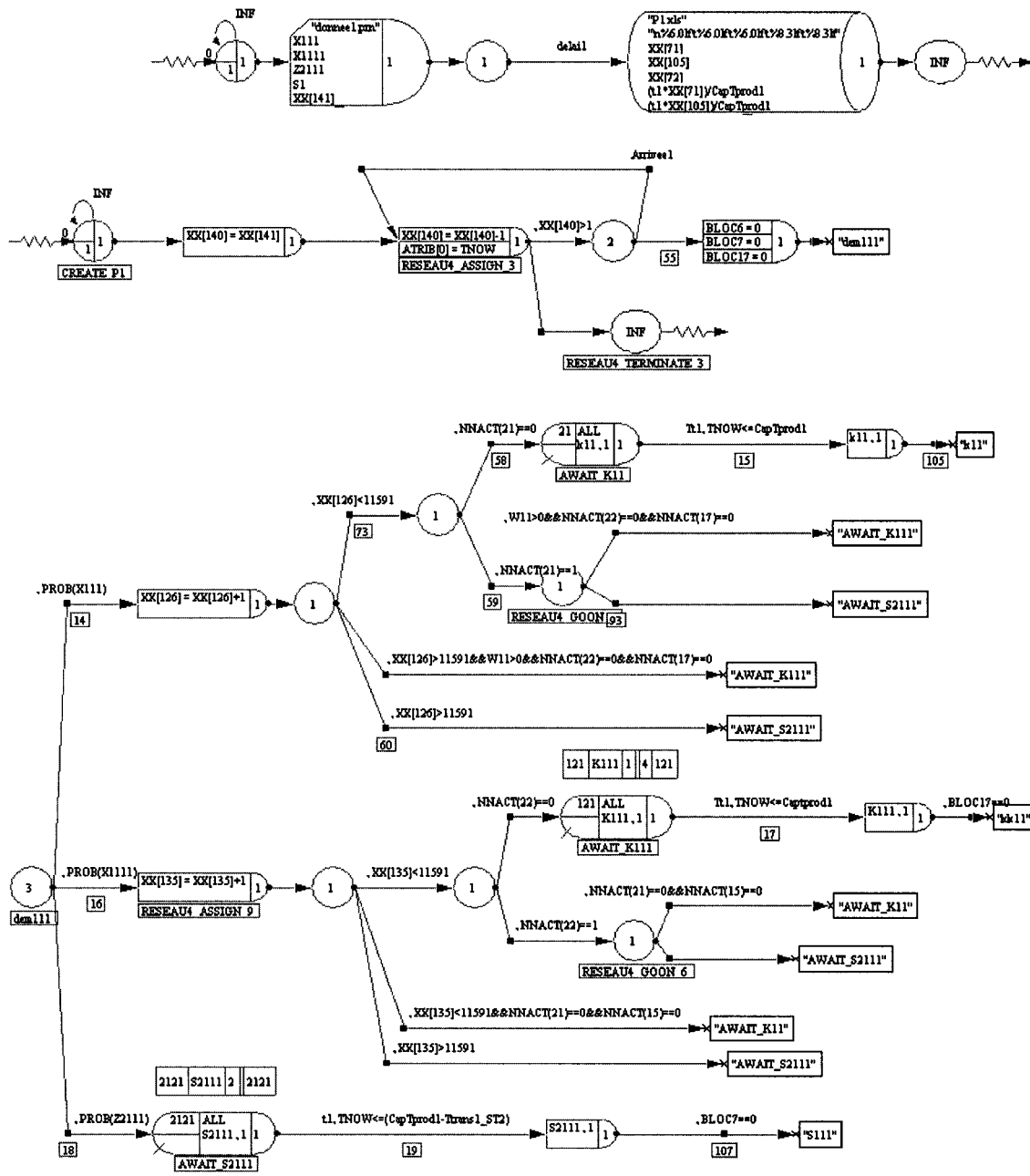
**INTLC,{{W11,1},{W12,0},{W22,1},{W13,1}};**

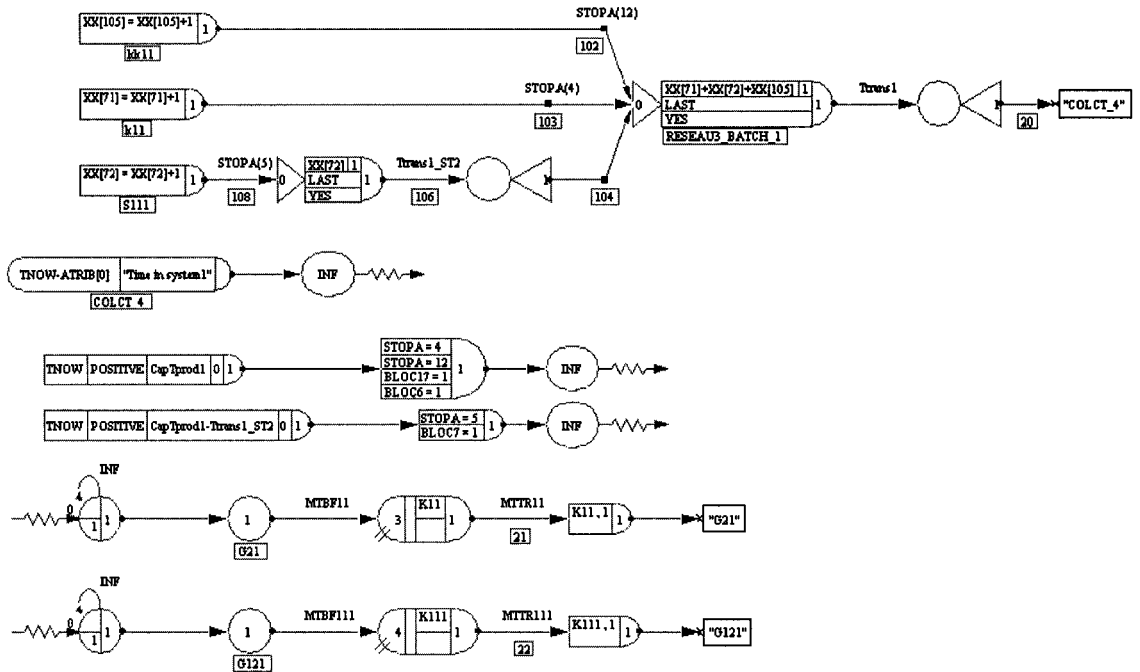
**;**-----

**FIN;**

### Réseau de simulation :

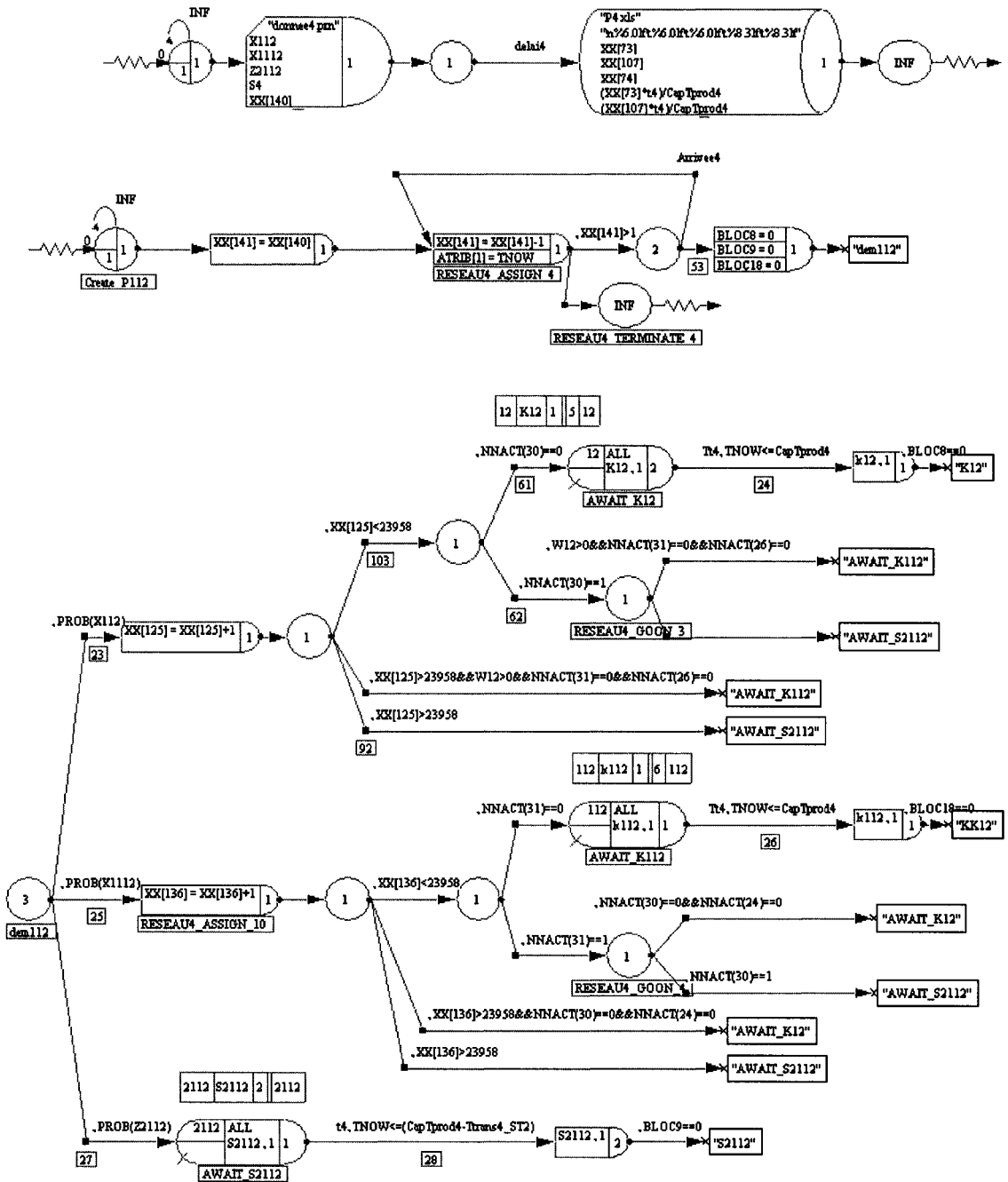
CENTRE DE PRODUCTION 1  
 PRODUITS: P111

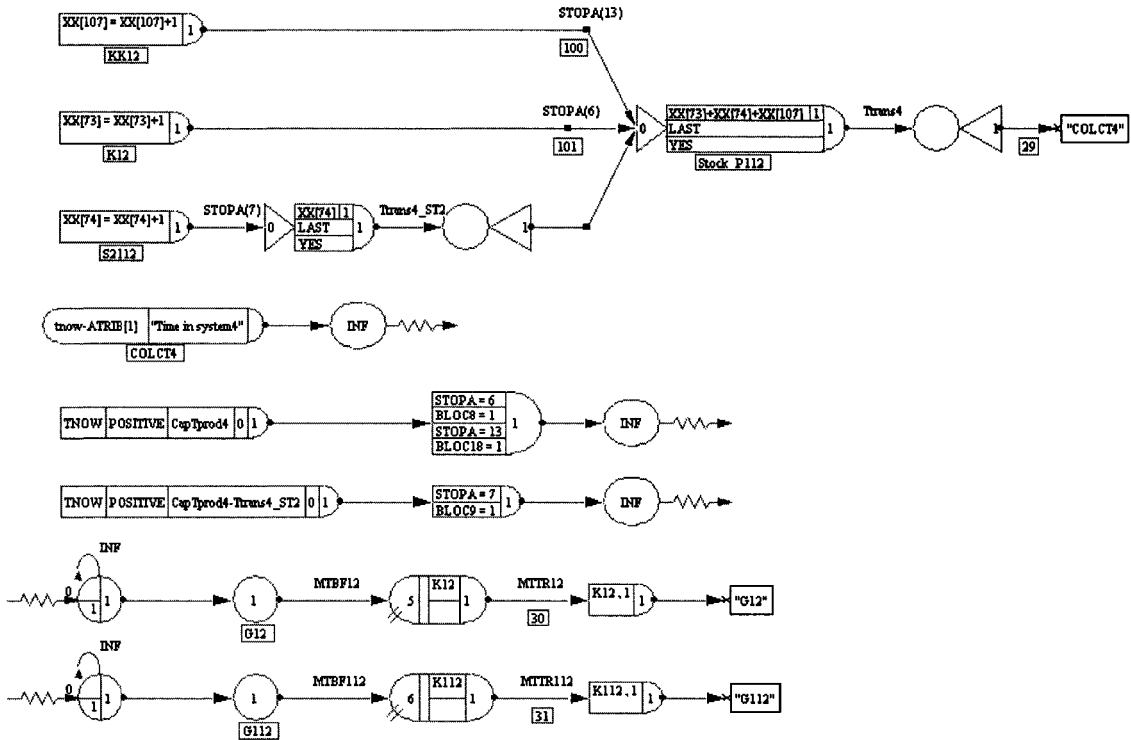




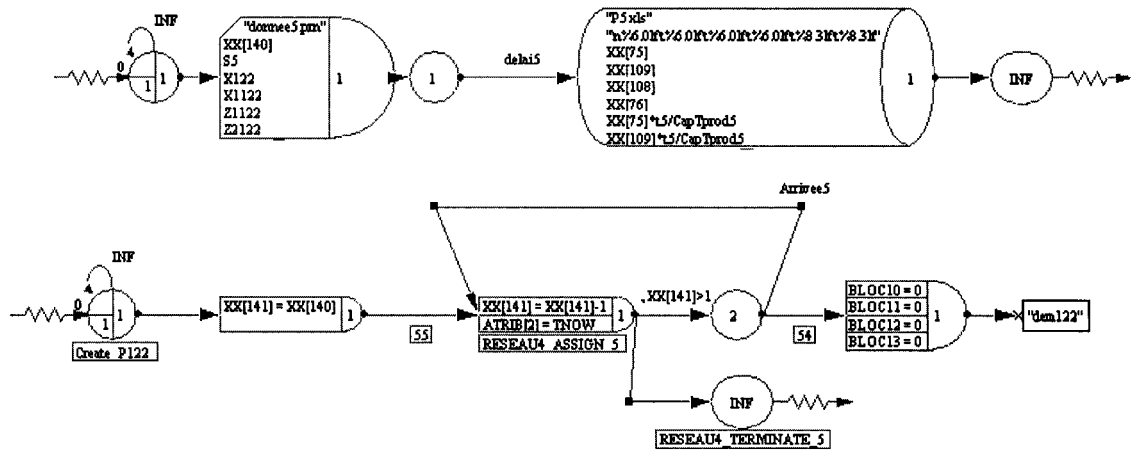
CENTRE DE PRODUCTION 2

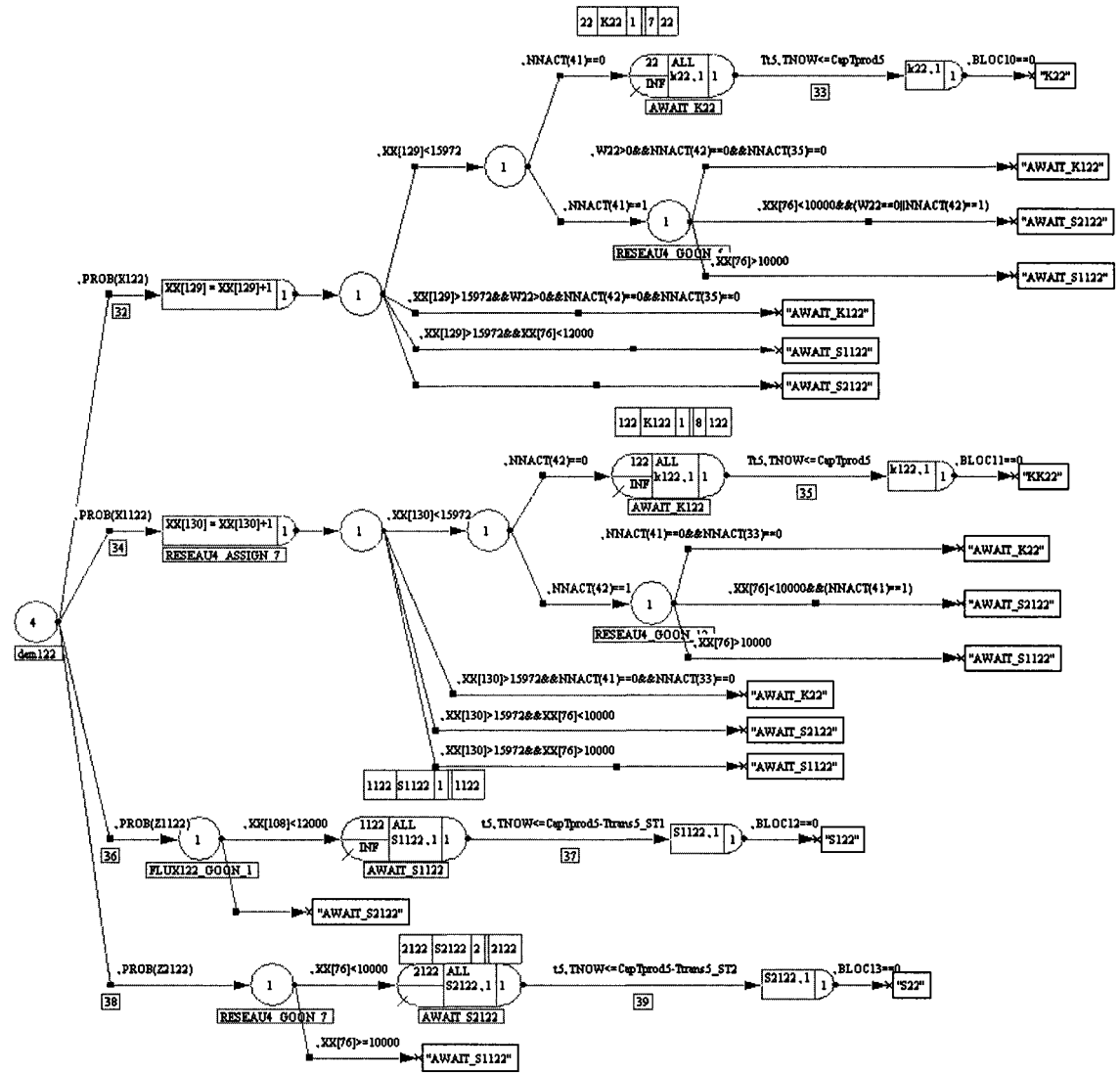
PRODUITS: P112

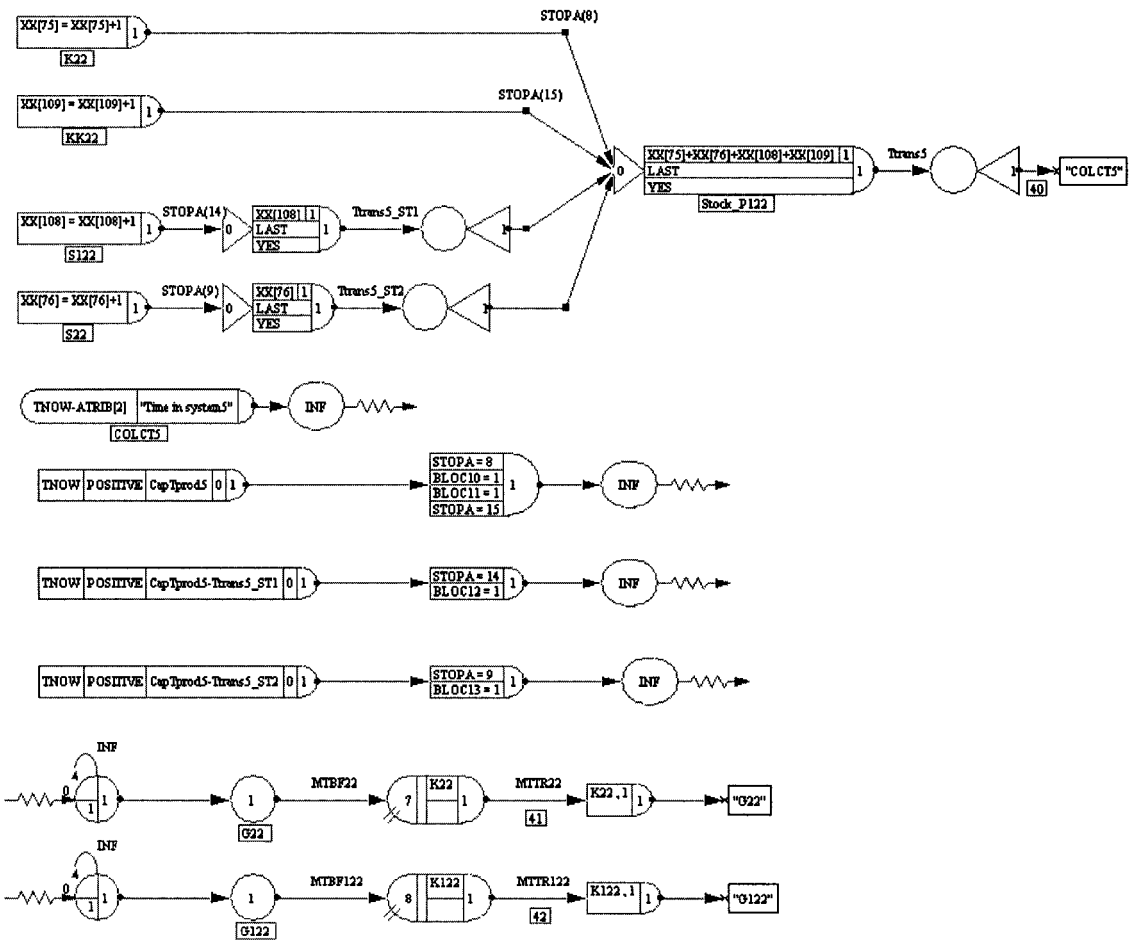




PRODUITS: P122

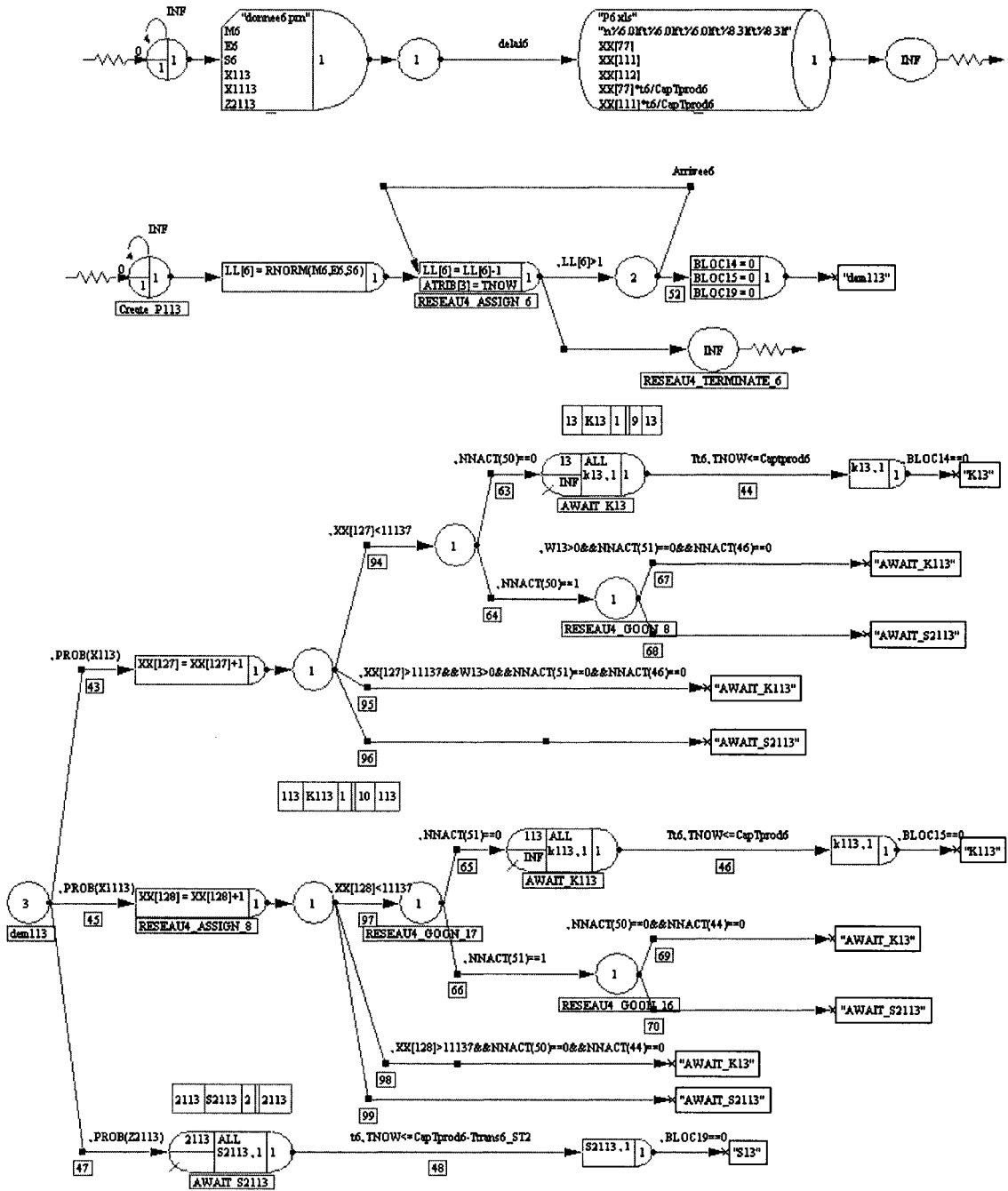


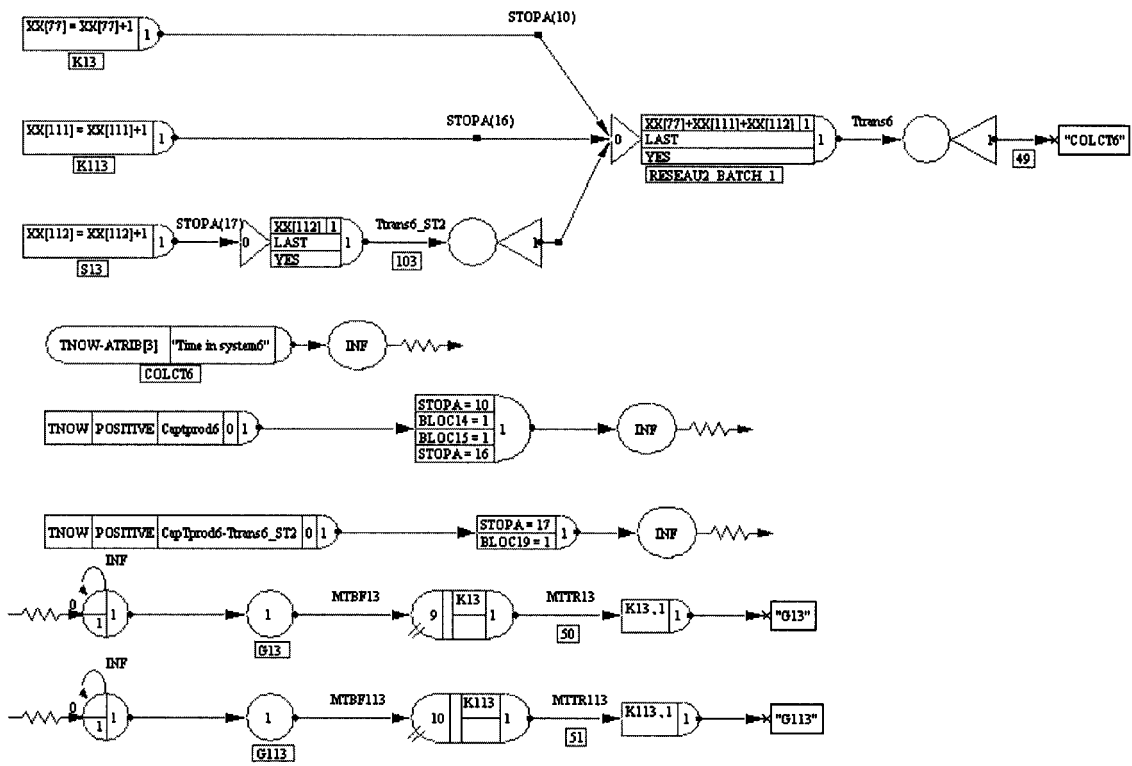






PRODUITS: P113





## **ANNEXE 3**

### **Résultats du modèle de simulation (validation)**

### Répartition des demandes pour les centres de production 1 et 2 :

Centre de production 1 :

Tableau XXV

Répartition de la demande du produit  $p_{111}$  générée par le modèle de validation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes				Sous-traitance		Moyennes des quantités livrées
			$Act_{11}$		$Act - sup_{11}$		$St_{1111}$		
Centre de production	Produits	Périodes	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	
1	$p_{111}$	1	11585	55	5604	23	0	0	17189
		2	11569	36	8430	49	0	0	19999
		3	11589	71	10681	17	0	0	22270
		4	11571	68	6926	44	0	0	18497
		5	11576	40	4422	29	0	0	15998

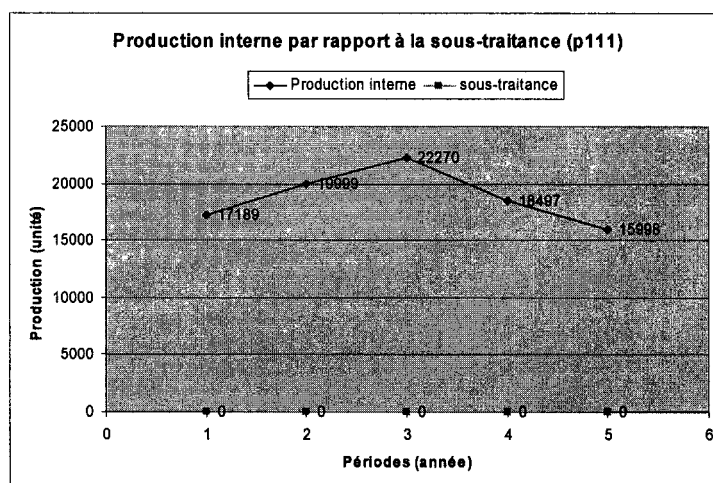


Figure 43 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{111}$  générée par le modèle de validation

Centre de production 2 :

Tableau XXVI

Répartition de la demande du produit  $p_{112}$  générée par le modèle de validation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes				Sous-traitance		Moyennes des quantités livrées
			$Act_{12}$		$Act - sup_{12}$		$St_{2112}$		
Centre de production	Produits	Périodes	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	
2	$p_{112}$	1	17199	0	0	0	0	0	17199
		2	20000	0	0	0	0	0	20000
		3	22272	0	0	0	0	0	22272
		4	18499	0	0	0	0	0	18499
		5	15698	0	0	0	0	0	15698

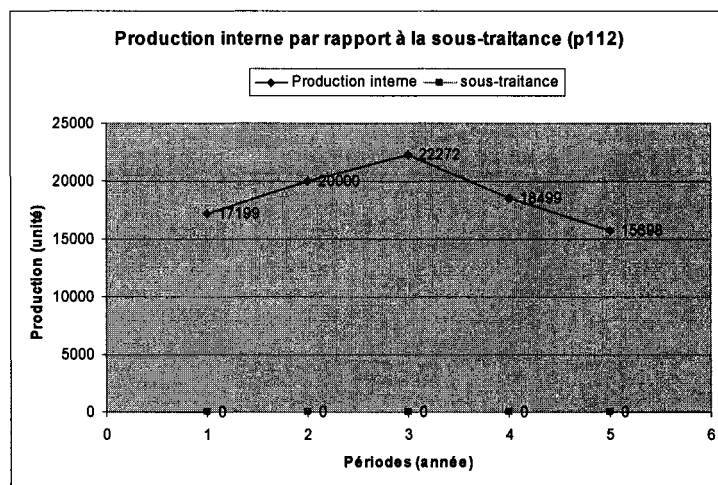
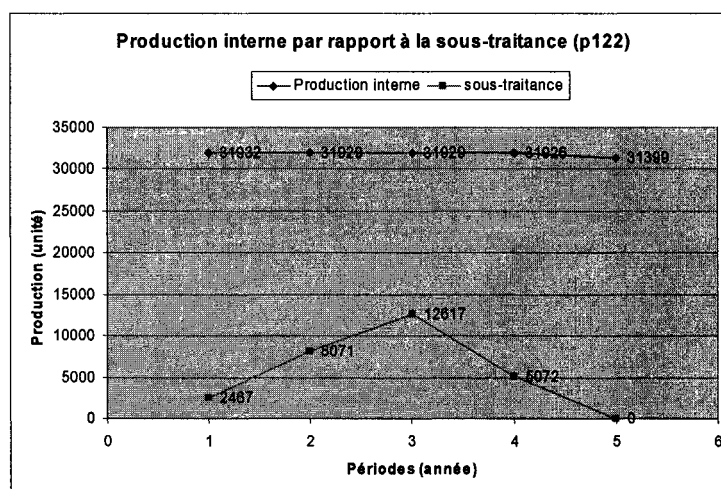
Figure 44 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{112}$  générée par le modèle de validation

Tableau XXVII

Répartition de la demande du produit  $p_{122}$  générée par le modèle de validation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance	Activités internes				Sous-traitance				Moyennes des quantités livrées
	$Act_{22}$		$Act - sup_{2,2}$		$St_{1122}$		$St_{2122}$		
	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	
Périodes	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	
1	15965	17	15967	13	2467	15	0	0	<b>34399</b>
2	15958	55	15971	50	8071	22	0	0	<b>40000</b>
3	15970	36	15959	48	12000	28	617	12	<b>44546</b>
4	15966	71	15960	27	5072	30	0	0	<b>36998</b>
5	15958	20	15441	36	0	0	0	0	<b>31399</b>

Figure 45 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{122}$  générée par le modèle de validation

## Taux d'occupations pour les centres de production 1 et 2 :

### Centre de production 1 :

Tableau XXVIII

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 1 générés par le modèle de validation

Centre de production	Périodes	$Act_{11}$		$Act - sup_{11}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type
1	1	0.89	0.003	0.44	0
	2	0.89	0.004	0.65	0.011
	3	0.89	0.005	0.83	0.002
	4	0.89	0.007	0.54	0.008
	5	0.89	0.008	0.32	0.002
Taux d'occupation moyen		0.89		0.56	

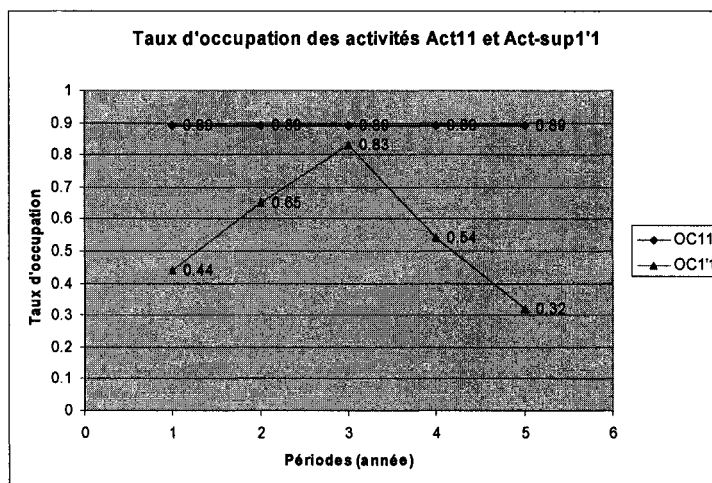


Figure 46 Taux d'occupation des activités  $Act_{11}$  et  $Act - sup_{11}$  générés par le modèle de validation

Centre de production 2 :

Tableau XXIX

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 2 générés par le modèle de validation

Centre de production	Périodes	$Act_{12}$		$Act - sup_{12}$		$Act_{22}$		$Act - sup_{22}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Écart Type	Moy	Ecart Type
2	1	0.65	0	0	0	0.9	0.003	0.9	0.004
	2	0.75	0.002	0	0	0.89	0.004	0.9	0.003
	3	0.84	0.002	0	0	0.9	0.003	0.9	0.003
	4	0.7	0	0	0	0.9	0	0.9	0
	5	0.59	0.001	0	0	0.89	0.002	0.89	0.003
Taux d'occupation moyen		0.71		0		0.9			

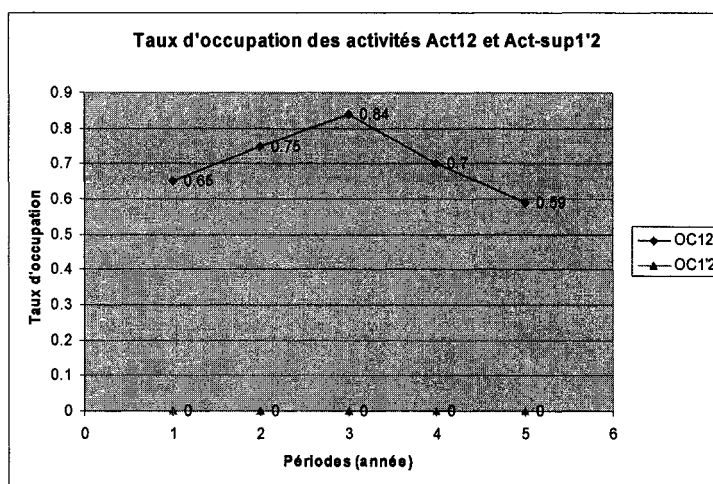


Figure 47 Taux d'occupation des activités  $Act_{12}$  et  $Act - sup_{12}$  générés par le modèle de validation



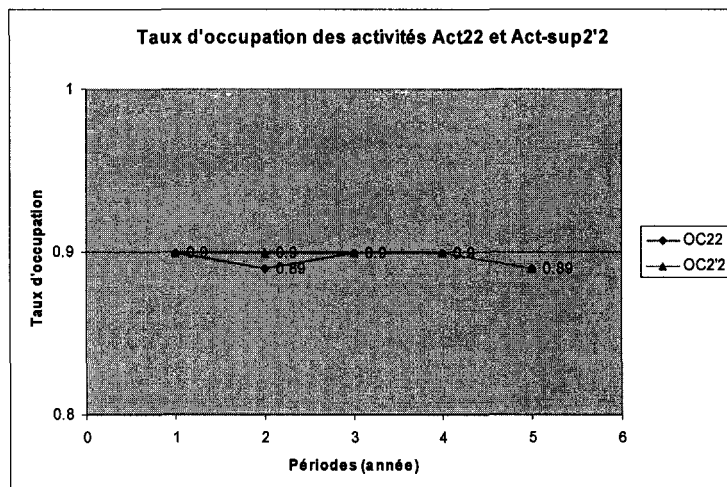


Figure 48 Taux d'occupation des activités  $Act_{22}$  et  $Act-sup_{2'2}$  générés par le modèle de validation

## **ANNEXE 4**

**Résultats du modèle de simulation par événements discrets  
(tenant compte des phénomènes aléatoires)**

## Répartition des demandes pour les centres de production 1 et 2 :

### Centre de production 1 :

Tableau XXX

Répartition de la demande du produit  $p_{111}$  générée par le modèle de simulation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes		Sous-traitance	Moyennes des quantités livrées
			$Act_{11}$	$Act - sup_{11}$	$St_{1111}$	
Centre de production	Produits	Périodes	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
1	$p_{111}$	1	10579	5364	522	<b>16465</b>
		2	10349	7682	807	<b>18837</b>
		3	10610	9949	923	<b>21483</b>
		4	10482	6601	578	<b>17662</b>
		5	10479	3919	439	<b>14837</b>

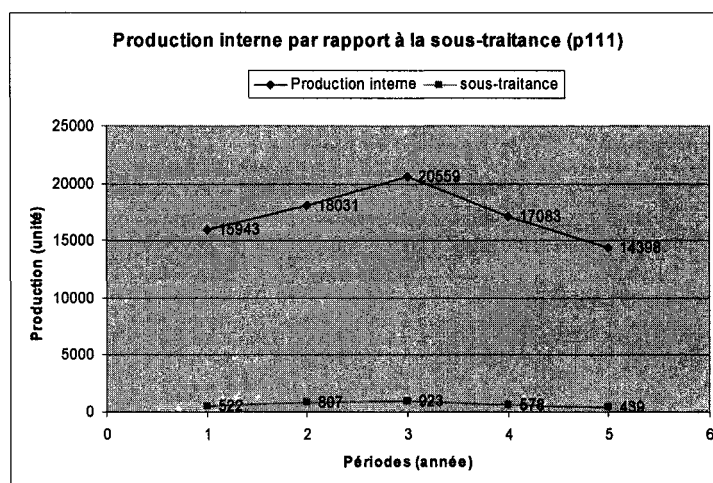


Figure 49 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{111}$  générée par le modèle de simulation

Centre de production 2 :

Tableau XXXI

Répartition de la demande du produit  $p_{112}$  générée par le modèle de simulation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes		Sous-traitance	Moyennes des quantités livrées
			$Act_{12}$	$Act - sup_{12}$	$St_{2112}$	
Centre de production	Produits	Périodes	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
2	$p_{112}$	1	16475	0	312	<b>16786</b>
		2	18858	0	332	<b>19190</b>
		3	21485	0	379	<b>21863</b>
		4	17684	0	300	<b>17984</b>
		5	14853	0	210	<b>15062</b>

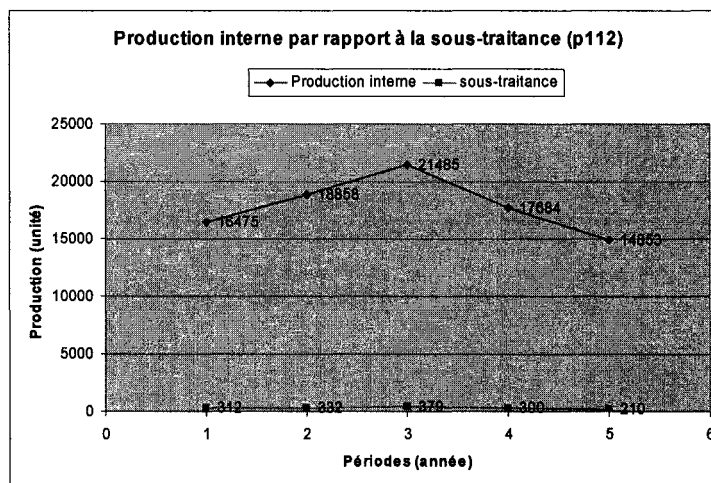
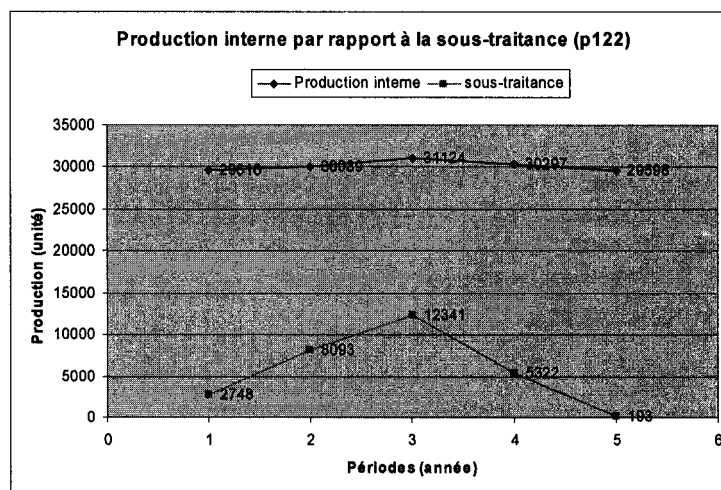


Figure 50 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{112}$  générée par le modèle de simulation

Tableau XXXII

Répartition de la demande du produit  $p_{122}$  générée par le modèle de simulation

Répartition des demandes entre la production interne et la sous-traitance			Activités internes		Sous-traitance		Moyennes des quantités livrées
			$Act_{22}$	$Act - sup_{2,2}$	$St_{1122}$	$St_{2122}$	
Centre de production	Produits	Périodes	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
2	$p_{122}$	1	14762	14854	2651	97	<b>32364</b>
		2	15006	15033	7891	202	<b>38132</b>
		3	15507	15617	11843	498	<b>43466</b>
		4	15182	15115	5178	144	<b>35619</b>
		5	14984	14614	182	11	<b>29790</b>

Figure 51 Répartition en interne et en externe de la demande du produit  $p_{122}$  générée par le modèle de simulation

## Taux d'occupations pour les centres de production 1 et 2 :

### Centre de production 1 :

Tableau XXXIII

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 1 générés par le modèle de simulation

Centre de production	Périodes	$Act_{11}$		$Act - sup_{11}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type
1	1	0.85	0.03	0.43	0.02
	2	0.83	0.06	0.62	0.07
	3	0.85	0.03	0.8	0.03
	4	0.84	0.05	0.53	0.04
	5	0.85	0.05	0.31	0.03
Taux d'occupation moyen		0.84		0.54	

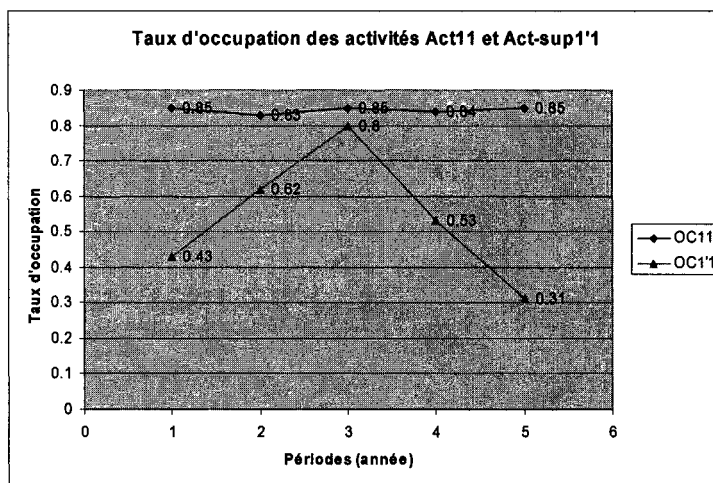


Figure 52 Taux d'occupation des activités  $Act_{11}$  et  $Act - sup_{11}$  générés par le modèle de simulation

Centre de production 2 :

Tableau XXXIV

Taux d'occupation des activités appartenant au centre de production 2 générés par le modèle de simulation

Centre de production	Périodes	$Act_{12}$		$Act - sup_{1'2}$		$Act_{22}$		$Act sup_{2'2}$	
		Moy	Ecart Type	Moy	Ecart Type	Moy	Écart Type	Moy	Ecart Type
2	1	0.62	0.03	0	0	0.83	0.07	0.83	0.07
	2	0.7	0.06	0	0	0.84	0.06	0.84	0.06
	3	0.8	0.02	0	0	0.87	0.01	0.88	0.01
	4	0.66	0.04	0	0	0.85	0.04	0.85	0.03
	5	0.55	0.04	0	0	0.84	0.05	0.82	0.05
Taux d'occupation moyen		0.67		0		0.85		0.84	

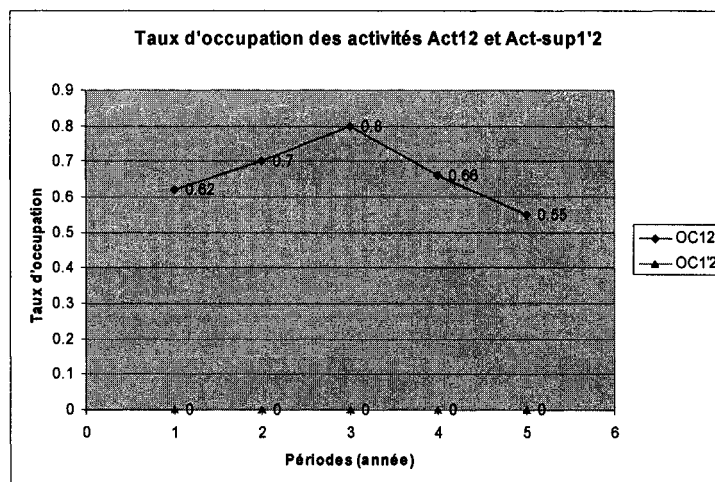


Figure 53 Taux d'occupation des activités  $Act_{12}$  et  $Act - sup_{1'2}$  générés par le modèle de simulation

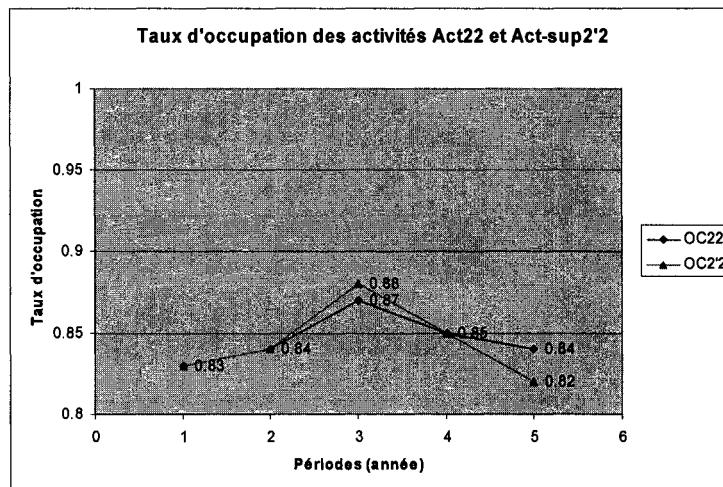


Figure 54 Taux d'occupation des activités  $Act_{22}$  et  $Act - sup_{2'2}$  générés par le modèle de simulation



## BIBLIOGRAPHIE

Ahmadi, R.H. et Tang, C.S. (1994). Production allocation with dual provisioning. *European Journal of Operational Research*, vol 75, pp 186-199.

Alfieri, A. et Brandimarte, P. (1997). Object-oriented modelling and simulation of integrated production/ distribution systems. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol 10, pp 261-266.

Arntzen, B.C., Brown, G., Harrison, T.P. et Trafton, L. (1995). Global supply chain Management at Digital Equipment Corporation. *Interface*, vol 25 (1), pp 69-93.

Archibald, G., Karabakal, N. et Karlsson, P. (1999). Supply chain vs. Supply chain: using simulation to compete beyond the four walls. In: *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.

Axsäter, S. (1993). Continuous review policies for multi-level inventory systems with stochastic demand. *S.C. Graves et al., Eds., Handbooks in OR & MS*, Vol 4.

Ballou, H. R. (1992). Business logistics management. *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, Third Edition.

Balou, R. H. (1995). Logistics network design: modeling and informational considerations. *The International Journal of Logistics Management*, vol 6, N°2, pp 39-54.

Barreyre, P.Y. (1991). La sous-traitance à l'heure des nouvelles politiques d'impartition. *Encyclopédie du management Tome II*, Édition Vuibert, Paris, France.

Beamon, B.M. (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. *International journal of production economics*, vol 55, pp 281-294.

Berry, D. et Naim, M. (1996). Quantifying the relative improvements of redesign strategies in a PC supply chain. *International Journal of Production Economics*, vol 46-47, pp 181-196.

Bouchriha, H. (2002). Faire ou Faire-Faire dans la conception d'une chaîne logistique : un outil d'aide à la décision. *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.

- Brandenburger, A.M. et Nalebuff, B.J. (1995). The right game: Use game theory to shape strategy. *Harvard Business Review*, juillet-août, pp 57-71.
- Brown, G.G., Graves, G.W. et Honczarenko, M.D. (1987). Design and operation of a multicommodity production/ distribution system using promal goal decomposition. *Management science*, vol 33 (11), pp 1469-1480.
- Bundschuch, M., Klabjan, D. et Thurston, D.L. (2003). Modeling robust and reliable supply chains. *University of Illinois at Urbana-Champaign*, june.
- Camm, J.D., Chorman, T.E., Dill, F.A., Evans, J.R., Sweeney, D.J. et Wegryn, G.W. (1997). Blending OR/MS, Judgment and GIS : Restructuring P&G's supply chain. *Interfaces*, vol 27, N°1, pp128-142.
- Caravelli, A.C. (2003). Flexibility configurations for the supply chain management. *International Journal of Production Economics*, vol 85, pp 141-153.
- Cavory, G., Frayret, J.M. et D'Amours, S. (2000). Conception des réseaux logistiques : Mesure de fiabilité et planification d'accélérateurs. RIRL 2000, *les troisièmes rencontres internationales de la recherche en logistique*, Trois Rivières.
- Cohen, M.A. et Lee, H.L. (1989). Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. *Journal of Manufacturing and Operations Management*, vol 2, pp 81-104.
- D'Amours, S., Montreui, B. et Soumis, F. (1996). Price-based planning and scheduling of multi-product orders in symbiotic manufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, vol 96, pp 146-166.
- Davis, T. (1993). Effective supply chain management. *Sloan management review*, pp 35-46.
- Diks, E.B., Kok, A.G. et Lagodimos, A.G. (1996). Multi-echelon systems: A service measure perspective. *European Journal of Operational Research*, vol 95, pp 241-263.
- Dogan, K. et Goetschalkx, M. (1999). A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. *Research Report, IIE Transactions*, vol 31(11), pp 1027- 1036.

Frayret, J.M., D'Amours, S., Montreuil, B. et Cloutier, L. (2000b). A network approach to design agile manufacturing systems. *Journal international production économique*, vol 74, N°1-3, pp 239-259.

Frayret, J.M., D'Amours, S. et Montreuil, B. (2000a). Cadre coopératif pour la gestion des réseaux manufacturiers. *Compte rendu de la troisième conférence internationale sur la recherche en logistique*, Trois Rivières.

Frizelle, G., Farlane, D.M. et Bongaerts, L. (1998). Disturbance measurement in manufacturing production systems. *In proceeding of ASI 98*, Bremen, June.

Forrester, J. (1961). Industrial dynamics. *MIT Press*, Cambridge.

Gaucher, S., Hovelaque, V. et Soler, L. G. (2000). Coordination entre producteurs et maîtrise des aléas de demande. *Cahier d'économie et sociologie rurale*.

Geller, T.L., Lammers, S.E. et Mackulack, G.T. (1995). Methodology for simulation application to virtual manufacturing environments. *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, Piscataway, N.J, pp 909-916.

Geoffrion, A. M. et Graves, G.W. (1974). Multicommodity distribution system design by benders decomposition. *Management Science*, vol 20 (5), pp 822-844.

Gomes-Casseres, B. (1994). Group versus Group : How alliance networks compete. *Harvard Business Review*, vol 4, pp 4-11.

Hafeez, K., Griffiths, M., Griffiths, J. et Naim, M. (1996). Systems design of two-echelon steel industry supply chain. *International Journal of Production Economics*, vol 45, pp 121-130.

Hafsi, T. et Toulouse, J.M. (1996). La stratégie des organisations : une synthèse. Les éditions transcontinental, Montréal, Canada, Vol33, pp 621-627.

Hadj-Hamou, M.K. (2002). Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche de contraintes. *Thèse de doctorat*, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

Hallikas, J., Virolainen, V. M. et Tuominen, M. (2002). Risk analysis and assessment in network environments: a dyadic case study. *International Journal of Production Economics*, vol 78, pp 45-55.

- Hicks, D.A. (1999). A four step methodology for using simulation and optimization technologies in strategic supply chain planning. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- Hsieh, S.J (2002). Hybrid analytic and simulation models for assembly line design and production planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol 10, pp 87-108.
- Indefurth, K. (1994). Safety stocks in multistage, divergent inventory systems: A survey. *International Journal of Production Economics*, vol 35, pp 321-329.
- Jain, S., Collins, L., Workman, R. et Ervin, E. (2001). Development of a high-level supply chain simulation model. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*.
- Kissani, I. et Martel, A. (2003). Design du réseau logistique des entreprises de pâte et papier. *Acte du 5<sup>ième</sup> congrès international de génie industriel*, Quebec, Octobre.
- Lee, H.L. et Billington, C. (1992). Managing supply chain inventory: Pitfalls and opportunities. *Sloan Management Review*, vol 33, N°3, pp 65-73.
- Lee, H. L. et Billington, C. (1993). Material management in decentralized supply chain. *Operation Research* , Vol 41, N°5, pp 835-847.
- Lee, Y. H. et Kim, S. H. (2000). Optimal production-distribution planning in supply chain management using a hybrid simulation-analytic approach. *Proceeding of the 2000 winter simulation conference*, pp1252-1259.
- Martel, A. et Vankatadri, U. (1999). Optimizing supply chain network structures under economics of scale. *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Production Mangement*, Glasgow, UK.
- Mason-Jones, R. et Towill, D.R. (2000). Coping with uncertainty: reducing “Bullwhip” behaviour in global supply chains. *Supply chain forum*, N°1, pp 40-45.
- Meixell, M.J., Shaw, N.C. et Tuggle, F.D. (2002). The use of knowledge management methodologies to improve the practice of supply chain management : the case study of the Bullwhip effect. *ECIS*, june 6-8, Gdansk, Poland.

Mile, R.E. et Snow, C.C. (1986). Strategy under complexity: Fostering Generative Relationships. *Long range planning*, vol 29, N°2, pp 215-231.

Min, H. et Zhou, G. (2002). Supply chain modeling : past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, vol 43, pp 231-249.

Mirabedini, A., D'Amours, S. et Daoud, A.K. (2001). Tactical planning of reliable supply chain. *Computer & Industrial Engineering International Conference*, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, pp 306-311.

Montreuil, B., Frayret, J.M et D'Amours, S. (1999). A strategic Framework for networked manufacturing. *Computer for industry*, vol 42, N°2-3, pp 299-317.

Morvan, Y. (1991). Réseaux et coopérations inter-firmes. *In Fondements d'économie industrielle, coll. Gestion, Economica*, pp 461-484.

Narahari, Y. et Biswas, S. (2000). Supply Chain Management : Modeling and decision making, invited paper. *International conference on flexible autonomous, manufacturing systems*, Coimbatore Institute of technology, Coimbatore.

Olivier, C., Montreuil, B., Lefrançois, P. et Maley, J.G. (1994). Evaluating layouts for mass customizing factories. *Proceeding for 10<sup>th</sup> ISPE/IFAC international conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*, Ottawa, Toronto, pp 262-869.

Olivier, C., Montreuil, B. et Lefrançois, P. (1996). A conceptual framework for planning and control of virtual manufacturing networks in agile production context, *Proceedings of Rensselaer's Fifth International Conference*, Grenoble, France, pp 154-159.

Olivier, C. (1998). Méthodologie d'évaluation des aménagements d'usines organisées en réseaux de processeurs. *Thèse de doctorat non publiée*, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Ste-Foy, Quebec.

Paquet, M., Martel, A. et Desaulniers, G. (2004). Including technology selection decisions in manufacturing network design models. *International journal of computer integrated manufacturing*, vol 17-2, pp 117-125.

Persson, F.J. et Olhager, D. (2002). Performance simulation of supply chain design. *International Journal of Production Economics*, vol 77, pp 231-245.

Pritsker, A.A.B. et O'Reilly, J.J. (1999). Simulation with Visual SLAM and AweSim, 2<sup>ème</sup> édition, John Wiley & sons, York, N.Y.

- Poter, M.E. (1985). Competitive advantage : Creating and sustaining superior performance. *The Free Press*.
- Ramudhin, A., Montreuil, B. et Lefrançois, P. (1994). Scheduling project activities in a distributed environment. *European Journal of Operational Research*, vol 72 (2), pp 242-251.
- Ramudhin, A., Lefrançois, P., D'Amours, S. et Montreuil, B. (1996). A decision support system for operations scheduling in a distributed environment. *Journal des systèmes de décisions*, vol 5, N°1-2, pp 51-71.
- Sabri, E.H. et Beamon B.M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *OMEGA, the international journal of management Science*, N°28, pp 581-598.
- Stadler, H. (2000). Personal communication, Modelling features in two APS systems.
- Slats, P.A., Bhola, B., Evers, J. et Dijkhuizen, G (1997). Logistic chain modeling, Logistic chain modeling. *European Journal of Operation Research*, vol 87, N°1, pp 1-20
- Terzi, S. et Cavalieri, S. (2004). Simulation in the supply chain context : a survey. *Computers in Industry*, vol 53, pp 3-16.
- Truong, T.H. et Azadivar, F. (2003). Simulation based optimization for supply chain configuration design. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*.
- Towill, D.R. (1991). Supply chain dynamics. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol 4, N°4, pp 197-208.
- Towill, D.R., Naim, M.M. et Wikner, J. (1992). Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains. *International Journal of physical Distribution and Logistics Management*, vol 22, N°5, pp 3-13.
- Vidal, C.J et Goetschalkx, M. (1996). The role and limitation of quantitative techniques in the strategic design of global logistics systems. *CIBER Research report*, Georgia Institute of Technology.

Viswanadham, N. et Gaonkar, R.S. (2003). Partner selection and synchronized planning in dynamic manufacturing networks. *IEEE, Transactions on Robotics and Automation*, vol 19, N°1, pp 117-130.

Vila, D., Martel, A. et Beauregard, R. (2003). Le design stratégique de la supply chain dans l'industrie du bois d'œuvre. *Acte du 5<sup>ième</sup> congrès international de génie industriel*, Quebec, Octobre.

Voudouris, V.T. (1996). Mathematical programming techniques to debottleneck the supply chain of fine chemical industries. *Computer chem. Engng*, vol 20, pp 1269- 1274.

Wikner, J., Towill, D.R. et Naim, M. (1991). Smoothing supply chain dynamics, *International Journal of Production Economics*, vol 22, N°3, pp 231-248.

Weber, C.A., Current, J.R. et Benton, W.C. (1991). Vendor selection criteria and methods. *European Journal of Operational Research*, N°5, pp 2-18.

Zulch, G., Jonsson, U. et Fischer, J. (2002). Hierarchical simulation of complex production systems by coupling of models. *International Journal of Production Economics*, vol 77, pp 39-51.