



HAL
open science

Optimisation combinée des coûts de transport et de stockage dans un réseau logistique dyadique, multi-produits avec demande probabiliste

Khaled Bahloul

► **To cite this version:**

Khaled Bahloul. Optimisation combinée des coûts de transport et de stockage dans un réseau logistique dyadique, multi-produits avec demande probabiliste. Recherche opérationnelle [math.OC]. INSA de Lyon, 2011. Français. NNT: . tel-00695275

HAL Id: tel-00695275

<https://theses.hal.science/tel-00695275>

Submitted on 7 May 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

INFOMATHS : Ecole Doctorale 512 Informatique et Mathématique de Lyon

THESE DE DOCTORAT

Optimisation combinée des coûts de transport et de stockage dans un réseau logistique dyadique, multi-produits avec demande probabiliste

Pour obtenir le grade de docteur en informatique

Spécialité productique

Par

Khaled BAHLOUL

(Ingénieur en informatique)

Soutenue publiquement le 08 Avril 2011 devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs :	Pr. Bernard Grabot (Ecole Nationale d'Ingénieurs de TARBES) Pr. Van-Dat Cung (Institut Polytechnique de GRENOBLE)
Examineurs :	Pr. Pierre Baptiste (Ecole polytechnique de MONTREAL, Canada) Pr. Samir Lamouri (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métier, PARIS) Dr. Naoufel Cheikhrouhou (Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse)
Directeur de thèse :	Pr. Jean Pierre Campagne (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon)
Co-directeur de thèse	Dr. Armand Baboli (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. le professeur Jean-Pierre CAMPAGNE et M. Armand BABOLI. Ce travail ne serait pas ce qu'il est sans leur présence, leur disponibilité, leur générosité, leur rigueur scientifique, leur enthousiasme et leurs précieux conseils qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens aussi à remercier M. le professeur Pierre BAPTISTE pour m'avoir accueilli dans son équipe de recherche à l'Ecole Polytechnique de Montréal dans le cadre d'un stage Explora-Doc. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, pour toutes ces discussions scientifiques et autres, qui m'ont permis d'avancer dans mes travaux, qui m'ont fait réfléchir et qui m'ont inspiré. Je voudrais encore le remercier infiniment pour avoir accepté d'être membre de mon jury.

Toute ma gratitude s'adresse à M. Bernard Grabot, Professeur, à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de TARBES et M. Van-Dat Cung, Professeur à l'Institut Polytechnique de GRENOBLE, rapporteurs, pour leur intérêt porté à ce travail et pour leurs remarques constructives et enrichissantes qui ont permis d'obtenir cette version finale du manuscrit.

Je remercie aussi M. Samir Lamouri, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métier, PARIS et M. Naoufel Cheikhrouhou, Docteur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE, Suisse pour le crédit qu'ils ont bien voulu accorder à ma thèse en faisant partie du jury.

Je remercie également tous mes collègues de bureau pour l'ambiance chaleureuse de travail qu'ils maintiennent au quotidien. Une pensée particulière à Omar SAKKA, Rym BENBACHOUCH, Ahlem ZAYETI et notre aimable secrétaire Nadira MATAR, qui m'ont tellement facilité la vie avec leur bonne humeur, leur bonne volonté et leur constante disponibilité.

Je remercie tous mes amis : Noomen, Sodki, Néjib, Omar, Walid, Amin, Walf, Haytham, Dhia, Hamza, Kaouthar, Wafa, ... qui m'ont toujours encouragés et soutenus.

Merci à tous ceux qui y ont cru à moi.

Khaled BAHLOUL

Dédicaces

Je dédie du plus profond de mon cœur ce travail, à mes chers parents Taoufik et Leila, à mon grand-père Mohamed, à toute ma famille proche. C'est grâce à leur soutien, leur patience et leur amour que je suis là aujourd'hui. Je leur suis très reconnaissant pour les sacrifices qu'ils ont dû faire pendant mes longues années d'études et d'absence.

A ma fiancée Marwa, pour la patience et le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse.

Khaled BAHLOUL

Résumé

Le but de cette thèse est de proposer des méthodes de gestion des approvisionnements adaptées à des contextes particuliers afin de minimiser les coûts logistiques engendrés dans un réseau logistique multi produits, multi niveaux confronté à une demande probabiliste.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes attachés à :

- Proposer des méthodes de gestion des stocks et du transport pour des familles de produits dans différents contextes :
 - o Une première politique de réapprovisionnement est proposée pour une famille de produits caractérisée par une demande aléatoire et répétitive. Cette politique est définie par un niveau de commande et par un niveau de ré-complètement de stock pour chaque produit et une période de réapprovisionnement. Dès qu'un produit atteint le niveau de commande, un réapprovisionnement de tous les produits de la famille est déclenché.
 - o Une deuxième politique de réapprovisionnement est proposée pour une famille de produits caractérisée par une demande très aléatoire et ponctuelle. Cette politique est basée sur les ruptures de stock. A chaque rupture d'un produit présent dans le stock il y a déclenchement d'un réapprovisionnement de tous les produits de la famille.
- Proposer une méthode de classification multicritères afin de constituer des groupes de produits relevant d'une politique donnée, chaque classe ou famille regroupant des produits réagissant identiquement. Cette classification des produits en familles homogènes permet d'identifier les caractéristiques déterminantes dans le choix des méthodes de gestion de stock et de transport.
- Analyser et comparer les performances de ces deux politiques d'approvisionnement par rapport à des politiques de référence, ainsi que leur sensibilité au regard de quelques paramètres discriminants : variabilité de la demande ; coût des produits ; coût des commandes urgentes...

Abstract

The aim of this work is to propose methods of inventory management tailored to specific contexts in order to minimize logistics costs incurred in a logistics network multi-product, multi-level faces a probabilistic demand.

In my research work, we have focused on the following scientific key-issues:

- The proposal of methods of inventory and transportation management for products families in different contexts
 - The first one is defined to solve the problems identified in a product family characterized by a variable and repetitive demand. This policy is defined by an ordering and a replenishment level for each product and a periodic review. As soon as a product reaches the ordering level, replenishment of the same family products is triggered.
 - The second one is dedicated to a product family which is characterized by a very punctual and variable demand. This policy is based on inventory shortages. Each shortage of a product in store triggers replenishment of all products of the same family.
- The proposal of a multi-criteria classification method in order to select the suitable inventory management method according to specificities of the product and the demand
- The analysis and performance comparison of the two procurement policies proposed with standard policies, and their sensitivity with respect to some parameters discriminating: demand variability, cost of products, cost of rush orders.

Table de matière

Chapitre 1	: Contexte & problématique	1
1.1	Introduction	2
1.2	Cadre de travail	2
1.2.1	Gestion de la chaîne logistique	2
1.2.2	Gestion de stock	3
1.2.3	Gestion du transport	4
1.2.4	La gestion combinée des stocks et du transport	5
1.3	L'optimisation des coûts logistiques pour un niveau de service donné	6
1.4	Solution proposée	6
1.5	Structure du mémoire	8
1.6	Conclusion	9
Chapitre 2	: Etat de l'art	11
2.1	Bref historique	12
2.2	Chaîne logistique	12
2.2.1	Structure des chaînes logistiques	14
2.2.2	Différents flux dans la chaîne logistique	15
2.2.3	Niveaux de décision	15
2.2.4	Demande	16
2.3	Gestion de stock	17
2.4	Gestion de transport	20
2.5	Optimisation des coûts logistiques	23
2.5.1	Décision centralisée / décentralisée	23
2.5.2	Optimisation intégrée des coûts logistiques	25
2.5.3	Travaux de recherche étudiés	27
2.5.4	Identification des problématiques de recherche	28

2.5.5	Analyse des solutions proposées.....	30
2.6	Synthèse des travaux étudiés.....	32
2.6.1	Optimisation concentrée sur les politiques de stock	32
2.6.2	Optimisation concentrée sur les politiques de transport	33
2.6.3	Chaine logistique étudiée: multi produits, multi échelons, demande	34
2.6.3.1	Mono ou multi produits	34
2.6.3.2	Deux ou plusieurs échelons.....	35
2.6.3.3	Demande déterministe ou probabiliste	35
2.6.4	Méthode de résolution.....	36
2.7	Gestion des ruptures de stock.....	36
2.8	Politique de réapprovisionnement pour une gestion multi-produit.....	39
2.9	Conclusion	42
Chapitre 3 : Optimisation combinée des coûts logistiques.....		43
3.1	Introduction.....	44
3.2	Système étudié.....	45
3.2.1	Caractérisations des produits.....	45
3.2.2	Hypothèses	45
3.2.3	Exigence du système de gestion de stock et de transport.....	46
3.2.4	Caractéristique de la demande	47
3.3	Proposition d'une nouvelle politique de réapprovisionnement	47
3.4	Calcul des paramètres S , T , s' et s''	49
3.4.1	Calcul du niveau de rechargement S	49
3.4.2	Calcul de la période de réapprovisionnement T	50
3.4.3	Calcul du niveau de commande urgente s' et du niveau s''	52
3.5	Fonctions de calcul des coûts logistiques.....	52
3.6	Optimisation du coût logistique total.....	55

3.6.1	Fonctionnement d'une heuristique.....	55
3.6.2	Position générale.....	56
3.6.3	Principes de base.....	56
3.6.4	Organigramme de la méthode heuristique.....	57
3.7	Expérimentation et validation.....	61
3.7.1	Comparaison par rapport à la politique (R, S).....	61
3.7.1.1	Politique (R, S).....	61
3.7.1.2	Les règles décisionnelles pour la politique (R, S):.....	61
3.7.1.3	Intervalle de réapprovisionnement (T).....	62
3.7.1.4	Niveau de commande (S).....	62
3.7.1.5	Calcul des coûts logistiques.....	63
3.7.2	Expérimentation.....	63
3.8	Conclusion.....	69
Chapitre 4 : Optimisation des coûts logistiques dans le cas des commandes urgentes 71		
4.1	Introduction.....	72
4.2	Caractérisation du contexte d'application.....	72
4.3	Méthode d'approvisionnement proposée.....	73
4.3.1	Première étape : un réapprovisionnement continu.....	74
4.3.1.1	Modèle agrégé.....	74
4.3.1.2	Définition des variables utilisées.....	77
4.3.2	Deuxième étape: niveaux de reemplètement.....	79
4.4	Optimisation mathématique : détermination des niveaux optimaux de reemplètement	
V	83	
4.4.1	Etude de la convexité:.....	83
4.4.2	Recherche du vecteur des niveaux de reemplètement optimaux : proposition d'une heuristique d'optimisation.....	83
4.5	Expérimentation et discussion.....	87
4.5.1	Politique de référence:.....	88

4.5.1.1	Détermination des niveaux s et S.....	88
4.5.1.2	Calcul des coûts :	89
4.5.2	Validation.....	89
4.6	Conclusion	93
Chapitre 5 : Classification des produits en familles homogènes.....		95
5.1	Introduction.....	96
5.2	Travaux liés à la classification dans le domaine logistique.....	97
5.3	Fouille de données	99
5.3.1	Introduction.....	99
5.3.2	Mode d'apprentissage.....	100
5.3.2.1	Critères de classification.....	100
5.3.2.2	Les variables quantitatives	101
5.3.2.3	Classification non supervisée	101
5.3.2.4	Méthodes de coalescence : K-moyenne.....	102
5.3.2.5	Classification supervisée.....	104
5.3.2.6	Arbre de décision.....	104
5.3.2.7	Apprentissage supervisé-actif	106
5.4	Approche proposée pour la classification des produits	106
5.4.1	Critères de classification des produits.....	108
5.4.2	Création des classes de produit.....	109
5.4.3	Attribution des politiques de réapprovisionnement pour chaque classe de produits 109	
5.4.4	Classification automatique des produits.....	110
5.5	Création des familles de produits.....	111
5.6	Déploiement d'un exemple	112
5.6.1	Critères de classification.....	112
5.6.2	Création des classes de produits dans l'exemple.....	114
5.6.3	Affectation des politiques de réapprovisionnement.....	115

5.6.4	Création de l'arbre de décision	117
5.6.5	Création des familles de produits dans l'exemple	118
5.7	Conclusion	119
Chapitre 6 : Analyse des deux politiques proposées : performance et sensibilité		121
6.1	Introduction.....	122
6.2	Analyse de la politique proposée dans le troisième chapitre	122
6.2.1	Sélection de la classe de produits	122
6.2.2	Caractérisation de la famille de produits retenu.....	123
6.2.3	Analyse par rapport au paramètre prix de produit.....	123
6.2.4	Analyse par rapport aux paramètres de la demande.....	125
6.2.5	Analyse par rapport au ratio : coût de commande urgente / coût commande normale	128
6.2.6	Synthèse	129
6.3	Analyse de la politique proposée dans le quatrième chapitre.....	130
6.3.1	Sélection de la classe de produits	130
6.3.2	Sélection de la famille de produits.....	131
6.3.3	Analyse par rapport au paramètre « prix de produit »	131
6.3.4	Analyse par rapport aux paramètres de la demande.....	133
6.3.5	Analyse par rapport au ratio : coût de commande normale / coût de commande urgente	135
6.3.6	Synthèse	137
6.4	Conclusion	138
Chapitre 7 : Conclusion générale.....		139
7.1	Problématique étudiée.....	140
7.2	Bilan de notre approche et des résultats obtenus.....	140
7.3	Perspectives.....	141

Liste des figures

Figure 1 : structure du mémoire	9
Figure 2 : structures de la chaine logistique selon (Huang, Lau et al. 2003).....	14
Figure 3 : interactions des flux dans une chaine logistique (Waters 1992)	18
Figure 5 : représentation des économies d'échelle	21
Figure 6 : Approximation linéaire par régression des coûts de transport	22
Figure 7 : Variation des coûts de transport.....	47
Figure 8 : loi de probabilité	47
Figure 9 : mode de fonctionnement de la politique de réapprovisionnement.....	49
Figure 10 : heuristique proposée	59
Figure 11 : Comparaison des coûts logistiques totaux.....	67
Figure 12 : pourcentage des gains totaux	68
Figure 13 : gains réalisés AVEC et SANS le mécanisme des sous-ensembles.....	69
Figure 14 : interconnexion des deux étapes de la politique de réapprovisionnement	74
Figure 15 : exemple de fonctionnement avec deux produits vendus à l'unité.....	75
Figure 16 : modèle descriptif de la première étape du politique de réapprovisionnement.....	76
Figure 17 : fonctionnement de la politique (cas de trois produits).....	78
Figure 18 : Organigramme de la démarche utilisée	80
Figure 19 : recherche du vecteur de quantités optimales	87
Figure 20 : comparaison des coûts logistiques totaux	90
Figure 21 : Pourcentage des gains réalisés par la politique proposée par rapport à la politique de référence	90
<i>Figure 22 : Mesures de distance pour le regroupement (Babuska 1998).....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 23 : Exemple d'un arbre de décision (Kempowsky 2004)</i>	<i>105</i>
Figure 24 : Les 4 phases de l'exploitation des données	106

Figure 25 : exemple d'arbre de décision (Pichot 2006)	110
Figure 26 : Les critères de classification	113
Figure 27 : Distribution des produits par rapport à tous les critères.....	114
Figure 28 : création de clusters	115
Figure 29 : Distribution des produits par rapport au critère 'prix'	115
Figure 30 : Arbre de décision.....	117
Figure 31 : Paramètres statistiques sur l'efficacité de l'arbre de l'arbre de décision	118
Figure 32: comparaison des gains pour chaque intervalle de prix de produits	124
Figure 33 : 1 ^{er} cas : variation des coûts logistiques	125
Figure 34 : 2 ^{ème} cas : variation des coûts logistiques.....	126
Figure 35 : 3 ^{ème} cas : variation des coûts logistiques.....	126
Figure 36 : 2 ^{ème} cas : variation des coûts logistiques.....	127
Figure 38 : pourcentage de gain dans le cas $\sigma = 2 m$	128
Figure 39 : comparaison des coûts logistiques en variant le ratio r.....	129
Figure 40 : variation de coûts logistique par rapport au prix des produits.....	132
Figure 41 : pourcentage des gains réalisés par la politique proposée en faisant varier les prix des produits	133
Figure 42 : comparaison des coûts logistiques en fonction de la demande	134
Figure 43 : pourcentage des gains obtenus en fonction de la demande	134
Figure 44 : analyse des coûts.....	136
Figure 45 : pourcentage de gain.....	137

Liste des tableaux

Tableau 1 : liste des travaux étudiés	27
Tableau 2 : classification par rapport aux centres d'intérêt des auteurs.....	29
Tableau 3 : classification par rapport aux méthodes de résolution.....	31
Tableau 4: schéma de transport.....	46
Tableau 5: valeurs numériques	64
Tableau 6 : probabilité d'avoir une rupture de stock pour le produit 1 (tab1).....	85
Tableau 7 : probabilité d'avoir et ne pas avoir rupture de stock pour un vecteur de quantité (2, 3, 13)	85
Tableau 8 : calcul des coûts.....	86
Tableau 9 : Espérance de coût calculé pour le vecteur V (3, 3, 13).....	86
Tableau 10 : valeurs numériques utilisées	89
Tableau 11 : comparaison des quantités commandées entre la politique de référence et la politique proposée.....	92
Tableau 12 : Tableau de données (Elghazel 2007)	101
Tableau 13 : Base de données des produits.....	112
Tableau 14 : valeurs des caractéristiques de la classe de produits.....	123
Tableau 15 : les moyennes des caractéristiques de la famille de produits.....	131
Tableau 16 : variation des taux de gain par rapport aux ratios	137

Glossaire

Variables relatives au transport

C : capacité du moyen de transport

FC : coût fixe de transport

VC : coût variable de transport

L : délai de livraison

v : type de véhicules

CFT : coût total de transport fixe

CVT : coût total de transport variable

Vt : volume total

Variables relatives à la demande et aux produits

D : demande annuelle

m_i : Moyenne de la demande journalière du produit i

$f_{i,t}$: est la densité de probabilité de la consommation

σ_i : Ecart type de la demande journalière du produit i

x_{T+L} = prévision de la demande dans une période de réapprovisionnement et le délai de réapprovisionnement, en unité

σ_{R+L} = déviation standard (écart type) de la demande durant l'intervalle de réapprovisionnement majoré du délai de réapprovisionnement, en unité

P_i : prix du produit i

U_i : volume du produit i

$V(q)$: volume de la quantité q

q_i : quantité consommée du produit i

N_{ij} : niveau de stock pour le produit i à la fin de la période j

S_i : niveau de rechargement de stock du produit i

s'_i : niveau de commande urgente pour le produit i

s''_i : niveau de commande et de séparation des deux ensembles P_{sous} et P_{sur}

Variables relatives au niveau de service

Kx : coefficient de satisfaction

Tx : niveau de satisfaction

Données de coût

A : coût de passation de commande

A'_{ji} : coût de passation de commande urgente dans la période j , pour le produit i .

Hc_i : coût de possession de produit par an

$CJPi$: coût de possession journalier de stock pour un produit i

t_j : taux de possession de stock du produit i

h_i : coût de possession de stock du produit i

s_i : coût de rupture du produit i

CPC : coût total de passation de commande normale

THc : coût total de possession de stock

CRS : coût total de rupture de stock

Variables de calcul

P_{sous} : ensemble de produits qui ont atteint leur niveau de commande

P_{sur} : ensemble de produits qui n'ont pas atteint leur niveau de commande

$V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$: les niveaux de reapprovisionnement optimaux recherchés

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$: un vecteur de reapprovisionnement possible

$Pnr_i(t, q)$: probabilité de non rupture pour le produit i au bout de t période si le niveau de reapprovisionnement est fixé à q

$Pnr(t, Q)$: probabilité de non rupture pour le vecteur de reapprovisionnement Q au bout de t périodes

$Pr(t, Q)$: probabilité de rupture de stock pour le vecteur de reapprovisionnement Q au bout de t périodes

nbr_j : nombre de jour avant la prochaine période

qri : quantité commandée dans le cas de commande urgente

Q : quantité optimale de commande

ss_i : stock de sécurité

T : période de réapprovisionnement pour une famille de produits

$T_{max}, T_{min}, T_{intr}$: période de réapprovisionnement maximale, minimale et intermédiaire

j : n° de période

i : n° de produits

Chapitre 1: Contexte & problématique

SOMMAIRE

- Chapitre 1 : Contexte & problématique1**
- 1.1 Introduction..... 2
- 1.2 Cadre de travail 2
- 1.3 L’optimisation des coûts logistiques pour un niveau de service donné..... 6
- 1.4 Solution proposée 6
- 1.5 Structure du mémoire 8
- 1.6 Conclusion 9

1.1 Introduction

L'objectif de toute entreprise est de livrer des produits à ses clients, en quantité demandée, dans le lieu demandé, à la date demandée, et au moindre coût. Il est donc clair que le bon fonctionnement d'une entreprise repose essentiellement sur la maîtrise de ses flux physiques.

Nous nous attachons dans ce chapitre à présenter le cadre de notre travail et à définir les grandes lignes de notre problématique de recherche. Dans un premier temps, nous commençons par présenter le cadre de travail en introduisant les mots clés de notre recherche : la gestion de la chaîne logistique, la gestion de stock, la gestion du transport, la chaîne logistique multi produits, la demande probabiliste. Comme indiqué dans le titre de la thèse, notre problématique se situe à l'intersection de ces domaines, car portant sur l'optimisation combinée des coûts de stockage et de transport dans une chaîne logistique multi produits avec une demande probabiliste.

Finalement, nous présentons un bref aperçu de notre méthodologie de résolution.

1.2 Cadre de travail

Concevoir le système logistique d'une entreprise, et plus particulièrement sa logistique de distribution, repose sur une définition de la logistique dans son ensemble et des différentes stratégies logistiques. Selon (Colin and Paché 1988) : « *Les objectifs d'une logistique aval, ou de distribution, sont multiples ; il est possible de citer la satisfaction des clients finaux, la recherche de la profitabilité, la réduction des coûts, ou encore la maximisation de la qualité de services* ». D'autre part, selon (Vallin 1999) : « *Optimiser la logistique aval d'une entreprise revient à déterminer la structure de son réseau de distribution, les systèmes de gestion des stocks et des réapprovisionnements, l'acheminement des flux physiques, les procédures de travail dans les entrepôts et le traitement des commandes, entreposage, expéditions et transports* » .

1.2.1 Gestion de la chaîne logistique

Dans la littérature, plusieurs définitions de la chaîne logistique ont été proposées. Parmi lesquelles, nous sélectionons la définition présentée par (Simchi-Levi and Kaminsky 2000) : « *Une chaîne logistique regroupe des organisations se trouvant en amont et en aval du processus productif. Celles-ci partagent un objectif commun, celui de s'engager dans un processus de création de valeurs, représenté par le produit ou service livré au consommateur. La chaîne logistique peut donc se concevoir d'une manière générale comme un processus d'intégration et de gestion des flux de matériaux et de flux d'informations au travers des différents maillons de la chaîne logistique pour répondre et satisfaire la demande du marché* ».

A cet égard, la gestion de la chaîne logistique suppose de planifier et de contrôler les stocks et le transport comme une entité unique et intégrée, et ce, des fournisseurs jusqu'aux utilisateurs finaux. Quatre éléments doivent alors être pris en considération :

- Le niveau de service souhaité par le client final,

- Le niveau des stocks sur différents lieux de positionnement préalablement définis tout au long de la chaîne,
- Le transport des produits entre les différentes entités,
- Les procédures de gestion de la chaîne logistique en tant qu'entité unique.

Le processus transverse qui traite de ces quatre éléments est le processus de l'optimisation des coûts logistiques. Il constitue l'une des premières préoccupations de chaque entreprise au regard de sa chaîne logistique.

1.2.2 Gestion de stock

D'après (Mehrabikoushki 2008) : « *Le stock peut représenter 20 à 40 % de l'actif total d'une entreprise* » (Tersin 1980) . « *Les stocks mobilisent de l'argent et le succès ou l'échec de la gestion de stock affecte la situation financière de l'entreprise. Avoir trop de stock peut être aussi problématique que des ruptures de stock. Trop de stock entraîne des dépenses inutiles liées aux coûts de stockage et d'obsolescence, tandis que trop peu de stock conduit à des ruptures de stock* » (Verwijmeren, Van Der Vlist et al. 1996).

« *Le but principal de la gestion de stock est de maximiser la rentabilité d'une entreprise en minimisant le coût de stockage tout en satisfaisant les exigences de service client* » (Lambert, Stock et al. 1998).

La gestion des stocks est un aspect important de la Gestion de la Chaîne Logistique. Il s'agit de mieux gérer le stock partout dans la chaîne par une meilleure circulation de l'information afin d'améliorer le service client, tout en offrant une plus grande variété de produits et réduisant les coûts. La gestion des flux de produits, des matières premières aux produits finis, en passant par les produits en-cours, exige la responsabilisation des partenaires de la chaîne logistique pour la planification, l'acquisition, le stockage, le mouvement et le contrôle des matières et des produits finaux ».

Dans ce contexte, le gestionnaire doit prendre plusieurs décisions en prenant en compte un certain nombre de paramètres simultanément.

La demande clientèle, qui est souvent aléatoire dans un contexte industriel réel, est parmi ces paramètres à gérer pour mener à bien ces décisions.

En effet, la demande probabiliste oblige le fournisseur à faire des prévisions en vue de satisfaire les commandes des clients dans des délais acceptables et avec des coûts minimaux.

Néanmoins, ces prévisions peuvent conduire à une incertitude sur la variation de la demande ; ce qui est considéré comme l'incertitude la plus préoccupante de toutes les incertitudes de la chaîne logistique.

Plusieurs moyens sont mis en place pour faire face à l'incertitude de la demande, et éviter ses conséquences. Nous pouvons citer à titre d'exemple l'utilisation de grandes quantités de stock de sécurité. Cette décision adoptée par certaines entreprises peut provoquer des pertes économiques énormes, et ceci pour plusieurs raisons : d'une part, ces quantités stockées occasionneront des coûts de possession très élevés pour l'entreprise ; d'autre part, ces quantités peuvent ne pas être

consommées, et se retrouver ensuite périmées. C'est exactement ce dont il s'agit dans la plupart des cas de produits à délais de péremption courts.

Cependant, dans le contexte industriel nous devons traiter aussi des problèmes d'approvisionnement multi produits. C'est un problème qui survient dans de multiples situations : par exemple lorsqu'un groupe de produits est commandé chez le même fournisseur, ou lorsqu'un ensemble de produits est stocké dans le même lot.

De ce fait, le problème majeur est de déterminer, face à une demande dynamique, les quantités à commander pour chaque produit, avec des périodicités définies, afin de minimiser le coût total et tout en faisant en sorte que la demande soit satisfaite. Lorsque des commandes des différents produits sont réunies dans une commande unique, tous ces produits partageront un même coût de commande. Ce coût de commande est composé d'un coût de commande fixe par commande et d'un coût de commande fixe par ligne de commande.

La gestion des stocks et des approvisionnements dans une chaîne logistique multi produits présente plusieurs difficultés. D'une part, le traitement de la totalité de ces produits peut s'avérer une tâche délicate puisque nous nous retrouvons face à une grande diversité de produits ; d'autre part ces produits ne présentent pas forcément les mêmes caractéristiques. Ceci peut rendre la tâche complexe et aboutir à des gestions non optimisées en raison de la grandeur des problèmes de calculs et de traitements conduisant à l'introduction d'hypothèses simplificatrices ou d'approximations pour gérer la diversité des produits. Ces simplifications peuvent être à l'origine d'une perte de fiabilité des méthodes de résolution proposées.

1.2.3 Gestion du transport

Dans la thèse de Labidi (Labidi 2005) plusieurs définitions ont été proposées, pour définir la chaîne logistique l'auteur s'appuie sur les travaux de (Lin and Shaw 1998) : « *La chaîne logistique la plus élémentaire est constituée d'un seul site assurant aussi bien la production que le stockage et la distribution. Des réseaux plus complexes peuvent coordonner plusieurs dizaines de sites répartis dans différentes locations et peuvent aussi gérer des flux physiques entre ces sites. Le terme site peut correspondre à une unité de stockage, une unité de production, une usine, un fournisseur, un centre de distribution, un entrepôt ou un client* ».

Les flux physiques d'une chaîne logistique et leur complexité sont définis dans les travaux de (Beamon and Chen 2001) : « *La complexité de ces flux physiques (matières premières, produits finis ...) dans une chaîne logistique s'explique en partie par leurs fortes variations et fluctuations dans les différentes locations de la chaîne logistique* ».

En effet, le partage d'un équipement ou la nécessité de transport par grandes quantités pour des raisons de coût génère des interruptions dans la circulation des flux de matières et de produits. Certaines opérations peuvent concerner plusieurs produits simultanément, c'est le cas notamment d'un réapprovisionnement multi produits. L'ajustement du débit devient alors complexe à assurer entre les différents flux entrant dans les stocks. D'autre part, la présence d'aléas et de

dysfonctionnements perturbent la régularité de la circulation des flux. Le stock qui peut être défini comme l'accumulation d'une différence de flux, est l'un des éléments d'organisation du système de flux.

Outre les stocks, la gestion et l'acheminement de ces flux physiques représente l'une des problématiques de gestion d'une chaîne logistique aval ou de distribution.

Dans cette thèse, nous étudions la gestion des flux physiques dans une structure divergente d'une chaîne logistique de distribution traitant les stocks, et le transport entre plusieurs sites.

1.2.4 La gestion combinée des stocks et du transport

« D'un côté, l'augmentation des coûts de transport et de stockage vis-à-vis du coût de production, et d'un autre, la diminution des délais de production et de livraison, incitent les entreprises à donner plus d'importance à la prise en compte des coûts et des contraintes liés à toutes ces activités simultanément, et ce, pour mieux gérer le fonctionnement de leur chaîne logistique. Le concept même de chaîne logistique a émergé avec ces besoins. L'optimisation de la gestion des flux physiques et des activités commence à se faire d'une manière combinée (intégrée) afin de minimiser le coût total engendré. Avec cette approche, les contraintes et les coûts des activités qui sont coordonnées sont mis dans le même modèle pour être optimisés en une seule fois. Dans la suite du mémoire, la gestion liée à cette approche est nommée gestion combinée/intégrée. Cette approche est d'actualité avec le nombre croissant de délocalisations d'entreprises » (Akbalik 2006).

« L'approche intégrée peut nous fournir un planning des activités à un coût plus réduit qu'une approche séquentielle dans laquelle les maillons de la chaîne sont optimisés de manière indépendante. Le gain obtenu avec une optimisation intégrée par rapport à une optimisation séquentielle est indéniable lorsqu'il s'agit de trouver un optimum global pour un problème général complexe. En revanche, cette approche conduit à considérer des systèmes complexes, de grande taille, avec de fortes interactions. Au niveau du processus d'optimisation, elle peut conduire à des problèmes difficiles à résoudre en un temps raisonnable. Cette complexification est due à l'augmentation des contraintes à prendre en compte lors d'une modélisation mathématique, mais aussi à la configuration de la fonction objectif qui devient plus compliquée à optimiser. Cette difficulté fait qu'il y a de plus en plus de recherches théoriques menées sur ce problème, en grande partie par des spécialistes de recherche opérationnelle » (Akbalik 2006).

L'application de cette approche dans le domaine logistique est assez fréquente. En effet, les entreprises doivent tester les différentes options de transport en termes de coûts et de gains, et les classer en fonction de la complexité de la coordination exigée. Un manager peut ensuite prendre la décision appropriée : il doit alors considérer la relation étroite entre le stockage et le transport. En effet, il s'agit de trouver un compromis satisfaisant entre des stocks importants permettant de faire des économies au niveau du transport ; par conséquent un taux de satisfaction clientèle élevé, ou des stocks faibles générant des transports plus fréquents, avec des coûts plus élevés et un risque plus important en termes de rupture de stock ainsi qu'un taux de satisfaction moins élevé.

Notre étude se situe dans ce domaine de la recherche opérationnelle. Nous nous intéressons aux méthodes de résolution efficaces pour résoudre les problèmes d'optimisation en gestion combinées des flux physiques (stock et transport) pour une structure divergente de chaîne logistique aval, sous différentes hypothèses et dans le cadre d'une approche intégrée.

1.3 L'optimisation des coûts logistiques pour un niveau de service donné

Nous nous intéressons aux méthodes de résolution en termes de coût logistique, pour résoudre les problèmes d'optimisation intégrée de ces coûts en gestion des flux physiques pour un niveau de service donné.

Ce travail s'appuie d'une part sur les travaux réalisés dans le domaine de l'optimisation de la gestion intégrée des flux physiques dans les chaînes logistiques, et d'autre part sur les politiques de réapprovisionnement multi-produits. Nous considérerons l'approvisionnement simultané de plusieurs produits regroupés en familles tout au long de ce mémoire.

Nous pouvons donc positionner notre recherche au milieu de deux axes présents dans la littérature. Le premier est le domaine de l'optimisation des coûts de la gestion intégrée des stocks et de transport dans une chaîne logistique, et le deuxième le problème de réapprovisionnement multi-produits. Dans les deux cas nous considérons une demande probabiliste.

Nous nous basons au cours de cette thèse sur la méthode « *'optimisation intégrée' pour identifier l'optimisation des flux physiques de la chaîne logistique, composée des maillons dans lesquels les activités en question sont réalisées. C'est l'optimisation liée à l'approche globale, c'est-à-dire à la gestion intégrée des coûts. Les contraintes liées à ces activités sont prises en compte dans le même modèle, et la minimisation se fait sur le coût total engendré par ces activités en tenant compte d'un niveau de service donné* » (Akbalik 2006). Par exemple, l'optimisation intégrée des activités stockage-transport dans une structure des dépôts indique que les contraintes liées à ces activités sont optimisées en une seule fois, et que la sortie est un planning complet de transport et de stockage pour un niveau de service.

« Une des difficultés pour mettre en œuvre une telle approche en situation réelle est liée au partage du gain total obtenu ; ce qui empêche souvent son utilisation dans les chaînes dans lesquelles différents acteurs et centres d'intérêts interviennent dans la gestion des différents maillons » (Akbalik 2006).

1.4 Solution proposée

La solution proposée traite essentiellement deux problématiques : d'une part, la gestion multi-produits des approvisionnements pour laquelle nous avons développé la notion de familles homogènes de produits. D'autre part, la gestion des ruptures de stock pour laquelle nous avons proposé une politique de réapprovisionnement basée sur les commandes urgentes.

Dans un premier temps, nous proposons une politique de réapprovisionnement pour un ensemble de produits provenant d'un même fournisseur, quelles que soient les caractéristiques de la demande

propre à chacun d'eux. L'objectif est de mutualiser les approvisionnements de ces produits, leur nombre limité ne permettant pas la constitution de familles homogènes.. Ces caractéristiques définissent le contexte d'application de cette méthode de réapprovisionnement. Cette politique est caractérisée par un approvisionnement périodique, un niveau de stock de sécurité et un niveau de recombplètement pour chaque produit de la même famille. Le réapprovisionnement des produits présents dans le stock est conditionné par un niveau de commande défini pour chaque produit, ainsi que les capacités des moyens de transport. Pour trouver une solution à ce problème, nous nous basons sur une méthode heuristique, afin de trouver la meilleure stratégie pour affecter les produits commandés aux moyens de transport nécessaires, tout en minimisant le coût logistique calculé à partir des fonctions de calculs de coûts.

Dans un deuxième temps, nous associons une autre méthode de réapprovisionnement à une deuxième famille de produits possédant des caractéristiques communes (demande aléatoire et ponctuelle, délai de livraison nul, coûts d'approvisionnement indépendants du nombre de références approvisionnées et du nombre de produits transportés, utilisation de coût d'approvisionnement non planifiés urgents, ...). Cette famille regroupe des produits caractérisés par des critères très particuliers qui rendent leurs traitements complexes par des politiques classiques. Cette politique se base sur deux principes fondamentaux qui sont (i) l'approvisionnement d'urgence en cas de rupture de stock d'un produit (ii) le réapprovisionnement de tous les produits de la même famille. En effet, un réapprovisionnement est déclenché quand un produit présent dans le stock arrive au niveau de stock zéro. De ce fait, tous les produits présents dans le stock et qui appartiennent à la même famille sont alors réapprovisionnés. Nous allons aussi proposer une méthodologie de calcul des quantités commandées, qui se base sur une étude de modélisation et une optimisation mathématique, et ce, dans le but de minimiser les coûts logistiques.

Suite aux réflexions menées dans les deux chapitres précédents, nous proposons une classification des familles de produits qui se base sur un certain nombre de critères. Ces critères permettent de classer les produits dans des groupes homogènes et de définir une corrélation qui nous permet d'analyser et de traiter l'ensemble des produits de la même manière ; ce qui facilite la proposition des méthodes de réapprovisionnement multi produits.

Dans cette partie, nous avons essayé de répondre aux difficultés résultant de la gestion multi produits de manière à définir des familles homogènes de produits en se basant sur un échantillon. Les familles seront identifiées, et par la suite, à l'aide d'un arbre de décision, on classera automatiquement les produits dans leurs familles adéquates. Nous nous sommes basés sur une méthode de classification qui a fait ses preuves dans le domaine de l'analyse de données, et plus précisément dans l'Extraction de Connaissances à partir de Données (ECD), référencée sous le nom de fouille de données. Nous avons projeté les principes de cette méthode sur notre problème de classification de produits pour aboutir à des familles homogènes de produits, et pouvoir proposer des méthodes de gestion adéquates pour chacune d'elles.

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire de thèse est organisé de la manière suivante :

Le deuxième chapitre présente une étude bibliographique sur la problématique de recherche étudiée dans cette thèse. Nous commençons par quelques définitions des concepts de base et des mots clés étudiés dans notre contexte. Par la suite, nous réalisons une étude sur un échantillon de soixante articles sélectionnés de la littérature. Cette étude est basée sur deux classifications de ces articles, suivies par une synthèse. Dans la troisième partie de ce chapitre, nous introduisons les politiques de réapprovisionnement qui présentent la principale solution adoptée par les auteurs ainsi que les nôtres dans les deux chapitres suivants.

Le troisième chapitre présente une nouvelle politique de réapprovisionnement dédiée à la résolution du problème de gestion combinée de stock et de transport d'une famille de produits, et ce, dans un contexte particulier défini par un ensemble de caractéristiques.

Le quatrième chapitre présente une solution pour un problème particulier de la gestion des ruptures de stock. Cette solution est sous la forme d'une deuxième politique de réapprovisionnement consacrée à une autre famille de produits.

Le cinquième chapitre présente une méthodologie de classification des produits en classes de produits puis en familles de produits homogènes susceptibles d'être gérées par des politiques de réapprovisionnement. Ce chapitre est né suite à des besoins de regroupement de produits dans les deux chapitres précédents, afin de définir des politiques dans un contexte multi produits.

Le dernier chapitre présente une évaluation des performances de nos politiques de réapprovisionnement proposées dans le troisième et quatrième chapitre. Nous nous basons sur les résultats de classification réalisée dans le cinquième chapitre afin d'identifier les familles de produits étudiées dans les deux cas. Dans cette étude, nous réalisons des expérimentations numériques et des analyses de sensibilité par rapport aux paramètres suivants : « prix de produits », « caractéristique de la demande » et « différence entre le coût de passation de commande urgente et normale ».

La Figure suivante (Figure 1) présente l'articulation générale de ce mémoire.

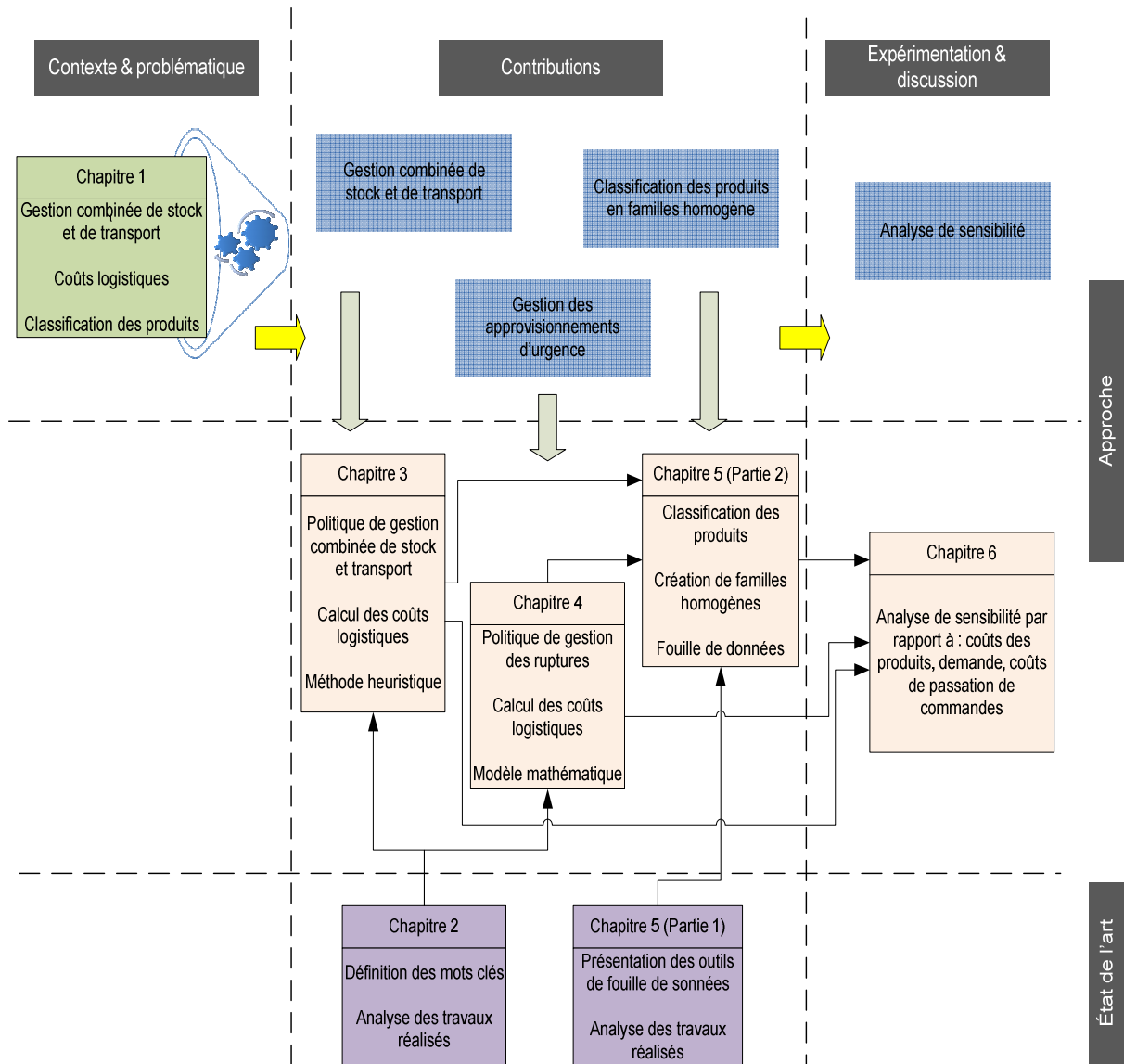


Figure 1 : structure du mémoire

1.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte général de la thèse. Nous avons introduit les concepts de notre problématique de recherche qui s'inscrit dans le cadre de la gestion combinée de stock et de transport, adaptée à des contextes particuliers afin de minimiser les coûts logistiques engendrés dans un réseau logistique multi produits, multi niveaux confronté à une demande probabiliste.

Par la suite, nous avons présenté notre méthodologie de résolution du problème évoqué. Cette démarche est composée de trois contributions faisant l'objet des trois chapitres suivants.

Finalement, nous avons exposé la structure de notre mémoire en montrant l'interaction entre les différents chapitres développés.

Chapitre 2 : Etat de l'art

SOMMAIRE

Chapitre 2	: Etat de l'art.....	11
2.1	Bref historique.....	12
2.2	Chaine logistique.....	12
2.3	Gestion de stock.....	17
2.4	Gestion de transport.....	20
2.5	Optimisation des coûts logistiques.....	23
2.6	Synthèse des travaux étudiés.....	32
2.7	Gestion des ruptures de stock.....	36
2.8	Politique de réapprovisionnement pour une gestion multi-produit.....	39
2.9	Conclusion.....	42

2.1 Bref historique

Dans cette section, nous présentons un bref historique de l'évolution de la logistique industrielle.

Dans les années 1950 et 1960 les principes de la production de masse ont été généralisés dans les entreprises avec pour objectif de réduire les coûts unitaires de production, avec un nombre limité de produits et une faible flexibilité des procédés de fabrication. Le développement de nouveaux produits était limité et résultaient principalement de développements internes. Les opérations sur les goulets d'étranglement ou «Bottleneck » étaient assurées par la mise en place de stocks assurant le maintien d'un débit de ligne équilibré (Farmer. 1997; Tan 2001).

Jusqu'aux années 1970, la politique industrielle se basait sur le principe de « flux poussés ». En général, la demande était supérieure à la production. « *Dans la plupart des entreprises, les responsables de chaque domaine ou service ont tenté de minimiser les coûts liés à leurs activités sans se soucier de l'impact de leurs décisions sur les autres parties de la société* » (Cheaitou 2008). À la fin des années 1970, l'augmentation de l'offre a accru la concurrence entre entreprises. Il devenait donc nécessaire de prendre en compte non seulement les activités de production, mais aussi toutes les activités industrielles, y compris l'approvisionnement, la distribution et les autres activités qui sont liées au processus de production.

L'objet de ce changement n'était pas seulement de réduire les coûts globaux, mais aussi d'accroître le niveau de service clientèle. Ceci a conduit à l'émergence de la notion de « *chaîne logistique* ».

Ce domaine a été amélioré après le développement de la "*science informatique*", qui a permis principalement le développement des activités de «*Planification de la production*», de «*Gestion des stocks*», de «*gestion des capacités de transport*» qui utilisent les techniques de recherche opérationnelle. Au cours des dernières décennies, ces domaines techniques de recherche opérationnelle ont connu des améliorations très importantes et de nouvelles pratiques sont nées (Cheaitou 2008).

2.2 Chaîne logistique

De nombreuses définitions ont été proposées pour la chaîne logistique. Dans cette partie, un certain nombre d'entre elles sont dégagées dans le but de rapprocher les points de vue des auteurs et de mettre l'accent sur les éléments clés apportés par chaque définition.

Par rapport aux événements historiques cités précédemment, nous présentons quelques définitions des termes logistiques en se basant sur la thèse de (Akbalik 2006). Nous les présentons dans l'ordre de leur évolution au cours du temps avec le besoin de changement et de la vision globale de la chaîne logistique : logistique, chaîne logistique, gestion des chaînes logistiques, gestion intégrée des chaînes logistiques qui ont évolué au cours du temps avec le besoin d'une vision plus globale sur les différents maillons d'une chaîne.

(Riopel, Langevin et al. 2003) ont étudié cette mutation à travers les titres des livres et des articles publiés sur la logistique. « *Dans les années 1960 et 70 on parle de la « distribution physique » qui laisse sa place au terme « logistique » dans les années 70 et 80* ».

(Akbari Jokaar, Frein et al. 2000) ont défini cette phase de « logistique séparée par *« la logistique de distribution physique reposant sur la recherche d'efficience »*.

(Heskett 1978) a défini *« la logistique comme le processus qui englobe l'ensemble des activités qui participe à la maîtrise des flux physiques de produits, à la coordination des ressources et des débouchés en cherchant à obtenir un niveau de service donné au moindre coût »*. Comme on peut le constater dans cette définition, la logistique ne concerne que les activités physiques.

À ce stade, Rushton et Saw (Rushton and Saw 1992) expliquent que *« la logistique existe principalement au travers d'activités comme le transport, le stockage, le conditionnement et le traitement des commandes clients, ainsi qu'une performance orientée vers la maîtrise des coûts des activités de distribution (efficience managériale), et servant surtout à satisfaire les exigences du client. C'est la phase dans laquelle on recherche une suite d'optimisations locales, et non une optimisation globale. En effet chacune des activités logistiques se déroule sans tenir compte des caractéristiques des autres activités logistiques »*.

« Le terme « gestion des chaînes logistiques » commence à être utilisé vers 1990, puis avec la croissance du nombre des multinationales et des délocalisations des centres de production, les gestionnaires prennent en compte la globalité des chaînes dans leurs diverses décisions. De nos jours, nous sommes entrés dans l'ère de la gestion intégrée ou gestion globale des chaînes logistiques. Nous pouvons remarquer que cette évolution de l'intégration au cours des années est plutôt managériale. Avec les besoins du marché, de plus en plus de formes adoptent cette approche ces dernières années et ceci devient très significatif après les années 1990. Cependant sur le plan théorique, les recherches sur l'intégration de deux maillons, production et stockage, avaient commencé dès la fin des années 50. Dans l'article d'Akbari Jokaar (Akbari Jokaar, Frein et al. 2002), la définition d'une chaîne logistique est donnée comme « un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, le transport de ces matières premières, la transformation de celles-ci en composants puis en produits finis, la distribution du produit fini chez le client ainsi que le service après-vente, le recyclage ou la mise au rebut des produits en fin de vie ». Dans ce même article, les auteurs donnent des définitions récentes des autres termes couramment utilisés dans ce domaine, pour faciliter l'échange des idées parmi les chercheurs » (Akbalik 2006).

(Simchi-Levi, Kaminsky et al. 2003) définissent la gestion d'une chaîne logistique comme *« un ensemble d'approches utilisées pour intégrer les fournisseurs, les producteurs, les dépôts et les centres de distribution, pour que le produit fini soit fabriqué et distribué avec la qualité requise, dans les délais exigés, de façon à minimiser le coût total en satisfaisant le niveau de service demandé »*.

La définition que l'ASLOG (Association Française de la Logistique) (ASLOG 2003) propose de la logistique est aujourd'hui la suivante : *« La logistique est une fonction qui a pour objet la mise à disposition au moindre coût de la quantité d'un produit, à l'endroit et au moment où une demande*

existe ». Par rapport à d'autres définitions, cette définition insiste clairement sur les flux physiques et le contrôle des coûts.

2.2.1 Structure des chaînes logistiques

D'après (Galasso 2007) : « La définition de structures de chaînes logistiques reflétant l'ensemble des cas réels est difficile tant la variété des types de fabrications et des périmètres de chaînes est grande. » Dans le but de définir un cadre à notre étude, il est indispensable de savoir les structures typologiques usuelles retrouvées dans la littérature sur lesquelles sont développées les modélisations existantes. Certains auteurs ont extrait des cas réels des typologies caractéristiques (Croom, Romano et al. 2000; Huang, Lau et al. 2003) .

Dans ce dernier travail, Huang et al. (Huang, Lau et al. 2003) décomposent les structures typiques de chaînes logistiques en : « Série ; Divergente ; Dyadique ; Convergente et Réseau ». Ces structures sont présentées en Figure 2. Dans le même travail, une étude a été réalisée pour montrer l'utilité de la connaissance de ces structures pour la modélisation des chaînes logistiques : « Ces structures typiques ont pour but d'offrir des cadres de modélisation pour l'étude des chaînes logistiques et sont orientées sur des processus spécifiques. La structure série correspond à un procédé de fabrication linéaire et vertical. Cette structure peut être utilisée, par exemple, pour étudier l'influence de la propagation de l'information sur l'ensemble de la chaîne. La structure divergente permet de modéliser un réseau de distribution avec pour objectif, par exemple, d'étudier la localisation des sites de distribution ou leur dimensionnement. La structure convergente représente un processus d'assemblage dans lequel la synchronisation des flux constitue un sujet d'étude. La structure réseau est la composition d'une structure convergente et divergente permettant de prendre en compte des chaînes logistiques plus complexes. Enfin, la structure dyadique peut être vue comme un cas particulier d'une chaîne en série limitée à 2 étages. Elle peut servir de base à l'étude de relations client/fournisseur ou donneur d'ordre/sous-traitant. »

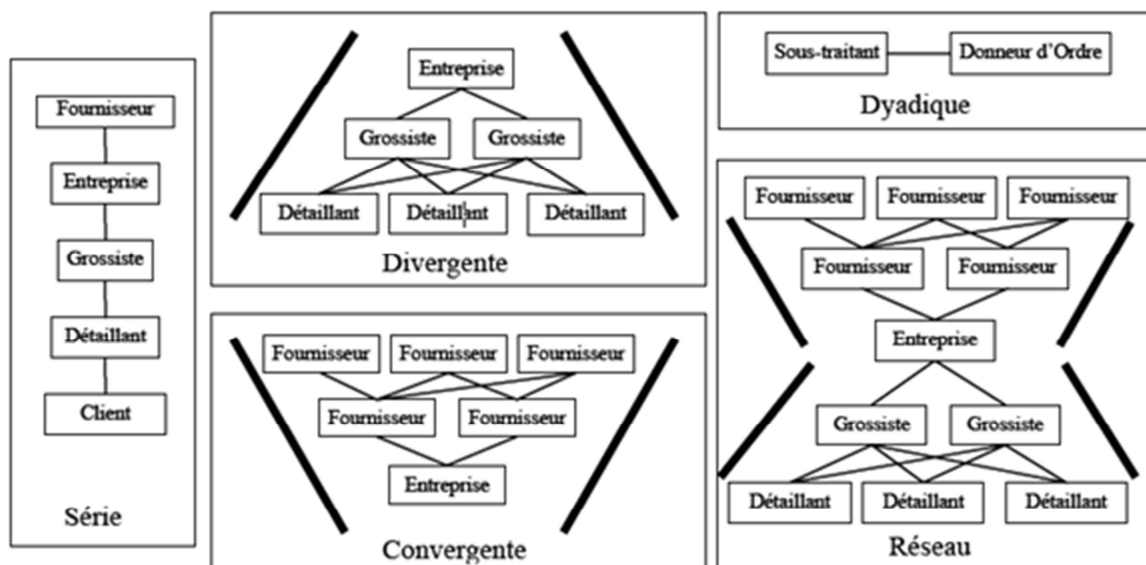


Figure 2 : structures de la chaîne logistique selon (Huang, Lau et al. 2003)

Cependant, ces structures ne reflètent pas vraiment des cas réels de l'industrie actuelle, cet aspect a été évoqué dans ce même dernier travail (Huang, Lau et al. 2003): « *La principale critique que l'on peut faire de ces structures est qu'elles ne traduisent pas clairement la possibilité pour un élément d'apparaître sur plusieurs rangs de la chaîne. En effet, l'assemblage d'un produit fini peut nécessiter aussi bien des pièces élémentaires standards que des sous-ensembles complexes. Pour leur réalisation, ces sous-ensembles vont nécessiter aussi un ensemble de pièces élémentaires. Ainsi, le fournisseur de ces pièces élémentaires, sera en contact direct avec l'entreprise d'assemblage en fin de chaîne logistique et en contact indirect par l'intermédiaire du fournisseur de sous-ensembles. De même, dans le cadre d'un réseau de distribution, une entreprise peut, dans certains cas, être directement en relation avec des détaillants sans passer par un grossiste. De plus, ni les relations de sous-traitance ni les retours de pièces (chaîne logistique inverse) ne sont décrits* ».

Dans le cadre de notre étude, nous proposons un modèle positionnant l'entreprise considérée comme élément central d'un ensemble de fournisseurs et clients. La structure la plus proche, adoptant une entreprise comme élément central de la chaîne logistique, est la structure divergente. C'est sur la base de cette structure que nous développerons, dans les chapitres 3 et 4, une modélisation plus fine du périmètre de notre étude.

2.2.2 Différents flux dans la chaîne logistique

D'après (Akbalik 2006) : « *Dans une chaîne logistique, on peut identifier différents types de flux : Flux d'information, flux physiques, flux financiers. Les flux physiques décrivent des matières qui circulent entre les différents maillons de la chaîne. Ces matières peuvent être des composants, des produits semi-finis, des produits finis, des pièces de rechange. Ces flux constituent la fonction première d'une chaîne logistique, sans lesquels les autres flux n'existeraient pas* ».

L'objet de notre étude est l'optimisation des flux physiques. Le but est de minimiser le coût total engendré par les activités de stockage et de transport, en satisfaisant les demandes du client sur un horizon donné. Nous devons décider combien, quand et où stocker et transporter les produits. Les coûts liés à chaque activité et les capacités de chaque maillon seront calculés par rapport à la demande, au nombre de périodes et au nombre d'installation (Akbalik 2006).

2.2.3 Niveaux de décision

D'après (Akbalik 2006) : « *La gestion de la circulation des différents flux dans une chaîne logistique, à moindre coût et avec une bonne qualité de service, est assurée différents niveaux décisionnels. A chaque niveau, différents outils d'aide à la décision sont utilisés, dont la plupart reposent sur des outils informatiques. On distingue traditionnellement trois grands niveaux de décision, dans de la gestion des chaînes logistiques ; même si les frontières ne sont pas très claires, elles sont souvent découpées en fonction de la longueur des périodes sur lesquelles ces décisions portent. Elles peuvent être décrites comme les décisions stratégiques, les décisions tactiques et les décisions opérationnelles. Ces niveaux de décisions sont définis dans le livre de Vallin (Vallin 2003) comme suit :*

- « *décisions stratégiques : les problèmes de localisation, l'ouverture et la fermeture des usines, des dépôts, le choix des fournisseurs, l'affectation des capacités aux différentes activités, le choix de mode de transport, la mise en place d'un système d'information,*
- *décisions tactiques : l'affectation des clients aux dépôts, l'allocation des fournisseurs aux usines, l'allocation des produits dans les différents centres de production,*
- *décisions opérationnelles : quand, combien, où produire, stocker, transporter, etc ».*

En grande partie, notre travail se situe au niveau opérationnel. Nous considérons des structures de chaîne logistique fixes et nous étudions les différentes méthodes d'optimiser les coûts de stock et de transport afin de minimiser le coût logistique combiné dans la chaîne logistique, en proposant des plannings de stock et de transport optimaux ou proche de l'optimum. Les décisions sont donc prises sur la quantité à transporter et à stocker dans les différents maillons de la chaîne, sur un horizon donné.

2.2.4 Demande

« L'incertitude et le besoin de réactivité sont étroitement liés. En effet pourquoi serait-il nécessaire d'avoir besoin de réagir vite en l'absence d'aléas ? Or, nous avons vu que le manque de visibilité crée de l'incertitude sur la demande et induit des difficultés à prendre en compte les capacités de réactions des autres maillons, ce qui pénalise fortement la gestion des flux.

Nous retrouvons plusieurs méthodes de traitement et de modélisation de la demande utilisées dans la littérature, nous citons ci-dessous quelques références » (Galasso 2007).

La notion de l'incertitude est utilisée dans plusieurs domaines, dans le domaine logistique cette notion est définie par (Bartezzaghi and Verganti 1995): « *La gestion de l'incertitude peut être vue comme un processus global dans lequel l'étape primordiale constitue la bonne compréhension de ce que sera la demande client finale* ». Autrement, dans le même travail nous retrouvons cette définition : « *Une première forme de prise en compte de la demande incertaine est de la modéliser par une distribution de probabilités. L'utilisation de modèles stochastiques constitue un champ important de recherche. En liaison avec la planification des chaînes logistiques* », Srinivasa Raghavan et Viwanadham (Srinivasa Raghavan and Viwanadham 2002) reprenant les travaux de (Angerhofer and Angelides 2000) mettent en avant cinq techniques pour le traitement de ce type de problème : « *les graphes série-parallèle, les chaînes de Markov, les réseaux de files d'attente, les réseaux de Petri et les modèles de dynamique des systèmes* ».

Dans les travaux de (Zadeh 1978; Dubois and Prade 2004), les auteurs ont proposé une méthode originale pour la modélisation de la demande : « *Un autre type d'approches pour la modélisation de la demande est l'utilisation de la théorie des possibilités et de la logique floue pour la propagation d'une demande incertaine tout au long d'un processus de planification MRP (Grabot, Geneste et al. 2005)* ». Cette méthode permet d'obtenir une planification des besoins et un plan de charge flous qui peuvent aider un gestionnaire à évaluer la charge à laquelle il sera susceptible de faire face. Fargier et Thierry (Fargier and Thierry 2000) proposent « *une représentation de l'imprécision sur les*

quantités commandées propagée dans le processus de planification dans le but de déterminer la demande globale correspondant à un ensemble de commandes ».

L'approche basée sur l'utilisation de lois de probabilités que nous adoptons par la suite permet une modélisation plus souple. Cette méthode apporte un formalisme pour traiter des données imprécises et incertaines liées à la demande probabiliste.

2.3 Gestion de stock

Dans la thèse de Labidi (Labidi 2005), plusieurs notions liées aux activités de l'entreprise et aux différentes méthodes ont été définies : *« l'activité de l'entreprise, sa taille et son organisation, les stocks existent (Waters 1992). « Une production sans stock est quasi inconcevable, aux vues des nombreuses fonctions que remplissent les stocks. La compétitivité de l'entreprise peut être particulièrement affectée par sa gestion des stocks, ce qui constitue une raison suffisante pour y porter une grande attention. En effet, la constitution de stocks est nécessaire pour de nombreuses raisons stratégiques et opérationnelles :*

- *Equilibrer la relation production/consommation : les stocks jouent un rôle incontournable pour faire face à une différence entre la cadence de consommation et la cadence de production. En effet, il n'est pas toujours possible de produire là et quand la demande se manifeste. Autrement dit, la production et la consommation ne coïncident pas souvent dans le temps et l'espace.*
- *Eviter la propagation des aléas: sans la présence de stocks, un dysfonctionnement au niveau d'un seul site dans une chaîne logistique peut se propager tout au long de la chaîne. Un retard d'exécution dans un poste de travail ou un problème de transport n'arrêtera pas immédiatement l'ensemble d'un processus de production s'il y a des stocks prévus dans ce processus.*
- *Pallier les incertitudes sur la demande et les prix : la demande et les prix sont souvent liés à la notion d'incertitude. Constituer des stocks de sécurité permet de pallier l'incertitude sur la quantité demandée. Constituer un stock permet aux entreprises de bénéficier de la chute des prix sur le marché ou de se prémunir contre d'éventuelles hausses de prix. »*

L'auteur montre (Figure 3) que la gestion du stock repose sur des informations internes et externes au système. Le gestionnaire doit connaître les caractéristiques du fournisseur, de la demande, les choix politiques de son entreprise et les variables de décision qui sont à sa disposition. L'information pour la gestion des approvisionnements se situe à deux niveaux : le système de gestion du stock et le système de tenue du stock définis comme suit :

- *« Le système de gestion du stock est l'ensemble des informations et des règles de décisions permettant de déclencher les approvisionnements et éventuellement des livraisons qui satisfont au mieux les objectifs adoptés par l'entreprise » (Waters 1992).*
- *« Le système de tenue de stock inspecte continuellement ou périodiquement les composantes de l'approvisionnement : le niveau du stock physique, les encours ou attendus disponibles à terme, les dus (partie du stock physique faisant l'objet d'engagement vis-à-vis du client) non disponibles » (Waters 1992).*

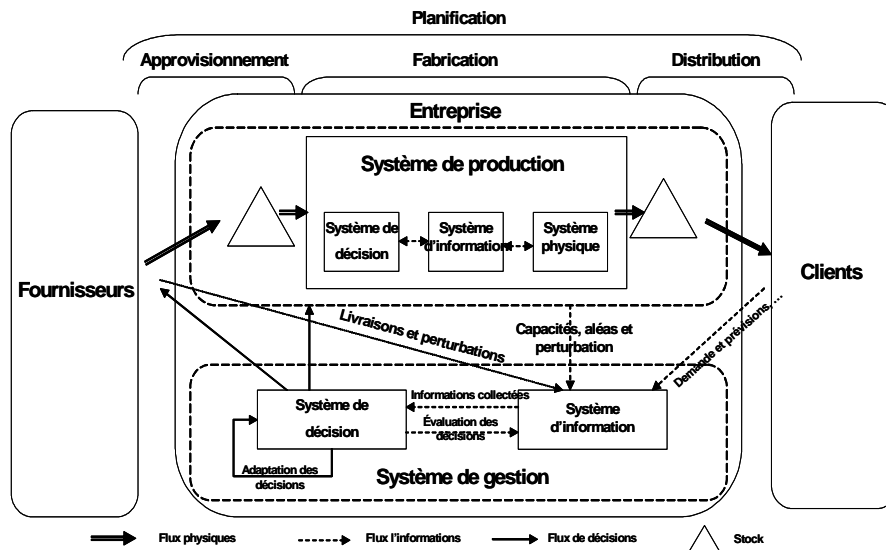


Figure 3 : interactions des flux dans une chaîne logistique (Waters 1992)

La gestion des stocks est une activité très importante pour les entreprises industrielles. Les entreprises formant en chaîne logistique échangent beaucoup d'informations en permanence à travers cette activité. Un mauvais choix de la politique de réapprovisionnement peut être soit à l'origine de stocks inutiles ou des ruptures de stock. Dans ces deux cas, les pertes sont importantes : un stock très important génère un coût de stockage et un éventuel coût d'obsolescence. Un stock faible génère des ruptures et des retards. Une meilleure politique de gestion a pour objectifs principaux de définir le niveau de stock indispensable pour faire face à la consommation qui peut suivre un processus aléatoire, les quantités à commander ainsi que les délais entre deux réapprovisionnements pour maintenir le niveau de stock souhaité. Elle peut se définir par les réponses qu'elle apporte aux deux questions de base suivantes :

- **Quand et comment approvisionner ?** La réponse à cette question réside en le choix de l'une des trois méthodes de réapprovisionnement ci-dessous :
 - **Gestion de stock au point de commande** : l'approvisionnement du stock est déclenché lorsque le stock descend au-dessous d'un niveau fixé appelé point de commande.
 - **Gestion calendaire** : l'approvisionnement du stock est déclenché à des intervalles de temps réguliers.
 - **Gestion calendaire conditionnelle** : l'approvisionnement du stock est déclenché à des intervalles de temps réguliers, mais uniquement lorsque le stock descend en dessous d'un certain seuil du point de commande.
- **Quelle quantité approvisionner ?** Il existe deux méthodes de base qui répondent à cette question :
 - **Approvisionnement par quantité fixe** : chaque commande porte sur la même quantité fixe. C'est le cas notamment lorsqu'il y a des contraintes de conditionnement ou de transport ou des seuils tarifaires qui impliquent un achat minimum. Ceci suppose bien évidemment une fréquence d'approvisionnement variable.

- **Approvisionnement par quantité variable** : lors de chaque commande, le stock théorique est mesuré pour commander une quantité qui permet de re-compléter ce stock.

Dans la littérature, nous retrouvons plusieurs modèles prédéfinies. Nous présentons ci-dessous quelques politiques de gestion de stocks les plus utilisées en pratique :

- (s, S) : Dans cette politique, dès que le niveau du stock descend en dessous d'un seuil fixé s , une commande d'approvisionnement du stock est passée immédiatement pour tenter de ramener le niveau du stock à son niveau initial S .
- (R, S) : Dans cette politique, à chaque R unités de temps, une commande d'approvisionnement du stock est passée pour tenter de ramener le niveau du stock à son niveau initial S .
- (R, s, S) : Dans cette politique, à chaque R unités de temps, le niveau du stock est contrôlé et s'il est en dessous d'un seuil fixé s , une commande d'approvisionnement du stock est passée pour tenter de ramener le niveau du stock à son niveau initial S .
- (s, Q) : Dans cette politique, dès que le niveau du stock est en dessous d'un seuil fixé s , une commande d'approvisionnement d'une quantité fixe Q est passée.
- (R, s, Q) : Dans cette politique, à chaque R unités de temps, le niveau du stock est contrôlé et s'il est en dessous d'un seuil fixé s , une commande d'approvisionnement d'une quantité fixe Q est passée.
- $(S-1, S)$: C'est un cas particulier de la politique (s, S) avec $s = S-1$ et un contrôle continu du niveau du stock.

Ces politiques peuvent être classées comme suit :

- **Politiques avec révision continue** : il s'agit des politiques (s, S) , (s, Q) et $(S-1, S)$ où l'état du stock est inspecté continuellement.
- **Politiques avec révision périodique** : il s'agit des politiques (R, s, S) , (R, S) et (R, Q) où l'état du stock est inspecté périodiquement.

Des coûts logistiques sont liés à ces politiques. Ces coûts peuvent être classés en trois familles (Zermati and Mocellin 2005; Toomey 2000). Les coûts de commande, les coûts de possession et les coûts de rupture. Lors de l'optimisation des décisions relatives à l'inventaire, il faut prendre en compte tous ces coûts.

De plus, dans certains secteurs industriels notamment l'industrie agro-alimentaire ou pharmaceutique, nous pouvons considérer le coût de péremption. Ce coût est en lien direct avec la durée de vie des produits présents dans le stock. Ce problème a été traité dans la littérature dans quelques travaux. Nous citons par exemple le travail de Kanchanasuntorn (Kanchanasuntorn and Techanitisawad 2004) qui précise que la péremption d'un produit est une préoccupation majeure dans certains secteurs industriels, notamment l'industrie agro-alimentaire ou pharmaceutique. Dans leur étude, les auteurs évoquent l'effet de la nature périssable du produit, la proposition d'une politique se basant sur les ruptures de stock dans les détaillants et l'influence de ce phénomène sur le coût total du système. Ceci en étudiant le bénéfice réalisé, le niveau de service et le niveau moyen des stocks dans un système de distribution à deux échelons. Les auteurs développent aussi un

modèle d'inventaire approximatif de ces mesures de rendement du système tenant compte des coûts de péremption des produits.

2.4 Gestion de transport

Plusieurs travaux ont étudié l'aspect transport dans la logistique globale et ont présenté différentes définitions et caractérisations. Devernay (Devernay 1997) a analysé « *le cas de l'organisation des transports entre les fournisseurs, les entrepôts et les entreprises. Il a ajouté que le transport constitue le véritable "moteur" de cette logistique : sans une organisation de transport fiable, réactive, flexible et économique, la logistique devrait faire appel à des moyens coûteux en surfaces, manutention, magasinage et systèmes d'information, pour satisfaire les exigences de ses consommateurs. Si certaines de ces chaînes restent internes aux établissements bénéficiant de leurs propres unités de production, beaucoup remontent vers des fournisseurs multiples et variés, à travers des prestataires, dont les plus connus sont les transporteurs* ».

Dans nos travaux, nous allons nous intéresser à la modélisation et l'optimisation des coûts de transport. Nous allons donc, ensuite, présenter, les différents modèles de coûts de transport étudiés dans la littérature. Dans ce qui suit, nous allons nous baser sur la thèse de (Bouchriha 2002).

Nous distinguons deux grandes catégories de coûts de transport : des coûts linéaires qui dépendent des quantités transportées et des distances, des coûts non linéaires par rapport aux quantités achetées :

- 1^{ère} catégorie : les coûts de transport linéaires : d'après (Arntzen, Brown et al. 1995) et (Sabri and Beamon 2000) : « *les coûts de transport linéaires sont les coûts qui dépendent des quantités achetées (des coûts variables). C'est la forme standard la plus utilisée dans la littérature dans les problèmes de conception d'une chaîne logistique et qui stipule que pour chaque unité supplémentaire transportée, le coût encouru augmente d'un taux fixe (v en unité monétaire) qui correspond au coût unitaire de transport* ».

L'allure de la courbe du coût de transport est donnée par la Figure 4.

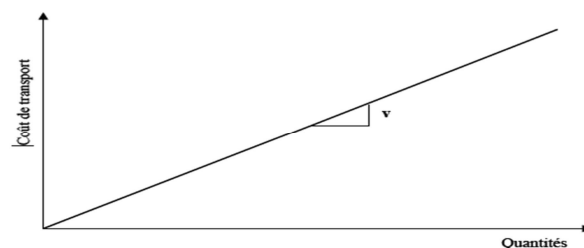


Figure 4 : représentation d'un coût de transport variable

- 2^{ème} catégorie : les coûts de transport non linéaires : « *Les coûts de transport ne sont pas linéaires et reflètent des économies d'échelle que l'entreprise peut réaliser en transportant de plus grandes charges. En effet, le coût marginal diminue au fur et à mesure qu'il y a augmentation des quantités transportées* (Bouchriha 2002) ».

Dans cette catégorie, plusieurs travaux ont été développés. « Plusieurs travaux commencent à intégrer les économies d'échelle dans la problématique de conception d'une chaîne logistique (Lakhal, Martel et al. 2001) (Martel and Vankatadri 1999). Les économies d'échelle résultent de plusieurs facteurs (Martel 2001) » :

- l'effet d'apprentissage,
- l'utilisation de technologies plus performantes,
- une meilleure utilisation des capacités disponibles,
- une meilleure utilisation des ressources,
- les escomptes de quantités offertes par les fournisseurs et transporteurs, etc.

L'allure de la courbe de la variation des coûts de transport en fonction des quantités achetées est représentée dans la figure ci-dessous (Figure 5):

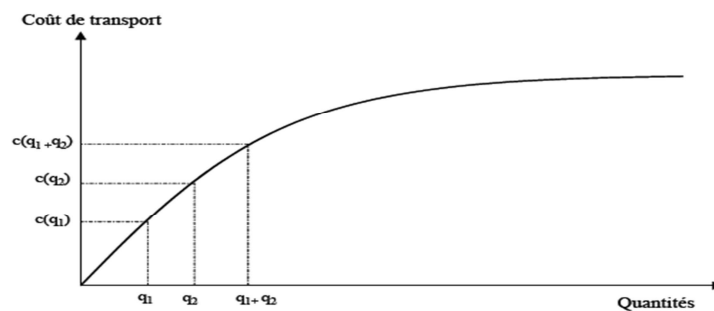


Figure 5 : représentation des économies d'échelle

Dans ce cas, la fonction de coût est caractérisé par :

Dans ce contexte, (Martel 2001) (Lee and Zipkin 1989) montrent que : « les économies d'échelle peuvent être modélisées adéquatement par une fonction exponentielle ».

Nous passons en revue, ci-dessous, les approches les plus utilisées dans la littérature pour modéliser les économies d'échelle dans les coûts de transport :

a) « A. Martel (Martel 2001b) retient l'allure exponentielle de la variation des coûts de transport et propose l'expression approximative suivante » :

Avec

- C_t : coût de transport de la cargaison, de l'origine à la destination.
- d : distance aller-retour de l'origine à la destination.
- Q : taille de la cargaison.
- a', α, b : paramètres obtenus par régression multiple.
- a : paramètre calculé pour une origine-destination donnée ($a = a'd^\alpha$).

Cette expression des coûts de transport, en fonction des distances parcourues et des quantités transportées, peut mener à des modèles non linéaires difficiles.

b) « (Martel 2001b) a proposé une deuxième approximation, plus simple que la première, qui consiste à trouver une approximation linéaire des coûts de transport par régression entre une origine et une destination données (Figure 6) ».

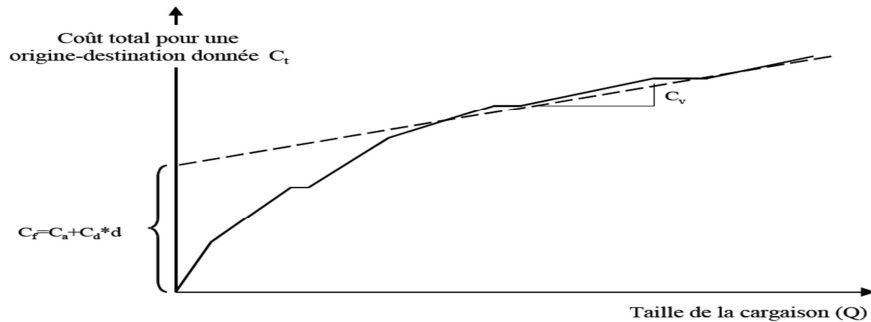


Figure 6 : Approximation linéaire par régression des coûts de transport

Ainsi la fonction des coûts de transport correspond à l'expression linéaire suivante :

Avec

- C_a , C_d , C_v : paramètres obtenus par régression multiple et ayant la signification physique suivante :
- C_a : coût d'arrêt (indépendant de la distance à parcourir et du contenu du chargement) encouru en particulier à cause du temps perdu au départ et à l'arrivée.
- C_d : coût de distance (indépendant du contenu du chargement) et correspond en général au coût de l'essence, du chauffeur, etc. (par kilomètre parcouru).
- C_v : coût de charge (indépendant de la distance parcourue) encouru par chaque article inclus dans le véhicule (chargement et déchargement de l'article, manutention dans le véhicule).
- C_f : paramètre calculé pour une origine et destination donnée.
- Q : taille d'une cargaison

A partir de cette expression, nous pouvons déduire que le coût unitaire de transport est :

—

Ainsi, si la demande par période est X et que chaque cargaison contient Q produits, pour satisfaire la commande, il faudrait expédier X/Q cargaisons, ce qui correspond à un coût total de transport par produit :

c) « D'autres travaux postulent que les coûts de transport par lot d'expédition sont fixes et ne dépendent pas des quantités correspondant à un lot d'expédition. Les auteurs dans (Burns, Hall et al. 1985) postulent que le coût de transport par lot d'expédition est » :

$$C_t = \gamma + \sigma + \alpha d$$

γ : coût d'initialisation d'une distribution.

σ : coût fixe d'arrêt.

α : coût de transport par unité de distance.

d : distance entre l'entreprise et son fournisseur.

Ainsi, si Q correspond à la quantité d'un lot, le coût unitaire de transport est :

$$C_{ut} = (\gamma + \sigma + \alpha d)/Q$$

Ce résultat est confirmé par Tyworth et Ruis-Torres (Tyworth and Ruis-Torres 2000) qui stipulent que les coûts unitaires de transport sont de la forme :

$$C_{ut} = k/Q$$

Où K désigne le coût fixe qui correspond à un lot d'expédition Q .

Ainsi, à la différence des travaux de Martel, Burns ainsi que Tyworth et Ruis-Torres n'incluent pas dans leur modélisation des coûts de transport la composante variable (C_v) par unité transportée et qui comporte le coût de chargement/déchargement ainsi que les coûts de manutentions. Les deux dernières expressions proposées par les deux derniers auteurs reflètent également la prise en compte des économies d'échelle puisque nous pouvons vérifier que si Q augmente les coûts unitaires baissent.

Ainsi nous pouvons conclure à la fin de ce paragraphe qu'il existe plusieurs façons de modéliser les coûts de transport dans la littérature. On aboutit en général à des fonctions de transport ayant des formes assez complexes.

Nous présenterons dans le troisième chapitre le modèle que nous allons adopter pour représenter l'aspect transport dans le modèle logistique global.

2.5 Optimisation des coûts logistiques

2.5.1 Décision centralisée / décentralisée

Plusieurs travaux dans la littérature ont traité des problèmes d'optimisation multi niveaux en distinguant deux processus décisionnels (Baboli, Pirayesh Neghab et al. 2008) : « un processus décentralisé dans lequel chaque maillon de la chaîne logistique optimise ses coûts indépendamment du reste ; un processus centralisé dans lequel l'optimisation des coûts est un objectif global ».

Plusieurs travaux se sont concentrés sur le choix de la structure centralisée ou décentralisée, la standardisation des produits et l'organisation des approvisionnements et des transports entre les partenaires pour améliorer l'efficience et l'efficacité de la chaîne logistique. Le choix d'une forme

d'organisation découle de considérations tant stratégiques qu'opérationnelles, et on devine que de multiples facteurs tant internes (règlements) qu'externes (contrats, risque de rupture, etc.) aux établissements concourent à la détermination de ce choix.

(Hassan 2006) a étudié cet aspect dans sa thèse et il a présenté plusieurs travaux : Tchokogué et Nollet (Tchokogué and Nollet 1998) ont présenté « *un modèle d'analyse de la fonction achats dans des entreprises du secteur de la santé. Les auteurs montrent que les entreprises peuvent adopter une structure organisationnelle centralisée, décentralisée ou une combinaison de centralisation et décentralisation. La structure retenue sera soumise aux forces centralisatrices et décentralisatrices créant une dynamique de transformation. Soulignons que la centralisation et la décentralisation ne constituent pas deux options mutuellement exclusives* ». Cavinato (Cavinato 1991) et Bennett (Bennett 1986) démontrent dans leurs travaux que : « *la notion de centralisation peut donner lieu à des organisations variables, les activités de contrôle étant centralisées, alors que les actes d'achats peuvent être décentralisés au niveau des services utilisateurs* ». Egalement, Garder (Gorder 1990) constate que : « *comme l'entreprise dans son ensemble, l'organisation de la gestion des achats est conduite à des changements liés à la recherche de l'efficacité et de l'efficacé* ».

Une communauté de chercheurs opte pour la gestion des chaînes logistiques en considérant la nature distribuée des centres de décision dans la chaîne. « Cette approche correspond à un point de vue "bottom-up" c'est-à-dire, un problème de coordination d'entités indépendantes. Ce problème de coordination consiste à assurer la satisfaction d'objectifs globaux au niveau de la chaîne logistique, tels que la satisfaction du client ou la réduction des coûts globaux, tout en tenant compte des objectifs locaux et de l'autonomie des entreprises. Ce point de vue "bottom-up" peut donc être résumé par l'analyse des interactions interentreprises à un bas niveau décisionnel, pour adopter un point de vue global sur les mécanismes dirigeant le fonctionnement de la chaîne dans son ensemble (Cheaitou 2008).

Kok et Fransoo (Kok and Fransoo 2003) mettent bien en avant le caractère distribué de la gestion des chaînes logistiques, tout en soulignant l'importance de développer et d'utiliser des modèles distribués. En effet, ces modèles permettent d'une part, de diminuer les quantités de données à traiter dans chaque processus de résolution et d'autre part, de préserver les contraintes d'autonomie locales qu'un modèle centralisé peut enfreindre en rassemblant les données des différents acteurs. Ainsi, le problème de gestion de la chaîne logistique est, actuellement de plus en plus appréhendé en termes de recherche d'un bon compromis entre centralisation et coopération. Une illustration de cette volonté de compromis est donnée par Chan et al., (Chan, Chung et al. 2004), qui définissent un modèle d'optimisation multicritère basé sur des algorithmes génétiques, permettant de comparer une gestion centralisée, dans laquelle les commandes sont envoyées au premier fournisseur disponible, à un mode de fonctionnement collaboratif.

Après avoir présenté quelques travaux de recherche montrant les avantages de l'optimisation des coûts dans le cas de prise de décision décentralisée, nous retenons cette théorie et nous l'adoptons dans la suite de nos travaux.

2.5.2 Optimisation intégrée des coûts logistiques

« Les premiers travaux théoriques sur l'intégration de l'activité de transport lors de la planification de la production et du stockage datent des années 1980. Début 1990, les entreprises s'intéressent de plus en plus à cette approche. Vers les années 2000, le nombre de publications scientifiques publiées sur la coordination de plusieurs activités dans plusieurs échelons va croître très fortement » (Akbalik 2006). Nous avons sélectionné quelques travaux de recherche et nous les avons classés en trois catégories. Ces catégories sont présentées dans la thèse de (Akbalik 2006) : (i) des travaux de synthèse où les auteurs ont essayé de balayer les articles publiés traitant ce sujet, (ii) des travaux proposant des études théoriques et montrant des résultats concrets, (iii) des travaux traitant des problèmes industriels :

(i) Les travaux de synthèses :

Dans la littérature nous avons pu extraire quelques articles de synthèse qui rassemblent les travaux publiés sur les approches intégrées dans une chaîne logistique.

Bhatnagar et al. (Bhatnagar, Chandra et al. 1993) détaillent deux grands bases de cette approche : « une coordination au niveau général et une coordination multi-usines. Dans le niveau général, ils citent les articles qui traitent des décisions intégrées des différentes fonctions comme la localisation des installations, la planification du stockage, de la distribution et de la production, le marketing, etc. Dans le deuxième type de coordination, l'intégration se fait au niveau des décisions prises pour la même activité, qui est constatée dans les différents échelons de l'organisation. Les usines intégrées verticalement peuvent être données comme exemple de ce type de coordination ».

Beamon (Beamon 1998) propose une étude complète de la littérature sur les modèles multi-échelons de la chaîne logistique et donne une classification des travaux selon quatre axes. Cette classification est basée sur l'approche de modélisation proposée. Les quatre catégories sont : « Les modèles analytiques déterministes, les modèles analytiques stochastiques, les modèles économiques et les modèles de simulation ».

Vidal et Goetschalckx (Vidal and Goetschalckx 1998) classifient les articles par rapport aux hypothèses développés dans les modèles mathématiques : « Les principaux points analysés sont la nature stochastique, les caractéristiques dynamiques, les états des installations, les hypothèses sur les capacités de stockage et de moyens de transport, mono ou multi-produits, le critère de la fonction objectif, les natures des coûts (linéaire, non-linéaire, composantes fixes ou continues), le nombre d'échelons, les méthodes de résolution proposées, etc ».

Geunes et Pardalos (Geunes and Pardalos 2003) proposent un état de l'art sur : « l'évolution de l'utilisation des techniques d'optimisation dans le domaine de la gestion de la chaîne logistique et de l'ingénierie financière ». Egalement, ces auteurs présentent plusieurs exemples d'entreprises qui se basent sur les méthodes d'optimisation pour gérer leur chaîne logistique et étudient les travaux autour de leur réseau d'optimisation.

(ii) Les travaux proposant des études théoriques :

L'utilisation de la résolution d'un problème par la méthode intégrée est étudiée théoriquement dans plusieurs travaux de recherche. Parmi les raisons qui ont poussés les auteurs à se concentrer sur ces études, nous retrouvons la difficulté de résolution du modèle mathématique associé en un temps raisonnable.

(Akbalik 2006) a étudié la difficulté de l'utilisation de l'approche "optimisation intégrée" : « *Cette difficulté est due au nombre de contraintes à prendre en compte et à la configuration de la fonction objectif qui devient plus dure à optimiser. Ceci nécessite des méthodes plus sophistiquées et appropriées au problème. Les différentes méthodes de résolution sont des techniques de relaxation, de décomposition, des heuristiques, etc. Sur le plan théorique c'est donc un problème très intéressant à traiter* ».

Afin de montrer le gain obtenu en adoptant une approche intégrée, nous faisons référence au travail de Chandra et Fisher (Chandra and Fisher 1994). Dans ce travail, les auteurs « *cherchent le gain de la coordination de la production dans une usine qui fabrique un certain nombre de produits différents et de la distribution en tournées de véhicules, chez plusieurs clients. Le but est de minimiser les coûts de stockage dans l'usine et dans le dépôt, de transport et de lancement. Ils obtiennent une réduction de 3% à 20% sur le coût total avec une approche intégrée* ».

Dans un autre contexte, Park (Park 2005) étudie « *une structure multi-usines, multi-détaillants, multi-produits et multi-périodes où l'objectif est de maximiser le profit total de la chaîne en intégrant les décisions de production, de stockage et de distribution* ».

« *En premier lieu, il optimise en se basant sur une approche séquentielle. En deuxième lieu, il intègre les différentes décisions dans un même modèle. Il propose une heuristique, au regard de la difficulté de la résolution de la programmation linéaire en nombre entier pour les grandes instances. Il compare le gain après une coordination, en utilisant une analyse de sensibilité sur les différents paramètres* » (Akbalik 2006).

Dans la littérature, plusieurs auteurs proposent l'utilisation de l'approche intégrée pour la résolution des problèmes liés à l'aspect transport et stockage. Nous nous sommes inspirés de la thèse de (Akbalik 2006) pour étudier les travaux les plus pertinents. Kim et Ha (Kim and Ha 2003) proposent : « *les quantités de commande, le nombre de livraisons et les quantités de livraison optimaux pour un modèle coordonné de donneur d'ordre-fournisseur, pour faciliter des livraisons plus fréquentes, et en petites quantités. Ils montrent que la politique de livraison optimale appliquée à ce système intégré est bénéfique pour les deux parties* ». Federgruen et Zipkin (Federgruen and Zipkin 1984) étudient : « *le problème de routage, couplé avec les décisions de stockage. Le but est de trouver les quantités optimales de livraison et de stockage depuis un dépôt vers les clients, avec des tournées de véhicules, tout en minimisant le coût total de stockage, de rupture et de transport* ». Burns et al. (Burns, Hall et al. 1985) développent : « *une méthode analytique pour minimiser le coût total de transport et de stockage depuis un fournisseur vers les clients. Ils comparent deux politiques de livraison : directe et avec des tournées* ». Hill (Hill 1999) étudie : « *la structure fournisseur client, où le fournisseur envoie un seul type de produit chez le client. Le fournisseur produit par lot, et le client consomme avec un taux fixe. Le but est de minimiser le coût total de setup, de transfert des produits et de stockage.*

L'auteur trouve la structure d'une solution optimale globale et propose un algorithme pour l'obtenir ». Iyogun (Iyogun 1992) étudie : « *le problème de distribution de plusieurs types de produits, depuis plusieurs dépôts vers plusieurs clients* ».

Une autre étude intéressante sur l'intégration des activités de transport et de stockage est menée par Mason et al. (Mason, Ribera et al. 2003) Les auteurs « *montrent avec un modèle de simulation qu'en intégrant les systèmes de gestion des stocks et de gestion de transport, on arrive à réduire les coûts, améliorer le service client et mieux gérer les flux physiques* ».

(iii) Les travaux étudiant des cas industriels

Matta et Miller (Matta and Miller 2004) coordonnent : « *les décisions de production, de stockage et de transport entre deux usines (la première qui fabrique des produits semi-finis pour la deuxième usine et la deuxième qui les transforme en produits finis). Ils analysent l'influence des différents paramètres sur les décisions, donc sur le gain obtenu avec une approche intégrée plutôt que séquentielle. Ils testent le gain obtenu avec des données réelles qu'ils ont récupérées d'une entreprise pharmaceutique* ».

En faisant référence à ces travaux, l'optimisation intégrée a montré ses avantages tant sur le plan théorique que sur le plan industriel.

2.5.3 Travaux de recherche étudiés

Nous avons sélectionné 60 travaux de recherche qui traitent de politiques de réapprovisionnement (Tableau 1).

Tableau 1 : liste des travaux étudiés

N°	Auteurs, année	N°	Auteurs, année
1	(Huang, Chew et al. 2004)	31	(Geunes and Zeng 2001)
2	(Alwan, Liu et al. 2003)	32	(Kanchanasuntorn and Techanitisawad 2004)
3	(Dullaert, Vernimmen et al. 2007)	33	(Lee 2005)
4	(Lei, Liu et al. 2006)	34	(Li and Liu 2005)
5	(Jong and Wee 2007)	35	(Mishra 2004)
6	(Chen and Chen 2005)	36	(Cheng-Liang, Bin-Wei et al. 2003)
7	(Abou-El-Ata and Kotb 1997)	37	(Cheng-Liang and Wen-Cheng 2004)
8	(Hwang, Chong et al. 2005)	38	(Sven and Wen-Fa 1999)
9	(Lodree, Jang et al. 2004)	39	(Sven 2007)
10	(Ouyang and Chang 2002)	40	(Chi 2001)
11	(Liang 2006)	41	(Teunter and Vlachos 2001)
12	(Watson and Polito 2003)	42	(Giri and Dohi 2009)
13	(Akcali and Bayindir 2006)	43	(Hsieh and Dye 2010)
14	(Hoque 2007)	44	(Lian, Liu et al. 2009)
15	(Lo and Szeto 2001)	45	(Li, Cheng et al. 2007)
16	(Kirche and Srivastava 2005)	46	(Benkherouf and Sethi 2010)
17	(Abdul-Jalbara, Gutierrez et al. 2003)	47	(Madadi, Kurz et al. 2010)
18	(Aydın and Christopher 2004)	48	(Rieksts and Ventura 2008)
19	(Bertazzi and Speranza 1999)	49	(Pan, Tang et al. 2009)

20	(Cardos and Garcia-Sabater 2005)	50	(Hnaïen, Delorme et al. 2010)
21	(Das and Tyagi 1997)	51	(Lee and Jeong 2009)
22	(Cetinkaya, Mutlu et al. 2005)	52	(Qin, Shi et al. 2009)
23	(Kutanoglu and Lohiya 2007)	53	(Kang and Kim 2010)
24	(Chiang and Gutierrez 1997)	54	(Zhao, Chen et al. 2010)
25	(Qu, Bookbinder et al. 1999)	55	(Sgren Glud and Anders 1998)
26	(Swenseth and Godfrey 2002)	56	(Stanislaw 2005)
27	(Yokoyama 2002)	57	(Hui-Ling 2004)
28	(Zhaoa, Wang et al. 2004)	58	(Schmitt, Snyder et al. 2010)
29	(Abdul-Jalbara, Gutierrez et al. 2003)	59	(Selda and Emmett 2010)
30	(Barnes-Schuster, Bassok et al. 2002)	60	(Silver and Bischak 2011)

2.5.4 Identification des problématiques de recherche

Nous réalisons, afin de positionner nos travaux de recherche, une première classification des articles cités ci-dessus par rapport à des mots clés liés à notre problématique de recherche (Tableau 2).

- La gestion des stocks :
 - o Approvisionnement des stocks : dans cette colonne, nous précisons si les auteurs ont abordé les problèmes d'approvisionnement de stock et s'ils ont défini une méthode de gestion de stock spécifique.
 - o Optimisation des coûts de stockage : dans cette colonne, nous précisons si les auteurs ont eu comme objectif l'optimisation du coût de stockage
 - o Gestion des ruptures de stock : nous indiquons si le problème des ruptures de stock a été abordé et si les auteurs prennent en considération des coûts spécifiques ou des pénalités pour gérer et prendre en compte cet aspect.
 - o Stock de sécurité : nous faisons de même pour ce paramètre, nous indiquons si les auteurs ont bien traité cet aspect et s'ils l'ont traité d'une manière explicite
- La gestion du transport
 - o Politique de distribution (livraison) : nous précisons dans cette colonne si les auteurs ont traité un problème de gestion de distribution et s'ils ont proposé de nouvelles méthodes ou politiques
 - o Optimisation des coûts de transport : en analogie avec les coûts de stockage, nous précisons dans cette colonne si les auteurs ont pris les coûts de transport comme objectif d'optimisation.
 - o Contraintes de capacité de transport : nous étudions dans cette colonne l'aspect de la gestion des capacités de transport. nous regardons si les auteurs ont proposé des outils permettant d'optimiser la gestion de ces capacités.
- Demande : nous précisons si la demande traitée est une demande déterministe ou aléatoire
- Multi produits : nous précisons si le problème posé par les auteurs est un problème de gestion individuelle des produits ou non

- Multi échelons : nous indiquons si la structure de la chaine logistique étudiée est une structure sur plusieurs échelons ou non.

Tableau 2 : classification par rapport aux centres d'intérêt des auteurs

	Gestion de stock				Gestion de transport			Demande		Multi produits		Multi échelon	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Pro	dét	oui	non	oui	Non
1	*	*			*	*	*		*	*		*	
2	*	*		*	*			*		*			*
3	*	*	*	*	*		*	*			*	*	
4		*		*	*	*	*		*	*		*	
5	*	*				*			*	*			*
6	*	*			*	*			*	*			*
7	*	*				*		*			*	*	
8	*	*	*	*	*				*	*		*	
9	*	*	*		*			*		*			*
10		*	*	*	*			*		*		*	
11		*			*	*	*		*	*		*	
12	*	*			*	*			*	*		*	
13	*	*	*	*		*			*	*		*	
14	*	*		*		*			*	*			*
15	*				*	*	*		*	*		*	
16	*	*				*		*		*		*	
17	*	*			*			*		*		*	
18		*			*	*		*		*		*	
19		*			*	*	*		*	*		*	
20	*	*				*	*	*		*		*	
21	*	*	*	*		*		*			*	*	
22	*	*			*	*		*		*			*
23	*	*			*	*		*		*			*
24	*	*	*	*	*	*		*			*	*	
25	*	*	*		*	*	*	*		*		*	
26	*	*		*		*			*	*		*	
27	*	*	*		*	*		*		*		*	
28	*	*				*	*		*	*		*	
29	*	*			*			*		*		*	
30		*	*		*			*		*			*
31	*	*	*		*	*		*		*			*
32	*	*	*			*		*		*			*
33	*	*	*	*	*			*		*			*
34	*	*	*	*		*			*	*		*	
35	*	*			*				*	*			*
36	*	*			*	*			*	*		*	
37	*	*			*		*	*		*		*	
38	*	*	*			*		*		*		*	
39	*	*	*	*		*		*		*			*

40	*	*	*	*		*		*		*		*	
41	*	*	*	*	*				*	*		*	
42	*	*	*	*		*		*		*		*	
43	*	*	*	*	*			*		*		*	
44	*	*	*			*		*		*		*	
45	*	*				*		*		*		*	
46	*	*	*			*		*			*	*	
47	*	*	*	*	*	*			*	*		*	
48	*	*				*			*	*		*	
49		*	*		*	*	*	*		*		*	
50		*	*			*		*		*		*	
51	*	*	*			*		*		*			*
52	*	*		*	*	*		*		*		*	
53	*	*			*	*	*	*		*			*
54	*	*	*		*	*	*	*		*			*
55	*	*	*	*		*	*	*		*		*	
56	*	*	*	*	*	*		*		*		*	
57	*	*	*		*	*		*		*		*	
58	*	*	*	*	*	*		*		*		*	
59	*	*	*	*	*	*		*		*		*	
60	*	*	*	*	*	*		*		*		*	

2.5.5 Analyse des solutions proposées

Nous allons réaliser une deuxième classification (Tableau 3) des articles sélectionnés afin d'identifier les méthodes de résolution utilisées par les chercheurs.

- Nous avons distingué trois méthodes :
 - o La résolution mathématique (M) : dans ce cas, les auteurs se basent généralement sur la modélisation mathématique pour poser le problème ainsi que sur des outils de recherche opérationnelle pour trouver la solution optimale adéquate.
 - o Les heuristiques (H) : dans ce cas, les chercheurs proposent une étude du problème et définissent un ou plusieurs algorithmes afin de développer une solution spécifique pour un problème précis. Cette méthode est souvent précédée par une modélisation mathématique d'un problème complexe et que les auteurs ont beaucoup de difficultés à résoudre mathématiquement, de par sa complexité.
 - o Les méthodes analytiques : certains auteurs proposent l'analyse d'un problème spécifique. Ils exposent les difficultés présentes et décomposent le sujet en plusieurs parties complémentaires, constitutives et essentielles, et ce, afin d'en saisir les rapports et de donner un schéma général de l'ensemble.
- Le type de données utilisées dans l'expérimentation numérique :
 - o données générées (S) : Dans plusieurs cas, les auteurs se basent sur des simulations numériques afin de montrer des résultats concrets de leurs propositions. Dans la plupart des

cas, les simulations sont basées sur des données générées aléatoirement. Dans d'autre cas, les auteurs utilisent des bases de données existantes utilisées dans des travaux antérieurs.

- Des données réelles (R) : certains travaux sont accompagnés d'une étude de cas réel. Les solutions proposées s'appliquent sur des données réelles qui peuvent être injectées dans des simulateurs afin de fournir une analyse d'un cas concret.

Tableau 3 : classification par rapport aux méthodes de résolution

N°	Méthodes de résolution			Données		N°	Méthodes de résolution			Données	
	M	H	A	R	S		M	H	A	R	S
1		*			*	31	*	*		*	
2	*			*		32	*				*
3			*	*		33	*	*		*	
4	*	*		*		34	*				
5	*			*		35	*	*		*	
6	*	*		*		36	*				*
7	*	*				37	*				*
8		*	*	*		38	*				*
9	*			*		39	*		*		*
10	*	*		*		40	*	*			*
11	*	*		*		41	*				*
12			*		*	42	*				*
13	*		*	*		43	*				*
14	*	*		*		44	*				*
15	*			*		45	*		*		*
16	*			*		46	*	*			
17	*			*		47	*	*		*	
18	*	*			*	48	*	*			*
19	*	*		----	----	49	*	*		*	
20	*	*		*		50	*	*			*
21	*			*		51	*				*
22	*		*	*		52	*	*			*
23	*				*	53	*	*			*
24	*	*			*	54	*	*			*
25	*	*			*	55	*	*			*
26	*	*		*		56	*	*			*
27	*	*			*	57	*				*
28	*	*		*		58	*				*
29	*	*			*	59	*	*			*
30	*		*		*	60	*				*

2.6 Synthèse des travaux étudiés

La plupart des travaux cités précédemment traitent un problème d'optimisation combinée des coûts de stockage et de transport. Mais quand nous avons analysé le contenu de ces articles et les apports scientifiques et méthodologiques qui ont été proposés, nous nous sommes rendus compte que ces travaux traitent en général de problématiques dérivées. Nous présentons par la suite une étude approfondie de quelques articles par rapport aux critères de classification retenus dans les deux tableaux précédents et positionnons nos travaux par rapport à ces approches.

2.6.1 Optimisation concentrée sur les politiques de stock

Les travaux sont davantage concentrés sur l'optimisation des stocks, alors que les auteurs annonçant une optimisation intégrée du niveau de stock et de transport sont nombreux (29/60 des travaux cités intègrent un seul paramètre pour l'aspect transport). En effet, dans ces travaux les auteurs proposent une optimisation des coûts de stockage et étudient les politiques de stock qui peuvent être mises en place, en incluant l'aspect de transport comme un paramètre fixe dans la fonction objectif.

Nous retrouvons dans ces travaux l'une des situations suivantes :

- Des travaux concentrés sur la proposition des méthodes d'approvisionnement de stock avec la définition de quelques paramètres liés à l'aspect stockage (niveau de commande, niveau de reapprovisionnement, décision organisationnelle, ...), tout en négligeant l'aspect transport et en se limitant à l'intégrer comme étant une variable fixe et non pas un paramètre à optimiser ou une contrainte à prendre en compte dans la fonction objectif (les travaux : 2, 8, 9, 10, 17, 29, 33, 35, 41 et 43).
- Des travaux se limitant à des coûts de stock et un seul coût de transport bien qu'il s'agisse d'une problématique d'optimisation intégrée de coûts logistiques. Dans plusieurs cas, nous retrouvons les différents coûts de stock (coût de possession, coût passation, coût de rupture) qui sont injectés dans la fonction objectif sans tenir compte des coûts liés à l'aspect transport ou à leur optimisation (les travaux 5, 7, 13, 14, 16, 21, 26, 32, 34, 38, 39, 40, 42, 44, 45, 46, 48, 50 et 51).
- Manque de solutions pour des cas particuliers et critiques. Par exemple le cas des ruptures de stock, ce problème a été évoqué dans la plupart des travaux mais les propositions données ne présentent vraiment pas des vraies solutions pour un problème assez critique. Parmi les travaux étudiés, 23/60 ont étudié ce problème (les travaux : 3, 8, 9, 10, 13, 24, 25, 27, 30, 31, 33, 41, 43, 44, 47, 49, 54, 55, 56, 57, 58, 59 et 60).

A titre d'exemple, Ouyang et Cahng (Ouyang and Chang 2002) proposent une nouvelle méthode pour minimiser les coûts de stockage. L'objectif est d'optimiser simultanément la taille de lot, le niveau de reapprovisionnement de stock, le coût de passation des commandes (diminuer le nombre de commande) et le délai de livraison. Nous pouvons remarquer que l'ensemble des paramètres à optimiser est en

lien direct avec l'optimisation de stock, et que ceci affaiblit fortement l'aspect transport au regard des objectifs des auteurs, qui sont de réaliser une optimisation intégrée stock-transport.

Un autre travail peut montrer ce déséquilibre dans le traitement du problème de l'optimisation intégrée. En effet, Lee (Lee 2005) propose un modèle de révision continue des stocks en tenant compte des politiques de distribution des produits, des délais de réapprovisionnement et du nombre de ruptures de stock contrôlables. En outre, il développe une procédure algorithmique pour trouver la quantité de commande optimale et le délai d'exécution optimal. En adoptant ces changements sur la politique de gestion, il obtient des résultats significatifs dans l'optimisation du coût total annuel en se basant sur les paramètres de stock.

Dans la première contribution de nos travaux, nous traitons les deux aspects simultanément avec le maximum de paramètres de gestion de stock et de gestion de transport. D'une part, la méthode de réapprovisionnement proposée fournit une politique de stockage prenant en compte les niveaux de stock (niveau de recombplètement et niveau de commande) et différents types de commandes (normale et urgente) et une politique de distribution se basant sur plusieurs types de moyens de transport et traitant la gestion des capacités. D'autre part, la fonction objectif est composée des trois coûts de stockage (passation de commande, possession de stock, coût de rupture) et des deux coûts de transport (fixe et variable) afin de minimiser la globalité des coûts simultanément.

2.6.2 Optimisation concentrée sur les politiques de transport

Dans un souci de réciprocité avec le raisonnement évoqué dans le précédent paragraphe, nous analysons ici des travaux qui se basent essentiellement sur l'optimisation des coûts de transport et sur la proposition de politiques de distribution, en tenant compte des contraintes de stock sous la forme d'un ou deux paramètres fixes dans la fonction objectif (25/60 des travaux étudient moins de deux paramètres sur les soixante travaux cités dans le Tableau 2).

Dans la plupart de ces travaux, nous constatons une concentration sur la proposition de solutions pour une amélioration de la gestion de transport en limitant l'intégration de l'aspect de stockage dans les modèles proposés.

- Certains travaux proposent des politiques de distribution afin d'améliorer la gestion de transport et d'optimiser les coûts logistiques. Mais, ces travaux ne tiennent pas en compte de l'aspect stockage et ne proposent pas des meilleures solutions pour améliorer la gestion de stock simultanément avec l'aspect transport (les travaux 1, 15, 20, 22 et 23)
- Dans d'autres travaux d'optimisation de coûts logistiques, les auteurs proposent des modèles en intégrant les coûts de transport en se limitant à quelques coûts de stock sans tenir englober le problème de gestion intégrée transport-stock (les travaux 11, 18 et 19, 36 et 37).
- Des travaux qui se basent sur une optimisation séquentielle, c'est-à-dire les modèles développés pour la gestion de transport sont utilisés dans la gestion de stock sans modification en cas de besoin pour bien améliorer la solution globale et liée à la gestion de stock (les travaux 4, 11, 19, 25, 49, 53 et 54).

Dans le travail de Aydın et Christopher (Aydın and Christopher 2004), les auteurs développent un modèle de distribution multi-échelon général, soumis à une demande stochastique. Ils proposent un schéma de décomposition qui permet de développer une politique de distribution quasi-optimale, avec un minimum de coûts de distribution totale prévue. Ils utilisent une analyse du système multi-échelon en deux applications spécifiques. La première application porte sur un réseau de distribution composé d'un magasin de détail basé dans l'extrémité du réseau et de plusieurs entrepôts. Le détaillant peut remplir les commandes générées à partir du magasin ou des entrepôts. Les auteurs évaluent le compromis entre ces deux options, tandis que dans la deuxième application, les auteurs ont essayé de trouver un moyen rentable pour distribuer les produits en utilisant le système de distribution combinée des deux détaillants. Dans ces deux propositions, les auteurs adoptent un seul coût de stock lié à la passation de commandes entre les deux échelons. Les auteurs ne proposent pas une étude pour optimiser les quantités stockées dans chaque échelon.

Dans le travail de Bertazzi et Speranza (Bertazzi and Speranza 1999), les auteurs traitent le problème de la minimisation de la somme des coûts d'inventaire et de transport dans un réseau logistique multi-produits composé par une origine, quelques nœuds intermédiaires et une destination pour laquelle un ensemble d'expéditions sont possibles avec des fréquences différentes. Le problème est de déterminer pour chaque lien une stratégie d'expédition périodique afin de minimiser le coût total. Ils présentent plus de deux formulations du problème obtenu en calculant le coût de possession des stocks grâce à l'agrégation de l'inventaire au fil du temps. Enfin, ils présentent des algorithmes heuristiques basés soit sur la décomposition du problème général, soit sur la solution d'un problème plus simple grâce à des techniques de programmation dynamique afin de proposer une stratégie de distribution des produits entre les différents échelons de la chaîne logistique étudiée.

Dans la deuxième contribution, nous traitons le cas des ruptures de stock. En se basant sur le fait que nous sommes placés dans un contexte où les ruptures de stock sont interdites pour des raisons humanitaires ou législatives, nous proposons une politique se basant sur les commandes urgentes. La méthode de réapprovisionnement développée prend en compte l'aspect stockage en incluant les différents coûts de stock ainsi que l'aspect transport en définissant une politique de distribution basée sur des commandes urgentes et rapides. De ce fait, les coûts de transport peuvent être inclus dans le coût de passation de commande vu que les moyens de transport utilisés sont dédiés pour répondre à ces contraintes (moyen de transport rapide et cher).

2.6.3 Chaîne logistique étudiée: multi produits, multi échelons, demande

2.6.3.1 Mono ou multi produits

Nous trouvons plusieurs travaux qui proposent des solutions mono produit pour la gestion combinée des stocks et de transport. Les solutions proposées se basent sur un raisonnement où les produits sont gérés indépendamment. Pour le calcul de coût logistique global, les auteurs effectuent des additions sur l'ensemble des coûts générés pour chacun des produits comme c'est le cas dans les travaux (Dullaert, Vernimmen et al. 2007) et de (Das and Tyagi 1997).

Nous retrouvons deux sortes de modèles dans ce cadre de la gestion multi produits :

- Le premier est un modèle basé sur la gestion mono produit et généralisé par la suite sur l'ensemble des produits gérés soit en réalisant une sommation sur le nombre total soit en multipliant le coût unitaire par le nombre de produits dans le cas de calcul de coûts.
- Le deuxième type de modèle, considéré comme les améliorations les plus récentes dans ce contexte, se base sur l'étude d'une éventuelle corrélation par rapport à un critère lié à la gestion des produits. Dans la plus part des travaux, cette corrélation est liée à la demande de l'ensemble des produits étudiés.

Dans notre étude, nous développons la notion de famille de produits afin de résoudre le problème de gestion multi-produit. Cette approche nous permet de regrouper les produits qui présentent des caractéristiques communes dans une même famille afin de les gérer simultanément et proposer une solution adéquate pour l'ensemble.

2.6.3.2 Deux ou plusieurs échelons

La plupart des travaux proposent des solutions sur deux échelons. Le même raisonnement appliqué sur ces deux niveaux peut être généralisé à l'ensemble de la chaîne logistique, sauf lorsque la gestion est centralisée comme c'est le cas dans plusieurs travaux (Cetinkaya, Mutlu et al. 2006; Kutanoglu and Lohiya 2008).

Notre étude porte sur une chaîne logistique de distribution composée de deux niveaux et de plusieurs maillons à chaque niveau. La solution proposée peut être généralisée sur une chaîne multi-niveaux puisque nous proposons une solution décentralisée.

2.6.3.3 Demande déterministe ou probabiliste

Certains auteurs se basent, dans leurs travaux, sur une demande probabiliste mais, pour des raisons de complexité, ajoutent des hypothèses restrictives qui transforment cette demande en demande stationnaire (Huang, Chew et al. 2004; Hwang, Chong et al. 2005).

La demande aléatoire présente dans la plupart des travaux une source d'incertitude qui a été résolue par la mise en place de fortes quantités de stock de sécurité dans le cas où les ruptures de stock sont interdites ou de ventes perdues dans le cas où la demande ne peut pas s'assurer ou de vente différée dans le cas où la demande peut s'assurer après une période d'attente.

Nous considérons dans la suite de nos travaux une demande probabiliste. Dans un premier temps, nous nous intéressons à une demande aléatoire et répétitive qui peut être représentée par la loi normale. Dans un deuxième temps, nous considérons une demande très aléatoire et ponctuelle qui peut être représenté par la loi des événements rares (loi de poisson).

2.6.4 Méthode de résolution

Nous remarquons que la majorité des solutions proposées se base sur une modélisation mathématique des problèmes posés, suivie d'une partie optimisation (56 travaux /60 travaux). Ceci explique l'utilisation des outils de recherche opérationnelle dans la plupart de ces travaux.

D'autre part, les auteurs ont recours aux méthodes heuristiques pour proposer des solutions à des problèmes complexes (34 travaux/60). En effet, les auteurs sont parfois confrontés à des fonctions objectifs assez complexes, ce qui rend difficile la recherche de l'optimum mathématiquement.

Tandis que d'autres auteurs proposent une analyse des problèmes posés en étudiant différents cas possibles (9 travaux/60), ces analyses reposent principalement sur des cas particuliers dans des chaînes logistiques spécifiques (Watson and Polito 2003; Akcali and Bayindir 2006; Cetinkaya, Mutlu et al. 2006).

Les solutions proposées dans notre thèse reposent sur une modélisation mathématique pour le calcul et l'optimisation des coûts logistiques et sur des méthodes heuristiques afin de définir les méthodes de réapprovisionnement développées. L'analyse numérique est basée sur des simulations réalisées avec des données générées aléatoirement dans le troisième et le quatrième chapitre, et des données réelles dans le dernier chapitre de la thèse.

2.7 Gestion des ruptures de stock

Le comportement des clients face à une rupture peut être de différente nature : si les clients attendent de recevoir les quantités manquantes dans les prochaines périodes, il s'agit alors d'un cas de « commande en souffrance » ou de ventes différées pour le vendeur. Dans ce cas, le niveau de stock chez le détaillant peut avoir des valeurs négatives. Si les clients n'acceptent pas d'attendre pour recevoir les quantités manquantes, nous sommes alors face à un cas de « vente perdue », dans lequel le niveau de stock chez le détaillant ne peut pas avoir de valeur négative ; sinon, dans le dernier cas, les clients imposent la réception de leurs commandes, c'est le cas des « commandes urgentes ».

Nous allons détailler quelques travaux qui ont proposé différentes solutions pour les ruptures de stock. Les solutions proposées appartiennent à l'un des trois cas : « vente différée », « vente perdue » ou « commande urgente ».

Dans ses travaux de recherche, Chi (Chi 2001) développe un modèle de programmation dynamique pour un système d'inventaire périodique avec deux niveaux de réapprovisionnement de stock, un niveau de réapprovisionnement normal et un niveau de réapprovisionnement d'urgence. Dans son système, les commandes régulières sont placées au début des cycles de commande, tandis que les commandes d'urgence peuvent être placées au cours de ces périodes. Ils supposent que les niveaux ordinaires et d'urgence de commande sont distincts, ils proposent alors deux modèles de calculs, le premier pour définir le niveau de réapprovisionnement ordinaire pour chaque période et le deuxième pour définir le niveau de réapprovisionnement urgent. Ils ont développé une politique optimale de commande ainsi qu'un algorithme heuristique pour calculer les paramètres de la politique optimale en se basant sur

plusieurs variables (coût de commande normale, coût de commande urgente, coût de possession de stock, fonction de densité de la demande, horizon de planification, niveaux de stock). Les résultats de cette étude peuvent aider les gestionnaires à décider des modalités d'utilisation du mode de réapprovisionnement d'urgence, lorsque cette option alternative est disponible.

Dans le travail de Giri et Doha (Giri and Dohi 2009), les auteurs mentionnent que la plupart des études sur le contrôle des stocks sont plutôt des problèmes d'optimisation minimisant le critère de coût. Toutefois, lorsque les gestionnaires mettent les systèmes d'inventaire dans des situations concrètes, ils doivent tenir compte de la fiabilité de ces systèmes ainsi que de l'aspect économique. Dans ce travail, la fiabilité est définie comme la probabilité que le stock ne sera pas épuisé pendant une durée prédéterminée. Dans le cas contraire, les auteurs discutent des politiques de contrôle de stock qui offrent un équilibre entre les exigences économiques et les exigences de fiabilité en étudiant les trois cas présentés précédemment et ce, en appliquant le critère de coût-efficacité qui comprend en même temps les effets de la disponibilité du système et le coût anticipé, comme une optimalité.

Le cas des ventes différées est étudié dans le travail de Selda et Emmett (Selda and Emmett 2010). Dans cet article, les auteurs abordent un problème d'inventaire stochastique pour les entreprises manufacturières qui font face à des décisions d'approvisionnement associées à des produits saisonniers. Les auteurs présentent une politique de contrôle dans laquelle les décisions sont basées sur un modèle de prévision de demande avec fortes perturbations. L'objectif du modèle proposé est de déterminer les quantités optimales de commande. Le problème est défini sur un horizon composé de plusieurs périodes de contrôle des stocks. Le modèle est formulé en ayant recours à une étude stochastique, où la demande au cours de chaque période est représentée comme une convolution de la demande de la période courante. L'objectif de cette étude est de réduire les coûts de stockage pour répondre à la demande stochastique et de façon proactive pour la préparation de demandes potentielles au cours de la période de consommation.

Le cas des commandes urgentes est détaillé dans le travail de Sven (Sven 2007). Dans son article, l'auteur examine un système d'inventaire mono échelon (un entrepôt) avec une demande clientèle basée sur la distribution de la loi de Poisson. Le système de gestion mis en place repose sur un suivi continu du stock avec gestion au point de commande. Toutefois, il est également possible d'utiliser des commandes d'urgence. Ces commandes génèrent des coûts supplémentaires, mais ont un délai beaucoup plus court. Les auteurs considèrent dans ce système les coûts de rupture de stock, ainsi que les coûts de commande normale. D'un point de vue pratique, une règle de décision heuristique pour les commandes d'urgence de déclenchement est suggérée. La règle de décision minimise les coûts attendus dans l'hypothèse où il n'y a qu'une seule possibilité pour une reconstitution d'urgence. Compte tenu du fait que la politique en vigueur se base sur le réapprovisionnement continu, la règle de décision sera toujours de réduire les coûts prévus. Les auteurs se sont basés sur des simulations pour montrer que la technique proposée donne de bons résultats dans des conditions pourtant différentes.

Le travail de Sgren Glud et Anders (Sgren Glud and Anders 1998) est parmi les meilleurs travaux portant sur les ruptures de stock en proposant une méthode de réapprovisionnement basée sur les commandes urgentes. Dans cet article, les auteurs considèrent explicitement la possibilité d'utiliser un mode de réapprovisionnement d'urgence pour se protéger contre l'incertitude de la demande dans le cas d'un système mono-produit. Les commandes normales avec un temps relativement long et constant sont contrôlées par les normes de la politique (R, Q). Les commandes urgentes ne peuvent être émises qu'en l'absence d'autres commandes normales.

Les situations d'urgence sont contrôlées par deux niveaux : le niveau de commande et un niveau de reconstituer. Ces deux paramètres dépendent d'une variable pour mesurer le temps restant jusqu'à ce que la commande normale soit livrée. Les commandes d'urgence ont un délai très court et elles ont des coûts supérieurs aux commandes normales. Cette mesure n'exige pas de commande immédiate en cas de rupture de stock mais permet plutôt aux commandes urgentes d'être différées. Les auteurs formulent un modèle de coûts pour les deux types de commandes, les coûts des ventes différées et les coûts de possession.

L'algorithme développé vise à réduire les coûts de stocks avec des commandes d'urgence. Pour identifier la meilleure politique, les auteurs utilisent une simple politique d'urgence pour réaliser des comparaisons en réalisant des simulations. Les résultats numériques sont présentés, avec une série de variations des paramètres, et comparés aux résultats sans ordonnances d'urgence, mais aussi comparés aux résultats du modèle de référence. Les résultats obtenus montrent que des gains substantiels pourraient être obtenus en utilisant des commandes d'urgence, notamment lorsque les coûts de ruptures sont élevés.

Stanislaw (Stanislaw 2005) présente une politique de révision périodique avec la possibilité de passer des commandes urgentes afin de limiter les commandes retardées ou perdues. Des commandes d'urgence sont passées pour répondre à la demande dès que survient un manque dans le stock. On présuppose que les demandes sont distribuées de façon indépendante au cours de périodes successives. Il existe deux modes d'approvisionnement disponibles: un mode normal et un mode d'urgence. Aucun délai de livraison pour les commandes en urgence n'est supposé, mais le prix d'achat est majoré. La mesure d'efficacité de cette politique est basée sur le calcul des coûts logistiques utilisés. Le coût minimal est obtenu en considérant ce système comme un processus de décision de Markov à temps discret. L'auteur se base sur un algorithme d'optimisation basé sur cette théorie pour trouver les paramètres de la politique optimale. Dans le système développé, l'auteur considère les trois cas possibles pour répondre aux éventuelles ruptures. Il utilise les commandes urgentes pour limiter les ventes perdues ou différées.

Les auteurs analysent dans leur travail (Teunter and Vlachos 2001) un modèle en temps discret d'inventaire avec deux modes d'approvisionnement. Des commandes régulières sont placées périodiquement et arrivent après un délai de livraison déterministe. Des commandes urgentes caractérisées par un délai plus court et déterministe mais avec des coûts plus élevés, peuvent être placées en cas de rupture de stock. Les auteurs proposent et analysent une politique se basant sur des commandes d'urgence qui arrivent un certain nombre fixe d'unités de temps précédant une

commande régulière. Ils se basent sur un modèle de coûts approximatifs et développent deux scénarios pour se rapprocher des conditions d'optimalité explicite. La première série de conditions liées au nombre maximum de commandes urgentes par périodes est assez compliquée, mais ils montrent par la réalisation de simulations qu'elles conduisent à des politiques quasi-optimales dans la plupart des cas. La deuxième série de conditions est très simple et semble plus pratique, mais ces conditions ne conduisent à une politique quasi-optimale s'il y a suffisamment de possibilités d'approvisionnement d'urgence dans une période de révision, afin de prévenir la plupart des commandes en rupture.

En résumé, les solutions proposées dans les travaux présentés varient entre les trois catégories des cas de « ventes perdues », « ventes différées » ou « commandes urgentes ». Cette dernière solution est mieux placée d'être la solution la plus pratique vu que dans certaines conditions les ruptures de stock sont interdites pour différentes raisons humanitaires, législatives ou même économiques.

Dans nos travaux, nous adoptons cette solution en montrant l'efficacité de cette solution surtout sur le plan économique. En revanche, cette solution peut être plus intéressante et convaincante lorsque nous l'appliquons dans le cadre multi-produit tout en proposant le regroupement des produits en familles homogènes ce qui n'était pas le cas dans les travaux présentés ultérieurement.

2.8 Politique de réapprovisionnement pour une gestion multi-produit

Dans un système mono-produit et dans un cadre très général, l'optimalité de la politique (s, S) , classée parmi les politiques à réapprovisionnement continu, a été prouvée par Iglehart (Iglehart 1963).

Dans un contexte d'approvisionnement continu basé sur les niveaux de stock (niveau de commande s et niveau de rechargement S), Veinott et Wagner (Veinott and Wagner 1965) ont montré des limites de l'optimalité des deux niveaux s et S , ainsi que l'optimalité de la méthode elle-même. Ils expliquent que cette méthode s'applique essentiellement au recensement complet de la grille à deux dimensions (s, γ) , en supposant que $\gamma = S - s$.

Zheng et Federgruen (Zheng and Federgruen 1991) ont proposé un algorithme basé sur un certain nombre de nouvelles propriétés de la fonction de coût logistique sur un horizon infini, ainsi que le renforcement des bornes de calcul pour les valeurs optimales de s et S . Sur cette base, ils ont d'abord fixé, un des deux paramètres s ou S , et ensuite ils font varier l'autre paramètre de manière itérative pour améliorer la fonction de valeur jusqu'à la convergence. Ils ont élaboré un modèle de réapprovisionnement périodique avec un critère d'optimisation à long terme du coût moyen. Ils ont également décrit une façon de l'appliquer à un réapprovisionnement continu et ils ont considéré comme un modèle d'optimisation de coûts logistiques.

Plus récemment, (Benkherouf and Sethi 2010) ont montré l'optimalité d'une politique (s, S) pour un modèle d'inventaire d'horizon infini et mono produit. Les auteurs supposent que les coûts de pénalité sur les ruptures de stock sont composés de deux parties : un coût forfaitaire indépendant du montant de la pénurie et un coût variable proportionnel à la quantité manquante. Ils se sont basés

sur une approche «Quasi-Variational Inequality » qui permet de proposer une version optimale de la politique (s, S) sous certaines conditions.

Toutefois, dans les systèmes multi-produits avec des coûts combinés de réapprovisionnement, les politiques optimales n'ont pas une structure simple en général. Ignall (Ignall 1969) a donné un exemple simple de deux produits afin de montrer que la politique optimale ne parvient pas à avoir une forme simple.

Une classe de règles simples de contrôle coordonné, appelé (s, c, S) , a été présentée par Balintfy (Balintfy 1964). Cette politique a trois paramètres s_i , c_i et S_i pour chaque produit i avec $s_i \leq c_i < S_i$. Une commande est déclenchée lorsqu'un produit a un niveau de stock inférieur à son point de commande s_i . Tout produit j dont niveau de stock est inférieur à c_j sera inclus dans la commande quand un ordre est déclenché. Le niveau de stock de chaque produit inclus dans l'ordre est reconstitué à son niveau S_i .

Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui analysent la façon de calculer les différents paramètres de la politique (s, c, S) avec des processus indépendants de la demande. Pour le cas particulier d'une demande qui suit la distribution de la loi de Poisson, Silver (Silver 1974) a fourni une méthode itérative pour calculer les paramètres d'une politique sous-optimale (s, c, S) . Dans un autre travail lié au précédent, (Federgruen, Groenevelt et al. 1984) ont étudié le problème dans un cadre plus général, et ont proposé une heuristique qui définit le principe du découplage, ils proposent de décomposer le problème multi-produit en des sous problèmes liés chacun à un seul produit. Pour chacun des problèmes mono-produit résultant, ils ont utilisé le concept d'une politique indépendante (s, c, S) .

Melchior (Melchior 2002) a proposé une approche de compensation pour le calcul des paramètres des politiques « can-order policies », et a montré que l'approche de Federgruen et al. (1984) peut aboutir à une solution loin de l'optimalité pour la politique (s, c, S) .

Atkins et Iyogun (Atkins and Iyogun 1988) ont proposé des politiques de réapprovisionnement périodique où tous les produits sont réapprovisionnés jusqu'aux niveaux de rechargement de stock. Deux types de politiques ont été proposés : une politique dans laquelle tous les produits sont commandés pour atteindre leurs niveaux de rechargement de stock à chaque période ; une politique se basant sur un réapprovisionnement périodique de l'ensemble des produits dépassant les niveaux de commande, le reste des produits étant réapprovisionné après un délai (multiple entier de la période de base) quand ils dépassent aussi leurs niveaux de commande. Les auteurs montrent que ces dernières politiques de réapprovisionnement peuvent surpasser les politiques usuelles. Ces travaux ont été repris par Viswanathan (Viswanathan 1997) et Nielsen et Larsen (Nielsen and Larsen 2005). Ces derniers travaux ont montré que ces politiques sont les plus performantes parmi les politiques envisagées.

Lorsque les demandes sont corrélées, il existe dans la littérature des travaux pour discuter de la faisabilité de travailler avec une demande liée, ainsi que plusieurs façons de modéliser les corrélations dans le problème d'inventaire stochastique.

Eppen (Eppen 1979) analyse les systèmes stochastiques d'inventaire périodique dans le cadre de la mutualisation des risques. Ce travail a été repris par Corbett et Rajaram (Corbett and Rajaram 2006) afin de généraliser ces résultats à des processus dépendants de la demande.

Il existe différentes manières d'exprimer une corrélation dans la demande entre plusieurs produits dans un cadre de réapprovisionnement continu. Xu (Xu 1999) s'est basé sur une corrélation de la demande pour rassembler les produits en plusieurs classes distinctes, où chaque classe est composée d'un ou plusieurs types de produits. Il a proposé par la suite un système de réapprovisionnement à la commande pour chaque classe de produits. Le processus de rassemblement de chaque classe est modélisé comme un processus de Poisson, alors que le nombre d'unités de chaque type de produits dépend de la distribution de la loi utilisée.

Dans le même domaine, Song (Song 1998) a fourni une version généralisée de Xu pour traiter la corrélation dans la demande.

Parmi les travaux les plus récents, nous détaillons le travail de (Feng, Muthuraman et al. 2007). Les auteurs analysent les politiques optimales qui minimisent les coûts des systèmes de stock multi-produits et stochastique. La différence entre ce travail et les travaux présentés précédemment qui étudiaient les systèmes d'inventaire multi-produits est que ce travail analyse l'existence de la corrélation dans la demande et les coûts conjoints de réapprovisionnement sur de multiples produits en un seul problème. Bien que la littérature antérieure sur les systèmes de gestion multi-produit aient retenu des heuristiques décomposant un problème à N produits en N problèmes à un produit, les auteurs mettent l'accent sur les structures des politiques optimales pour les systèmes de gestion multi-produits, en particulier lorsque la demande est corrélée à travers l'ensemble des produits. Le problème est formulé comme un processus de décision de Markov (MDP). Les auteurs proposent une méthode particulière pour calculer la politique optimale qui utilise une frontière variable basée sur la règle de l'amélioration de la politique proposée. La politique proposée est une heuristique (s, c, d, S) , qui saisit l'incidence d de la corrélation de la demande sur la structure de la politique optimale.

La principale différence avec la méthode (s, c, d, S) proposée et la méthode (s, c, S) usuelle est que les niveaux de rechargement sont déterminés par le niveau de la corrélation qui existe entre la demande des produits stockés.

En résumé, les travaux présentés proposent des solutions quasi-optimales pour le problème de gestion multi produit. Les solutions proposées sont généralement sous la forme de politique de réapprovisionnement étudiant différents contextes. En revanche, toutes les méthodes proposées traitent l'aspect multi produit en proposant une décomposition en sous problèmes mono produit, ou en proposant un classement monocritère de produits afin de diviser la totalité des produits en sous ensembles. Ce classement est lié en général aux caractéristiques de la demande.

Dans notre travail, nous allons utiliser la notion de famille homogène de produits afin de résoudre le problème de gestion multi produit. En effet, dans les deux chapitres suivants, nous proposons deux politiques de réapprovisionnement pour deux différentes familles de produits. Par la suite dans le cinquième chapitre, nous généralisons le principe de regroupement des produits en familles homogènes en se basant sur des outils de fouille de données.

2.9 Conclusion

Dans la première section de ce chapitre, nous avons défini quelques notions liées à notre travail afin de nous positionner et de citer les travaux les plus proches de notre étude. Il est à noter que la liste des définitions données n'est pas exhaustive, mais nous avons essayé de sélectionner la ou les définitions les plus pertinentes.

Par la suite, nous avons réalisé deux classifications d'un échantillon de soixante articles. La première classification est faite par rapport à des mots clés dans la gestion de stock (approvisionnement des stocks, optimisation des coûts de stockage, gestion des ruptures de stock, stock de sécurité) et la gestion de transport (politique de distribution, optimisation des coûts de transport, gestion de capacité de transport) ainsi qu'au regard de caractéristiques de la chaîne logistique (nombre d'échelons, nombre de produits) et de la demande (déterministe ou probabiliste). La deuxième classification est faite par rapport aux critères liés aux méthodes de résolution utilisées (mathématique, algorithmique, analytique) ainsi qu'aux variables utilisées. Une synthèse suit ces deux classifications.

Une dernière partie est consacrée à l'étude de quelques politiques de réapprovisionnement en lien avec nos travaux.

Nous présentons dans le chapitre suivant une nouvelle méthode de réapprovisionnement qui résout un problème particulier dans la gestion combinée de stock et de transport.

Chapitre 3 : Optimisation combinée des coûts logistiques

SOMMAIRE

- Chapitre 3 : Optimisation combinée des coûts logistiques.....43**
- 3.1 Introduction..... 44
- 3.2 Système étudié..... 45
- 3.3 Proposition d’une nouvelle politique de réapprovisionnement 47
- 3.4 Calcul des paramètres S, T et s..... 49
- 3.5 Fonctions de calcul des coûts logistiques..... 52
- 3.6 Optimisation du coût logistique total..... 55
- 3.7 Expérimentation et validation..... 61
- 3.8 Conclusion 69

3.1 Introduction

Les systèmes de gestion de stock sont confrontés à des facteurs très aléatoires pouvant conduire à deux problèmes majeurs : soit des ruptures de stock occasionnelles, à l'origine d'une dégradation de la qualité de service, soit des invendus qui engendrent des pertes importantes pour l'entreprise.

Au cours de ce chapitre, nous nous intéresserons à un ensemble de produits approvisionnés auprès d'un même fournisseur.

En effet, la plupart des solutions proposées dans la littérature qui ont abordé la gestion combinée de stock et de transport sous contrainte d'une demande stochastique font l'hypothèse que celle-ci peut être soit stationnaire soit dépendant de l'historique de la consommation. En d'autres termes, la demande peut être prévue dans le futur. Cependant, dans notre étude nous nous sommes positionnés dans le cadre d'une demande probabiliste aléatoire qui ne dépend ni du temps ni de l'historique de consommation. C'est-à-dire, aucune information externe ne sera prise en compte dans notre traitement. Nous allons nous baser sur les lois de probabilité (fonction de répartition et fonction de densité) pour représenter cette demande aléatoire.

Cependant, le gestionnaire, quand il se retrouve face à ce genre de situation, propose des solutions d'urgence et mal réfléchies qui coûtent beaucoup plus cher que les solutions planifiées, puisque il est obligé de fonctionner avec les moyens disponibles par exemple les caractéristiques des moyens de transport utilisés, les capacités de stockage et de transport

Au cours de ce chapitre, nous allons proposer une politique de réapprovisionnement simultanée de l'ensemble des produits livrés par un même fournisseur.

Nous suivons la démarche d'aide à la décision composée par trois étapes : la première étape est une étape de modélisation dans laquelle nous commençons par définir le système étudié en présentant les caractéristiques des produits considérés, ainsi que le schéma de transport adopté.

La deuxième étape est consacrée à la résolution du problème posé. En effet, nous présentons la nouvelle politique classée parmi les méthodes de réapprovisionnement continu avec niveau de recomplètement. Puis, nous définissons des fonctions pour calculer les coûts logistiques de stock et de transport.

Ceci nous conduit à proposer une méthode heuristique pour optimiser les coûts logistiques de stockage (possession, passation et rupture) et de transport (fixe et variable).

Dans la dernière étape, nous analysons les résultats obtenus suite à des simulations réalisées en comparant la politique proposée à une politique de référence. Ces résultats montrent des gains réalisés qui sont présentés séparément pour les coûts de transport, les coûts de stockage et les coûts logistiques totaux.

3.2 Système étudié

Comme tout système, une politique d'approvisionnement se conçoit d'abord au niveau stratégique. Les décisions prises à ce niveau se déclinent ensuite au niveau tactique. Le contenu de ce travail concerne ces deux niveaux.

Nous nous sommes d'abord intéressés à la définition du contexte général de la politique de réapprovisionnement étudiée, laquelle a pour conséquence qu'une décision stratégique primaire sur la typologie de la méthode de réapprovisionnement se décline en décisions tactiques et opérationnelles sur le calcul des paramètres de gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Le contexte général du système faisant l'objet de notre étude dans ce chapitre est défini comme suit : un fournisseur livrant de nombreux produits faisant l'objet de demandes présentant une grande variabilité qui peuvent induire des stocks de sécurité très importants dès que la périodicité de réapprovisionnement est élevée. Ceci peut conduire à des approvisionnements avec des moyens de transport différents selon le volume à transporter.

Dans ce contexte, la solution proposée est la combinaison d'un réapprovisionnement périodique systématique avec une scrutation à chaque unité de temps des stocks pour anticiper sur les ruptures et réduire les stocks de sécurité.

3.2.1 Caractérisations des produits

Chaque politique de réapprovisionnement est définie pour un contexte particulier afin de répondre aux exigences posées par le gestionnaire. Une grande partie de ce contexte est liée aux caractéristiques des produits gérés dans le stock. Dans le cas de traitement d'un ensemble de produits simultanément, ces caractéristiques conditionnent le choix de la politique de réapprovisionnement. Nous utiliserons la notion de famille de produits pour indiquer cet ensemble de produits gérés de manière mutualisée.

Dans cette étude, nous nous intéressons à des produits possédant les caractéristiques suivantes :

- les produits sont fournis par un même fournisseur ;
- ils sont en nombre suffisants pour justifier d'une mutualisation des approvisionnements mais en nombre trop limité pour les regrouper par famille ;
- la demande est aléatoire et très variable selon les produits. Dans la pratique cette demande peut être représentée par la loi Normale ;
- le délai de livraison est le même pour tous les produits et est supposé constant ;
- nous considérons des produits moyennement chers permettant la détention de stocks de sécurité afin d'éliminer dans la mesure du possible les ruptures et les commandes urgentes ;
- la durée de vie des produits dans cette famille est limitée.

3.2.2 Autres hypothèses

Nous considérons par ailleurs les hypothèses suivantes :

- le coût de transport est fixe entre deux échelons (n, n-1) et est pris en charge par l'échelon (n-1) ;
- le délai de livraison est constant ;
- le fractionnement de la quantité commandée n'est pas autorisé : une quantité commandée est livrée en totalité, une rupture, constatée ou anticipée, déclenche un réapprovisionnement urgent ;
- la chaîne logistique est dyadique : Centre de distribution – Centre de consommation.

3.2.3 Exigence du système de gestion de stock et de transport

Nous supposons qu'il y a trois types de véhicules (VT) (petite, moyenne et grande afin de couvrir la variété des tailles des véhicules). La livraison de chaque commande de l'entrepôt au détaillant est réalisée sans fractionnement de lot ; ces types sont définis par rapport à la taille de chaque véhicule : petite taille (S) de capacité C_1 , moyenne taille (M) de capacité C_2 et grande taille (L) de capacité C_3 . Pour ces différents véhicules, nous affectons des coûts fixes (FC) distincts et des coûts variables (VC). Les véhicules sont numérotés de 1 à 3 pour chaque type. Voir Tableau 4.

Tableau 4: schéma de transport

VT	C	FC	VC
S	C_1	FC_1	VC_1
M	C_2	FC_2	VC_2
L	C_3	FC_3	VC_3

A partir des notations utilisées dans le tableau précédent, nous fixons :

- $FC_1 < FC_2 < FC_3$,
- $VC_1 > VC_2 > VC_3$,
- $C_1 < C_2 < C_3$,
- $FC_2 = FC_1 + C_1 (VC_1 - VC_2)$,
- $FC_3 = FC_2 + C_2 (VC_2 - VC_3)$.

Nous définissons par la suite des contraintes de liaisons entre les variables utilisées pour permettre une bonne utilisation des véhicules. Ces contraintes interdisent le dépassement de capacité à chaque changement de véhicule. De ce fait, le coût de transport varie selon la quantité commandée comme indiqué dans la Figure 7.

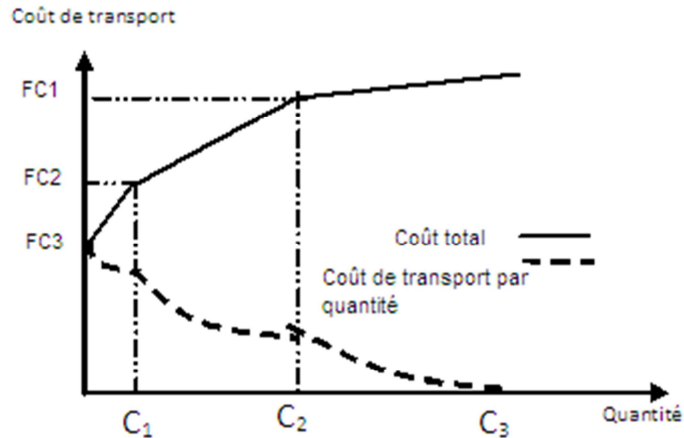
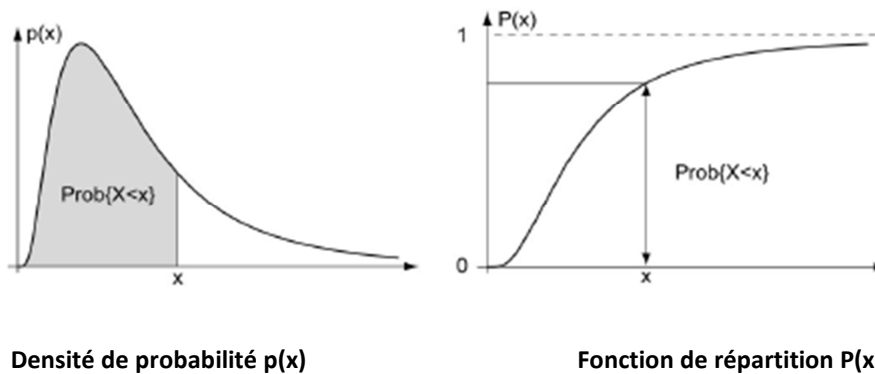


Figure 7 : Variation des coûts de transport

3.2.4 Caractéristique de la demande

Nous considérons une demande représentée par une variable aléatoire définie par une fonction de répartition et une fonction de densité de probabilité.

La densité de probabilité $p(x)$ ou la fonction de répartition $P(x)$ définissent la loi de probabilité d'une variable aléatoire continue X . Elles donnent lieu aux représentations graphiques suivantes (Figure 8):



Densité de probabilité $p(x)$

Fonction de répartition $P(x)$

Figure 8 : loi de probabilité

Dans le cas de ce chapitre, nous supposons que la demande suit la loi normale de paramètres m et σ .

3.3 Proposition d'une nouvelle politique de réapprovisionnement

Tout d'abord, nous définissons quatre variables qui représentent les paramètres principaux pour décrire le fonctionnement de la politique de réapprovisionnement proposée :

- Période de réapprovisionnement (T) : c'est la période de temps séparant deux réapprovisionnements.
- Niveau de remplètement (S): c'est le niveau maximal de stock. A chaque réapprovisionnement périodique, tous les produits sont remplétés par des quantités commandées pour atteindre ce niveau.

- Niveau de commande urgente (s') : ce niveau représente le niveau de déclenchement d'une commande urgente pour ce produit.
- Niveau de commande (s'') : ce niveau permet de distinguer deux ensembles de produits. Le premier ensemble est composé par les produits qui dépassent ce niveau et qui doivent être commandés lors d'un réapprovisionnement. Tandis que le deuxième ensemble est composé par les produits qui n'ont pas atteint encore ce niveau.

Fonctionnement :

Nous définissons dans cette partie une nouvelle politique de réapprovisionnement qui se base sur le principe de révision périodique avec une scrutation à chaque unité de temps dans un contexte multi-produit. Une commande est lancée au début de chaque période T pour une famille de produits donnée. Les produits de cette famille sont plus ou moins consommés au cours de cette période. Les quantités commandées au début de chaque période sont calculées sur la base des niveaux de stock et des niveaux de recombplètement (la quantité q^* pour chaque produit).

Le dépassement du niveau s' par l'un des produits en stock (le cas du produit numéro 2 dans la figure suivante) génère une commande urgente pour ce produit et pour l'ensemble des produits qui se trouvent entre les niveaux s' et s'' (le cas du produit 3). Par contre, pour les produits dont le stock dépasse le niveau s'' , une décision doit être prise reposant sur l'espérance de gain en cas de commande anticipée de ce produit (nous détaillons cet aspect dans le paragraphe 3.6).

Les quantités commandées dans ce cas sont des quantités suffisantes pour couvrir la consommation de chaque produit jusqu'à la prochaine période de réapprovisionnement (les quantités qr_2 et qr_3 pour les produits 2 et 3 respectivement).

Ce fonctionnement est schématisé dans la Figure 9. Nous représentons la consommation des quantités stockées par des courbes linéaires juste à titre de simplification.

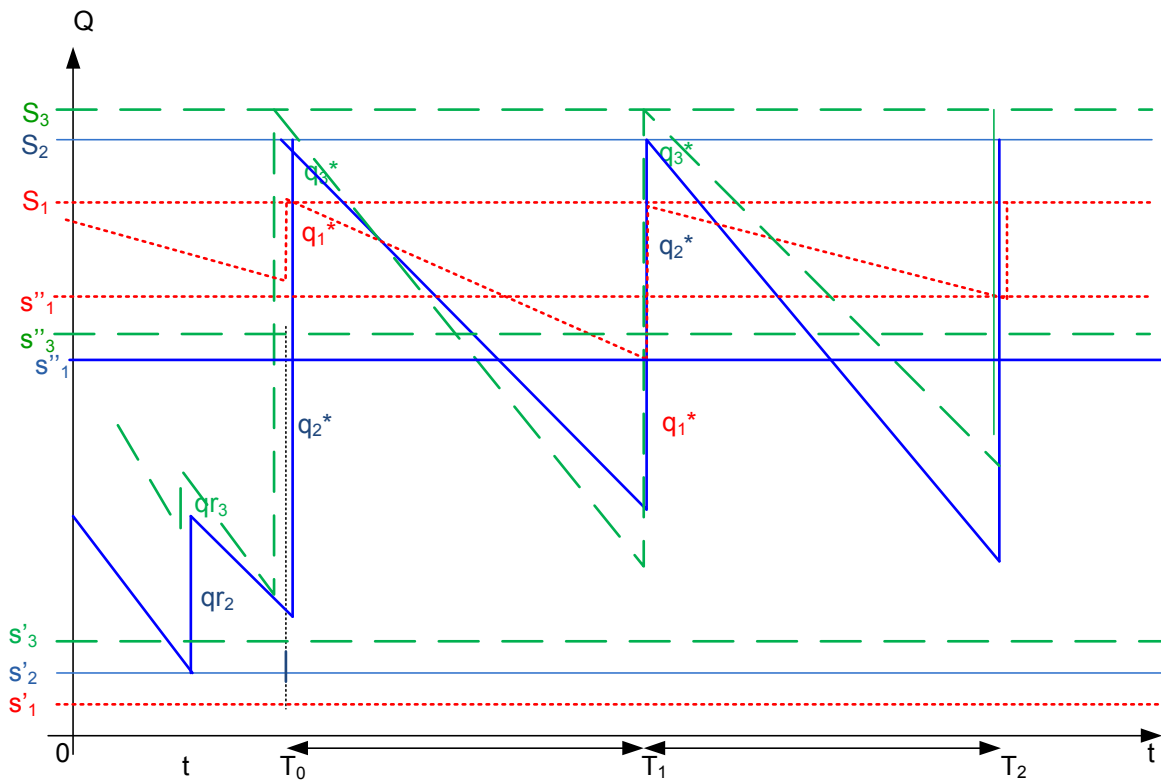


Figure 9 : mode de fonctionnement de la politique de réapprovisionnement

3.4 Calcul des paramètres S, T, s' et s''

3.4.1 Calcul du niveau de remplèment S

Notons :

T_x : niveau de satisfaction

K_x : coefficient de satisfaction associé

m_i : Moyenne de la demande journalière du produit i

σ_i : Ecart type de la demande journalière du produit i

L : délai de livraison en nombre de jours

nbr_j : nombre de jours avant la prochaine date de réapprovisionnement périodique

S_{ij} : stock du produit i à la date de scrutation j

$$S_i = m_i * (T + L) + kx * \sigma_i * \sqrt{T + L} \quad (3.1)$$

En se basant sur ces mêmes variables, nous calculons aussi la quantité à commander en urgence en cas de dépassement du niveau s' . Cette quantité doit permettre de couvrir la demande jusqu'à la fin de la période en cours.

$$qr_i = m_i * (nbrj + L) + kx * \sigma_i * \sqrt{nbrj + L} - S_{ji} \quad (3.2)$$

$$nbrj = T - \text{mod}\left(\frac{J}{T}\right)$$

3.4.2 Calcul de la période de réapprovisionnement T

Dans un contexte multi produits, la période de réapprovisionnement est calculée à partir du coût de passation de commande, de la somme des coûts journaliers de possession de stock multipliés par les moyennes de la demande pour tous les produits et des deux coûts (fixe et variable) de transport afin de trouver la meilleure périodicité de réapprovisionnement dans un contexte d'optimisation combinée. Nous nous sommes basés sur les travaux d'Orsenblatt et Haksever et al. (Rosenblatt 1981; Haksever and Moussourakis 2005).

Dans notre étude, nous avons défini un système de transport composé de trois véhicules différents. Chacun véhicule est caractérisé par une capacité de transport, un coût fixe de transport FC et un coût variable VC. La périodicité de réapprovisionnement dépend du véhicule utilisé et de ces caractéristiques.

Nous distinguons trois périodicités différentes (T_{max} , T_{moy} , T_{min}) calculées respectivement pour les trois véhicules utilisés (grande capacité, moyenne capacité, petite capacité).

FC_v : coût fixe de transport pour un véhicule v

C_v : capacité du véhicule v

VC_v : coût variable de transport pour un véhicule v

U_i : volume du produit i

T_{max} : période de réapprovisionnement maximale

T_{min} : période de réapprovisionnement minimale

T_{intr} : période de réapprovisionnement intermédiaire

A : coût de passation de commande

m_i : moyenne de la demande journalière du produit i

$$T_{max} = ENT\left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_3)}{\sum_{i=1}^{i=N} m_i * (CJP_i + (U_i * VC_3))}}\right) \quad (3.3)$$

$$T_{moy} = ENT\left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_2)}{\sum_{i=1}^{i=N} m_i * (CJP_i + (U_i * VC_2))}}\right)$$

$$T_{min} = ENT\left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_1)}{\sum_{i=1}^{i=N} m_i * (CJP_i + (U_i * VC_1))}}\right)$$

Vérification de l'admissibilité de chacune des périodicités ou ajustement de celle-ci :

Les périodicités de réapprovisionnement calculées à partir des équations 3.3 doivent vérifier une condition de faisabilité. En effet, une période calculée en se basant sur un véhicule de transport identifié de capacité C_v doit garantir que ce véhicule peut transporter toutes les quantités commandées pour l'ensemble des produits gérés dans le stock au cours de la période T . Cette contrainte est donnée par la formule suivante :

$$C \geq \sum_i (m_i \times U_i) \times T \quad (3.4)$$

Les formules 3.4 et 3.5 sont valables pour les trois capacités de véhicules (S, M et L) et par conséquent pour les trois périodes de réapprovisionnement (max, moy et min).

Si cette contrainte est vérifiée, la période calculée à partir des équations 3.3 est maintenue. Sinon, la période correspondante est calculée comme suit :

$$T = \frac{C}{\sum_i m_i \times U_i} \quad (3.5)$$

Calcul de la fréquence optimale :

Après avoir calculé les trois périodicités possibles correspondant aux trois véhicules de transport utilisés, nous cherchons la période optimale, i.e. qui conduit à l'espérance de coût minimal.

L'espérance de coût pour chaque fréquence est la somme de deux composantes : le coût de stock moyen et le coût de passation de commande.

- Coût du stock moyen :

$$\text{Coût stock moyen} = \frac{T}{2} \times \sum_i [m_i + k_x \times \sigma_i \times \sqrt{(L + T)}] \times h_i \quad (3.6)$$

- Coût de passation de commande :

$$\text{coût passation de commande} = \frac{A + FC_v + (T \times \sum_i (m_i \times U_i) \times VC_v)}{T} \quad (3.7)$$

3.4.3 Calcul du niveau de commande urgente s'_i et du niveau s''_i

Le niveau de commande urgente s'_i pour une scrutation à chaque jour et le niveau s''_i de séparation des deux sous-ensembles de produits sont calculés comme suit :

$$s'_i = m_i * (1 + L) + kx * \sigma_i * \sqrt{1 + L} \quad (3.8)$$

$$s''_i = m_i * (nbrj + L) + kx * \sigma_i * \sqrt{nbrj + L} \quad (3.9)$$

3.5 Fonctions de calcul des coûts logistiques

Nous présentons dans ce paragraphe des fonctions de calcul de coût liés à l'optimisation de la gestion des flux physiques des activités. Dans ce domaine, l'optimisation se fait d'une manière simultanée (intégrée) afin de minimiser le coût total engendré. Avec cette approche, les contraintes et les coûts des activités qui sont coordonnées sont mis dans le même modèle pour être optimisés en une seule fois. Une des principales motivations d'une optimisation intégrée est de minimiser le coût total généré tout au long de la chaîne logistique, en prenant en compte les contraintes et les coûts des différentes activités.

Nous présentons ci-dessous les fonctions de calcul des coûts de stockage et de transport au niveau d'un échelon.

Notations:

j : n° de période

i : n° de produits

v : type de véhicules

P_i : prix du produit i

A : coût de passation de commande

t_i : taux de possession de stock du produit i

h_i : coût de possession de stock du produit i

s_i : coût de rupture du produit i

s_r : coût de commande urgente suite à une rupture du produit i

T : durée de la période de réapprovisionnement pour une famille de produits

Kx : coefficient de satisfaction

σ_i : écart type de la demande journalière pour le produit i

FC_v : coût fixe de transport pour un véhicule de type v

C_v : capacité du véhicule v

VC_v : coût variable de transport pour un véhicule v

$Y_{vj}=1$ si le véhicule v est utilisé dans la période j , 0 sinon

U_i : volume du produit i

ss_i : stock de sécurité

$\alpha_{vij}=1$ si le produit i est délivré par le véhicule v dans la période j , 0 sinon

$z_{ij}=1$ si le produit i est commandé dans la période j , 0 sinon

m_i : Moyenne de la demande journalière du produit i

D_{ij} : demande du produit i à la période j

N_{ij} : niveau de stock pour le produit i à la fin de la période j

L : délai de réapprovisionnement pour tous les produits de la même famille

Nous définissons deux types de coût :

- **Les coûts de stockage :**

Nous distinguons trois types de coûts : les coûts de passation de commande, les coûts de possession de stock et les coûts de rupture.

- Les coûts de passation de commande normale (CPC) :

Une commande étant passée systématiquement au terme de chaque période T de réapprovisionnement. Ce coût sur l'horizon J est égal à (on fera l'hypothèse qu'au moins 1 produit de la famille est consommé au cours de chacune des périodes) T :

$$CPC = \frac{J}{T} \times A \quad (3.10)$$

- Les coûts de possession de stock (THC) :

Cette fonction dépend de la période T , de la quantité commandée basée sur une demande clientèle probabiliste m_i , de la quantité de produit en stock de sécurité s'_i et du coût de possession des stocks par période h_i . Nous faisons d'abord la somme sur le nombre de produits et puis sur le nombre de périodes.

$$h_i = P_i * t_i$$

$$THC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left[h_i * \left(\frac{N_{i(j+1)} + q^* - N_{ij}}{2} \right) \right] \quad (3.11)$$

- Les coûts de rupture de stock (CRS) :

Nous distinguons deux coûts de commandes urgentes : le coût d'une commande urgente pour anticiper une rupture et le coût d'une commande suite à une rupture.

Les commandes urgentes d'anticipation : (3.12)

$$CRS = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [s_i \times b_j]$$

$$\begin{cases} b_j = 1 \text{ si } (N_i < s'_i) \\ b_j = 0 \text{ si non} \end{cases}$$

Les commandes urgentes après ruptures :

$$CRS = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (sr_i \times b'_j)$$

$$\begin{cases} b'_j = 1 \text{ si } (N_i < 0) \\ b'_j = 0 \text{ si non} \end{cases}$$

- **Les coûts de transport**

Nous détaillons deux coûts de transport :

- Les coûts fixes (CFT) :

La fonction ci-dessous dépend directement du coût fixe de transport FC_v et de la variable binaire Y_{vj} pour indiquer si un véhicule va être utilisé dans cette période.

$$CFT = \sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^J [FC_v \times Y_{vj}] \quad (3.13)$$

- Les coûts variables (CVT) :

Cette fonction dépend de la demande m_i , de la période T , du volume des produits u_i et de la variable binaire a_{vij} pour préciser si l'article i est livré par le véhicule v dans la période j .

$$CVT = \sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^I [a_{vij} \times T \times q^* \times u_i] \right) \times VC_v \right] \quad (3.14)$$

$$\forall i, j \sum_{v=1}^V \alpha_{vij} = z_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^T \sum_{v=1}^V \alpha_{vij} \geq \sum_{j=1}^T z_{ij}$$

$$\left\{ Y_{vj} = 1, \text{ si } \sum_{i=1}^I \alpha_{vij} > 0 \right\}$$

$$\left\{ \text{si non } Y_{vj} = 0 \right\}$$

- **Coût logistique total :**

Le coût logistique total est la somme des trois coûts de stockage et des deux coûts de transport.

$$f = CPC + THc + CRS + CFT + CVT \quad (3.15)$$

3.6 Optimisation du coût logistique total

3.6.1 Fonctionnement d'une heuristique

Dans ce paragraphe, nous présentons le fonctionnement général d'une méthode heuristique. Nous nous basons sur la thèse de Bontoux pour présenter d'une manière globale la démarche de l'utilisation d'une méthode heuristique.

En effet, le principe de la recherche locale est le suivant : la méthode commence par fixer une solution initiale et réalisable. Par la suite, il va falloir appliquer des changements locaux (du voisinage de la solution courante), tant que celles-ci améliorent la solution précédente. En appliquant ce principe, la solution optimale n'est pas garantie. L'amélioration de la solution trouvée dans une étape de recherche peut se retrouver bloquée dans un optimum local et s'arrêter, à cause d'impossibilité d'amélioration dans le voisinage. Nous pouvons déduire que la solution finale dépend en grande partie de la complexité et du nombre des transformations permises par les opérateurs de recherche locale. Le problème principal est donc de faire un compromis entre le temps de calcul nécessaire pour explorer l'intégralité d'un espace de recherche caractérisé par le voisinage et sa taille.

D'après Bontoux : « à chaque itération, l'ensemble des modifications que l'on se permet d'effectuer sur la solution courante S définit un nouvel ensemble de solutions. Ce nouvel ensemble de solutions est appelé le voisinage de S ou $N(S)$. Pour un même problème, il existe un grand nombre d'opérateurs de voisinages possibles et intéressants.

Les bases de la recherche locale peuvent être définies ainsi. Soient:

– $f()$ la fonction que l'on souhaite maximiser,

- S la solution courante,
- S^* la meilleure solution connue,
- f^* la valeur de la meilleure solution connue,
- $N(S)$ le voisinage de S .

La procédure de recherche locale est la suivante (BONTOUX 2008) »:

Algorithme d'une recherche locale simple de plus grande pente

```

1 Initialisation : Construire une solution de départ  $S_0$ ;
2  $S^* = S_0$ ;
3  $S = S_0$ ;
4  $f^* = f(S_0)$ ;
5 Tant que l'optimum local n'a pas été atteint faire
  6  $S = \operatorname{argmax}_{S' \in N(S)} (f(S'))$ ;
  7 Si  $f(S) > f^*$  alors
    8  $f^* = f(S)$ ;
    9  $S^* = S$ ;

```

Nous proposons une méthode heuristique pour trouver, à moindre coût logistique, une solution dont il n'est pas possible de garantir la qualité d'optimalité. Nous essayons de faire de cette heuristique, une méthode robuste en traitant le maximum de cas possible et en assurant la convergence vers la même solution en partant des conditions identiques. Nous veillons aussi que cette méthode soit le plus efficace possible et donne une solution proche de l'optimum en un temps de calcul donné.

3.6.2 Position générale

L'objectif de base de cette heuristique est de trouver une meilleure solution pour gérer le réapprovisionnement d'une famille de produits tout en combinant l'aspect transport et stockage afin de minimiser les coûts logistiques liés.

3.6.3 Principes de base

Trois principes que nous utiliserons par la suite dans la définition de l'algorithme sont :

- Ordonner des produits par rapport aux volumes totaux des quantités commandées : cet ordre est défini par la multiplication de la demande m_i du produit i par le volume de l'unité du même produit afin de déterminer le volume total de commande par produit V_t .

$$V_t = V_i * m_i$$

- Ordonner des produits en fonction de leur horizon de couverture : en commandant un ensemble de produits (ou un vecteur v de quantités), nous pouvons calculer un coût logistique total à partir des fonctions de calcul de coût définis précédemment. Ce coût peut être modifié en ajoutant ou

en enlevant un produit. L'ordre que nous allons appliquer consiste à classer les produits par rapport à l'horizon de couverture de chaque produit.

- Condition de commande pour les produits de l'ensemble P_{sur} : une décision liée à la commande de chacun des produits de l'ensemble P_{sur} doit être prise. La commande de chaque produit est validée si la contribution à la couverture des frais des coûts fixes (transport et passation de commande) dépasse le coût variable (transport et possession) de la période de couverture. Cette condition est formulée pour le produit j par l'équation suivante :

$$(A + FC_v) \times \frac{V(q_j)}{\sum_i V(q_i)} \geq (V(q_j) \times U_j \times VC_v) + (V(q_j) \times h_j \times nbr_j) \quad (3.16)$$

3.6.4 Organigramme de la méthode heuristique

Notre raisonnement est basé sur deux étapes pour définir une procédure complète afin de chercher une meilleure solution possible.

Cette réflexion est elle-même basée sur la nature de la politique de réapprovisionnement proposée précédemment. En effet, plusieurs produit(s) peuvent dépasser leur(s) niveau(x) de commande et d'autres non. Cependant, tous ces produits sont approvisionnés en même temps puisqu'ils appartiennent à la même famille et ils doivent être gérés de la même manière à condition de proposer un coût logistique total minimal (voir la Figure 12).

P : ensemble de produits dans le stock

P_{sous} : ensemble de produits qui ont atteint leur niveau de commande

P_{sur} : ensemble de produits qui n'ont pas atteint leur niveau de commande

N_i : niveau de stock pour le produit i au début de la période

S_i : niveau de rechargement de stock du produit i

s'_i : niveau de commande urgente pour le produit i

s''_i : niveau de commande et de séparation des deux ensembles P_{sous} et P_{sur}

q_i : quantité consommée du produit i

Q_i : quantité commandée du produit i

C_1, C_2, C_3 : les trois capacités des camions utilisés

$V(q)$: volume de la quantité q

La méthode proposée commence par la vérification qu'aucun produit présent dans le stock ne dépasse le niveau de commande urgente. Dans le cas contraire, il y a déclenchement d'une commande urgente en commandant une quantité nécessaire et suffisante pour couvrir la

consommation de la période en cours jusqu'à la prochaine commande régulière pour l'ensemble des produits P_{sous} .

Pour ces produits nous calculons les quantités à commander pour permettre de couvrir la consommation jusqu'à la fin de la période. Puis, nous calculons le volume total des quantités commandées et nous sélectionnons le moyen de transport convenable pour transporter tous les produits de l'ensemble P_{sous} et en calculant le coût logistique engendré.

La partie suivante de la méthode proposée est consacrée à la gestion des produits de l'ensemble P_{sur} . Nous étudions, produits par produit, la possibilité de réapprovisionner les produits de cet ensemble en fonction de leur horizon de couverture (deuxième principe présenté dans le paragraphe 3.6.3).

La condition de commande est décrite dans le principe 3 (paragraphe 3.6.3) : pour un produit de l'ensemble P_{sur} , une commande de ce produit peut être passée si la contribution à la couverture des coûts fixes dépasse les coûts variables (équation 3.16).

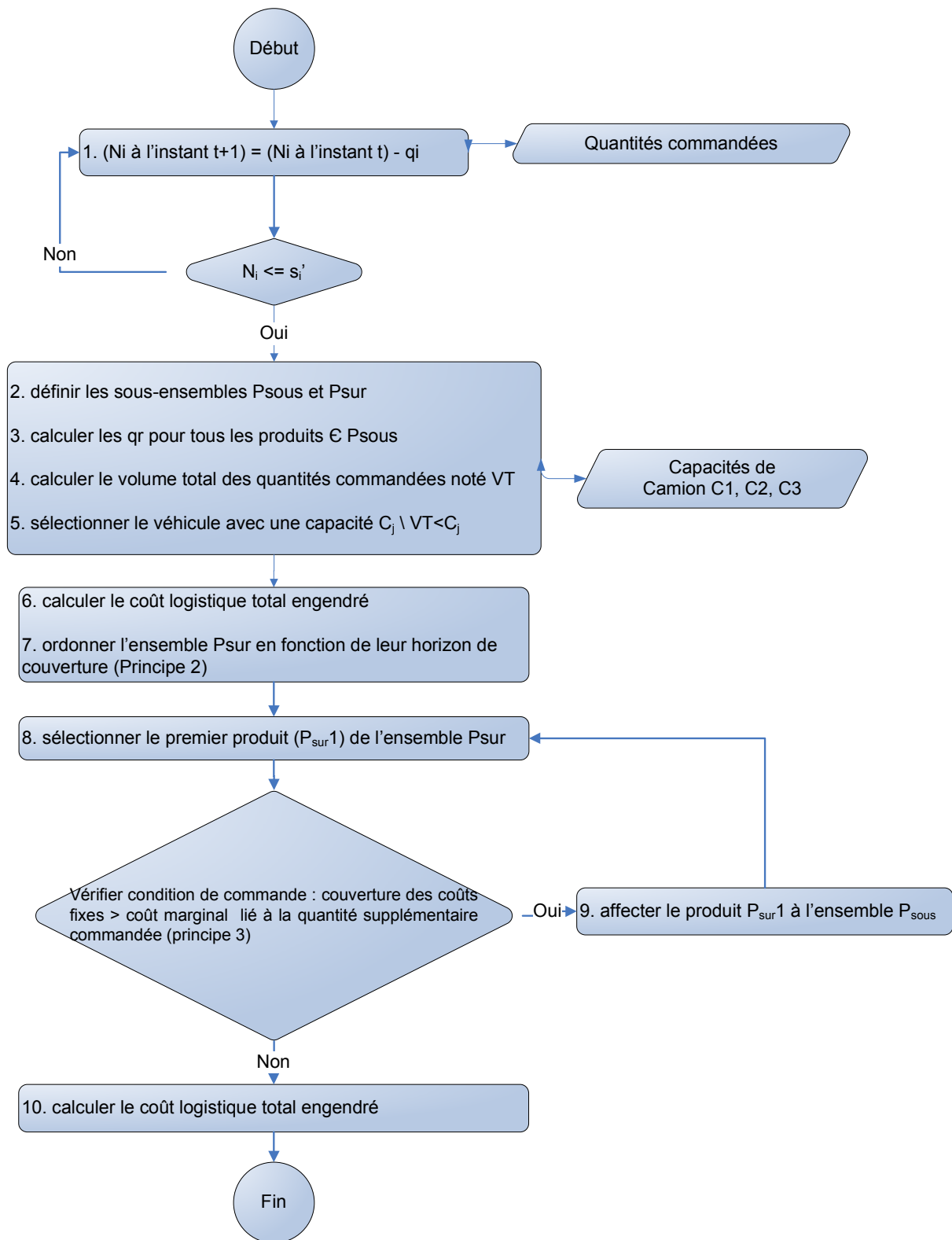


Figure 10 : heuristique proposée

Puis, le traitement de l'ensemble ordonné est réalisé élément par élément c'est-à-dire produit par produit dans une famille de produits tout en calculant le volume V des produits transportés et en sélectionnant le moyen de transport adéquate de capacité C . Pour chaque combinaison de produits

(ensemble $P_{s\text{ous}}$ et un produit de $P_{s\text{ur}}$), nous calculons le volume correspondant au nouveau vecteur de quantités et nous le comparons par rapport à la capacité du moyen de transport sélectionné. Dans le cas où le test est positif, le produit sélectionné de l'ensemble $P_{s\text{ur}}$ compte parmi les produits réapprovisionnés et nous traitons le produit suivant. Si non, le traitement des produits de l'ensemble $P_{s\text{ur}}$ s'arrête à ce niveau.

Nous présentons ci-dessous l'algorithme détaillé afin d'analyser de près avec les paramètres du système la démarche suivie dans la méthode heuristique développée.

Algorithme :

Entrée :

$P, P_{s\text{ous}}, P_{s\text{ur}}, N_i, S_i, s'_i, s''_i, q_i, Q_i, C_1, C_2, C_3, V(q)$

Début

1 : (niveau de stock à l'instant $(t+1)$ pour chaque produit i appartenant à P) = (niveau de stock à l'instant (t) pour chaque produit i appartenant à P) - (q_i)

TEST 1 (si le niveau de stock d'un produit i dépasse le niveau de commande d'urgence s'_i)

SI Oui

2. définir les deux ensembles de produits $P_{s\text{ous}}$ et $P_{s\text{ur}}$
3. calculer les q_r pour tous les produits appartenant à l'ensemble $P_{s\text{ous}}$
4. calculer le volume total des quantités commandées noté VT
5. sélectionner le ou les véhicule (s) avec une capacité $C_j \setminus VT < C_j$
6. calculer le coût logistique total engendré
7. ordonner l'ensemble $P_{s\text{ur}}$ par rapport au gain réalisé
8. sélectionner le premier produit ($P_{s\text{ur}1}$) de l'ensemble $P_{s\text{ur}}$

TEST 2 (Vérifier la condition de commande : couverture des coûts fixes > coût marginal lié à la quantité supplémentaire commandée (voir principe 3))

SI oui

9. affecter le produit $P_{s\text{ur}1}$ à l'ensemble $P_{s\text{ous}}$ puis revenir à l'étape 8

SI non

10. calculer le coût logistique total engendré

FIN

Cette heuristique permet de chercher une solution proche de l'optimum. En effet, nous tenons à explorer les solutions possibles pour un réapprovisionnement multi produits avec une demande

aléatoire en minimisant les coûts de stockage (réduire le nombre de commandes, réduire les quantités stockées, ...) et les coûts de transport (exploiter au mieux la capacité des moyens de transport, réduire le nombre de commande, ...).

Nous montrons dans le paragraphe suivant une étude expérimentale afin de montrer numériquement les résultats obtenus.

3.7 Expérimentation et validation

Afin de valider la politique proposée et d'étudier sa performance, nous avons comparé la politique de réapprovisionnement proposée avec une politique de référence utilisée dans des conditions similaires aux nôtres. Pour ce faire, nous avons fait appel à des simulations afin de :

- Générer la demande aléatoirement en respectant les critères de la famille de produits sélectionnée.
- Calculer les coûts logistiques fournis par la politique proposée et une autre politique de référence.
- Analyser le gain réalisé par la politique proposée par rapport à des paramètres décisifs en faisant une étude de sensibilité.

3.7.1 Comparaison par rapport à la politique (R, S)

Nous faisons référence dans cette partie à une politique définie dans le livre (Edward A., David F. et al. 2003) (pages 275). Dans ce livre les auteurs traitent et comparent plusieurs politiques de réapprovisionnement, parmi lesquelles nous avons sélectionné la politique (R, S) qui répond le mieux à nos hypothèses définies au début du chapitre.

Nous utiliserons dans ce paragraphe les mêmes notations utilisées dans la référence et nous ajoutons des modifications quand cela est nécessaire dans le but de définir une politique de référence adéquate au contexte présenté précédemment.

3.7.1.1 Politique (R, S)

3.7.1.2 Les règles décisionnelles pour la politique (R, S):

Rappelons que dans la politique (R, S) à chaque unité R de temps, on fait une commande de réapprovisionnement d'une quantité suffisante pour élever la position du stock jusqu'au niveau S.

Il s'en suit donc que la règle décisionnelle pour déterminer les valeurs S et R dans une politique (R, S), pour une valeur particulière de coût de péremption ou un niveau de qualité de service.

Notation:

R = période de réapprovisionnement spécifié d'avance, en unité de temps

S = niveau de rechargement, en unité

A = coût de passation d'une commande normale

CPJ_i = coût journalier de possession de stock pour le produit i

x_{T+L} = prévision de la demande dans une période de réapprovisionnement et le délai de réapprovisionnement, en unité

σ_{R+L} = déviation standard (écart type) de la demande durant l'intervalle de réapprovisionnement majoré du délai de réapprovisionnement, en unité

3.7.1.3 Intervalle de réapprovisionnement (T)

Dans une politique (T, S) , une commande de réapprovisionnement est faite à chaque unité de temps T ; et lorsqu'on calcule la valeur de S , on suppose qu'une valeur de T a été prédéterminée. La détermination de T est équivalente à la détermination de la quantité économique exprimée comme un temps logistique à l'exception de deux variations mineures.

Dans un contexte mono-produit, la période optimale de commande est calculée comme suit (Silver 2001):

D : demande annuelle

Q : quantité optimale de commande

A : coût de passation de commande

Hc_i : coût de possession de produit par an

$CJPI$: coût de possession journalier de stock pour un produit i

Pour un produit et avec la formule de Wilson :

$$Ct = A \frac{D}{Q} + \left(\frac{Q}{2} + ss \right) * Hc_i$$

$$Ct = \frac{A}{T} + \left(\frac{T * D}{2} + ss \right) * Hc_i$$

$$\frac{\delta(Ct)}{\delta(T)} = \left(-\frac{A}{T} \right) + \left(\frac{D}{2} * Hc_i \right) = 0$$

$$T^* = \sqrt{\frac{2A}{D * Hc_i}}$$

3.7.1.4 Niveau de commande (S)

Nous allons maintenant présenter l'équation significative pour le stock de sécurité et la rupture de stock. Nous en déduisons par la suite l'équation pour calculer le niveau de commande S_i .

$$S_i = m_i * (T + L) + kx * \sigma_i * \sqrt{T + L} \quad (3.17)$$

Pour trouver la valeur de kx optimale, nous proposons une méthode simplifiée, celle que nous avons présentée précédemment dans le paragraphe 3.4.1 et qui se base sur le taux de satisfaction clientèle. Ce choix nous permettra de comparer les deux politiques dans les mêmes conditions et avec le même taux de satisfaction.

3.7.1.5 Calcul des coûts logistiques

Afin d'ajuster cette méthode par rapport notre contexte et ajouter l'aspect transport, nous avons ajusté les équations de calcul de coût proposées auparavant afin de déduire le coût logistique global proposé par la politique de référence.

Nous utilisons les équations (équations 10, 11 et 12) présentées dans le paragraphe 3.5 pour calculer les coûts logistiques. Pour les coûts de stockage, nous appliquons directement les mêmes équations (4, 5 et 6) en transformant le coût de rupture en coût de passation d'une commande urgente, ce qui fait que le coût total de passation de commande est défini comme suit :

$$CPC + CRS = \frac{J}{T} \times A + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [s_{ji} \times b_j] \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} b_j = 1s_i(N_i < s'_i) \\ b_j = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

A'_{ji} = coût de passation de commande urgente dans la période j , pour le produit i .

Dans la politique de référence, les commandes urgentes sont gérées séparément pour chaque produit.

Pour le calcul des coûts de transport, nous utilisons les fonctions de calcul (13 et 14).

3.7.2 Expérimentation

Nous allons illustrer un exemple numérique afin de montrer la démarche suivie pour le calcul des paramètres de la politique proposée :

Ces calculs sont basés sur les valeurs numériques suivantes (Tableau 5):

Tableau 5: valeurs numériques

Variable	Désignation	Valeur
N	Nombre d'échelons	2
i	Nombre de produits	10
Tx	Niveau de satisfaction	95%
	Nombre de période par simulation	470
V	Nombre de véhicules	3
A	Prix de passation de commande normale	200€
A'	Prix de passation de commande urgente	300€
A''	Prix de passation de commande immédiate	500€
h _i	Taux annuel du coût de possession de stock	20% x P _i
FC _v	Coûts de transport fixe pour les 3 véhicules	{100€, 150€, 300€}
VC _v	Coûts de transport variable pour les 3 véhicules	{15€, 10€, 5€}/m ³
U _i	Volume des produits	{0,01, 0,02, 0,03} m ³ /unit
C	Capacité de camion	{3, 10, 30} * m ³
M = σ	Moyenne m et écart type σ de la demande journalière	∈ [5.. 50] par période
P _i	Prix des produits	∈ [10€.. 100€]

1^{ère} étape : calcul de la période de réapprovisionnement :

Calcul de la période T_{min} qui correspond au véhicule numéro 1 :

$$T_{min} = ENT \left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_1)}{\sum_{i=1}^N m_i * (CJP_i + (U_i * VC_1))}} \right) = 3 \text{ périodes}$$

Si :

$$C_1 = 3 \geq \sum_i (m_i \times U_i) \times T_{min} = 18$$

⇒ Contrainte non vérifiée donc

$$T_{min} = E \left(\frac{C_1}{\sum_i m_i \times U_i} \right) + 1 = 1$$

Calcul de la période T_{moy} qui correspond au véhicule numéro 2 :

$$T_{moy} = ENT \left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_2)}{\sum_{i=1}^N m_i * (CJP_i + (U_i * VC_2))}} \right) = 4 \text{ périodes}$$

Si :

$$C_2 = 10 \geq \sum_i (m_i \times U_i) \times T_{moy} = 19$$

⇒ Contrainte non vérifiée donc

$$T_{moy} = E \left(\frac{C_2}{\sum_i m_i \times U_i} \right) + 1 = 3$$

Calcul de la période T_{max} qui correspond au véhicule numéro 3 :

$$T_{max} = ENT \left(\sqrt{\frac{2 * (A + FC_3)}{\sum_{i=1}^N m_i * (CJP_i + (U_i * VC_3))}} \right) = 6 \text{ périodes}$$

Si :

$$C_3 = 30 \geq \sum_i (m_i \times U_i) \times T_{max} = 29$$

⇒ Equation VERIFIEE donc

$$T_{max} = 6 \text{ périodes}$$

Calcul de l'espérance de coût de chaque fréquence de réapprovisionnement :

Pour T_{min} :

$$\begin{aligned} & \left[\frac{T_{min}}{2} \times \sum_i [m_i + k_x \times \sigma_i \times \sqrt{(L+T)}] \times h_i \right] \\ & + \\ & \left[\frac{A + FC_v + (T_{min} \times \sum_i (m_i \times U_i) \times VC_v)}{T_{min}} \right] \\ & = 396 \end{aligned}$$

Pour T_{moy} :

$$\begin{aligned} & \left[\frac{T_{moy}}{2} \times \sum_i [m_i + k_x \times \sigma_i \times \sqrt{(L+T)}] \times h_i \right] \\ & + \\ & \left[\frac{A + FC_v + (T_{moy} \times \sum_i (m_i \times U_i) \times VC_v)}{T_{moy}} \right] \end{aligned}$$

$$= 236$$

Pour T_{max} :

$$\left[\frac{T_{max}}{2} \times \sum_i [m_i + k_x \times \sigma_i \times \sqrt{(L+T)}] \times h_i \right] + \left[\frac{A + FC_v + (T_{max} \times \sum_i (m_i \times U_i) \times VC_v)}{T_{max}} \right] = 216$$

La période optimale est celle qui correspond à l'espérance de coût le plus faible :

$$T = T_{max}$$

Calcul des paramètres de la politique pour le début de la période T=6 :

S	895	447	358	268	447	179	537	447	358	716
s''	645	322	258	193	322	129	387	322	258	516
s'	391	195	156	117	195	78	234	195	156	313

Comparaison de la politique proposée et la politique de référence :

Nous avons réalisé une série de 31 simulations sous Excel. Nous générons 470 demandes à chaque simulation. La demande est générée aléatoirement en se basant sur la fonction de répartition de la loi normale. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau précédent (Tableau 5) :

Nous montrons dans le tableau suivant les différents coûts, entre la politique proposée et la politique de référence, calculés pour une simulation réalisé avec les données numériques présentées précédemment :

	passation	possession	T fixe	T variable	C Total
politique proposée	22 500 €	40 589 €	25 650 €	15 325 €	104 064 €
politique de référence	31 100 €	40 462 €	25 800 €	15 721 €	113 083 €

Les différents coûts (passation, possession, transport fixe, transport variable) sont donnés dans ce tableau ainsi que le coût total logistique en résultant.

Le gain de la politique proposée est réalisé en grande partie dans le coût de passation de commande (qui englobe le coût des commandes normales et le coût des commandes urgentes). En effet, ce gain est dû à la diminution du nombre des commandes urgentes. Les chiffres ci-dessous prouvent ce gain réalisé :

Politique proposée :

Nombre de commande normale = 78

Nombre de commande urgente = 23

Politique de référence :

Nombre de commande normale = 78

Nombre de commande urgente = 31

Nous montrons dans les trois figures suivantes la différence en termes de coûts entre la politique proposée et la politique de référence sur 31 simulations. La Figure 11 présente le coût logistique total calculé pour les deux politiques.

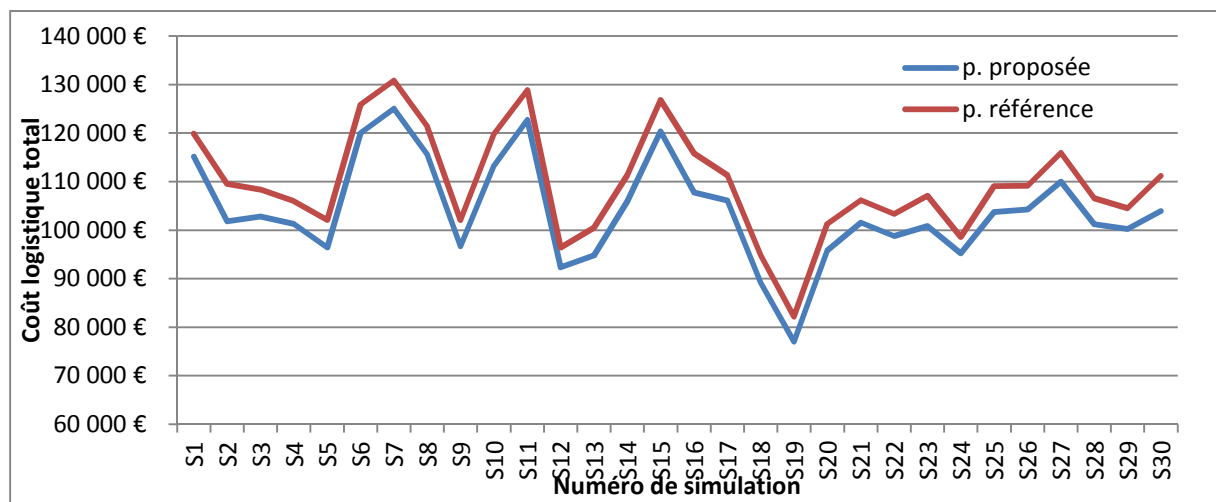


Figure 11 : Comparaison des coûts logistiques totaux

L'utilisation de l'optimisation intégrée dans la définition même de la politique de réapprovisionnement proposée et dans la méthode heuristique développée est la principale explication de ce gain réalisé tant sur l'aspect transport que sur l'aspect stockage. D'une part, les gains réalisés dans les coûts de stockage sont dus principalement au regroupement des produits dans une seule famille homogène, ce qui permet de trouver une période de réapprovisionnement commune pour diminuer le nombre de commande passée. D'autre part, les gains réalisés dans les coûts de transport sont dus aux décisions de regroupement des produits transportés afin d'optimiser les coûts de transport en occupant le maximum la capacité des véhicules utilisés.

Nous montrons dans la Figure 12 les pourcentages des gains totaux réalisés sur l'ensemble des 31 simulations.

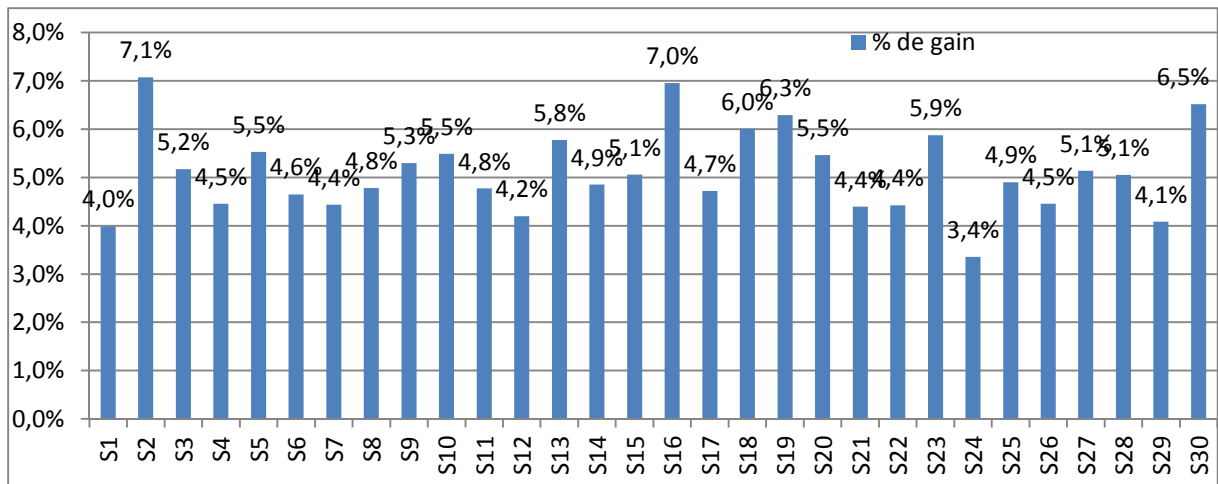
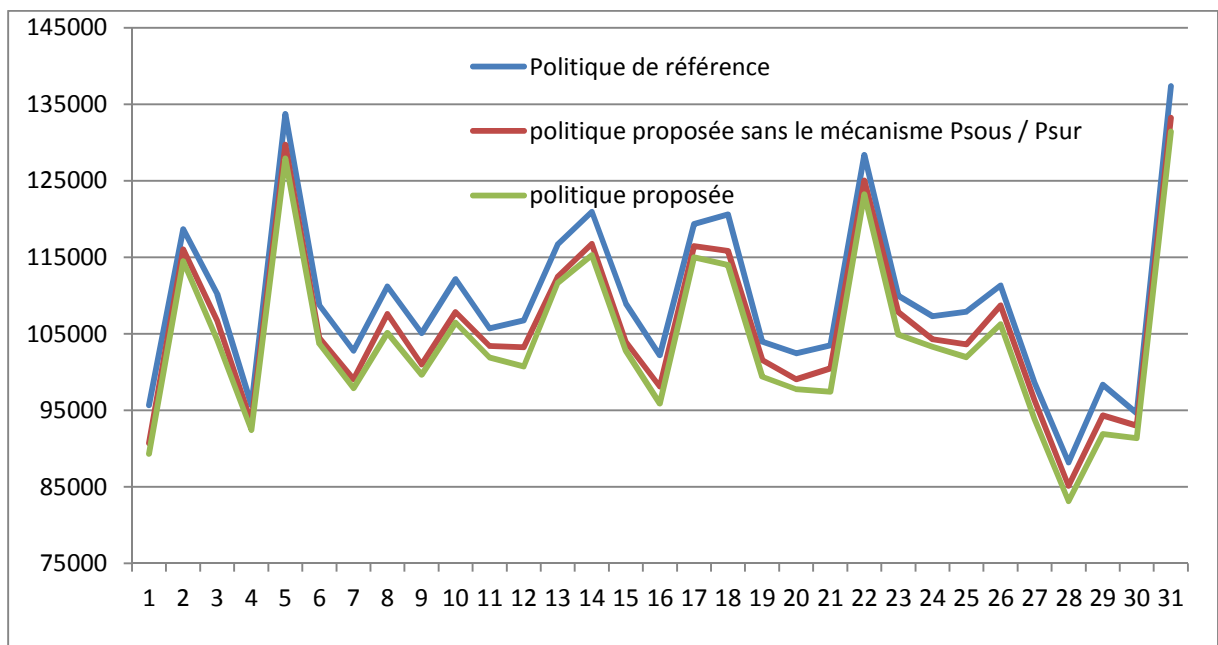


Figure 12 : pourcentage des gains totaux

Nous pouvons remarquer que nous réalisons un gain important qui varie entre 3,4% et 7,1% sur l'ensemble des simulations. La moyenne des gains est de l'ordre de 5,1% par rapport au coût total logistique. Ce qui prouve une certaine régularité de la politique proposée vis-à-vis du contexte étudié notamment la variation de la demande.

Afin de montrer l'utilité du mécanisme de séparation entre les deux sous ensemble P_{sous} et P_{sur} , nous avons réalisé une simulation avec les mêmes données numériques présentées précédemment en montrant la différence de gain entre la politique proposée AVEC et SANS ce mécanisme de séparation des deux sous-ensembles par rapport à la politique de référence.



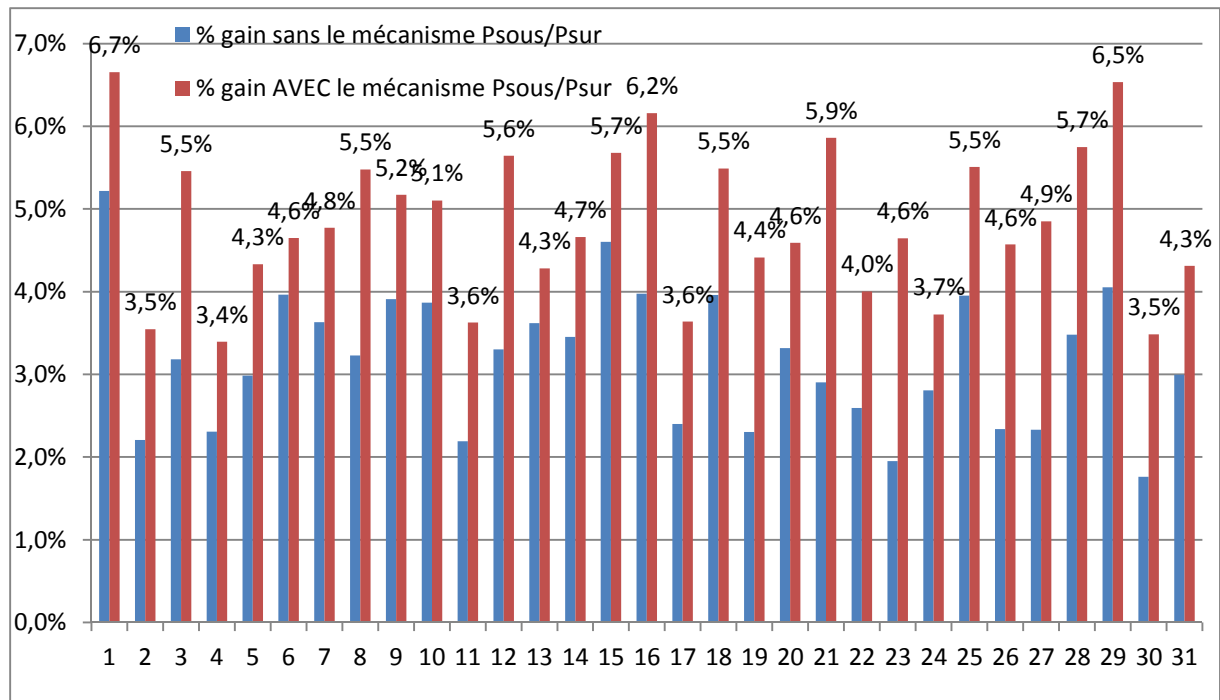


Figure 13 : gains réalisés AVEC et SANS le mécanisme des sous-ensembles

La moyenne des gains réalisés par la politique proposée sans le mécanisme des sous-ensembles P_{sous} et P_{sur} est égale à 3,2% alors que la moyenne des gains en intégrant les deux sous-ensembles P_{sous} et P_{sur} est égale à 4,8%.

3.8 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre un problème de gestion combinée de stock et de transport dans un réseau logistique multi niveaux et multi produits confronté à une demande probabiliste. L'objectif est de minimiser les coûts de stockage et de transport en garantissant un seuil minimum de satisfaction clientèle. Nous nous sommes intéressés à une famille de produits caractérisée principalement par une demande aléatoire et répétitive.

Nous avons proposé une politique de réapprovisionnement se basant sur quatre paramètres de base : une période de réapprovisionnement T pour une révision périodique, un niveau de recombplètement S de stock pour chaque produit, un niveau de commande s'' et un niveau de commande urgente s' .

Puis, nous avons détaillé les trois fonctions de calcul de coût de stockage, à savoir le coût de possession de stock, le coût de passation de commande et le coût de rupture. Ainsi que deux coûts de transport, à savoir le coût fixe et le coût variable.

Par la suite, nous avons développé une méthode heuristique afin de minimiser ces coûts logistiques. Cette méthode est composée de deux parties, dans la première partie nous traitons le cas des produits qui ont dépassé les niveaux de commandes'' lorsqu'on arrive au moment de lancement de commande. Dans la deuxième partie, nous traitons les produits restant n'ayant pas dépassé ce

niveau. Principalement, nous étudions dans cette heuristique l'optimisation intégrée des coûts de stockage et de transport dans le but de :

- Minimiser le nombre de commande en regroupant les produits de la même famille dans la même commande,
- Minimiser les quantités présentes dans le stock en écartant les produits non consommés dans la période qui précède la commande,
- Minimiser le nombre de rupture de stock en anticipant la commande des produits qui dépassent le niveau de commande au moment du réapprovisionnement (T),
- Exploiter le maximum les capacités de transport en regroupant plusieurs produits dans la même commande et en essayant plusieurs possibilités de transport des produits commandés

Dans le dernier paragraphe, nous avons réalisé une étude expérimentale afin de montrer le gain en termes de coût logistique de la politique proposée par rapport à une politique mono produit de référence définie dans la littérature pour des produits similaires. Cette étude se base essentiellement sur des simulations réalisées sous Excel et montre un gain de l'ordre de 4% de la politique proposée. Ces résultats confirment le contexte d'application de cette politique et valident les hypothèses définies au début de chapitre.

Nous étudions dans le chapitre suivant un cas particulier de ce problème de gestion combinée de stockage et de transport afin de définir une nouvelle politique basée sur l'étude des ruptures de stock.

Chapitre 4 : Optimisation des coûts logistiques dans le cas des commandes urgentes

SOMMAIRE

Chapitre 4	: Optimisation des coûts logistiques dans le cas des commandes urgentes	71
4.1	Introduction.....	72
4.2	Caractérisation du contexte d'application	72
4.3	Méthode d'approvisionnement proposée	73
4.4	Optimisation mathématique : détermination des quantités optimales de commande ...	83
4.5	Expérimentation et discussion	87
4.6	Conclusion	93

4.1 Introduction

On distingue dans la littérature deux types de modèles pour la gestion de stock en présence d'une demande stochastique. Ces modèles se distinguent par leur réponse en cas de rupture de stock. Le premier modèle est le modèle avec ventes perdues connu dans la littérature sous le nom de *Lost Sales Model*, dans lequel en cas de rupture, les ventes sont perdues. Le deuxième modèle est le modèle de ventes différées, connu sous le nom de *Backordering Model*, et dans lequel en cas de rupture, la demande est différée et satisfaite les périodes suivantes. Nous nous plaçons ici dans un contexte particulier dans lequel les ruptures, pour des raisons juridiques ou humanitaires, sont interdites.

Une première réponse peut être apportée sous la forme de création d'importants stocks de sécurité. Néanmoins cette solution engendre des coûts très élevés de possession de stock et ces coûts peuvent devenir prohibitifs pour des produits chers et/ou lorsque des délais de péremption courts peuvent entraîner des pertes importantes de produits. C'est dans ce contexte que nous proposons dans ce chapitre une nouvelle politique de réapprovisionnement qui se base sur un réapprovisionnement uniquement en urgence de ces produits.

Un réapprovisionnement en urgence se faisant nécessairement à un coût plus élevé, nous proposons d'appliquer cette politique non pas au niveau d'un produit unique mais au niveau d'une famille de produits. Le choix de cette famille est basé sur des critères spécifiques très particuliers qui posent des problèmes complexes pour les politiques de réapprovisionnement classiques. D'où l'intérêt de la définition d'une politique spécifique et adéquate.

Nous débutons ce chapitre par une définition du contexte d'application de cette politique proposée. Dans la section suivante, nous présentons un modèle agrégé basé sur des états stationnaires pour donner une vue générique de la méthode. Puis, nous décrivons en deux parties cette politique qui ressort des méthodes à approvisionnement continu avec point de commande. Tout d'abord nous définissons la logique d'approvisionnement : approvisionnement jusqu'à un niveau de re-complètement prédéterminé de tous les produits d'une même famille lors de la rupture de stock d'un quelconque des produits de cette famille. Puis nous présentons le modèle mathématique nous permettant de calculer ces niveaux de re-complètement.

Dans la dernière section de ce chapitre nous présentons les résultats de simulations effectuées afin d'évaluer notre politique en la comparant à une politique de référence.

4.2 Caractérisation du contexte d'application

Nos travaux se situent dans le cadre d'une chaîne logistique constituée de plusieurs centres de distribution (CDs) et de plusieurs centres de consommation (CCs). Dans ce contexte nous nous attachons à définir la politique d'approvisionnement d'un centre de consommation donné pour des produits pour lesquels les ruptures de stock au niveau du centre de consommation sont interdites, sachant que :

- Les produits stockés au niveau du fournisseur (DCs) sont disponibles avec des quantités suffisantes pour pouvoir permettre de répondre à toute demande ;
- Le délai de réapprovisionnement en urgence est nul.

Hypothèses relatives à la demande :

Nous considérons une demande très variable qui ne dépend ni du temps ni de l'historique de consommation. Nous pouvons considérer que cette demande suit la loi des événements rares et sera représentée numériquement soit par la loi de poisson soit par la loi normale avec un écart type très proche ou même égal à la moyenne.

Hypothèses relatives aux produits :

- i. Coût des produits : nous considérons des produits chers. Proportionnellement à leurs prix, le stockage de ces produits coûte cher.
- ii. Délai de péremption : nous considérons des produits avec des délais de péremption très courts, ce qui exige de ne pas garder ces produits pour de longues périodes dans le stock.
- iii. Volume des produits : nous considérons des produits qui sont peu volumineux afin de mieux préparer leur commande.

Hypothèses concernant les coûts logistiques :

Dans la littérature, on distingue trois coûts d'approvisionnement différents (Skouri and Papachristos 2002) : un coût planifié, un coût non planifié normal, et un coût non planifié urgent. Les approvisionnements en coût planifié urgent sont à délai nul (nous considérons que le temps de transport est suffisamment faible pour être négligé). Nous ne considérons que le coût non planifié urgent pour la politique proposée.

Nous considérons un coût de possession pour chaque produit calculé en fonction du prix du produit. Ce coût est élevé à cause de la valeur des produits et / ou de leurs délais de péremption faibles.

Le coût de passation de commande est indépendant du nombre de produits commandés.

Le coût d'achat des produits est indépendant des quantités commandées (aucune réduction accordée pour la commande de quantités importantes).

Dans un tel contexte, la mise en place de stocks de sécurité n'est pas adaptée car elle ne peut garantir, sauf à des coûts prohibitifs, l'absence de rupture de stock. D'où notre proposition d'utiliser des commandes urgentes.

4.3 Méthode d'approvisionnement proposée

Dans cette partie, nous présentons une description physique du modèle de réapprovisionnement proposé. Nous nous sommes basés sur les deux principales variables de décision, à savoir l'événement déclenchant et la quantité à commander, afin d'expliquer dans deux parties séparées de ce chapitre notre politique d'approvisionnement.

Le schéma suivant (Figure 14) décrit les deux étapes de cette méthode de réapprovisionnement.

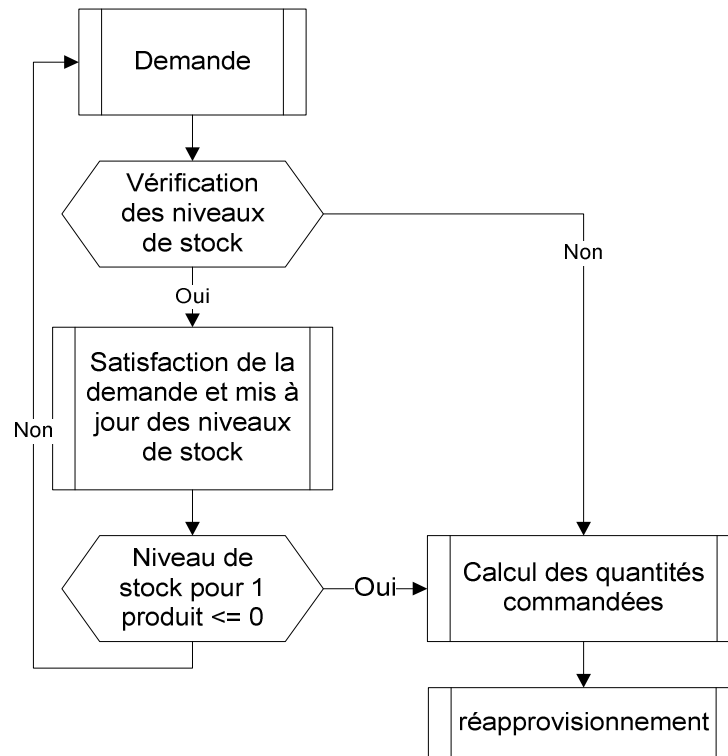


Figure 14 : interconnexion des deux étapes de la politique de réapprovisionnement

Le cycle de réapprovisionnement est initié par une demande client. Nous vérifions dans un premier temps si les quantités commandées sont disponibles. Si le test est positif, nous satisfaisons la demande et retranchons ces quantités du stock. Un deuxième test est effectué après avoir livré la commande, afin de vérifier si le stock d'un des produits devient nul. Dans ce cas ou dans le cas où la commande ne peut être satisfaite, nous passons alors à l'étape de calcul des quantités à commander afin d'atteindre les niveaux de recomplètement et de satisfaire la demande.

4.3.1 Première étape : un réapprovisionnement continu

La méthode consiste à attendre une rupture de stock d'au moins un produit, et à approvisionner tous les produits de la même famille jusqu'à un niveau Q_i prédéterminé pour chaque produit i . Cette politique est donc une politique de gestion de stock à approvisionnement continu en quantités variables.

Nous présentons dans ce paragraphe une étude qualitative de notre système de réapprovisionnement. Cette étude décrit l'évolution du système au cours du temps. Une première présentation sous la forme d'un modèle agrégé est faite et, par la suite, nous donnons la définition des variables de décision du système, tout en expliquant le fonctionnement de la méthode proposée.

4.3.1.1 Modèle agrégé

Le modèle agrégé est un modèle en réseau qui va nous servir principalement à décrire l'évolution de notre système. Ce modèle représente toutes les évolutions possibles du stock. Il est constitué par des nœuds et des arcs possédant des ressources qui décrivent les états du système.

Afin de faciliter la compréhension du modèle général, nous commençons par donner l'exemple introductif ci-dessous.

Exemple : Nous illustrons un exemple de deux produits avec des quantités de réapprovisionnement égales à trois unités (nombre pris par hasard) pour chacun lorsque les ventes sont des ventes unitaires. Un chemin commence par l'état initial et se termine par un des états finaux. Les états finaux sont ceux qui ont un élément égal à 0. A partir d'un état final, on revient à l'état initial par une commande de réapprovisionnement.

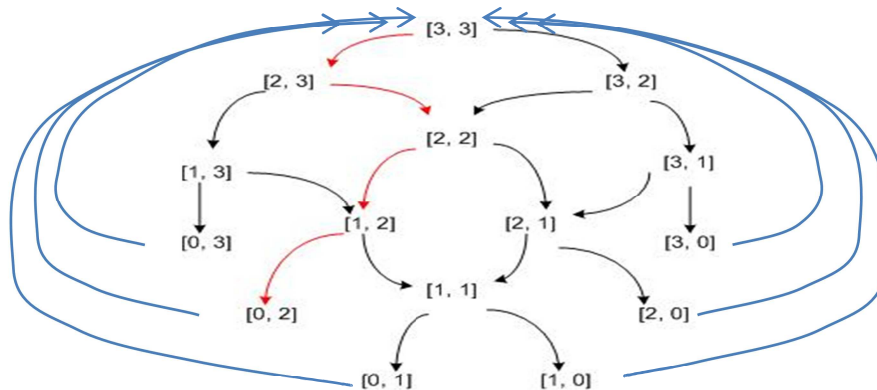


Figure 15 : exemple de fonctionnement avec deux produits vendus à l'unité

En se basant sur cet exemple, nous allons présenter un modèle générique afin de décrire le principe général de cette politique. Nous définissons par la suite les deux composants de notre modèle agrégé à savoir les nœuds et les arcs, ainsi que les ressources associées.

a. Les nœuds :

Chaque nœud représente un état indiquant le niveau de stock pour chaque produit, et ceci pour tous les produits présents dans le stock.

$(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_p)$: un vecteur de quantités représente la ressource pour chaque nœud et indique le niveau de stock pour chaque produit i .

Le nœud initial représente l'état du système au début de chaque réapprovisionnement, la ressource de ce nœud correspond aux quantités optimales (les niveaux de re-complètement de stock) qui doivent être présentes au début de chaque cycle.

Le nœud final représente l'état à la fin du cycle de réapprovisionnement, la ressource de ce nœud représente les niveaux de stocks de chaque produit avec un niveau égal à 0 pour un seul produit ; ce qui va déclencher un réapprovisionnement, et, le retour à l'état initial du système.

b. Les arcs :

Un arc représente un changement d'état déclenché par l'arrivée d'une demande induisant un changement des niveaux de stocks.

(i, Q_i) : un couple représente la ressource pour chaque arc. Le premier élément de ce couple précise l'indice du produit commandé, tandis que le deuxième élément indique la quantité demandée pour le même produit.

Ci-dessous le modèle générique de la politique de réapprovisionnement proposée (Figure 16). Ce modèle présente les changements d'état que peut connaître le système en commençant par l'état initial, en passant par N états intermédiaires et en sortant par l'état final.

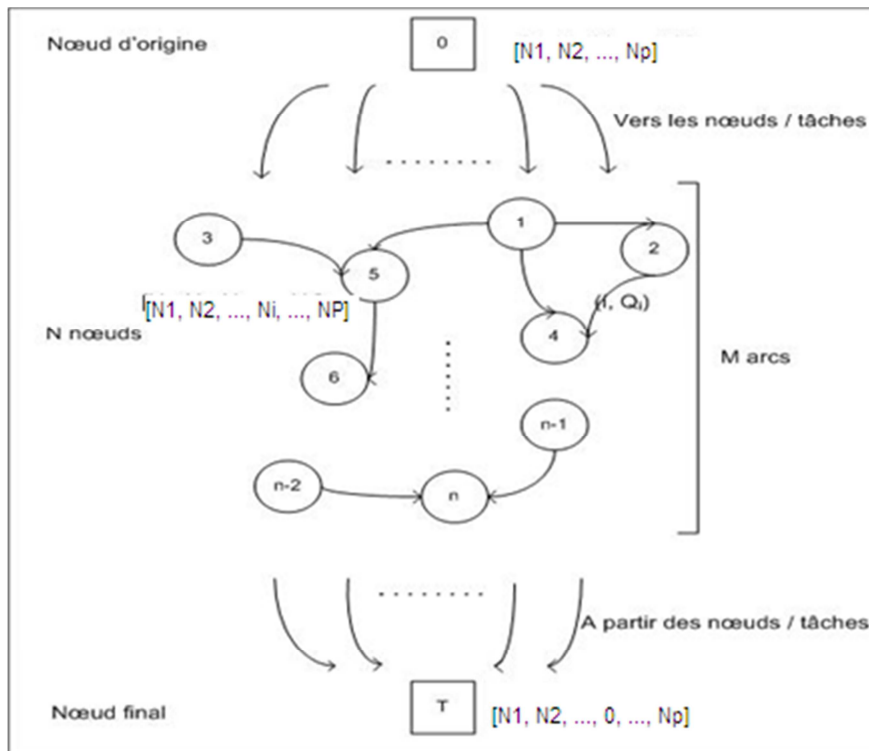


Figure 16 : modèle descriptif de la première étape du politique de réapprovisionnement

Le fonctionnement :

Le nœud d'origine est caractérisé par les niveaux de stock initiaux au début de chaque réapprovisionnement $[N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n]$ et représente les niveaux de ré-complètement de stock. Le système passe par la suite par différents états caractérisés chacun par un niveau de stock N_i pour chaque produit i . La transition entre deux nœuds est déclenchée par une demande et génère un changement d'état. Ce passage provoque le changement des niveaux de stock dans chaque nœud. Ce changement est indiqué dans la ressource de l'arc (i, Q_i) indiquant le produit commandé et la quantité demandée. La condition de sortie du système se présente quand un produit atteint le niveau 0. Donc le niveau 0 du stock peut apparaître dans n'importe quelle position dans le vecteur de quantité de la ressource du nœud final.

Les changements d'état entre deux réapprovisionnements correspondent à un parcours DATÉ de ce graphe, de l'origine à l'une des sorties.

Notre étude se concentre précisément sur un de ces chemins particuliers dans le modèle agrégé. Un chemin est une succession de nœuds commençant par le nœud d'origine, passant par plusieurs états et s'arrêtant si le niveau de stock de l'un des produits arrive au niveau 0.

Pour un cycle donné, chaque nœud a une probabilité d'être visité, en particulier, chaque nœud final. Notons $P(X)$ la probabilité de visiter le nœud X dans un cycle.

D'autre part, si un nœud est visité, il a une distribution de probabilité dans le temps. Notons $P(X,t)$ la probabilité que le nœud X soit atteint à la date t (référence prise ($t=0$) au début du cycle de réapprovisionnement)

$$P(X) = \int_{t=0}^{\infty} P(X,t) dt$$

Ou si le temps est discret :

$$P(X) = \sum_{t=1}^{\infty} P(X,t)$$

4.3.1.2 Définition des variables utilisées

Nous définissons les variables ci-dessous afin d'expliquer le fonctionnement général de la politique de réapprovisionnement.

Notations :

q_i^* : quantité de commande pour le produit i

N_i : niveau de stock du produit i

$\Omega_i = \{1, 2, \dots, i\}$ ensemble des produits

Condition de commande : Si $\exists i / N_i \leq 0$, commander tous les produits de la même famille présents dans le stock. Des quantités seront commandées pour chaque produit $j \in \Omega_i$ / pour tous les j , les q_j^* présentent des quantités optimales qui engendrent un coût logistique minimal.

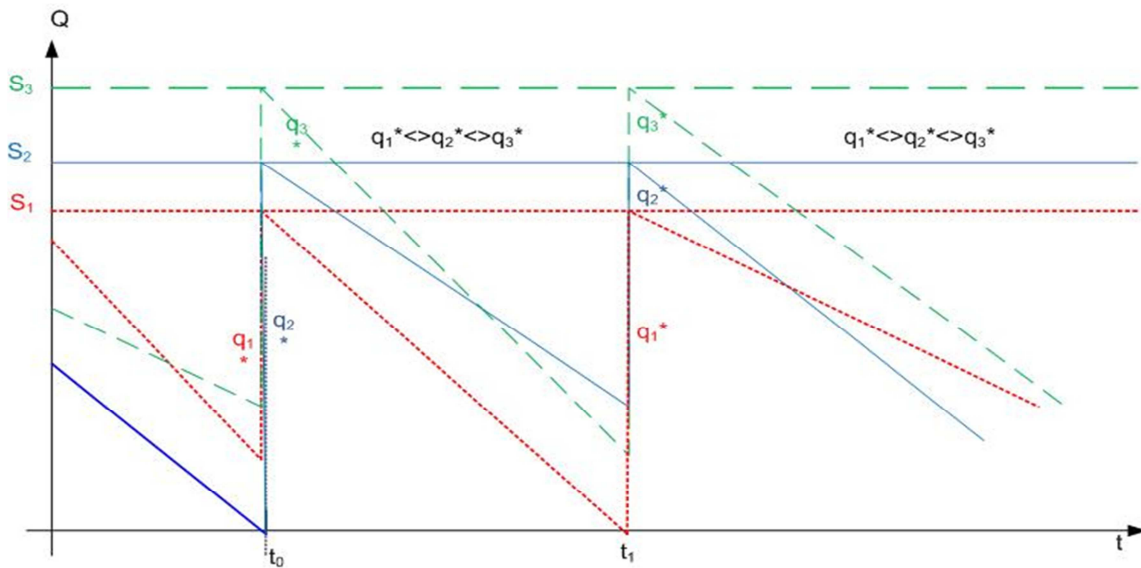


Figure 17 : fonctionnement de la politique (cas de trois produits)

Principe :

Au cours du temps, les quantités stockées diminuent indépendamment les unes des autres au gré de la demande aléatoire de chaque produit. Dans notre quête de simplification, nous avons choisi de privilégier une représentation linéaire des courbes qui montrent la diminution des niveaux de stock au cours du temps (Figure 17). À un instant t_0 , un produit i présent dans le stock arrive au niveau 0 ($N_i = 0$) tandis que les autres ont des niveaux de stocks plus ou moins proches de ce niveau 0 puisque les produits gérés ensemble appartiennent à la même famille de produits, et qu'ils ont plus ou moins des caractéristiques similaires. C'est à cet instant t_0 que nous décidons de commander des quantités ($q_0, q_1, \dots, q_i, \dots, q_n$). Les quantités q_i commandées pour chaque produit dans le stock complètent les niveaux actuels pour atteindre les niveaux de rechargement de stock ($S_1, S_2, S_3, \dots, S_i, \dots, S_n$) de chaque produit.

De point de vue algorithmique, la méthode proposée s'écrit comme suit (algorithme 1). Les variables d'entrée de cet algorithme de simulation de la politique correspondent à un tableau indiquant les quantités présentes dans le stock (niveaux de stock), un tableau indiquant les quantités commandées. Tandis que la variable de sortie est une variable booléenne pour indiquer s'il y a une commande ou non, c'est-à-dire s'il un stock atteint le niveau 0.

```

1 Entrées :
2 Tab_quantité[] // tableau des quantités présentes dans le stock
3 Tab_demande[] // tableau de la demande clientèle
4 quantite_min // la plus petite quantité dans le stock sur l'ensemble des produits à chaque instant
5 Sorties :
6 Commande : booléen // une variable booléenne pour indiquer s'il y a commande ou non
7 début
8 commande = 0
9 quantite_min = MIN (Tab_quantité)
10 Tant que quantite_min > 0 Faire
11   Pour i=1 à p Faire
12     Tab_quantité[i] = Tab_quantité[i] - Tab_demande[i]
13     quantite_min = MIN (Tab_quantité[i])
14   Fin pour
15 commande = 1
16 Fin Tant que
    
```

Algorithme 1 : fonctionnement algorithmique de la simulation de la politique

4.3.2 Deuxième étape: niveaux de reapprovisionnement

Dans ce paragraphe, nous allons déterminer les quantités optimales à commander pour compléter les quantités présentes dans le stock pour atteindre les niveaux de reapprovisionnement. Nous nous intéresserons donc au deuxième paramètre quantitatif de la politique proposée.

A chaque fois que nous déclenchons un réapprovisionnement, ces niveaux de reapprovisionnement de stock sont fixes, et ce, pour les raisons suivantes :

- La demande est indépendante du temps
- La demande ne dépend pas de l'historique de consommation
- Il n'y a aucune intervention extérieure qui peut influencer la nature de la demande

Donc le système est face aux mêmes incertitudes au début de chaque période de réapprovisionnement et il n'a aucune information supplémentaire qui peut être prise en considération pour ajuster ces niveaux de stock.

Nous présentons dans l'organigramme ci-dessous le processus complet de calcul des quantités optimales de commandes en quatre étapes. La première étape consiste à sélectionner les produits à commander et à définir un vecteur de quantités associé à ces produits. La deuxième étape est destinée à la gestion du phénomène aléatoire en se basant sur le calcul de probabilités de rupture. La troisième étape est consacrée au calcul des coûts logistiques considérés. Enfin la quatrième étape est dédiée à la recherche de quantités optimales de commande pour compléter le stock jusqu'aux niveaux de reapprovisionnement.

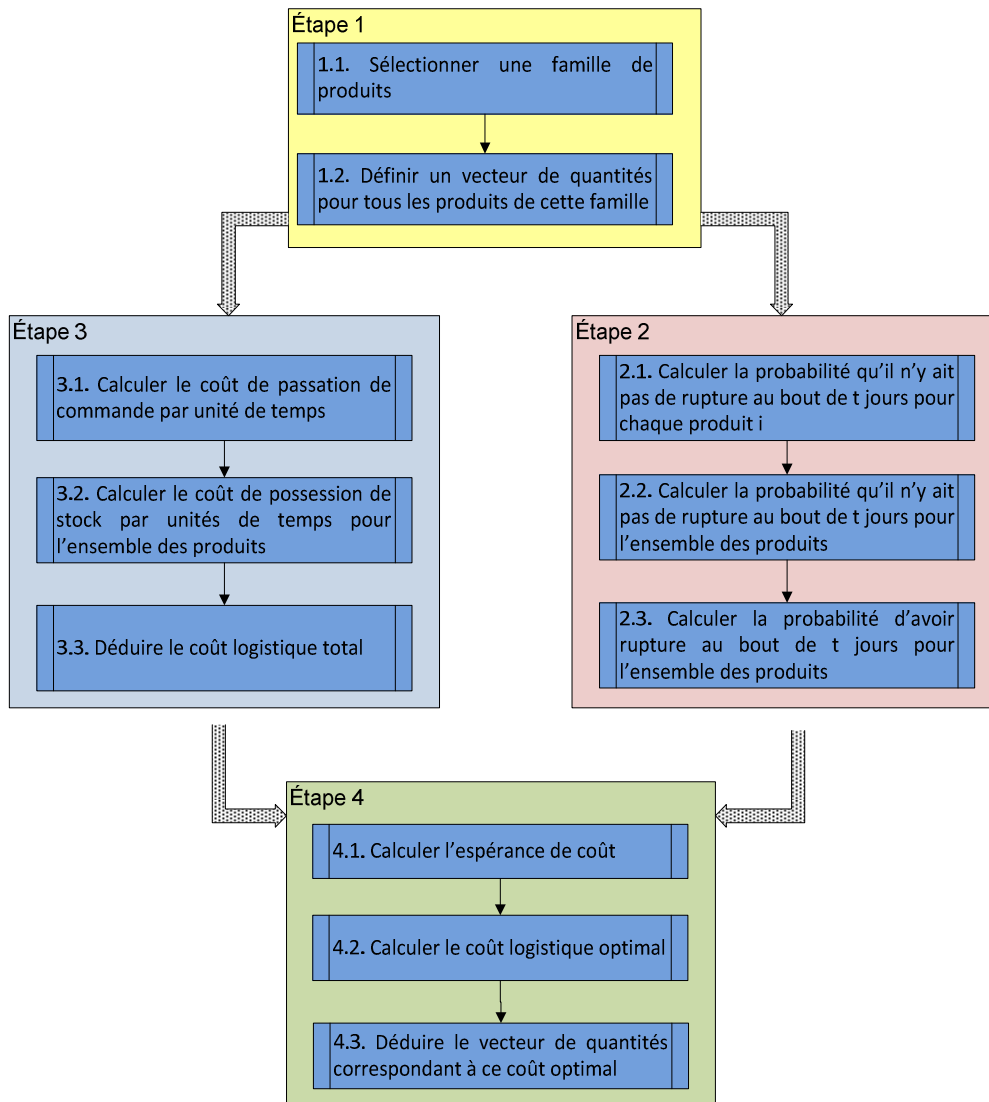


Figure 18 : Organigramme de la démarche utilisée

Notation :

t : unité de temps

λ : paramètre de la loi de poisson

A : coût de passation de commande

f : fonction de densité de probabilité

F : fonction de cumul de probabilité

$V = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$: les niveaux de rechargement optimaux recherchés

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$: un vecteur de rechargement possible

$Pnr_i(t, q)$: probabilité de non rupture pour le produit i au bout de t période si le niveau de rechargement est fixé à q

$Pnr(t, Q)$: probabilité de non rupture pour le vecteur de rechargement Q au bout de t périodes

$Pr(t, Q)$: probabilité de rupture de stock pour le vecteur de reapprovisionnement Q au bout de t périodes

Etape 1 : création du vecteur de reapprovisionnement

Nous définissons un vecteur de niveau de reapprovisionnement possible $V = (q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n)$ qui regroupe les quantités de commande pour atteindre les niveaux de reapprovisionnement afin de pouvoir calculer d'une part le coût logistique engendré et d'autre part la probabilité d'avoir une rupture pour un des éléments du vecteur V .

Etape 2 : calcul des probabilités de rupture

Pour chaque produit :

Dans un premier temps, nous calculons pour chaque produit la probabilité qu'il n'y ait pas de rupture de stock avant une date t pour un niveau de reapprovisionnement donné q . Dans notre cas, cette probabilité est calculée à partir de la fonction de répartition de la loi de poisson de paramètre $t*\lambda$ pour la période t ou $P(X < t*\lambda)$.

Si $f_{i,t}$ est la densité de probabilité de la consommation en t jours pour le produit i , alors la probabilité qu'il n'y ait pas de rupture au bout de t jours est $Pnr_i(t, q)$ en variant t entre $[1 .. T]$ et q entre $[1 .. Qmax]$.

$$\forall q, Pnr_i(t, q) = F_{i,t}(q) \text{ avec } t = 1..T \text{ et } q = 1..Qmax \tag{4.1}$$

Remarque : nous prenons un horizon de période assez grand pour avoir des probabilités assez significatives pour le calcul.

Nous obtenons une matrice à deux dimensions [Quantité x Période] dans laquelle toutes les probabilités sont calculées pour chaque période et chaque quantité.

Pour l'ensemble des produits :

La probabilité de n'avoir aucune rupture de stock avant la date t pour un vecteur de quantité Q est calculée par le produit de chaque probabilité $Pnr_i(t, q)$ de chaque produit i qui lui correspond une quantité commandée q :

$$Pnr(t, Q) = \prod_i Pnr_i(t, q) \tag{4.2}$$

Nous obtenons une matrice à une dimension [Période] dans laquelle sont définies les probabilités de n'avoir aucune rupture avant la date t pour chaque période.

Nous déduisons à partir de chacune de ces probabilités, la probabilité d'avoir une rupture de stock en t pour le vecteur de reapprovisionnement possible Q . Cette probabilité $Pr(t, Q)$ est égale à la différence entre la probabilité de n'avoir aucune rupture de stock avant la date $t-1$, $Pnr(t-1, V)$, et la probabilité de n'avoir aucune rupture de stock avant la date t , $Pnr(t, V)$:

$$\text{Pour } t = 1, Pr(1, Q) = 1 - Pnr(1, Q) \tag{4.3}$$

$$\forall t, \Pr(t, Q) = Pnr(t - 1, Q) - Pnr(t, Q) \quad (4.4)$$

La somme de ces probabilités sur toutes les périodes pour un vecteur de reapprovisionnement Q vaut 1 si on prend un horizon suffisamment important de calcul :

$$\sum_t \Pr(t, Q) = 1 \quad (4.5)$$

Etape 3 : étude des coûts par période de commande

Coût de passation de commande :

Le coût de passation de commande varie en fonction de la date de la rupture de stock, si la rupture a eu lieu à l'instant t , le coût de commande par unité de temps est $CPC(t)$:

$$CPC(t) = \frac{1}{t} * A \quad (4.6)$$

Coût de possession de stockage :

Hypothèse : Si la rupture a eu lieu à l'instant t , on peut estimer que chaque produit a été consommé linéairement en suivant la moyenne journalière. Dans ce cas, certains produits sont en rupture et d'autres non.

Cs_i = coût de stockage par période du produit i par unité de temps

$$THC_i(t) = \frac{(q_i + \max(0, q_i - (t * \lambda_i)))}{2} * Cs_i \quad (4.7)$$

Pour le vecteur de reapprovisionnement possible Q , le coût de possession de stock par période est $THC_Q(t)$:

$$THC_Q(t) = \sum_i C_{poss_i}(t) \quad (4.8)$$

Coût total :

Le coût total s'il y a rupture à l'instant t pour le vecteur de reapprovisionnement possible Q est $C_Q(t)$:

$$C_Q(t) = THC_Q(t) + CPC(t) \quad (4.9)$$

On déduit de (4.9) et (4.4) la fonction de l'espérance de coût C pour un vecteur de niveau de reapprovisionnement Q donné. Cette espérance de coût C est alors le produit de la probabilité d'avoir une rupture de stock par le coût total :

$$C(Q) = \sum_t Pr(t, Q) * Cr_Q(t) \quad (4.10)$$

Conclusion : nous disposons d'une fonction qui calcule l'espérance de coût d'un vecteur de rechargement possible Q .

4.4 Optimisation mathématique : détermination des niveaux optimaux de rechargement V

Dans ce paragraphe, nous développons la troisième partie de l'organigramme présenté précédemment. Nous cherchons le vecteur de quantités qui engendre un coût logistique minimal en se basant sur le travail de modélisation de l'espérance de coût.

4.4.1 Etude de la convexité:

Il convient de s'assurer de la convexité de l'espérance de coût calculée précédemment afin d'appliquer un algorithme d'optimisation.

Le domaine de convexité est défini par la réunion du domaine de définition de l'espérance de coût pour chaque vecteur Q , comme suit :

$$D = \bigcup_Q \text{dom } C(Q)$$

Mathématiquement, cette espérance de coût définie dans l'équation 9 est présentée par la somme (+) d'un produit (x) de deux entités. Parmi ces deux entités, il y en a une qui représente une probabilité calculée à partir d'une fonction de distribution. Ce qui rend l'étude de la convexité de ce domaine difficile.

En effet, l'étude de la convexité de cette fonction avec des outils mathématiques de base (soit par la définition de la convexité, soit par l'une des caractéristiques) est une tâche très complexe imposant l'utilisation d'outils très sophistiqués. Nous pouvons faire référence aux travaux réalisés dans le centre GERAD (Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions) et principalement aux travaux du professeur François Soumis (Soumis et al., 2001, 2002).

Nous nous limiterons donc à vérifier graphiquement la convexité de cette fonction de coût.

4.4.2 Recherche du vecteur des niveaux de rechargement optimaux : proposition d'une heuristique d'optimisation

Nous voulons minimiser notre fonction C . Pour cela nous nous donnons un point de départ arbitraire V_0 . Pour construire l'itéré suivant V_1 il faut penser que nous voulons nous rapprocher du minimum de C ; on veut donc que $C(V_1) < C(V_0)$. On cherche alors V_1 sous la forme $V_1 = V_0 + \mu_1 d_1$ où d_1 est un vecteur non nul de R^n et μ_1 un réel strictement positif. En pratique, nous cherchons d_1 et μ_1 pour que $C(V_0 + \mu_1 d_1) < C(V_0)$. Quand d_1 existe nous disons que c'est une direction de descente et μ_1 est le pas

de descente. La direction et le pas de descente peuvent être fixes ou changer à chaque itération. Le schéma général d'une méthode de descente est le suivant :

$$\begin{cases} V_0 \in R^n \text{ donné} \\ V_{k+1} = V_k + \mu_k d_k, d_k \in R^n - \{0\}, \mu_k \in R^+ \end{cases}$$

Où μ_k et d_k sont choisis de telle sorte que $C(V_k + \mu_k d_k) < C(V_k)$.

Cette méthode a pour avantage d'être très facile à mettre en œuvre, même si les conditions de convergence sont assez lourdes (essentiellement à cause de la stricte convexité).

Dans chaque itération, l'algorithme utilisé a recours à une fonction de calcul de coût. Cette fonction dispose d'un vecteur de quantités comme données d'entrée et d'une valeur retournée qui correspond au coût logistique de ce vecteur.

L'algorithme compare le coût calculé à chaque fois par rapport à tous les vecteurs de quantités possibles et ne retient que la valeur qui oriente l'algorithme dans le bon sens vers l'optimum, c'est-à-dire dans le sens de la descente. Le pas de notre algorithme est une unité de quantité, et la direction de descente est dans le sens du coût minimal afin d'obtenir le vecteur des niveaux de recombêtement optimaux recherchés.

```

1 Entrées :
2 nbre_produits // nombre de produits gérés dans le stock
3 quantites_produits[] // tableau des quantités présentes dans le stock
4 Calcul_Cout // fonction pour calculer le coût logistique
5 Sorties :
6 Cout // coût logistique
7 quantites_optimales // quantités optimales de commande
8 Cout_optimal // coût logistique optimal
9 Début
10 Amélioré = 1 ;
11 Cout_optimal = Calcul_Cout(quantites_produit [0])
12 Tant que amélioré = 1 Faire
13     Amélioré = 0 ;
14     Pour toute combinaison Q de quantité de produit ∈ quantites_produit [] ;
15     If (Calcul_Cout(Q) < Cout_optimal )
16         Cout_optimal = Calcul_Cout(Q) 17         Amélioré = 1 ;
18 Fin tant que
19 Fin
    
```

Algorithme 2 : recherche du vecteur de quantités optimales

Afin d'illustrer nos propos, nous montrons un exemple numérique de trois produits. Nous calculons le niveau de commande pour chaque produit en se basant sur le raisonnement ultérieur.

Les calculs vont être faits sur un univers de cinquante périodes $[1, 50]$ avec des variations des quantités commandées dans l'intervalle $[1, 20]$.

La demande suit la distribution de la loi de poisson avec un paramètre λ différent pour les trois produits. $\lambda_1 = 0.4$, $\lambda_2 = 0.8$ et $\lambda_3 = 1.2$ sont les trois paramètres de la demande des trois produits respectivement produit1, produit2 et produit3.

Pour chaque produit, nous allons générer la probabilité qu'il n'y ait pas de rupture de stock avant une date $t \in [1, 50]$ pour une quantité donnée $q \in [1, 20]$. Nous allons alors construire un tableau de taille 20×50 en se basant sur la fonction de répartition de paramètre λ_i pour chaque produit i . ci-dessous, nous présentons le tableau pour le produit 1 (voir Tableau 6), nous avons donc besoin de trois tableaux similaires à celui-ci pour réaliser l'exemple. Nous les nommons *tab1*, *tab2* et *tab3* pour les trois produits respectivement.

Tableau 6 : probabilité d'avoir une rupture de stock pour le produit 1 (tab1)

nb période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
Q										
0	0,6703	0,4493	0,3012	0,2019	0,1353	0,0907	0,0608	0,0408	0,0273	0,0183
1	0,9384	0,8088	0,6626	0,5249	0,406	0,3084	0,2311	0,1712	0,1257	0,0916
2	0,9921	0,9526	0,8795	0,7834	0,6767	0,5697	0,4695	0,3799	0,3027	0,2381
3	0,9992	0,9909	0,9662	0,9212	0,8571	0,7787	0,6919	0,6025	0,5152	0,4335
4	0,9999	0,9986	0,9923	0,9763	0,9473	0,9041	0,8477	0,7806	0,7064	0,6288
5	1	0,9998	0,9985	0,994	0,9834	0,9643	0,9349	0,8946	0,8441	0,7851

Exemple : La cellule colorée en rouge (0.4695) représente la probabilité qu'il n'y ait pas de rupture de stock avant la période 7 si on complète le stock à 2 unités pour le produit 1 ($\lambda_1 = 0.4$).

Le calcul de la probabilité qu'il n'y ait pas rupture de stock pour un vecteur composé de trois quantités des trois produits se déduit des trois tableaux *tab1*, *tab2* et *tab3*.

Dans la deuxième ligne du tableau ci-dessous (Tableau 7), nous prenons l'exemple d'un vecteur composé des trois quantités 2, 3 et 13 des trois produits 1, 2 et 3 respectivement. Nous calculons les probabilités qu'il n'y ait pas de rupture de stock pour ce vecteur de quantités en récupérant de chaque tableau *tab1*, *tab2* et *tab3* les probabilités qu'il n'y ait pas rupture de stock pour les quantités 2, 3 et 13 respectivement et ceci pour toutes les périodes considérées (50 périodes).

Dans la troisième ligne, nous déduisons les probabilités qu'il y ait rupture de stock.

Tableau 7 : probabilité d'avoir et ne pas avoir rupture de stock pour un vecteur de quantité (2, 3, 13)

Q1	Q2	Q3	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
2	3	13	pnr	0,9831	0,8775	0,6849	0,4718	0,2923	0,1650	0,0852	0,0403	0,0174	0,0069	...
2	3	13	pr	0,0169	0,1056	0,1926	0,2131	0,1795	0,1273	0,0797	0,0449	0,0229	0,0105	...

Nous précisons que la somme des deux probabilités pour chaque instant t n'est pas égale à 1 puisque nous calculons dans la deuxième ligne la probabilité d'avoir rupture de stock à l'instant associé à cet instant et ne doit pas avoir lieu avant.

Nous calculons le coût logistique total engendré par ce vecteur de quantités. Ce coût est composé des coûts de passation de commande et de possession de stock. Nous illustrons ce calcul dans le tableau ci-dessous (Tableau 8) en se basant sur un coût de lancement égal à 200€ et des taux de possession de 20 % du prix du produit.

Tableau 8 : calcul des coûts

ti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ...
CPC	200	100	67	50	40	33	29	25	22	20 ...
THc	16	32	48	61	65	66	68	70	71	72 ...
C. Total	216	132	115	111	105	99	97	95	93	92 ...

Finalement, l'espérance de coût est calculée par déduction des deux résultats précédents, les probabilités d'avoir une rupture de stock et le coût logistique global donc l'espérance est égale à la somme sur toutes les périodes de la multiplication terme par terme. Le Tableau 10 montre l'espérance de coût calculée pour le vecteur $V(3, 3, 13)$.

Tableau 9 : Espérance de coût calculé pour le vecteur V (3, 3, 13)

		t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ...
Espérance	109,28	= \sum	3,6578	13,935	22,09	23,653	18,849	12,517	7,4603	4,0446	1,9961	0,895 ...

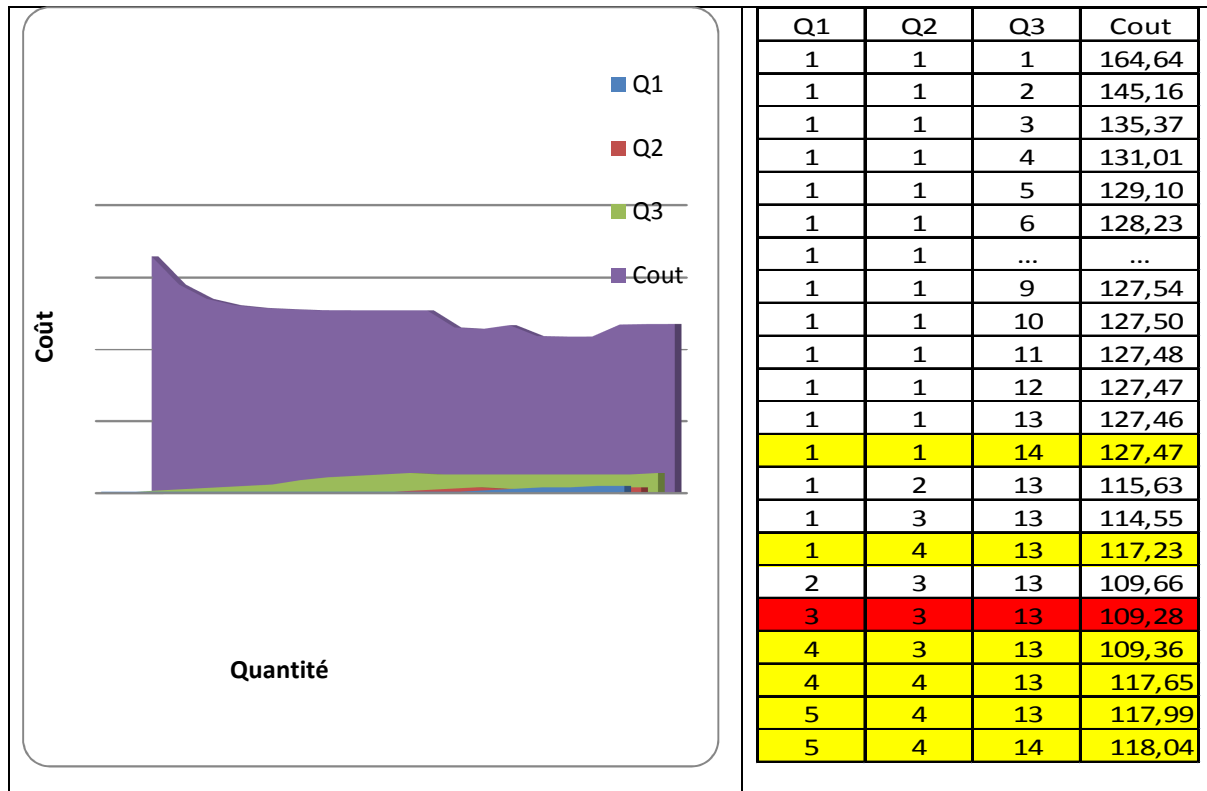


Figure 19 : recherche du vecteur de quantités optimales

Dans la Figure 19, nous détaillons la recherche de l'espérance de coût. Nous réalisons l'expérience pour plusieurs combinaisons de vecteurs de quantités dans le but de minimiser le coût engendré. La figure 22 illustre la convexité de cette espérance. Les valeurs indiquées dans le tableau montrent le déroulement de l'algorithme, les lignes colorées en jaune montrent le changement de combinaison pour passer un autre couple de vecteur de quantités. La ligne colorée en rouge montre le vecteur optimum trouvé. Le coût optimal est de 109,28 qui correspond au vecteur de quantités $V(3, 3, 13)$. Ces quantités représentent les niveaux de reapprovisionnement de stock à atteindre à chaque réapprovisionnement.

4.5 Expérimentation et discussion

Afin de montrer la performance de la politique proposée, il est indispensable de la comparer à une politique de réapprovisionnement de référence.

Pour ce faire, nous avons fait appel à la simulation afin de :

- Générer la demande aléatoirement en respectant les critères de la famille de produits sélectionné.
- Comparer les coûts logistiques fournis par la politique proposée et une deuxième politique de référence

4.5.1 Politique de référence:

La politique classique que nous avons retenu est une politique de révision continue avec un niveau de recomplètement de stock S , en tenant compte des stocks de sécurité.

Les auteurs, dans plusieurs travaux de littérature [Silver et al. 2003], proposent deux représentations de cette politique, premièrement par une approche séquentielle et puis par une approche simultanée. Rappelons qu'un système (s, S) suppose une révision continue. Chaque fois que la position du stock descend jusqu'au niveau de commande s ou plus bas, une commande est effectuée afin d'atteindre le niveau de recomplètement de stock S . Lorsque toutes les transactions sont de la taille de l'unité, toutes les commandes sont de la taille $S-s$ et sont effectuées lorsque la position de stock se trouve exactement au niveau s . Nous pouvons alors considérer que la quantité de commande Q est égale à $S-s$. dans le cas où les commandes peuvent être de plusieurs unités, la quantité commandée varie suivant la quantité manquante.

Nous présentons par la suite l'approche séquentielle présentée par Silver et al. [Silver et al. 2003] afin de sélectionner s et S sous des conditions de transaction de différentes tailles et qui répercutent le plus dans notre contexte particulier.

4.5.1.1 Détermination des niveaux s et S

Dans cette approche, les auteurs sélectionnent s et S simultanément et essaient aussi de prendre en compte les quantités manquantes. Une rupture de stock arrive si la somme des quantités manquantes et les quantités consommées pendant le délai de révision de la demande totale est supérieure à s . Ainsi, nous définissons la variable :

$$x' = z + x$$

Où z correspond aux quantités manquées et x aux quantités consommées pendant le délai de révision de la demande totale.

Dans la référence utilisée, les auteurs présentent un algorithme séquentiel basé sur le calcul des quantités manquées, le taux d'erreur de prévision et la moyenne de la taille de transaction afin de calculer les deux niveaux s et S .

Nous nous basons sur ce raisonnement pour définir la politique de référence que nous allons utiliser pour faire la comparaison par rapport à la politique proposée dans ce chapitre.

Les niveaux s et S sont calculés comme suit :

$$s_i = E(x') + Kx\sigma_{x'} \quad (4.11)$$

arrondi à l'entierle plus proche

$$S_i = s_i + Q_i \quad (4.12)$$

Q_i : quantité économique de commande pour le produit i

Dans le cas où la demande est définie par la loi de poisson, le niveau de satisfaction clientèle (k) est de 100% puisque les ruptures de stock sont interdites, ces équations s'écrivent comme suit :

$$s_i = \lambda_i + \sqrt{\lambda_i} \quad (4.13)$$

$$S_i = s_i + Q_i \quad (4.14)$$

4.5.1.2 Calcul des coûts :

Le calcul des coûts dans la politique de référence se base sur les fonctions de calcul de coût présentées dans le chapitre précédent (fonctions 4, 5, 6, 7 et 8). Le coût de passation de commande englobe le coût de lancement de commande et le coût de transport puisque nous adoptons un transport rapide et que les produits gérés sont suffisamment petits pour être transportés par le même moyen transport, ce qui donne le même coût de transport variable.

4.5.2 Validation

Nous avons réalisé une série de 32 simulations sous Excel, avec 470 demandes générées à chaque simulation. La demande est générée aléatoirement en se basant sur la fonction de répartition de la loi de poisson. Les paramètres utilisés sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 10):

Tableau 10 : valeurs numériques utilisées

Variable	Désignation	Valeur
i	Nombre de produits	10
	Nombre de période par simulation	470
A_{jin}	coût de passation de commande normale, urgente	100€, 400€
h_{jkin}	Taux de possession de stock	20%
λ	Paramètre de la loi de poisson	$\lambda \in [1.. 10]$ par période
Prix	Prix des produits	€ [100€. 300€]

En se basant sur ces valeurs numériques, nous réalisons des simulations pour calculer le coût logistique total sur l'horizon de 470 périodes dans chacune (voir Figure 20). Ce qui permet de comparer les deux politiques avec les mêmes données d'entrée notamment la demande. La demande est générée aléatoirement et est utilisée pour les deux politiques.

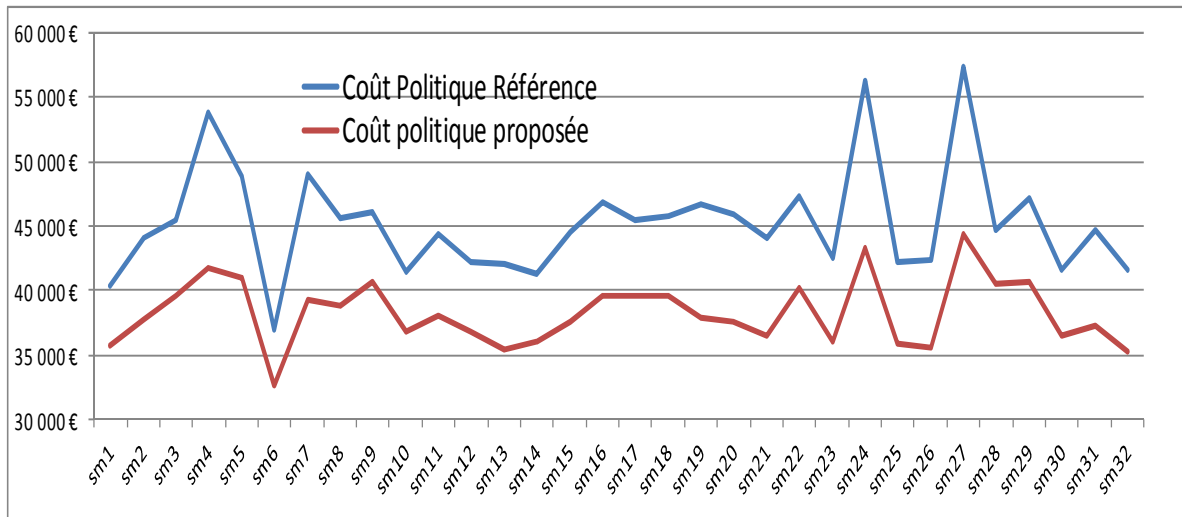


Figure 20 : comparaison des coûts logistiques totaux

La différence entre les deux politiques est claire. Dans toutes les simulations, la politique de référence surmonte la politique proposée d'un écart minimum de quelques milliers d'euro.

Tandis que la variation de ces coûts ([33000€.. 44000€] pour la politique proposée) est due à la variation de la demande qui influence les quantités présentes dans le stock d'où le coût de possession.

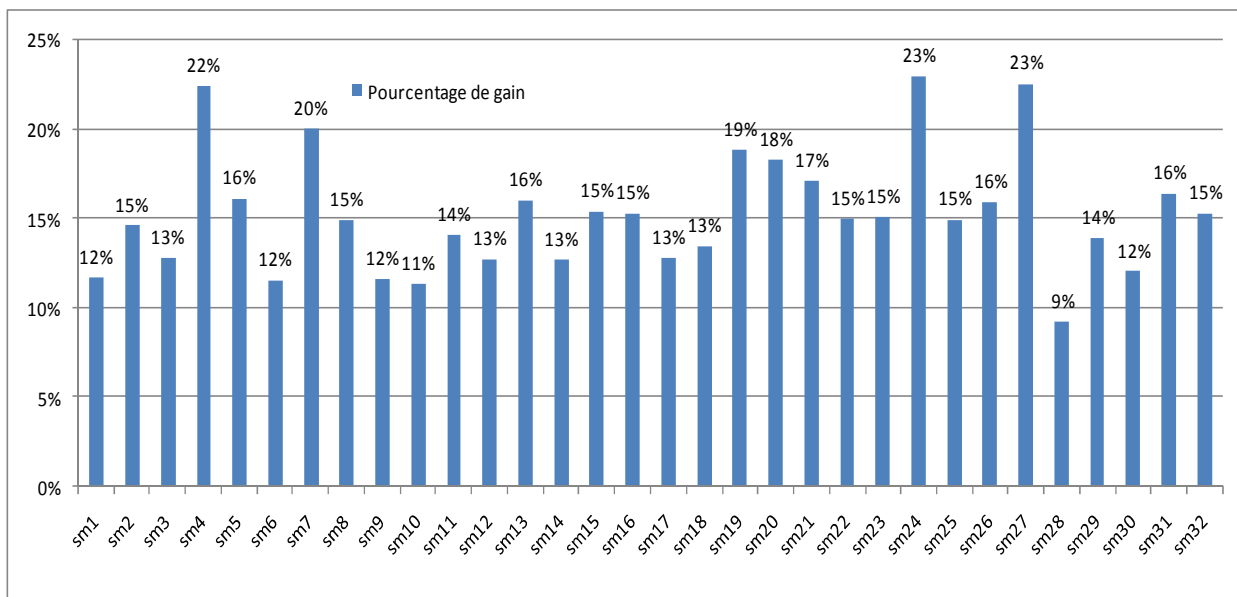


Figure 21 : Pourcentage des gains réalisés par la politique proposée par rapport à la politique de référence

Pour les mêmes simulations réalisées dans la Figure 20, nous déduisons le pourcentage de gain dans chacune. Ces pourcentages varient entre 9% et 23% avec une moyenne de 15% sur l'ensemble.

Nous pouvons conclure donc que la politique proposée est plus performante que la politique de référence pour faire face aux problèmes de rupture de stock en se basant totalement sur les commandes urgentes, et ce pour l'ensemble des produits.

Une autre constatation aussi qui peut être à l'origine de ces gains, c'est le regroupement des produits en famille homogène, ce qui permet de gagner en termes de coût de passation de commande.

Ces gains sont dus au fonctionnement de chaque politique. Nous montrons dans le Tableau 11 un extrait du déploiement des deux politiques au cours du temps.

Tableau 11 : comparaison des quantités commandées entre la politique de référence et la politique proposée

										ss	5	14	15	3	12	12	6	6	9	11											
										S	20	59	65	13	52	52	26	26	39	46	S	27	81	90	18	72	72	36	36	54	63
13	18	11	0	29	23	8	2	3	6	31	0	62	0	0	0	0	0	0	34	0	26	46	47	14	84	42	16	3	25	28	
1	26	11	3	4	20	0	15	2	10	0	86	0	0	0	74	22	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	16	5	0	6	7	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	20	0	4	0	3	5	8	5	5	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	35	4	5	9	4	4	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	20	11	0	29	11	2	0	2	6	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	1	1	1	0	0	5	4	5	12	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	7	1	8	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	23	0	0	0	50	0	20	67	81	18	46	49	23	31	37	60	
0	14	9	2	26	6	0	0	1	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	13	6	6	8	10	4	0	2	9	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	20	3	2	11	16	7	0	5	0	0	0	0	16	53	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	33	9	1	7	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	12	27	2	30	16	5	10	2	20	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	15	0	18	14	5	0	13	4	0	0	77	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	10	3	15	23	10	4	2	11	0	0	0	70	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	1	11	11	2	6	9	2	18	0	0	0	0	64	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	8	0	1	15	5	5	8	18	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	18	2	19	6	3	8	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	4	0	3	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	2	27	1	11	18	5	5	18	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	15	6	78	10	75	87	30	29	54	50	
0	12	20	4	19	8	5	9	6	17	0	83	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	11	15	3	11	12	5	6	13	9	0	0	0	0	59	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	3	8	0	0	18	7	0	6	0	0	0	0	0	0	32	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	16	10	2	17	10	0	7	21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	16	3	0	10	0	4	0	8	0	48	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	12	3	0	2	2	11	3	11	17	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	15	54	72	12	49	60	28	29	57	53	
0	17	2	2	28	1	3	5	6	2	24	0	54	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	1	0	3	4	5	4	12	18	0	0	0	0	62	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	18	6	3	26	36	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	24	11	0	18	7	4	1	19	12	0	72	0	0	0	25	24	0	0	0	0	12	60	19	8	76	49	14	21	43	14	
1	10	13	0	6	4	5	1	14	2	0	0	0	50	47	0	51	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	7	15	1	10	5	10	3	7	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	16	9	0	22	0	7	1	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	2	4	0	9	1	8	0	0	21	0	56	0	0	23	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	4	0	13	0	0	7	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	23	1	1	3	15	12	6	6	18	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	12	24	3	20	0	7	0	12	6	0	70	0	0	0	0	26	0	0	0	0	24	70	68	9	74	33	42	26	63	37	
0	29	10	2	4	1	2	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	22	3	16	7	0	2	2	17	0	0	0	0	0	21	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	6	1	12	14	2	4	0	0	25	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	27	0	5	0	0	0	10	16	0	0	0	57	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	2	17	4	15	0	4	1	5	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	7	4	0	0	14	0	6	2	17	0	0	14	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	33	19	0	8	32	3	14	14	0	0	0	0	0	0	36	0	41	0	0	0	31	71	105	10	60	68	11	36	33	59	
1	0	0	2	3	0	6	0	13	24	22	71	67	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	16	1	5	4	28	6	6	8	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	38	5	0	2	4	0	15	8	0	0	0	0	0	25	0	50	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	4	13	3	9	0	2	0	16	15	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	9	29	2	11	16	12	2	2	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	29	81	17	27	46	30	8	54	59	
1	6	18	1	2	7	0	10	0	7	21	0	0	52	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	6	3	5	3	4	6	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	35	3	10	24	3	6	9	10	0	0	0	0	0	28	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	14	0	6	7	24	0	0	0	31	0	54	18	0	0	0	33	0	0	0	0	7	20	54	16	22	60	6	20	15	64	
0	12	17	2	0	13	1	0	0	5	0	61	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	12	12	0	7	17	3	7	2	5	0	0	0	0	0	24	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	15	0	3	6	0	3	0	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	19	13	0	0	4	4	1	14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	10	3	2	15	0	3	2	6	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	16	7	0	20	7	3	0	0	3	0	0	0	68	0	0	32	0	0	0	0	15	84	52	7	48	41	17	10	32	17	

La différence entre les deux politiques se résume principalement sur deux volets :

- (i) La fréquence de commande : il y a beaucoup plus de commande dans le cas de la politique de référence puisque le réapprovisionnement est individuel pour chaque produit dans le stock.

(ii) Les quantités présentes dans le stock : la présence de stock de sécurité oblige la présence de quantités importantes dans le stock, ce qui n'est pas le cas dans la politique qui se base sur une rupture d'un produit pour commander pour l'ensemble des produits.

Dans ce dernier cas, la notion de famille de produits est importante pour espérer avoir une périodicité égale pour tous les produits. C'est-à-dire quand un des produits arrive au niveau 0, le reste y sont ou presque. Nous pouvons constater ce phénomène en comparant les quantités commandées par rapport aux niveaux de commandes.

4.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié un problème particulier de gestion combinée de stock et de transport. Nous nous sommes intéressés spécialement à une famille de produits qui présentent des caractéristiques particulières telles que : une demande très aléatoire et ponctuelle, une interdiction de rupture de stock, des prix de produits très chers, des délais de péremptions très courts,

Une gestion fine des produits de cette famille de produit est essentielle car les coûts qui s'y rapportent peuvent être très élevés en raison de leurs prix unitaires élevés et de leurs faibles délais de péremption.

Ceci nous a conduits à proposer une nouvelle méthode de gestion des approvisionnements pour laquelle nous avons défini en premier lieu le contexte d'application. Par la suite, nous avons présenté un modèle agrégé basé sur des états stationnaires afin d'expliquer la progression de la politique. Puis, nous avons défini le fonctionnement au cours du temps en définissant les relations des paramètres quantitatifs de la politique de réapprovisionnement.

Cette politique est classée parmi celles basées sur un approvisionnement continu avec un niveau de remplètement pour chaque produit de la même famille.

Le déclenchement d'un nouveau réapprovisionnement est conditionné par l'arrivée d'une rupture de stock de l'un des produits gérés. Ceci provoque une commande de tous les produits de la même famille pour compléter les niveaux actuels des stocks jusqu'aux niveaux de remplètement.

Ces niveaux sont calculés en se basant sur des modèles mathématiques définissant d'une part les probabilités d'avoir une rupture de stock à chaque instant t et pour chaque quantité commandée Q , d'autre part sur le coût logistique total. Nous en déduisons l'espérance de coût pour chaque vecteur de quantités commandées et nous appliquons un algorithme d'optimisation pour chercher le vecteur optimal qui définit les niveaux de remplètement.

Nous avons réalisé une partie d'expérimentation basée sur des simulations afin d'évaluer notre politique et de la comparer par rapport à une politique classique. Cette étude présente des gains de l'ordre de 15% quand le coût de commande urgente est quatre fois plus élevé qu'une commande normale.

Le chapitre suivant sera consacré à une étude de classification de produits en familles homogènes. L'objectif est de proposer une méthodologie générique pour classer les produits présents dans le stock en groupes homogènes présentant les mêmes caractéristiques. Cette classification permet de distinguer les familles de produits et facilite l'application des politiques de réapprovisionnement proposées dans les chapitres 3 et 4.

Chapitre 5: Classification des produits en familles homogènes

SOMMAIRE

Chapitre 5	: Classification des produits en familles homogènes.....	95
5.1	Introduction.....	96
5.2	Travaux liés à la classification dans le domaine logistique.....	97
5.3	Fouille de données	99
5.4	Approche proposée pour la classification des produits	106
5.5	Création des familles de produits.....	111
5.6	Déploiement d'un exemple	112
5.7	Conclusion	119

5.1 Introduction

La mise en place de politiques de réapprovisionnement est une étape clé dans le processus de gestion combinée des stocks et transports de produits. Dans le cas général, les produits sont très diversifiés et l'identification des politiques s'avère une tâche complexe. Le risque est alors double : définir une politique pour chaque variété de produit et se retrouver avec un très grand nombre de politiques entraînant un problème de gestion et de maintenance de ces politiques ; définir une politique générique pour l'ensemble des produits et gérer nombre d'entre eux de manière sous-optimale.

Face à ce problème nous avons choisi de définir des politiques de réapprovisionnement par classe de produits comme c'était le cas des deux chapitres précédents. Les produits seront ainsi classés dans des classes homogènes. Chaque classe aura sa propre politique qui va piloter le réapprovisionnement de tous ses membres. Par ce choix, nous garantissons un nombre acceptable de politiques, d'où une gestion et une maintenance de politiques à la fois simple, efficace et maîtrisé.

Le problème devient alors un problème de caractérisation des classes de produits. Le domaine de la logistique présente quelques travaux qui ont traité ce sujet. Cependant la majorité des recherches se base sur des algorithmes assez complexes et sont soumises à la subjectivité des critères de classification. De plus, la majorité de ces travaux préconise de figer la base des produits à un instant particulier ce qui suppose d'avoir une vision globale de tous les produits pour effectuer les calculs des paramètres de classification. Tout nouveau produit engendre dès lors de nouveaux calculs, ce qui pose problème dans un contexte où les produits évoluent et changent fréquemment.

Dans notre travail, nous avons essayé de répondre à ces difficultés en définissant les classes de produits en se basant sur un échantillon de produits. Les classes sont identifiées et par la suite à l'aide d'un arbre de décision, nous intégrons les nouveaux produits dans leurs classes adéquates. Nous nous sommes basés sur une méthode de classification qui a fait ses preuves dans le domaine de l'analyse de données et plus précisément dans l'Extraction de Connaissances à partir de Données (ECD), référencé sous le nom de fouille de données ou encore sous le terme couramment utilisé de Datamining en anglais. Nous avons projeté les principes de cette méthode sur notre problème de classification de produit pour aboutir à des classes homogènes de produit.

La recherche dans le cadre d'Extraction de Connaissances à partir de Données est basée sur les statistiques. Ces notions sont très rarement associées à la recherche dans le domaine de la logistique, d'où l'originalité de notre approche.

Nous réalisons un traitement de ces classes de produits afin d'obtenir des familles de produits à partir d'un filtrage par rapport à des critères liés à la mise en œuvre des politiques de réapprovisionnement.

La suite de ce chapitre s'énonce comme suit. Nous faisons une synthèse bibliographique des différentes méthodes classiques de classification dans le domaine logistique. Nous présentons ensuite des outils du domaine fouille de données, plus précisément les outils que nous allons utiliser

dans notre étude. Puis, la partie principale de ce chapitre sera consacrée à la classification des produits en classes homogènes, à l'affectation des politiques de réapprovisionnement aux classes créées et à la création d'un arbre de décision pour classer le reste des produits automatiquement. Un exemple illustratif sera présenté dans lequel nous avons utilisé des données réelles pharmaceutiques obtenues dans le cadre d'une collaboration entre notre laboratoire et la pharmacie d'établissement de l'hôpital Croix-Rousse à Lyon.



Travaux liés à la classification dans le domaine logistique

Plusieurs modèles sont proposés pour résoudre les problèmes de classification et de gestion des produits. Parmi ceux-ci on retient particulièrement le système ABC qui est, depuis son élaboration par Pareto dans les années 1920, la méthode la plus utilisée dans le domaine logistique.

La classification ABC permet de classer les produits stockés en trois groupes : (i) A : très important (ii) B : important (iii) C : moins important. Ce qui permet alors de regrouper les produits et les ressources mobilisées selon un critère d'importance. Cette méthode met en évidence les phénomènes de concentration en traduisant le fait que certaines valeurs consommées ou critères suivent une loi gaussio-logarithmique. Le principe de base est de classer par valeur décroissante les éléments étudiés selon un critère d'analyse déterminé, et de calculer les pourcentages cumulés. La recherche du critère d'analyse correspondant à la classification désirée, les valeurs peuvent être connues ou calculées à partir des valeurs connues. Nous obtenons ainsi la relation suivante :

- X% des éléments représentent Y % de la valeur étudiée.

Cependant, une des faiblesses de la classification ABC de base réside dans le fait qu'elle n'est basée que sur un seul critère. Or, la plupart du temps, nous sommes devant la nécessité de considérer d'autres critères de classification. Ceci est bien montré dans plusieurs travaux qui s'intéressent à la classification pour l'identification des méthodes de réapprovisionnement (Guvener and Erel 1998; Huiskonen 2001; Partovi and Anandarajan 2002; Hadi-Vencheh 2010).

En effet, si nous nous plaçons dans le contexte de classification des produits, nous pouvons remarquer que dans beaucoup de cas plusieurs critères s'avèrent importants dans l'évaluation de l'importance des produits. Ce problème prend alors la forme d'une classification multi critères étudiée par plusieurs chercheurs. En général, ils font appel à des outils et des procédures de calcul complexe pour effectuer cette classification ABC multi critères. Ils proposent à chaque fois une amélioration de cette méthode ABC classique.

Les premières améliorations de la classification ABC multi critères ont été faites dans les années 80. Flores and Whybark (Flores and Whybark 1986) proposent une méthodologie matricielle. Une matrice de critères combinés est constituée lorsque l'on est en présence de deux critères de classification. Bien qu'elle représente un progrès dans la classification ABC multi critères, cette méthode est difficile à utiliser lorsqu'on doit prendre en compte plus de deux critères.

En 1990, Ernst et Cohen (Ernst and Cohen 1990) présentent une méthodologie basée sur le clustering statistique. L'avantage majeur de cette approche est qu'elle peut prendre en compte des

combinaisons très variées de critères de classification. Cependant, cette approche exige des données substantielles. L'utilisation de l'analyse de facteurs, dans la procédure de clustering, rend cette méthode difficile à pratiquer dans l'environnement de gestion de stock.

Le processus de l'analyse hiérarchique présenté par Saaty (Saaty 1980) a été à la base de plusieurs travaux. Ce modèle a été largement adopté par les chercheurs dans le contexte classification ABC (Partovi and Burton 1993; Gajpal, Ganesh et al. 1994; Partovi and Hopton 1994). L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'elle intègre beaucoup de critères et facilite la gestion du système étudié, mais elle présente la faiblesse d'être trop soumise à la subjectivité dans l'intégration des critères.

Egalement dans la méthode ABC et afin de déterminer la partition de l'espace de description la plus convenable pour caractériser les différents modes de fonctionnement, l'opérateur peut faire appel aux différents modes d'apprentissage en fonction de ses connaissances. En effet, quand seule la connaissance des experts est utilisée pour l'identification des différents états fonctionnels du processus de classification peuvent apparaître plusieurs situations:

- L'expert n'est capable d'exprimer qu'une connaissance partielle du processus,
- Il est conscient de l'existence de plusieurs états mais il ignore comment les identifier en utilisant les données historiques et celles disponibles en ligne,
- Il n'a pas une idée claire des états à reconnaître.

Il a aussi été fait appel à l'intelligence artificielle comme méthode de classification multi critères. Guvenir et Erel (Guvenir and Erel 1998) se sont basés sur les algorithmes génétiques comme méthode de classification. D'autres techniques ont été appliquées telles que les réseaux de neurones proposés par Partovi et Anandarajan (Partovi and Anandarajan 2002). Ces deux techniques se basent sur des heuristiques qui ne peuvent convenir à tous les environnements de travail (Ching-Wu, Gin-Shuh et al. 2008).

Récemment (Ramanathan 2006) a présenté un mode de classification simple qui se base sur l'optimisation linéaire et qui s'apparente à l'analyse d'enveloppement de données. Dans son approche proposée, l'auteur utilise une fonction objectif pondérée (un poids pour chaque critère), cette fonction est utilisée pour agréger les caractéristiques d'un produit dans le stock en termes de différents critères pour une seule valeur. Cette valeur représente « le score » optimal d'un produit. Les poids sont affectés aux critères en utilisant l'objet d'optimisation

Le modèle utilise une fonction objectif de maximisation que tous les critères sont supposés être en corrélation avec le niveau d'importance pour chaque produit. Le modèle donne le score optimal pour chaque article. Pour obtenir les résultats optimaux des autres produits dans le stock, le modèle doit être utilisé en changeant plusieurs fois la fonction objectif. Ces scores peuvent être utilisés pour classer les articles en stock.

Nous pouvons constater que cette dernière suggestion représente la faiblesse de la méthode ABC multi critères. En effet, nous nous retrouvons face à un problème assez complexe si nous sommes obligés d'appliquer cette méthode sur une base de données qui présente plusieurs articles.

(Zhou and Khotanzad 2007) ont proposé une méthode de classification floue basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques. Les résultats de ces classifications comparés à ceux obtenus par Ramanathan et ceux d'autres classifications apparaissent comme meilleurs mais ne répondent pas totalement aux exigences de fiabilités des méthodes de classification des produits dans le domaine logistique.

En résumé, ces méthodes présentent chacune quelques faiblesses :

- L'appel à des outils et des procédures de calcul complexe et manuel pour effectuer une classification ABC multi critères
- L'utilisation des approches qui exigent l'utilisation des données substantielles ainsi que l'utilisation de l'analyse de facteurs de classification
- L'utilisation des méthodes qui se basent sur la subjectivité dans l'intégration des critères,
- Le manque de fiabilité dans certaines méthodes

La méthode de classification à utiliser doit fournir à l'expert plusieurs alternatives d'apprentissage pour identifier et caractériser les états fonctionnels du système. Ainsi, la séparation en régions de l'ensemble des observations à utiliser pour l'apprentissage peut se réaliser selon un étiquetage des observations imposées par l'expert (apprentissage supervisé), ou de façon automatique (apprentissage non supervisé). Une combinaison des deux types d'apprentissage peut être également envisagée. Tous ces outils se situent dans le domaine de la fouille des données. Notre étude se focalise surtout sur les outils qui vont nous servir comme solutions pour répondre à notre besoin de classification des produits en classes homogènes. L'utilisation de ces outils présente plusieurs avantages :

- L'intervention des experts est limitée à la phase amont, lors de la création de l'arbre de décision,
- La probabilité de classer convenablement un nouvel élément est supérieure à 96%,
- Un temps de réponse rapide pour la création des classes de produits ainsi que pour la gestion des nouveaux produits,
- Les outils de fouilles de données ne sont pas soumis à la subjectivité des critères,

5.3 Fouille de données

5.3.1 Introduction

La fouille de données (Jambu 1999; Tufféry 2005) ou encore analyse intelligente des données, désigne « *l'ensemble des méthodes destinées à l'exploration et l'analyse des données informatiques, de façon automatique ou semi-automatique, en vue de détecter dans ces données des règles, des tendances inconnues ou cachées, des structures particulières restituant l'essentiel de l'information pertinente. La fouille de données permet d'ajouter de l'intelligence aux archives de données pour être capable ensuite de décider* ».

D'après (Elghazel 2007) : « *la fouille de données traduit l'ensemble des techniques descriptives (ou exploratoires) visant à mettre en évidence des informations présentes mais cachées par le volume des*

données (classification automatique), ou aussi prédictives cherchant à extrapoler de nouvelles informations à partir des informations présentes dans les données (classement, prédiction) ».

Dans un premier temps, nous abordons le problème de la classification automatique. La classification automatique ou analyse de clusters (clustering en anglais) est la tâche qui classe des produits hétérogènes en un certain nombre de classes homogènes, appelés clusters.

Dans le clustering, il n'y a pas de variable cible privilégiée et on ne dispose d'aucune autre information préalable que la description des données en une liste de variables communes. C'est pour cette raison que nous dirons que le clustering est une tâche d'apprentissage "non supervisée" où les enregistrements sont regroupés en fonction de leur similitude de manière à vérifier les deux propriétés suivantes » (Elghazel 2007):

- *« Les objets d'une même classe (cluster ou groupe) sont aussi similaires que possible : c'est l'homogénéité intraclasse (cohésion) qui traduit cette caractéristique.*
- *Les objets appartenant à des classes différentes sont aussi différents que possible : la plus grande hétérogénéité interclasse (séparation) est recherchée ».*

Les résultats de l'étape de classification doivent être traités et analysés afin de déterminer une certaine signification pour les clusters créés. Dans le domaine logistique, ces derniers peuvent indiquer différentes caractéristiques des classes de produits et par la suite orienter le choix de la politique de réapprovisionnement pour chacune des classes.

En effet, le clustering détermine des groupes de produits susceptibles d'être soumis à une gestion déterminée, chaque classe regroupant des produits réagissant identiquement.

Dans un second temps, nous abordons aussi le problème du classement (ou aussi classification supervisée).

Cette technique est considérée comme l'une des techniques de la fouille de données les plus anciennes et les plus souvent utilisées, que ce soit en marketing pour identifier le profil d'un client, en logistique pour connaître les critères d'un produit, le classement de données séquentielles suppose que chaque séquence temporelle d'une population donnée appartient à une classe prédéfinie et cherche à déterminer automatiquement la catégorie correspondante à toute nouvelle séquence introduite dans le système. Au cours des dernières années, plusieurs techniques de classement de données séquentielles ont été développées. Les plus répandues sont les approches à base de prototypes et les approches à base de modèles. Dans ce cadre, nous essayons de développer un module de prédiction en exploitant des trajectoires qui nous ramènent à des classes prédéfinies. Ce module utilise une méthode descendante hiérarchique sous la forme d'un arbre de décision. Cette dernière opère en segmentant l'ensemble des produits en classes de produits » (Elghazel 2007).

5.3.2 Mode d'apprentissage

5.3.2.1 Critères de classification

« Comme pour toutes les méthodes de fouilles, les données non structurées ne sont pas directement analysables par les techniques de classification automatique : elles se présentent le plus souvent sous la forme d'un tableau rectangulaire avec en lignes les individus (objets, entités, produits, etc.) et en colonnes des variables (attributs, critères, etc.) (Voir Tableau 12) ».

Tableau 12 : Tableau de données (Elghazel 2007)

		Variables				
		Y	Y_1	...	Y_j	...
Individus	X					
	X_1					
	X_2			X_{ij}		
	X_n					

On distingue schématiquement deux types de variables : les variables quantitatives dites aussi numériques et les variables qualitatives dites aussi catégorielles.

5.3.2.2 Les variables quantitatives

Guenir et Erel (Guenir and Erel 1998) définissent la variable quantitative comme : « une variable quantitative prend des valeurs ordonnées (comparable par la relation d'ordre \leq) pour lesquelles des opérations arithmétiques telles que différence et moyenne aient un sens. Une variable quantitative peut être binaire, continue ou discrète. Les variables binaires ne peuvent prendre que deux valeurs, le plus souvent associées à {absence, présence} ou {succès, échec}. Les variables continues ou d'échelle sont les variables dont les valeurs forment un sous-ensemble infini de l'ensemble des réels ».

Les variables discrètes sont celles dont les valeurs forment un sous-ensemble fini ou infini de l'ensemble N des entiers naturels.

5.3.2.3 Classification non supervisée

« Il n'est pas toujours possible de disposer des connaissances a priori sur les caractéristiques des modes de fonctionnement et l'expert ne peut pas affecter chaque observation à une situation. L'objectif est de proposer une structure de classe, dans un ensemble d'observations, en trouvant des ressemblances entre ces observations. Autrement dit, l'auto-apprentissage (classification non supervisée) consiste en la découverte, à partir des informations contenues dans un ensemble de données, de classes ou groupes de classes caractérisant les différents modes de fonctionnement » (Elghazel 2007).

De cette façon, la méthode de classification propose une première partition à l'expert qui, ensuite, doit valider ces résultats en prenant en compte sa connaissance ainsi que les lois physiques régissant le comportement du processus.

Plusieurs méthodes peuvent assurer la classification non supervisée. Nous présentons par la suite la méthode la plus répandue sur laquelle nous allons nous baser dans notre étude.

5.3.2.4 Méthodes de coalescence : K-moyenne

Nous nous sommes basés sur les travaux de thèse de Kempowsky (Kempowsky 2004) et de Nadia Kanaoui (Kanaoui 2007) pour présenter cette méthode de coalescence.

« Les techniques de coalescence (regroupement ou en anglais « clustering ») essaient de trouver une partition de l'espace en regroupant les éléments, de nature quantitative x appartient R^D , d'un ensemble $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ en un nombre K de groupes (ou classes), selon leurs ressemblances ou bien leur proximité » (Kaufman and Rousseeuw 1990).

« Typiquement, le concept de similitude est défini à partir de la distance entre un vecteur de données et le prototype (centre) du groupe (classe). Ces groupes doivent satisfaire deux critères » (Jain, Murty et al. 1999):

- *« Chaque groupe ou classe est homogène : les objets appartenant au même groupe ou classe doivent être similaires entre eux (le plus proche possible).*
- *Chaque groupe ou classe doit être distinct des autres : les objets qui appartiennent au même groupe doivent être différents des objets appartenant à d'autres groupes (le plus éloigné possible des autres groupes) ».*

Les méthodes de classification sont basées sur le système de l'optimisation itérative d'une fonction objectif permettant d'obtenir des classes homogènes et les plus distinctes possibles.

Algorithme K-moyennes

Selon (MacQueen 1967) : *« l'algorithme le plus connu des méthodes de regroupement est celui des K-moyennes (K-means). Cet algorithme réalise une partition stricte ("dure"), c'est-à-dire que chaque objet n'est assigné qu'à une seule classe. Il s'agit d'une procédure simple et itérative dont l'idée générale est de classer un ensemble $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ d'éléments dans un nombre K de groupes ("clusters") fixés à l'avance ».*

« Chaque élément est un vecteur x appartient R^D . La partition est faite de telle façon que les éléments à l'intérieur d'un groupe sont les plus semblables possible, et les plus distincts des éléments appartenant à d'autres groupes. Le groupement est réalisé en deux étapes : d'abord, il faut définir les k centres ou prototypes de chaque groupe ; ensuite, chaque élément est associé au groupe dont il est le plus proche du centre.

Ainsi, chaque groupe est caractérisé par son centre v_k et par les éléments qui lui ont été associés. Le centre du groupe est le point dans l'espace D -dimensionnel qui minimise la somme de la distance de

tous les éléments qui font partie du groupe. Ici, D correspond au nombre de caractéristiques de l'espace de représentation.

L'algorithme est utilisé pour minimiser de la fonction objectif :

Où D_{kna} définit la mesure de distance entre l'objet x_n et le prototype v_k au sens d'une métrique définie par la matrice A :

La forme des groupes est déterminée par le choix de la matrice A dans l'équation précédente. Un choix très commun est $A=I$, ce qui donne la distance euclidienne [BAB, 1998] :

Cette distance est la plus utilisée dans l'algorithme des K -moyennes et elle induit une partition en hyper-sphères de dimension D . un autre choix, pour A , est une matrice diagonale qui utilise les variations dans les directions des coordonnées de l'espace de représentation. Ceci produit la norme diagonale et génère des classes hyper-ellipsoïdales, parallèles aux axes de l'espace de représentation. Finalement, A peut être définie comme l'inverse de la matrice de covariance de l'ensemble X : $A=M^{-1}$

— — —

Dans cette équation, \bar{x} correspond à la valeur moyenne de l'ensemble des éléments X . dans ce cas, la matrice A induit la norme de 'Mahalanobis' dans l'espace D . Avec cette norme, les classes sont représentées par des hyper-ellipses dont l'orientation est arbitraire, définie par les valeurs propres de M , comme le montre la figure suivante (Figure 22) ».

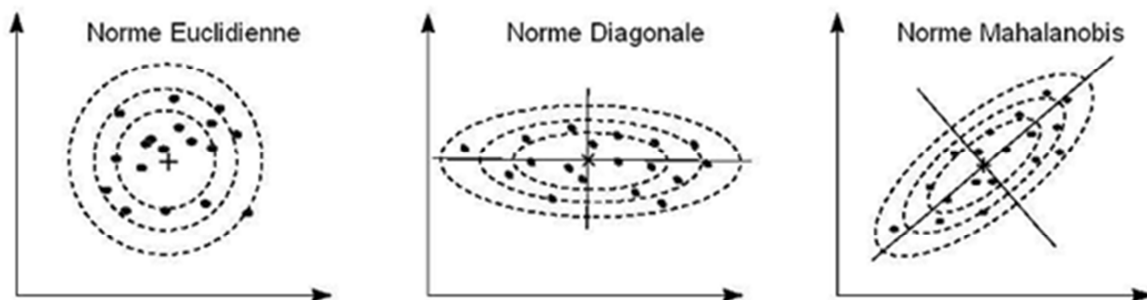


Figure 22 : Mesures de distance pour le regroupement (Babuska 1998)

L'algorithme simplifié est donné ci-dessous :

Algorithme K-Moyennes (Babuska 1998): «

Entrée : K groupes ($1 < K < N$)

1 choisir le centre initial des k groupes (aléatoirement)

2 affecter chaque élément x_n au groupe dont il est le plus proche

3 recalculer le centre v_k de chaque groupe

4 répéter 2 et 3 jusqu'à ce que : stabilisation des centres ou nombre d'itérations t (fixé) atteint.

Même s'il peut être démontré que l'algorithme converge toujours, il ne trouve pas forcément la configuration optimale, correspondant au minimum global de la fonction objective donnée par l'équation (3). Ceci correspond à un problème d'optimisation multimodal ».

5.3.2.5 Classification supervisée

Lorsque l'opérateur connaît a priori les modes réels de fonctionnement contenus dans l'ensemble d'apprentissage, nous parlons d'un apprentissage dirigé ou imposé par l'expert. En effet, l'expert étiquette les observations qui d'après lui, représentent le mieux les différentes situations. De cette façon, les paramètres de chaque classe seront une combinaison des caractéristiques des observations imposées par l'expert.

Nous allons expliquer une des méthodes les plus utilisées dans le cas de la classification supervisée.

5.3.2.6 Arbre de décision

Nous nous sommes basés sur le même travail de Kempowsky (Kempowsky 2004) afin de présenter cette partie.

Selon (Michie, Spiegelhalter et al. 1994) : « *Les arbres de décision sont des outils puissants et très répandus pour la classification et la prédiction* ». Ce qui les rend attractif est le fait qu'ils peuvent être représentés comme des règles exprimées de façon interprétable. Dans des applications où l'explication des causes ou des raisons d'une décision est cruciale, les experts ont besoin d'outils qui permettent de reconnaître et de valider les connaissances découvertes issues des données, dans le contexte du diagnostic. Il existe une variété d'algorithmes pour la construction des arbres de décision qui offrent la qualité d'interprétation souhaitée.

Selon (Kempowsky 2004) : « *Les arbres de décision sont des classificateurs avec une structure arborescente. Ils réalisent une recherche « top-down » (de haut en bas). Chaque nœud représente une décision, ou un test, à effectuer sur un attribut donné des individus. Le nœud initial s'appelle racine. Deux (ou plus) branches peuvent être issues d'un nœud selon que la décision à prendre soit de type binaire ou non. Les nœuds intermédiaires sont des nœuds de décision. Les nœuds terminaux se nomment feuilles, et c'est là que la décision est prise pour affecter un individu à une classe existante. Les conditions principales, pour l'extraction des connaissances à partir de la construction d'arbres de décision, sont les suivantes (Figure 23):*

- *Les classes auxquelles les individus sont assignés doivent être établies à l'avance,*
- *Une quantité suffisante d'exemples (individus) représentatifs des classes est nécessaire,*
- *Pour chaque nœud de décision, l'attribut approprié doit être choisi ».*

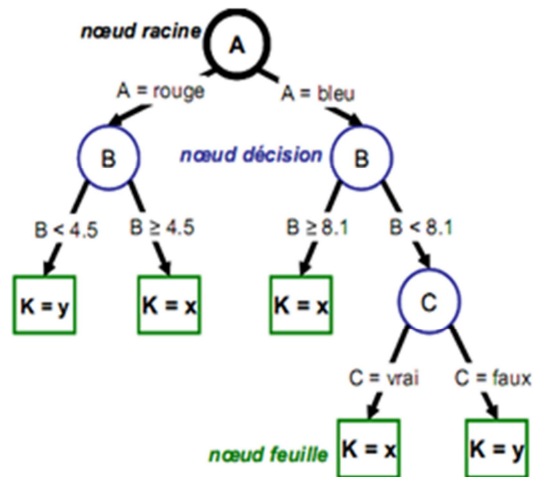


Figure 23 : Exemple d'un arbre de décision (Kempowsky 2004)

L'algorithme ID3 (et son successeur C4.5) de J.R Quinlan (Quinlan 1986) et l'algorithme CART (classification And Regression Tree) (Duda, Hart et al. 2001) sont les algorithmes les plus connus d'arbres de décision. Le critère d'évaluation dans l'algorithme ID3 est le choix d'un attribut à examiner à chaque nœud de décision. Le but est de choisir, dans tout l'espace de représentation, l'attribut qui sépare le mieux les individus de l'ensemble de l'apprentissage. Pour choisir quel attribut est le plus approprié, c'est-à-dire celui avec la distribution de classe la plus non-homogène (Mitchell 1997), l'algorithme emploie le concept d'entropie, issu de la théorie de l'information. L'entropie caractérise la pureté, ou l'homogénéité, d'une collection d'individus :

$$H = - \sum_{k=1}^K p_k \log_2 p_k$$

Où :

- n_b est le nombre d'individus dans la branche b d'un attribut A de l'espace de représentation,
- n_{bk} est le nombre d'individus dans la branche b d'un attribut pour la classe k ,
- n_N est le nombre total d'individus dans toutes les branches.

La procédure à suivre est la suivante : d'abord, il faut trouver la façon dont l'attribut distribue les individus dans les classes selon chaque branche. Ensuite, il faut calculer l'entropie moyenne de chaque attribut et choisir celui pour lequel l'entropie est moindre ; il sera le premier attribut à être testé. La procédure de sélection d'un nouvel attribut et la partition des individus est répétée pour chaque nœud, en n'utilisant que les individus associés au nœud. Ainsi, les attributs qui ont déjà été testés ne sont pas inclus, de façon à ce que chaque attribut soit testé au moins une fois dans un des chemins possibles. Ceci est fait jusqu'à ce que :

- Chaque attribut ait été déjà inclus, ou que
- Les individus liés à ce nœud feuille aient tous la même classe assignée (leur entropie est zéro).

Il n’y a aucune restriction pour la nature des données à classifier : les arbres de décision peuvent manipuler des variables continues (discrétisées) et symboliques. Un autre avantage des arbres de décision est leur capacité à générer des règles compréhensibles, tout en réalisant la classification sans exiger beaucoup de calcul. Ils fournissent une indication claire sur les attributs les plus représentatifs pour la classification ou la prévision. Un inconvénient des arbres de décision est que la plupart d’entre eux examinent seulement un champ (attribut) à la fois. D’ailleurs, ils peuvent être informatiquement coûteux dans leur construction, de par leur croissance combinatoire ».

5.3.2.7 Apprentissage supervisé-actif

Nous pouvons constater qu’entre l’apprentissage dirigé et l’auto-apprentissage il existe une troisième situation d’apprentissage pour laquelle une information partielle sur les données d’apprentissage est disponible. En fait, l’expert n’a pas besoin d’étiqueter toutes les observations de l’ensemble d’apprentissage, il peut laisser des éléments sans classe, soit parce qu’il considère que certains ne sont pas assez représentatifs, soit parce qu’il ne possède pas les connaissances pour déterminer si ces éléments correspondent à un type de comportement.

A ce moment-là, l’algorithme d’apprentissage peut effectuer une première classification pour obtenir les paramètres de classes. Ensuite, les observations qui n’ont pas été attribuées à une classe seront utilisées, soit pour faire évoluer les classes existantes, soit pour en créer de nouvelles.

Cette même procédure peut être réalisée d’une autre façon : dans un premier temps, un auto-apprentissage donnant lieu à une classification est réalisé. Dans un deuxième temps, à l’aide d’un nouveau jeu de données, un autre apprentissage est effectué, celui-ci autorisant la modification et/ou la création des classes obtenues précédemment.

5.4 Approche proposée pour la classification des produits

A la lumière de l’état de l’art présenté précédemment, il est temps de situer notre approche par rapport aux méthodes présentées.

La démarche complète d’exploitation des données peut se résumer en quatre phases, selon les travaux de Liu et Motoda (Liu and Motoda 1998) (Figure 24):

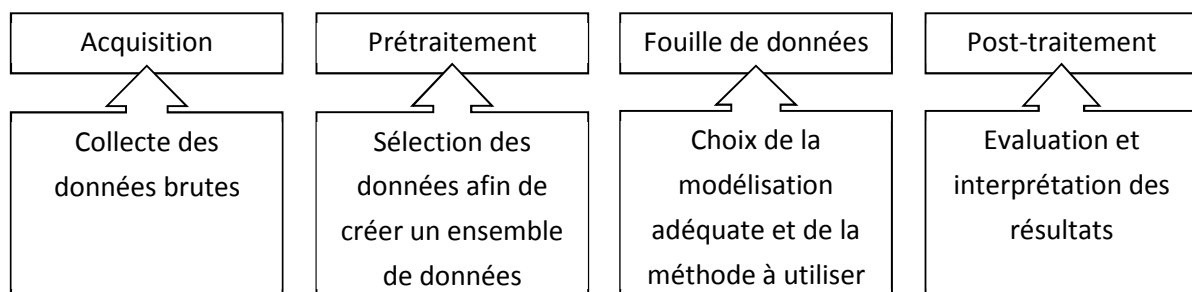


Figure 24 : Les 4 phases de l'exploitation des données

L'acquisition de données correspond à la collecte des données à partir de multiples sources d'information et dans différents formats. Dans notre cas, nous présenterons une étude de la chaîne logistique de distribution de médicaments. Nous avons récupéré les données brutes de la pharmacie d'établissement de l'hôpital Croix-Rousse de Lyon.

Le prétraitement consiste à sélectionner les données afin de créer un ensemble de données homogènes et pouvant être traitées. Nous nous intéresserons aux données liées aux méthodes de gestion des produits dans le stock et le transport. Nous définissons à partir de ces données des critères de classification pour les utiliser dans la phase suivante. Ce travail sera décrit dans le paragraphe 5.4.1.

La fouille de données consiste à sélectionner la méthode à utiliser et son application. Nous nous basons sur des outils de classification supervisée (les arbres de décision) et non supervisée (la méthode de coalescence (K-moyenne)).

Le post-traitement consiste à évaluer et à interpréter les résultats obtenus. Les résultats de la phase précédente sont sous la forme de classes de produit affectés à des politiques de réapprovisionnement. Nous traitons ces classes pour créer des familles de produits pour la mise en œuvre des politiques.

Nous rappelons que notre objectif n'est pas de proposer une nouvelle méthode de classification dans le domaine de la fouille de données, mais plutôt d'appliquer les méthodes sélectionnées et définies précédemment pour résoudre le problème de classification des produits afin de créer des classes homogènes et de proposer un outil de classification automatique du reste des produits. L'originalité de notre approche est de combiner ces outils du domaine de la fouille de données pour répondre à un problème dans le domaine de la logistique. En effet, le but de notre travail est de classer les produits présents dans le stock afin d'assurer une certaine homogénéité dans chaque classe, ceci nous permettra par la suite de (i) affecter plus aisément une politique de réapprovisionnement pour chaque classe en se basant sur les caractéristiques de chacun, (ii) classer automatiquement les nouveaux produits en se basant sur un arbre décisionnel déduit des résultats ultérieurs et (iii) définir des familles de produits pour la mise en œuvre de ces politiques.

Nous avons essayé de proposer une classification qui réponde aux hypothèses suivantes :

- Le choix du nombre de classes créées est fixé a priori
- Une forte cohésion intra classe et une nette séparation interclasse est assurée
- Elle permet de traiter aussi bien les données de descriptions classiques (numériques et catégorielles) que les données de descriptions symboliques (ensembles de valeurs)
- Elle fournit une représentation des classes de la partition obtenue
- Elle permet d'obtenir un taux élevé de produits correctement classés par l'arbre de décision

Ces hypothèses nous ont amenés à considérer de plus près les méthodes de classification à base de la fouille de donnée, qui nous ont semblé ouvrir d'intéressantes opportunités pour la problématique de classification des produits dans le domaine logistique.



5.4.1 Critères de classification des produits

Nous avons constitué une famille de critères traduisant les aspects pertinents du problème de décision. Les critères sont des expressions quantitatives de points de vue ou d'objectifs, ou d'aptitudes ou de contraintes relatives au contexte réel, qui permettent d'apprécier des alternatives (Simos 1989). L'ensemble des critères doit posséder certaines propriétés : exhaustivité, non redondance, cohérence, indépendance, ... (Roy and Bouyssou 1993). De plus, ces critères doivent posséder deux qualités importantes : être lisibles, c'est-à-dire ils doivent constituer un nombre suffisamment restreint pour qu'il soit possible de raisonner sur cette base et être opérationnels, c'est-à-dire être acceptés comme la base de travail pour la suite de l'étude (Mousseau, Roy et al. 2000).

En effet, le choix des critères de classification est basé sur ces recommandations théoriques et sur des besoins pratiques. Ces besoins sont déduits des caractéristiques logistiques des produits qui peuvent orienter les experts dans le choix de la politique d'approvisionnement.

Face aux problèmes de l'optimisation combinée des stocks et de transport, de la gestion multi-produits, d'une demande aléatoire, ... Nous devons couvrir ces aspects afin de définir des critères permettant par la suite de créer des classes de produits vérifiant des caractéristiques similaires.

En effet, nous avons défini sept critères destinés à nous orienter dans le choix de la politique de réapprovisionnement pour chaque classe créée. Principalement, ces critères utilisés dans les deux chapitres précédents, couvrent les aspects stock, transport et demande.

Les critères sont :

C1 : fréquence optimale de livraison unitaire (individuelle) : ce critère nous permet de traiter l'aspect temporel et organisationnel d'une politique de réapprovisionnement. En effet, la gestion d'un ensemble de produits suggère le regroupement de ces produits en une seule commande, d'où la nécessité d'avoir une vision sur la fréquence de livraison pour décider de la période de réapprovisionnement.

C2 : ratio 1 = écart type de la demande / moyenne de la demande : ce ratio permet d'avoir une visibilité sur la variabilité de la demande et par la suite sur les quantités qu'il faudrait commander et stocker.

C3 : délai de livraison : pour optimiser le délai de réapprovisionnement d'une classe de produits, il faut les regrouper de telle sorte que l'ensemble des produits d'une famille aient un délai de livraison similaire.

C4 : prix des produits : ce critère peut être important pour prendre plusieurs décisions en liaison directe avec la manière de gérer les produits dans le stock. Les coûts des produits interviennent dans le calcul des coûts de possession de ces produits, des coûts de rupture,

C5 : délai de péremption : c'est un critère discriminant pour regrouper les produits qui ont le même délai de péremption. Ce critère intervient pour calculer les périodes pendant lesquelles les produits peuvent être gardés dans les stocks.

C6 : ratio 2 = Coût possession / Coût de rupture : ce critère nous permet de décider si nous devons disposer de stocks de sécurité car les coûts de rupture sont nettement supérieurs aux coûts de possessions ou si nous prenons le risque de garder le minimum de quantité et acceptons de payer les coûts de rupture en cas de commande non satisfaite.

C7 : ratio 3 = Coût de passation de commande / Coût produit : ce ratio nous guide dans le choix de regroupement du maximum de produits dans une même commande afin de minimiser le coût de passation de commande rapporté à l'article, ou au contraire, de gérer ces produits séparément.



5.4.2 Création des classes de produit

Dans cette partie du processus de classification, nous nous sommes basés sur la méthode K-moyenne de classification non supervisée présentée précédemment.

Cette méthode nous donne la possibilité de définir le nombre de cluster à l'avance. Le choix du nombre de classes de produits est déterminant dans la suite du processus de classification et de spécification dans l'étape d'affectation des politiques de réapprovisionnement. Deux solutions peuvent être envisagées : soit adopter un nombre minimum de clusters et affecter à chacun une politique, soit adopter un grand nombre de clusters et affecter par la suite une politique à un ou plusieurs clusters.

Dans la suite, nous retenons la première solution qui nous évite une deuxième classification pour regrouper les clusters avant de les affecter aux politiques. Cette deuxième classification présente l'inconvénient majeur d'amplifier l'intervention des experts du domaine pour étudier tous les clusters créés.



5.4.3 Attribution des politiques de réapprovisionnement pour chaque classe de produits

Chaque classe est représentée par la moyenne calculée des valeurs normalisées des critères quantitatifs. Ceci donne les caractéristiques de chaque classe par rapport à l'ensemble des critères. A partir des caractéristiques de chaque classe de produit, le gestionnaire peut déterminer quels sont les critères les plus discriminants dans l'espace de représentation, c'est-à-dire ceux qui ont le plus d'influence dans la caractérisation des classes. Pour ce faire, il est possible de calculer l'entropie de chaque critère par rapport à chaque classe. Ainsi le critère avec la plus petite entropie sera le plus discriminant, et celui avec la plus grande entropie est celui qui apporte le moins dans la caractérisation des classes de produits.

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe « Classification non supervisée », l'auto-apprentissage permet l'interprétation des classes en termes de modes de fonctionnement ou d'états fonctionnels. En effet, certaines classes obtenues présentent parfois des caractérisations très proches et le gestionnaire peut décider d'affecter ces classes à une seule classe. Pour réaliser l'agrégation des classes dans une seule classe significative, le gestionnaire peut alors s'appuyer sur la représentation graphique des caractéristiques des classes et de la similitude des valeurs par rapport à chaque critère. L'objectif est de donner à l'expert des moyens pour mieux exploiter les résultats de la classification lors de l'interprétation et la validation des classes.

Les résultats de cette étape sont :

- Création des classes de produits homogènes par rapport à l'ensemble des critères
- Affectation des politiques de réapprovisionnement pour chaque classe

L'affectation des politiques de réapprovisionnement aux classes de produits nécessite aussi une connaissance de la typologie de ces politiques. Dans le cas où une ou plusieurs classes de produits présentent des caractéristiques qui n'entrent pas dans le cadre des politiques classiques, il va falloir identifier ces classes, les analyser et proposer la politique la plus adaptée.



5.4.4 Classification automatique des produits

Après avoir créé des classes de produits homogènes et affecté de politiques de réapprovisionnement à chacune d'entre elles, nous proposons un outil de classification pour classer le reste des produits ou les nouveaux produits d'une façon automatique.

Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les arbres de décision présentés précédemment comme outil de classification supervisée et expliqués dans la thèse de L.Pichot (Pichot 2006) qui a fait sa thèse au sein de notre laboratoire.

« Un arbre de décision est une représentation graphique d'une procédure de classification. Il est constitué de trois types d'éléments : les nœuds, les branches, et les feuilles. Chaque nœud représente un sous-ensemble de produits et est associé à un critère, chaque branche est associée à l'une des modalités de ce critère.

Les feuilles, ou nœuds terminaux, représentent les différentes classes d'appartenance des produits.

Soient (Figure 25):

Ω_i : l'ensemble des produits associés à la feuille i

F_i : la feuille étiquetée i

N_j : le nœud j

A_j : le critère associé au nœud j

m_j^k : la modalité k du critère j

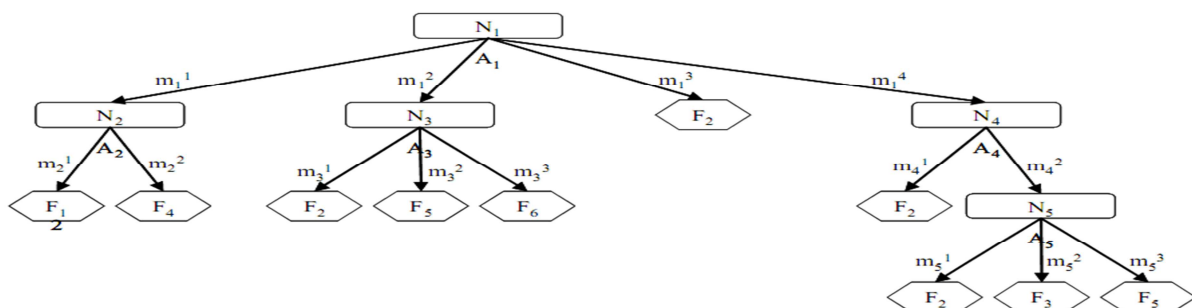


Figure 25 : exemple d'arbre de décision (Pichot 2006)

« Afin de classer un nouvel produit, l'arbre est parcouru en partant de la racine. Le critère correspondant au nœud est testé et la branche correspondant à la sortie appropriée est alors choisie.

Le processus est réitéré jusqu'à ce qu'une feuille soit rencontrée et le produit alors identifié comme appartenant à la classe désignée par la feuille.

Le principe est de diviser les produits de l'ensemble de l'échantillon d'apprentissage par des tests définis à l'aide des critères jusqu'à ce que l'on obtienne des sous-ensembles de produits ne contenant, à peu d'erreur près, que des produits appartenant tous à une même classe.

Les différentes étapes de construction d'un arbre de décision sont les mêmes pour toutes les méthodes » (Pichot 2006):

- Etat initial : l'arbre est vide, le nœud courant est la racine (comprenant l'ensemble des produits)
- Etape 1 : déterminer si le nœud courant est terminal, si c'est le cas, étiqueter le nœud courant comme une feuille. Le nœud courant est terminal s'il n'y a plus de critères disponibles, c'est-à-dire que sur le chemin menant de la racine au nœud courant tous les tests disponibles ont été utilisés tous les produits du nœud courant sont dans une même classe.
- Etape 2 : sélectionner un test à associer à un nœud et créer un sous arbre. Le choix du test est effectué à l'aide de fonctions mesurant " le degré de mélange " des différentes classes.
- Etape 3 : choisir un nœud non étudié et répéter le processus à l'étape 1 jusqu'à l'obtention d'un arbre de décision.
- Etape 4 : élaguer l'arbre de décision obtenu. L'objectif de la phase d'élagage est de diminuer la taille de l'arbre. Cette opération revient à détruire les sous arbres afin d'obtenir un arbre ayant un meilleur pouvoir de généralisation.

Les arbres de décision sont recommandés dans le cas où les variables de classification ont des pouvoirs discriminants plus ou moins importants et identifiables ».

Les résultats de cette étape se résument dans la création de l'arbre de décision qui permettra par la suite de classer le reste des produits d'une façon automatique. Cette solution présente des avantages du point de vue efficacité et du point de vue temps d'exécution.



5.5 Création des familles de produits

L'affectation des politiques d'approvisionnement aux classes de produits est une étape préliminaire qui doit être suivie au niveau opérationnel d'analyse de chaque classe en vue de grouper les produits en familles homogènes. Ce regroupement en familles de produits est nécessaire dans le cas d'un approvisionnement multi produits. En effet, les produits formant la même famille doivent répondre à quelques exigences afin de permettre leur rassemblement dans une même commande.

Les familles d'une même classe de produits vont être gérées par la même politique de réapprovisionnement.

Cette structuration en familles de produits est basée sur une classification hiérarchique par rapport à un certain nombre de critères discriminants. Ces critères identifient des groupes de produits dans chaque classe rendant leur gestion commune réalisable.

Les critères utilisés :

- Source d'approvisionnement : le regroupement des approvisionnements ne peut être fait que pour des produits provenant d'un même fournisseur.
- Fréquence de réapprovisionnement : dans le but de retenir une même période de réapprovisionnement pour un ensemble de produits, il est important de grouper les produits ayant des fréquences optimales d'approvisionnement similaires.
- Délai de livraison : ce critère peut être fondamental dans le choix d'une politique. En effet, nous distinguons principalement trois types de familles de produits. La famille regroupant des produits à délai de réapprovisionnement nul, à délai court et à délai important.



5.6 Déploiement d'un exemple

Afin d'illustrer ces principes et méthodes, nous allons développer un exemple du processus de classification et de création de familles de produits.

5.6.1 Critères de classification

Dans cet exemple nous avons étudié des données réelles récupérées de la pharmacie d'établissement de l'hôpital Croix-Rousse de Lyon. Nous avons analysé ces données et avons pu extraire un échantillon de 200 produits pharmaceutiques avec leurs caractéristiques au regard des critères de classification utilisés.

Le tableau ci-dessous (Tableau 13) présente quelques statistiques sur les valeurs numériques considérées. Ces résultats sont obtenus en se basant sur des outils de calcul d'Excel.

Tableau 13 : Base de données des produits

	Min	Max	Moyenne	Ecart type moyen
C1 : fréquence optimale de livraison unitaire	1	8	3,45	2
C2 : ratio 1 = écart type de la demande / moyenne de la demande	0.16	3	1	0.66
C3 : délai de livraison	0	8	3.06	2.338
C4 : Coût des produits	10	100	40	24.804
C5 : délai de péremption	2	12	6,78	3,13
C6 : ratio 2 = Coût possession / Coût de rupture	0,4	2.4	1,35	0.62

C7 : ratio 3 = Coût de passation / Coût produit	0.06	0,5	0.27	0.11
---	------	-----	------	------

Nous utilisons le logiciel « Weka » pour appliquer la démarche de classification proposée. Ce logiciel est très riche, programmé en JAVA, donc potentiellement exécutable sur tous les systèmes d'exploitation. Le contenu scientifique est très solide, il fait référence chez les chercheurs dans le domaine de l'apprentissage automatique. Les principaux points forts de ce logiciel sont (Lechevallier 2010):

- Un logiciel libre (en particulier gratuitement) disponible sous la licence publique générale GNU,
- Un logiciel très portable car il est entièrement implémenté en Java et donc fonctionne sur quasiment toutes les plateformes modernes, et en particulier sur quasiment tous les systèmes d'exploitations actuels.
- Un logiciel complet, il contient les « préprocesseurs » de données et des techniques de modélisation,
- Un logiciel facile à utiliser par un novice en raison de l'interface graphique qu'il contient.

La figure suivante (Figure 26) présente une vue statistique de nos produits par rapport aux critères de classification.

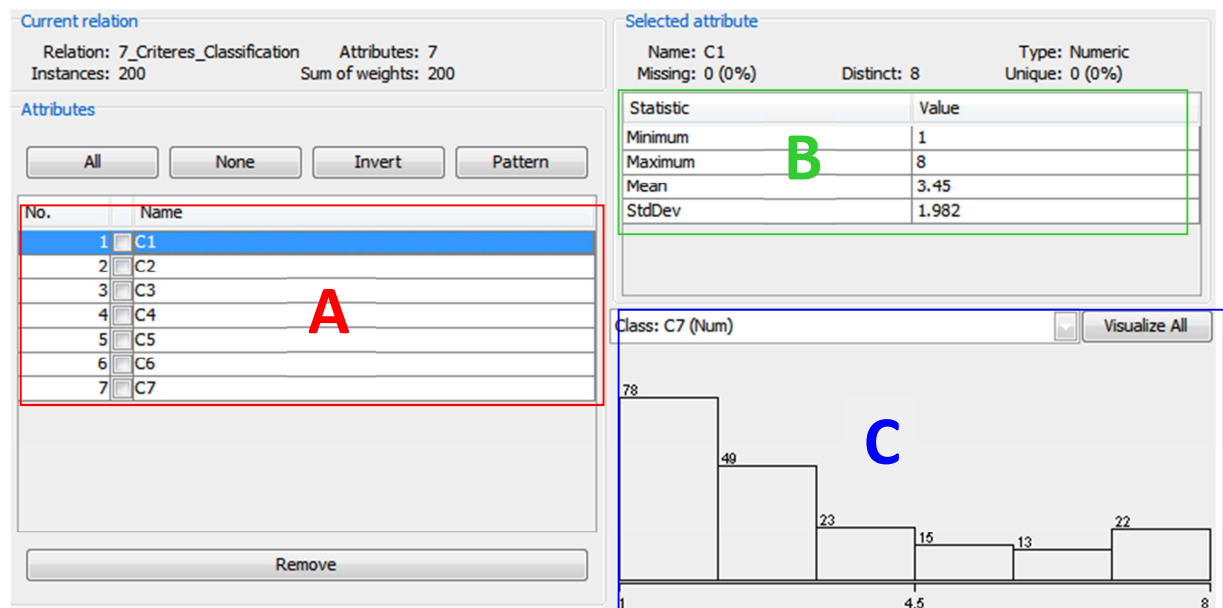


Figure 26 : Les critères de classification

Le bloc 'A' : nous retrouvons les sept critères de classification.

Le bloc 'B' : nous retrouvons des informations sur les produits par rapport au premier critère sélectionné dans le bloc 'A'.

Le bloc 'C' : nous retrouvons la distribution des coûts des produits.

La Figure 27 montre la distribution de tous les produits par rapport à l'ensemble des critères. Nous remarquons que les produits présents dans la base de données sont très hétérogènes par rapport à

ces critères de classification, ce qui justifie une étude de classification pour retrouver une certaine homogénéité dans les classes créées.

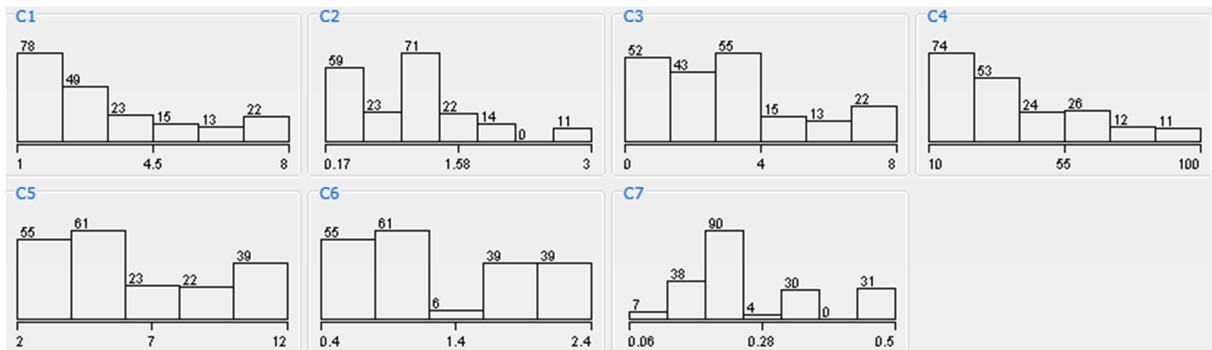


Figure 27 : Distribution des produits par rapport à tous les critères

5.6.2 Création des classes de produits dans l'exemple

La Figure 28 donne les caractéristiques des classes obtenues après un apprentissage dirigé. Il y a quatre classes, chaque classe est caractérisée par une moyenne de chacun des sept descripteurs.

Le bloc 'A' : dans cette zone, nous pouvons choisir la méthode de classification non supervisée, dans notre cas la méthode k-means. Nous pouvons aussi choisir le nombre de cluster souhaités.

Le bloc 'B' : ce bloc présente le résultat de classification, nous retrouvons les quatre clusters $\{0, 1, 2, 3\}$, ainsi que le nombre de produits dans chacun $\{35, 54, 51, 60\}$ respectivement.

Nous retrouvons aussi toutes les informations caractérisant chaque famille de produits. Ces informations sont présentées sous la forme d'une moyenne par rapport à chaque critère de classification.

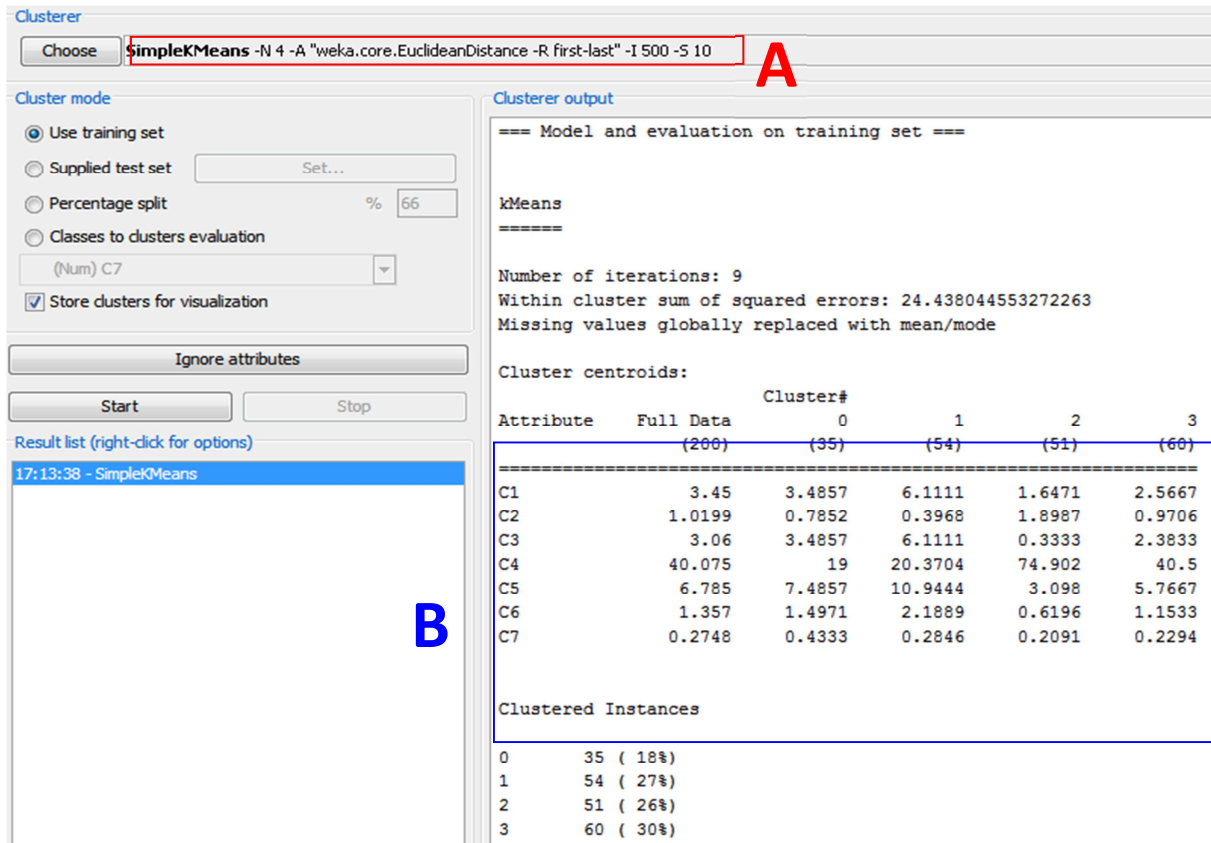


Figure 28 : création de clusters

La Figure 29 donne la distribution des produits par rapport au critère 'prix' dans les quatre clusters créés.

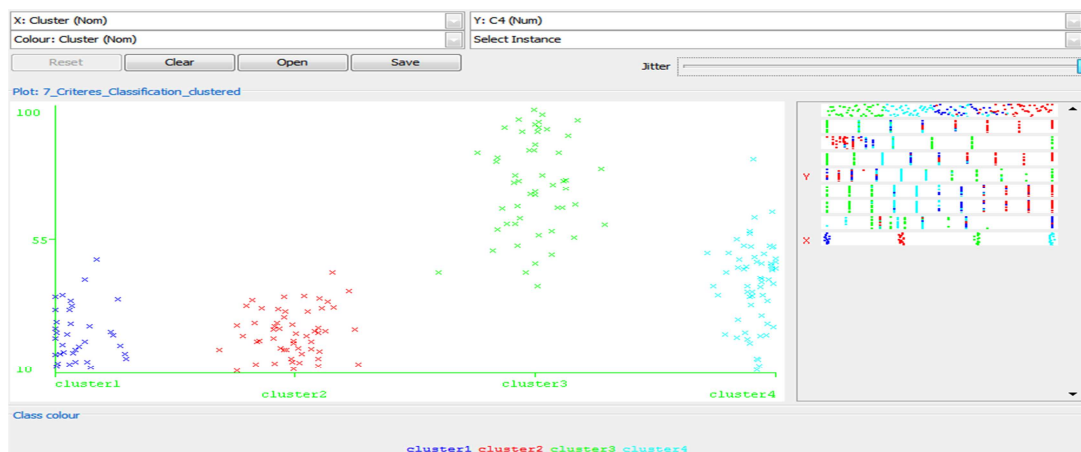


Figure 29 : Distribution des produits par rapport au critère 'prix'

5.6.3 Affectation des politiques de réapprovisionnement

L'affectation d'une politique de réapprovisionnement à une classe de produit résultant de cette classification est une tâche très délicate qui exige des connaissances du domaine logistique et de différentes méthodes de réapprovisionnement. En effet, cette classification propose des classes

homogènes par rapport à l'ensemble des critères, il va falloir trouver un équilibre pour décider du type de la politique utilisée pour chaque classe.

Si nous observons les caractéristiques de chaque classe créée, nous pouvons faire quelques suggestions en vue de définir des politiques adéquates. Nous pouvons également identifier les classes de produits étudiées dans les deux chapitres précédents.

- Classe 1 (cluster 2) : les critères les plus discriminants dans cette classe sont :
 - C1 (fréquence optimale de livraison) : cette classe présente la moyenne la plus faible par rapport à ce critère. Largement au-dessous de la moyenne de tous les produits présents, cette caractéristique nous informe que cette classe rassemble les produits qui ont une fréquence optimale de livraison faible. Le regroupement par famille des produits pour cette classe permet d'augmenter leur fréquence d'approvisionnement et donc de réduire les stocks.
 - C4 (coût des produits) : cette classe regroupe les produits les plus chers avec une moyenne très supérieure à la moyenne de l'ensemble des produits. Ceci a un impact, d'une part sur le ratio associé au sixième critère (C6), et d'autre part, sur le septième critère (C7), ce qui explique que la moyenne de ce dernier critère est la plus faible.
 - C5 (durée de vie) : cette classe regroupe les produits avec des durées de vie limitées. Cette caractéristique oblige le gestionnaire de proposer une politique de réapprovisionnement qui limite la durée de possession des produits dans le stock pour ne pas avoir des produits périmés.

Cette classe de produits correspond aux critères étudiés dans le quatrième chapitre. Nous pouvons affecter donc la politique proposée dans ce chapitre à cette classe de produits que nous noterons politique 2.

- Classe 2 (cluster 1 & 0) : cette classe regroupe les produits les plus consommés. La fréquence optimale de livraison (C1) est la plus élevée pour les quatre classes créées. Le critère C5 (durée de vie) montre que cette classe regroupe des produits qui ont des durées de vie élevées. Le ratio du sixième critère est le plus faible par rapport aux quatre classes, ce qui implique que le coût de possession est faible par rapport au coût de rupture.

Nous pouvons conclure pour cette classe que tous les critères suggèrent l'utilisation d'une politique de réapprovisionnement périodique. Ce système a été largement étudié dans la littérature et ne fait pas l'objet d'une étude approfondie dans cette thèse. Nous noterons la politique associée à chaque classe par politique 3 pour le cluster 0 et politique 4 pour le cluster 1.

- Classe 3 (cluster 3) : cette classe rassemble les produits à consommation (C1) et à variabilité (C2) moyenne. Le délai de livraison est faible mais supérieur à la classe de produits dans le cluster 2. Cette classe regroupe des produits aux prix assez élevés mais évidemment moins chers que les produits de la classe 1. Ce qui influence directement les moyennes des deux derniers critères qui sont proches des moyennes de l'ensemble des produits. Tandis que le délai de péremption est un peu au-dessous de la moyenne, supérieur à la moyenne du cluster numéro 2, et inférieur aux moyennes dans les deux autres clusters.

Cette classe de produits correspond aux critères étudiés dans le troisième chapitre. Nous pouvons affecter donc la politique proposée dans ce chapitre à cette classe de produits que nous noterons politique 1.

5.6.4 Création de l'arbre de décision

Dans la Figure 30, nous représentons l'arbre de décision, cet arbre est constitué par 10 niveaux et 19 feuilles. Plusieurs chemins peuvent aboutir à une seule politique, ce qui explique le nombre de feuilles finales.

```

Classifier output
J48 pruned tree
-----
C3 <= 1: politique2 (52.0/1.0)
C3 > 1
|  C5 <= 8
|  |  C7 <= 0.375
|  |  |  C2 <= 0.6
|  |  |  |  C1 <= 4: politique3 (2.0)
|  |  |  |  C1 > 4: politique4 (3.0/1.0)
|  |  |  |  C2 > 0.6
|  |  |  |  C5 <= 6: politique1 (53.0)
|  |  |  |  C5 > 6
|  |  |  |  |  C7 <= 0.25: politique1 (6.0/1.0)
|  |  |  |  |  C7 > 0.25: politique3 (4.0)
|  |  |  |  C7 > 0.375: politique3 (19.0)
|  |  C5 > 8
|  |  |  C2 <= 0.6: politique4 (53.0/3.0)
|  |  |  C2 > 0.6
|  |  |  |  C5 <= 11: politique3 (6.0)
|  |  |  |  C5 > 11: politique4 (2.0)

Number of Leaves :      10
Size of the tree :      19
    
```

Figure 30 : Arbre de décision

Nous montrons dans la figure suivante (Figure 31) quelques résultats statistiques de la création de l'arbre de décision. Nous remarquons principalement que le pourcentage des éléments classés correctement est égal à 97%, ce qui représente un taux satisfaisant dans le domaine logistique et particulièrement pour l'affectation des nouveaux produits à leurs politiques convenables en se basant sur cette arbre de décision.

```

Classifier output
=== Summary ===
Correctly Classified Instances      194          97    %
Incorrectly Classified Instances    6            3    %
Kappa statistic                    0.9594
Mean absolute error                 0.0267
Root mean squared error            0.1156
Relative absolute error             7.2122 %
Root relative squared error        26.8585 %
Coverage of cases (0.95 level)     99          %
Mean rel. region size (0.95 level) 32.75      %
Total Number of Instances          200

=== Detailed Accuracy By Class ===

          TP Rate  FP Rate  Precision  Recall  F-Measure  ROC Area  Class
          0.886   0        1          0.886  0.939     0.988    politique3
          1       0.027   0.931     1       0.964     0.99     politique4
          1       0.007   0.981     1       0.99      0.997    politique2
          0.967   0.007   0.983     0.967  0.975     0.987    politique1
Weighted Avg.  0.97    0.011    0.971    0.97    0.97      0.99

=== Confusion Matrix ===

 a  b  c  d  <-- classified as
31  3  0  1 | a = politique3
 0 54  0  0 | b = politique4
 0  0 51  0 | c = politique2
 0  1  1 58 | d = politique1
    
```

Figure 31 : Paramètres statistiques sur l'efficacité de l'arbre de l'arbre de décision

5.6.5 Création des familles de produits dans l'exemple

En analysant chaque classe de produits, nous pouvons constater que nous avons regroupé les produits en familles homogènes afin de définir pour chacune une politique de réapprovisionnement. Nous précisons que la création de familles de produits n'est obligatoire que pour les produits gérés de manière collective ce qui correspond aux cas traités aux chapitres 3 et 4. Lorsque les produits sont gérés individuellement, le rattachement d'un produit à une classe est suffisant.

Une sous classification en familles de produits est envisageable dans chaque classe pour mettre en place les politiques de réapprovisionnement.

- Source d'approvisionnement : Pour les produits des classes 1 et 3, le regroupement en famille impose que les produits soient commandés chez le même fournisseur. On peut dès lors associer une (ou plusieurs) famille de produits à chaque fournisseur.
- Fréquence de consommation : nous pouvons considérer aussi que les produits de la même famille ont la même moyenne de consommation afin de calculer plus facilement une période de réapprovisionnement.
- Délai de livraison : dans le cas de la politique proposée dans le chapitre 4, nous regroupons tous les produits de cette famille qui peuvent être réapprovisionnés avec un délai de livraison nul. Dans le cas de la première politique proposée (chapitre 3), il suffit de regrouper les produits ayant des délais courts et égaux.

5.7 Conclusion

Le but de ce chapitre est de présenter une démarche permettant l'attribution de politiques d'approvisionnement aux produits et leur éventuelle classification en famille. Le problème que nous avons rencontré vient du fait que le nombre de produits est assez important (contexte multi-produits). Mettre en place des politiques de réapprovisionnement dans un tel contexte est difficile. En fait, soit on choisit une politique assez générique pour l'ensemble des produits, soit des politiques très spécifiques pour chaque produit. Dans les deux cas, la gestion des produits va être très difficile avec un grand risque d'erreur et un manque de fiabilité dans les décisions.

En se basant sur ce constat, notre proposition est de considérer l'ensemble des produits, analyser cet ensemble et le structurer en plusieurs sous ensemble auxquels sont attribués des politiques adéquates. Ce choix est à l'origine du travail effectué dans ce chapitre pour une classification multi critères de produits en familles homogènes.

Dans cette optique, la première partie de ce chapitre a été consacrée à une synthèse bibliographique des différentes méthodes classiques de classification dans le domaine logistique. Puis, un état de l'art sur les outils de classification inspirés du domaine de la fouille de données a été présenté.

Nous nous sommes basés dans un premier temps sur la classification supervisée et plus particulièrement sur la méthode de coalescence k-moyenne pour créer des familles de produits homogènes. Les clusters créés dans cette étape sont analysés par des experts du domaine logistique pour affecter une politique de réapprovisionnement à chaque famille. Dans un deuxième temps, nous avons proposé un outil de classification supervisée (arbre de décision) afin d'affecter aux nouveaux produits la politique d'approvisionnement la plus adaptée.

Nous avons présenté en fin de chapitre un exemple complet basé sur des données réelles pharmaceutiques pour montrer la faisabilité et l'efficacité de la méthode de classification proposée.

Dans la suite de ce rapport, nous nous basons sur cette étude de validation et d'expérimentation afin de mettre en œuvre de la démarche étudiée dans cette thèse sur le cas de la pharmacie d'établissement Croix-Rousse de Lyon.

Chapitre 6: Analyse des deux politiques proposées : performance et sensibilité

SOMMAIRE

- Chapitre 6 : Analyse des deux politiques proposées : performance et sensibilité 121**
- 6.1 Introduction..... 122
- 6.2 Analyse de la politique proposée dans le troisième chapitre 122
- 6.3 Analyse de la politique proposée dans le quatrième chapitre..... 130
- 6.4 Conclusion 138

6.1 Introduction

Nous évaluons dans ce chapitre les performances de nos politiques de réapprovisionnement proposées dans le troisième et quatrième chapitre.

Les expérimentations sont conduites afin de déterminer les contextes d'application ainsi que les performances de chaque politique par rapport à certains paramètres décisionnels dans le domaine de la gestion des approvisionnements.

Les paramètres retenus sont les suivants : « prix de produits », « caractéristique de la demande » et « différence entre le coût de passation de commande urgente et normale ».

6.2 Analyse de la politique proposée dans le troisième chapitre

Nous réalisons cette étude expérimentale afin de montrer l'apport d'une politique proposée par rapport à une politique de référence, et ce, en faisant varier plusieurs paramètres d'entrée utilisés dans nos simulations.

Nous nous sommes basés sur les mêmes équations de calculs de coûts logistiques et sur les mêmes simulateurs que ceux utilisés dans le troisième chapitre (la même politique de référence (R, S) mono-produit). Nous faisons varier dans chaque simulation un seul paramètre et gardons le reste des paramètres dans leurs intervalles indiqués dans les hypothèses de définition de la politique.

6.2.1 Sélection de la classe de produits

Nous rappelons que la classification des produits en classes homogènes, réalisée dans le cinquième chapitre est faite à partir des données réelles extraites de la base de données de la pharmacie de l'hôpital Croix Rouse.

Comme indiqué, la classe de produits étudiée dans le troisième chapitre n'est pas homogène (grande variété des coûts et de la demande selon les produits) et regroupe de fait tous les produits livrés par un même fournisseur. Tous ces produits partagent néanmoins les caractéristiques suivantes :

- Une demande aléatoire et répétitive : cette caractéristique est représentée par le deuxième critère de classification.
- Un délai de livraison constant : cette caractéristique est représentée par le troisième critère. Le délai est un peu supérieur à deux unités de temps.
- Une durée de vie moyenne des produits : cette caractéristique est représentée par le cinquième critère. Ce délai n'est ni le plus court ni le plus élevé. Il correspond à un délai limité qui exige des conditions particulières dans la définition de la politique de réapprovisionnement.

Dans le tableau ci-dessous (Tableau 14), nous résumons les valeurs numériques caractérisant la classe (classe 3) des produits obtenue après classification.

Tableau 14 : valeurs des caractéristiques de la classe de produits

	Valeurs
C1 : fréquence optimale de livraison unitaire	2,566
C2 : ratio 1 = écart type de la demande / moyenne de la demande	0,97
C3 : délai de livraison	2.38
C4 : coût des produits	40,5
C5 : délai de péremption	5,76
C6 : ratio 2 = Coût possession / Coût de rupture	1,15
C7 : ratio 3 = Coût de passation / Coût produit	0.22

6.2.2 Caractérisation de la famille de produits retenu

Nous avons effectué ces simulations sur une famille de produits pour laquelle :

- La fréquence de réapprovisionnement est égale à 3 unités de temps.
- Le délai de livraison est égal à 2 jours (2 unité de temps).

6.2.3 Analyse par rapport au paramètre prix de produit

Nous réalisons une étude de sensibilité par rapport au paramètre « prix des produits » afin de montrer les gains réalisés par la politique proposée pour plusieurs intervalles distincts de prix.

Nous réalisons des simulations en faisant varier ce paramètre afin de calculer le coût logistique total de la politique de référence ainsi que la politique proposée. Nous déduisons entre autre les pourcentages de gains réalisés dans chaque intervalle de prix.

Nous réalisons des simulations selon 5 cas différents montrés dans la figure suivante (Figure 32):

- Les prix des produits varient dans l'intervalle [10 €.. 30€]
- Les prix des produits varient dans l'intervalle [30 €.. 50€]
- Les prix des produits varient dans l'intervalle [100€.. 120€]
- Les prix des produits varient dans l'intervalle [200€.. 220€]
- Les prix des produits varient dans l'intervalle [300€.. 320€]

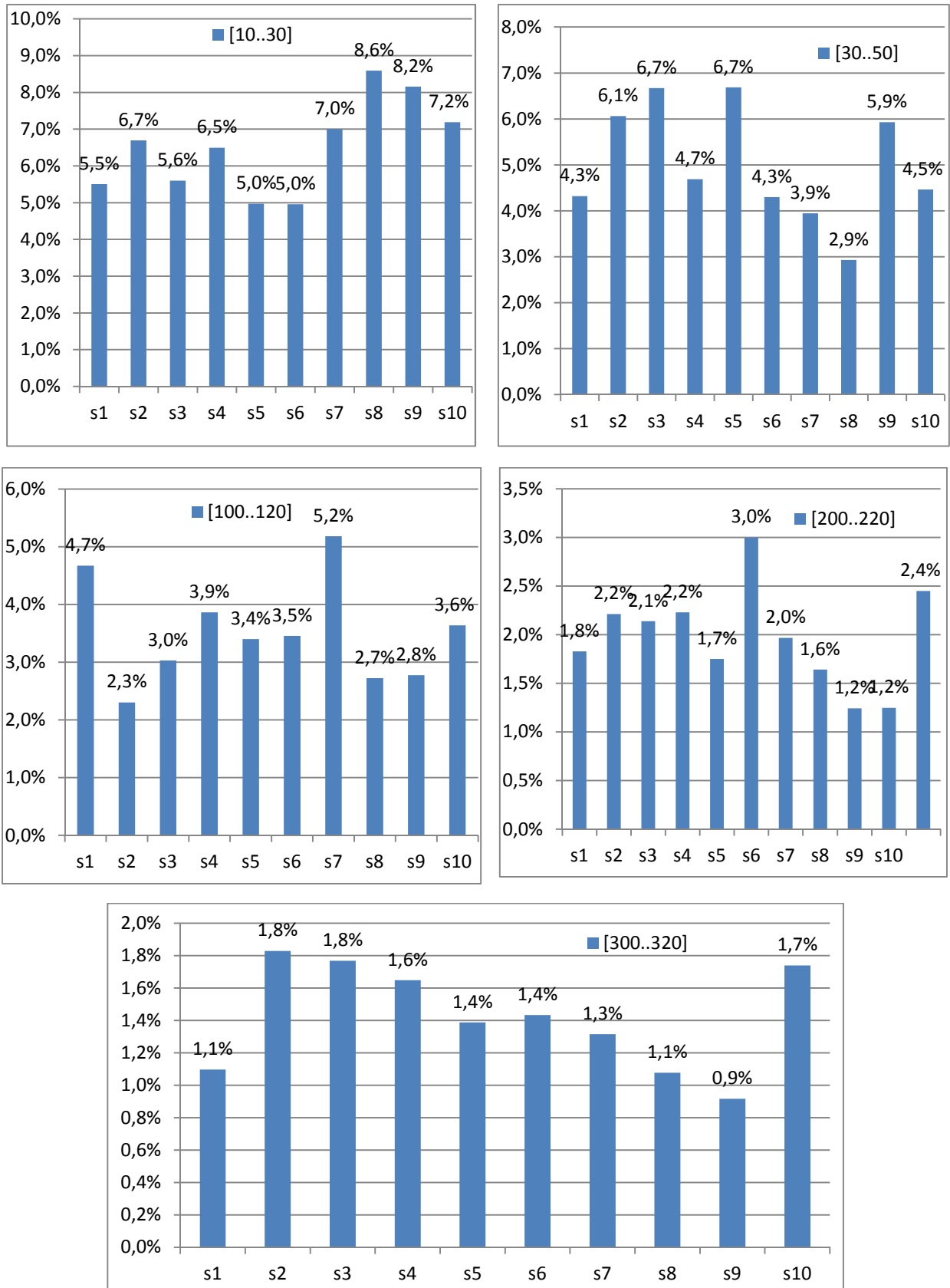


Figure 32: comparaison des gains pour chaque intervalle de prix de produits

Les gains diminuent proportionnellement à l'augmentation des prix des produits. Dans le premier et le deuxième cas où les prix sont faibles, les gains sont considérables (moyenne des gains de 6,5% dans le premier cas), tandis que dans les deux derniers où les prix sont très élevés, les gains sont faibles avec une moyenne de 1,3% pour le dernier cas.

Cette diminution en pourcentage des gains résulte du fait que la mutualisation est d'autant plus intéressante que les coûts des produits sont faibles, les coûts de passation de commande et de transport étant alors proportionnellement plus élevés. De plus dans ce cas les commandes anticipées de produits peuvent provoquer des coûts supplémentaires qui dépassent les coûts de passation de commande en cas de rupture.

6.2.4 Analyse par rapport aux paramètres de la demande

Nous effectuons une deuxième analyse de sensibilité par rapport aux paramètres de la demande, à savoir la moyenne et l'écart type. Nous allons étudier les variations des coûts logistiques par rapport à la variation de l'écart type de la demande. Nous avons réalisé ces simulations en nous basant sur les mêmes valeurs numériques utilisées dans le troisième chapitre, et en définissant quatre cas différents :

Cas I.1 : les simulations sont réalisées avec 470 générations de demande avec une périodicité $T=6$. Ce qui donne un horizon de simulation de 78 périodes. Dans ce cas, la moyenne est égale à l'écart type et varient dans l'intervalle [1..50].

Nous représentons dans la figure (Figure 33) la variation des coûts logistiques de la politique proposée ainsi que la politique de référence. Pour chaque simulation, nous calculons aussi le gain réalisé.

Cas I.1 : 10 produits avec une moyenne égale à l'écart type variant entre 5 et 50

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10		p. proposée	référence	% de gain I.1
I.1	50	5	30	50		45	45	40	35	40	15	124 978 €	132 255 €	5,5%
I.1	30	10	40	20		40	45	40	5	25	20	99 610 €	104 668 €	4,8%
I.1	20	40	40	25		15	45	35	35	25	25	106 020 €	112 415 €	5,7%
I.1	50	35	20	5		45	5	50	15	25	15	92 649 €	96 882 €	4,4%
I.1	10	20	25	30		45	40	25	35	50	50	127 699 €	134 060 €	4,7%
I.1	35	40	40	10		15	10	15	10	25	20	76 259 €	81 300 €	6,2%
I.1	50	10	25	20		35	25	35	25	35	15	99 598 €	105 081 €	5,2%
I.1	50	30	25	35		25	25	45	10	15	40	100 688 €	106 191 €	5,2%
I.1	35	30	5	20		50	10	10	5	30	5	75 895 €	80 905 €	6,2%
I.1	30	35	35	30		10	30	15	25	50	15	102 054 €	109 057 €	6,4%
I.1	50	35	20	40		20	10	35	50	10	10	95 059 €	100 207 €	5,1%
I.1	30	40	35	5		45	5	5	20	50	25	94 248 €	98 109 €	3,9%
I.1	20	30	45	10		25	5	25	40	30	10	90 844 €	95 252 €	4,6%
I.1	15	10	10	25		25	30	30	5	40	35	96 304 €	102 772 €	6,3%
I.1	50	30	5	30		30	40	40	40	5	10	97 990 €	104 083 €	5,9%

Figure 33 : 1^{er} cas : variation des coûts logistiques

Cas I.2 : les simulations sont réalisées avec 470 générations de demande avec une périodicité T=4. Ce qui donne un horizon de simulation de 117 périodes. Dans ce cas, la moyenne est égale à l'écart type et varient dans l'intervalle [10..120].

Nous représentons dans la figure (Figure 34) la variation des coûts logistiques de la politique proposée ainsi que la politique de référence. Pour chaque simulation, nous calculons aussi le gain réalisé.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10		p. proposée	référence	% de gain I.2
80	40	10	40		10	40	90	10	30	80	130 723 €	139 834 €	6,5%
20	30	10	30		30	60	60	70	60	70	147 545 €	158 017 €	6,6%
10	40	20	40		50	50	90	50	100	30	158 810 €	168 760 €	5,9%
90	90	90	20		60	30	40	50	60	90	164 361 €	173 115 €	5,1%
100	10	90	40		80	100	40	80	90	10	170 231 €	180 128 €	5,5%
80	10	30	70		10	70	20	80	100	80	177 430 €	189 092 €	6,2%
70	50	20	50		90	80	60	20	10	90	150 893 €	163 326 €	7,6%
90	20	30	30		20	40	20	80	60	40	130 158 €	138 430 €	6,0%
70	60	40	20		30	10	90	20	10	70	120 612 €	129 133 €	6,6%
70	40	100	70		100	40	40	20	40	30	157 578 €	166 192 €	5,2%
100	60	80	90		100	50	20	30	70	30	154 988 €	164 251 €	5,6%
70	50	20	40		30	80	70	60	80	20	160 018 €	169 770 €	5,7%
70	60	50	100		100	30	100	10	90	60	180 514 €	192 305 €	6,1%
70	10	10	30		30	80	100	20	60	30	144 195 €	152 050 €	5,2%
80	50	80	80		80	50	100	70	80	50	180 972 €	193 393 €	6,4%

Figure 34 : 2^{ème} cas : variation des coûts logistiques

Cas II.1 : les simulations sont réalisées avec 470 générations de demande avec une périodicité T=9. Ce qui donne un horizon de simulation de 52 périodes. Dans ce cas, la moyenne est égale à l'écart type et varient dans l'intervalle [1..30].

Nous représentons dans la figure (Figure 35) la variation des coûts logistiques de la politique proposée ainsi que la politique de référence. Pour chaque simulation, nous calculons aussi le gain réalisé.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20		proposée	référence	% de gain
6	27	27	9	15	30	9	27	9	27	18	3	3	12	24	24	30	3	21	9	110 337 €	112 887 €	2,3%	
9	27	12	6	9	24	6	21	15	9	15	24	30	24	27	3	6	21	30	27	119 055 €	120 824 €	1,5%	
24	3	21	21	18	21	15	18	12	15	27	30	6	27	27	15	24	24	24	24	128 183 €	131 373 €	2,4%	
6	15	30	21	21	15	21	6	3	30	21	30	27	3	30	24	18	15	27	27	133 054 €	136 597 €	2,6%	
9	30	15	18	9	15	3	12	27	12	21	3	6	27	3	30	6	27	24	27	109 882 €	113 096 €	2,8%	
3	9	15	6	21	30	3	3	30	21	9	30	15	24	18	21	18	30	27	24	129 341 €	132 896 €	2,7%	
12	15	24	9	9	3	30	24	30	30	12	15	30	24	27	9	27	24	15	30	129 917 €	133 451 €	2,6%	
24	12	30	21	18	15	15	30	21	12	12	6	12	15	18	15	6	9	21	18	107 673 €	109 028 €	1,2%	
12	27	6	12	27	21	6	18	9	12	18	18	6	27	24	24	3	3	3	30	103 333 €	105 807 €	2,3%	
12	30	27	6	30	24	24	30	21	24	15	27	12	15	12	30	3	12	21	24	121 972 €	126 628 €	3,7%	
18	21	21	15	12	15	9	3	6	15	12	24	18	27	3	27	15	18	3	27	108 529 €	109 777 €	1,1%	
18	6	15	18	30	6	9	15	18	21	9	18	18	9	6	21	21	21	21	30	115 134 €	117 652 €	2,1%	
3	27	6	6	12	9	6	30	27	21	24	12	21	30	15	6	3	9	18	30	113 269 €	118 206 €	4,2%	
24	30	9	6	3	9	24	27	3	27	9	15	6	27	9	30	15	12	15	18	107 177 €	108 963 €	1,6%	
27	18	27	15	6	9	18	24	24	27	24	18	6	3	3	21	6	30	12	24	109 978 €	112 185 €	2,0%	

Figure 35 : 3^{ème} cas : variation des coûts logistiques

Cas II.2 : les simulations sont réalisées avec 470 générations de demande avec une périodicité T=9. Ce qui donne un horizon de simulation de 52 périodes. Dans ce cas, la moyenne est égale à l'écart type et varie dans l'intervalle [1..60].

Nous représentons dans la figure (Figure 36) la variation des coûts logistiques de la politique proposée ainsi que la politique de référence. Pour chaque simulation, nous calculons aussi le gain réalisé.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	proposée	référence	% de gain
30	54	30	48	18	24	30	24	54	30	24	54	36	18	6	36	12	54	42	42	179 491 €	186 528 €	3,8%
60	30	6	6	12	12	6	30	6	6	48	60	60	60	6	18	60	60	60	36	199 626 €	204 332 €	2,3%
42	18	6	42	60	60	54	48	6	60	12	6	12	48	60	30	60	42	60	24	202 162 €	208 040 €	2,8%
54	60	6	6	48	6	6	54	12	54	54	36	54	24	42	36	54	60	12	54	203 516 €	209 605 €	2,9%
18	36	36	42	54	30	18	48	30	24	30	54	18	24	54	30	6	24	42	36	179 059 €	187 578 €	4,5%
48	36	24	24	36	60	18	54	48	6	54	24	12	42	18	6	24	48	36	12	169 412 €	172 537 €	1,8%
36	12	36	12	18	36	30	42	42	12	48	24	42	30	42	12	24	48	12	54	176 357 €	182 129 €	3,2%
12	24	30	48	54	54	18	36	12	60	60	36	24	48	48	24	42	24	30	6	181 228 €	183 963 €	1,5%
18	48	42	42	48	60	24	48	6	54	12	12	42	36	6	60	48	18	54	18	187 540 €	191 116 €	1,9%
48	18	12	18	36	60	42	60	30	24	54	36	60	42	36	6	54	6	30	6	182 679 €	185 975 €	1,8%
60	48	6	24	54	48	42	12	30	24	60	30	6	48	60	24	54	42	12	42	192 468 €	198 625 €	3,1%
30	54	24	48	18	60	30	30	18	6	6	48	6	36	36	18	54	24	60	54	180 745 €	191 452 €	5,6%
48	54	60	48	42	30	6	60	24	6	60	60	42	24	60	12	6	6	12	12	163 556 €	167 186 €	2,2%
24	60	12	24	42	54	18	18	12	30	54	54	36	30	24	42	42	12	18	36	174 108 €	178 234 €	2,3%
30	42	54	36	30	48	12	12	30	48	12	18	6	6	6	18	18	6	6	42	129 570 €	132 264 €	2,0%
18	48	30	48	18	48	24	18	12	48	54	12	30	30	36	6	12	60	6	18	161 284 €	166 437 €	3,1%

Figure 36 : 2^{ème} cas : variation des coûts logistiques

La comparaison des gains réalisés dans chaque contexte et fournie figure suivante (Figure 35). Le gain maximal est obtenu dans le deuxième cas I.2 (10 produits avec une grande variation dans la demande). Ensuite vient le cas I.1 (10 produits avec une variation plus faible) puis le cas II.2 (20 produits avec une grande variation de la demande). Le contexte le moins favorable est le cas II.1 (20 produits avec une variation plus faible).

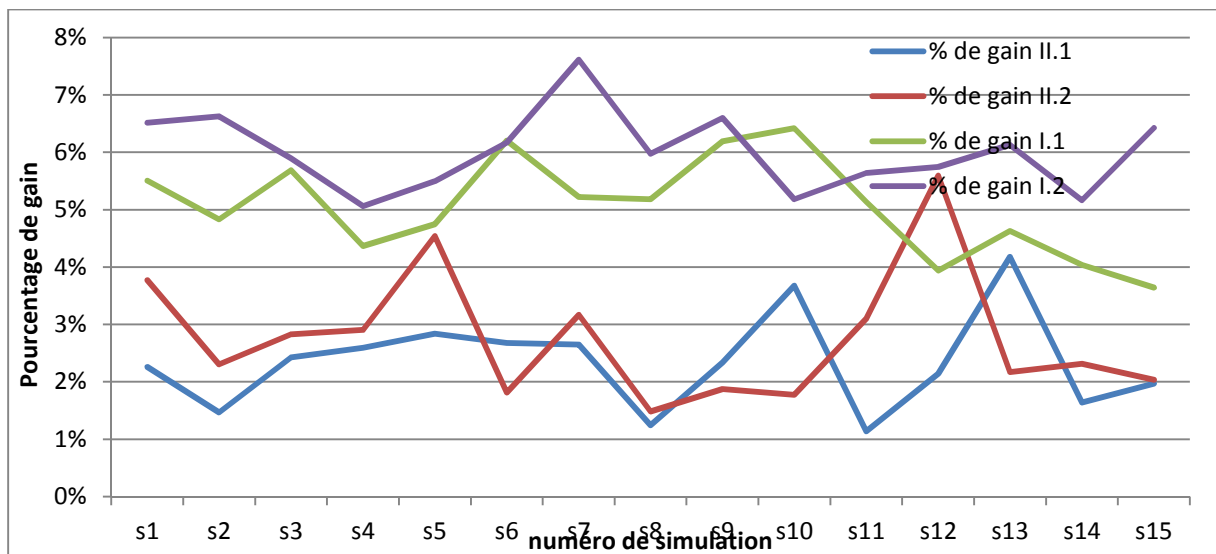


Figure 37 : comparaison des gains dans les quatre cas

En résumé, la politique proposée est plus performante lorsque la variation de la demande est grande et que la famille de produits est composée par un petit nombre de produits. Dans ce contexte, la variation de demande provoque un nombre de rupture plus important et qui génère un coût de passation de commande supplémentaire. Ce dernier coût couvre le coût de possession de commande supplémentaire dans le cas d'une commande anticipée pour minimiser le risque d'avoir rupture de stock. Dans un premier temps, au cours de la période quand un produit dépasse le niveau s' , la commande passée tient en compte ce produit et tous les produits qui présentent un risque significatif d'avoir une rupture avant la fin de la période. Dans un deuxième temps, quand nous anticipons à commander les produits de l'ensemble P_{sur} et qui nous apporte un gain en cas de commande par anticipation.

Nous allons étudier dans le paragraphe suivant, le cas d'une demande variable en changeant la valeur de l'écart type. Nous avons réalisé des simulations avec une moyenne m variant dans l'intervalle [5..50] et un écart type $\sigma = 2 m$. La figure suivante (Figure 38) montre les pourcentages de gain sur les 32 simulations réalisées.

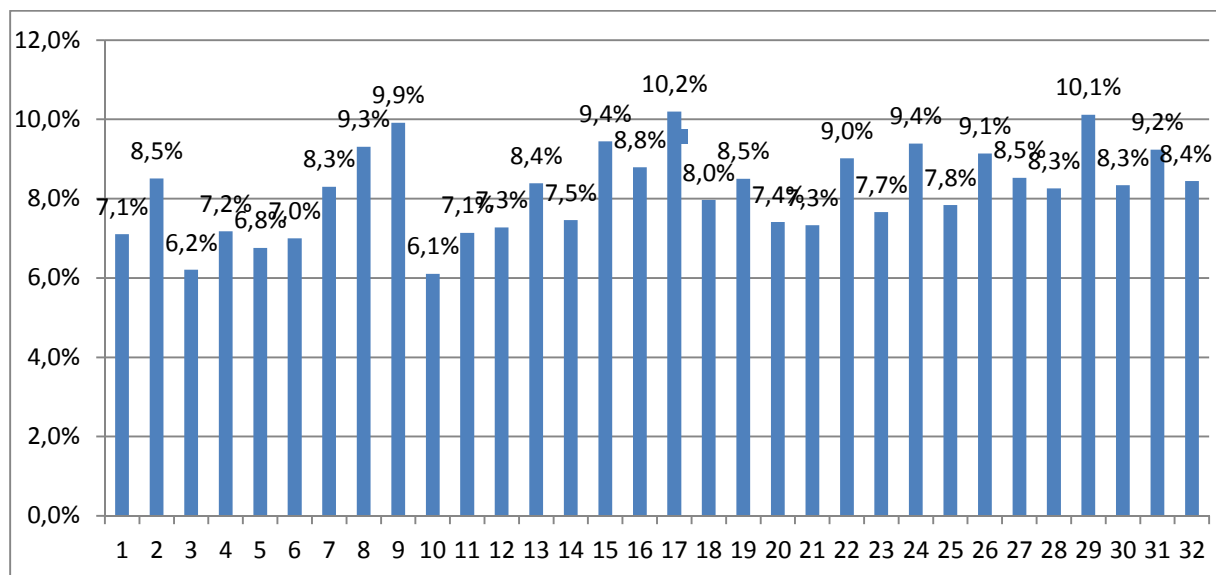


Figure 38 : pourcentage de gain dans le cas $\sigma = 2 m$

Avec 8,2% de moyenne sur l'ensemble des simulations, les gains réalisés dans ce contexte sont plus importants que lors des études précédentes. Ce qui signifie que la politique proposée est plus performante quand la variation de demande est plus grande et quand l'écart type est très élevé.

6.2.5 Analyse par rapport au ratio : coût de commande urgente / coût commande normale

Dans ce paragraphe, nous analysons le comportement de la politique proposée par rapport au ratio r avec :

$$r = \frac{\text{coût commande urgente}}{\text{coût commande normale}}$$

La différence entre le coût d'une commande urgente et une commande normale est très significative dans le calcul du coût logistique total dans les deux politiques. L'impact de ce ratio est important puisque dans la politique proposée ainsi que dans la politique de référence, on utilise les deux types de commandes.

Le but est de trouver l'équilibre entre la minimisation des ruptures de stock qui se transforment en commandes urgentes, et l'accroissement des quantités stockées.

La Figure 39 montre une comparaison des coûts logistiques calculés pour les deux politiques en faisant varier le ratio r . Le ratio r prend les valeurs de 1, 2 et 3.

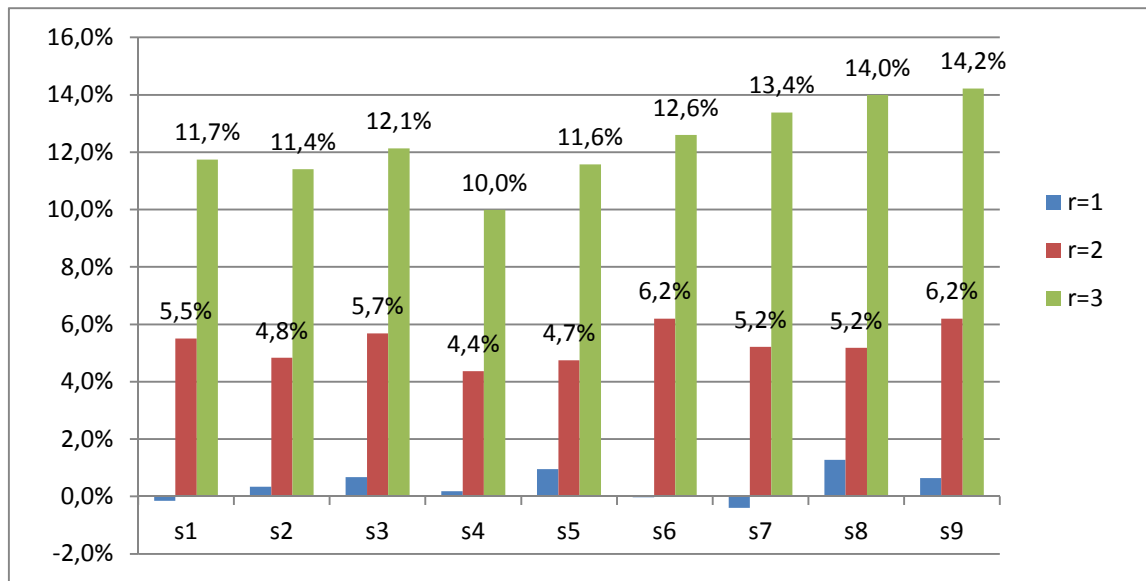


Figure 39 : comparaison des coûts logistiques en variant le ratio r

Dans le cas où le coût de commande urgente est de deux ou trois fois supérieur au coût d'une commande normale, la politique de référence présente un coût très élevé par rapport à la politique proposée.

Cependant, ce gain est faible ou même inexistant quand le ratio $r = 1$, c'est-à-dire la politique proposée ne présente pas de gain quand le coût de commande urgent est égale à la commande normale. Ce qui nous paraît très logique vu que l'avantage de la politique proposée est de diminuer le nombre de commande urgente en faveur des coûts supplémentaires de possession de stock.

6.2.6 Synthèse

L'objectif de cette étude expérimentale est de déterminer un contexte précis d'application de la politique proposée, et d'analyser son comportement en cas de changement de plusieurs paramètres d'entrée du système.

Dans les trois analyses réalisées, nous avons noté des gains importants pouvant être expliqués par plusieurs facteurs :

- La gestion multi produits permet, dans la plupart des cas, d'avantager le réapprovisionnement à moindre coût avec un taux de service déterminé. En effet, l'homogénéité des produits sélectionnés, grâce à la création des classes et, par la suite des familles de produits sur une base de caractéristiques bien étudiées, s'avère déterminant.
- La gestion simultanée du stock et du transport permet d'avoir plusieurs gains relatifs à l'optimisation intégrée des coûts logistiques. En effet, l'équilibre que nous avons toujours essayé de retrouver entre la minimisation, à la fois des quantités stockées et des coûts de transport, nous a conduit à prendre des décisions en tenant en compte de l'ensemble des contraintes du problème posé.
- La cohérence des hypothèses définies permet aussi de déterminer un contexte d'application précis de la politique de réapprovisionnement.

6.3 Analyse de la politique proposée dans le quatrième chapitre

Nous réalisons les mêmes expériences sur la politique proposée dans le quatrième chapitre afin de montrer l'apport en termes de gains de coûts logistiques, en la comparant à la politique de référence ((s, S) mono-produit).

Dans cette section, conformément à la précédente, nous nous sommes basés sur les mêmes équations de calculs de coûts logistiques et les mêmes simulateurs utilisés dans le quatrième chapitre, en faisant varier à chaque fois un des paramètres utilisés, et ce, afin d'étudier l'efficacité de la politique proposée dans des contextes différents.

Nous rappelons que la politique proposée se base principalement sur la passation de commande urgente à chaque rupture de stock. Le réapprovisionnement est réalisé pour l'ensemble des produits appartenant à la même famille de produits.

6.3.1 Sélection de la classe de produits

Nous rappelons les caractéristiques de la classe de produits étudiée par la politique proposée dans ce chapitre. Ces caractéristiques sont identifiées par la classification réalisée dans le cinquième chapitre :

- Une demande très aléatoire et ponctuelle : cette caractéristique est représentée par le deuxième critère de classification. Nous sommes dans le cas où l'écart type de la demande est presque le double de la moyenne $C2=1,86$. Ceci prouve la grande variabilité de cette demande.
- Un délai de livraison nul : cette caractéristique est représentée par le troisième critère. Le délai est presque nul dans ce cas $C3=0,33$. Pour cela, nous pouvons supposer que les ruptures de stock sont transformées directement en commandes urgentes. Ceci représente une condition nécessaire pour mettre en place la politique proposée.
- Le coût des produits : cette caractéristique est représentée par le quatrième critère. Cette classe regroupe les produits les plus chers $C4=74,9$; d'où la nécessité de ne pas avoir de fortes quantités dans le stock puisque leur détention entraîne des coûts de possession élevés.

- La durée de vie des produits : cette caractéristique est représentée par le cinquième critère. Ce délai est plus court que les autres, et correspond à un délai critique qui nous contraint à minimiser la possession des produits dans le stock afin d'éviter leur péremption.

Dans le Tableau 15, nous résumons les valeurs numériques utilisées pour la classe (classe 2) de produits résultante de la classification.

Tableau 15 : les moyennes des caractéristiques de la famille de produits

	Valeurs
C1 : fréquence optimale de livraison unitaire	1,64
C2 : ratio 1 = écart type de la demande / moyenne de la demande	1,89
C3 : délai de livraison	0,33
C4 : Coûts des produits	74,90
C5 : délai de péremption	3,09
C6 : ratio 2 = Coût possession / Coût de rupture	0,61
C7 : ratio 3 = Coût de passation / Coût produit	0.20

Nous rappelons aussi que cette classe de produits représente 26% des produits dans la base de données pharmaceutiques étudiée dans le cinquième chapitre.

6.3.2 Sélection de la famille de produits

La sélection des familles de produits est basée sur les mêmes critères présentés dans le cinquième chapitre. Nous les résumons ci-dessous :

- Source d'approvisionnement : la contrainte principale est de sélectionner une famille de produits où tous les produits peuvent être approvisionnés à partir du même fournisseur.
- Fréquence de réapprovisionnement : nous avons sélectionné une famille de produits avec une fréquence de consommation très faible. Cette fréquence reflète la consommation irrégulière des produits dans cette classe, qui présente donc la moyenne la plus faible par rapport aux autres classes créées dans la classification.
- Le délai de livraison est nul.

6.3.3 Analyse par rapport au paramètre « prix de produit »

Le premier paramètre à étudier est le « prix des produits ». Ce paramètre représente une contrainte forte dans la définition de la politique puisque nous avons initialement supposé que cette politique est destinée aux produits chers ; ce qui exige de minimiser les quantités stockées, puisque la possession de ces produits coûte cher proportionnellement à leur prix puisque ce dernier coût

varient en fonction des prix des produits, et peut donc provoquer plusieurs situations de ruptures de stock.

Nous essayons ainsi de voir l'influence de ce paramètre par rapport à l'efficacité de la politique de réapprovisionnement proposée.

Dans la Figure 40, nous comparons les coûts logistiques calculés pour la politique proposée et la politique de référence sur plusieurs intervalles de prix de produits. Ces intervalles varient du moins cher (par exemple : [10€ – 30€], [30€ – 50€]), au plus cher (par exemple [180€ - 200€], [300€- 320€]) par rapport aux valeurs définies dans la classe de produits étudiée.

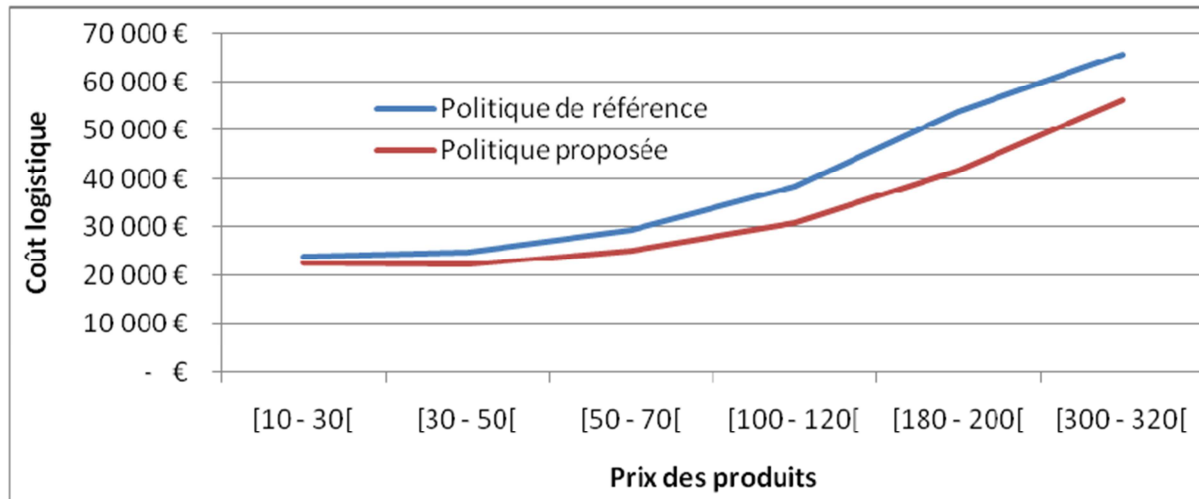


Figure 40 : variation de coûts logistiques par rapport au prix des produits

Nous constatons que la différence entre les deux politiques est plus importante pour des produits à coût élevé. En effet, la politique proposée présente un gain significatif à partir de l'intervalle de coût [50€ - 70€], et ce gain croît quand les coûts des produits augmentent.

Dans la Figure 41, nous montrons les pourcentages de gain réalisés dans chaque intervalle de coût de produits.

Nous réalisons aussi d'autres simulations, avec des intervalles de coûts et un écart type important. Ces expériences permettent de voir si la politique proposée répond efficacement à la variation des coûts de produits. Les trois intervalles étudiés sont [10€ - 100€], [100€ - 200€] et [200€ - 300€].

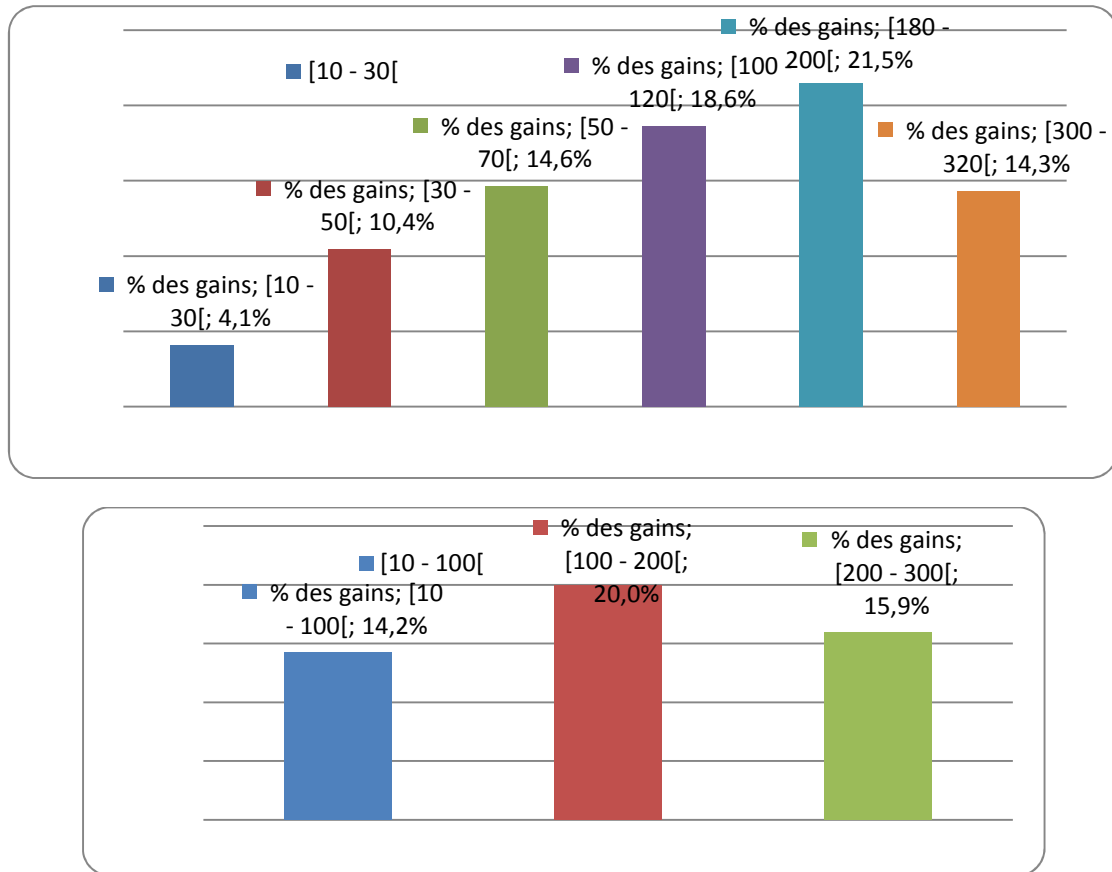


Figure 41 : pourcentage des gains réalisés par la politique proposée en faisant varier les prix des produits

Dans la première série d'expérimentation, nous notons des gains importants dans les intervalles de coût élevé. Le gain le plus élevé est de 21,5% qui correspond à l'intervalle de [180€ - 200[.

Dans la seconde série expérimentation, le gain le plus important est obtenu dans l'intervalle de coût [100€ - 200€ [. Nous constatons que le gain est important même lorsque l'écart type élevé, l'intervalle dans lequel la politique est la plus efficace étant l'intervalle [100€ - 200€ [.

Nous pouvons conclure que cette politique est bien adaptée pour gérer des produits chers même avec un écart type important.

6.3.4 Analyse par rapport aux paramètres de la demande

Le deuxième paramètre à étudier dans ce paragraphe est la demande. Nous allons faire varier la demande en utilisant plusieurs valeurs du paramètre λ de la loi de poisson utilisée.

Dans la définition de la politique, nous avons supposé que la demande est aléatoire et ponctuelle. Nous l'avons représentée numériquement par la loi de poisson puisque cette loi est appropriée pour les événements rares ou les événements avec une probabilité faible et sans mémoire. Le but de cette étude est de déterminer un contexte d'application précis de la politique proposée, et de confirmer la concordance de la classe de produits résultant de la classification du cinquième chapitre.

Nous faisons varier λ sur plusieurs valeurs entre {2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 12 et 14}. Ces valeurs couvrent un horizon suffisant pour étudier l'efficacité de la politique proposée par rapport à la politique de référence.

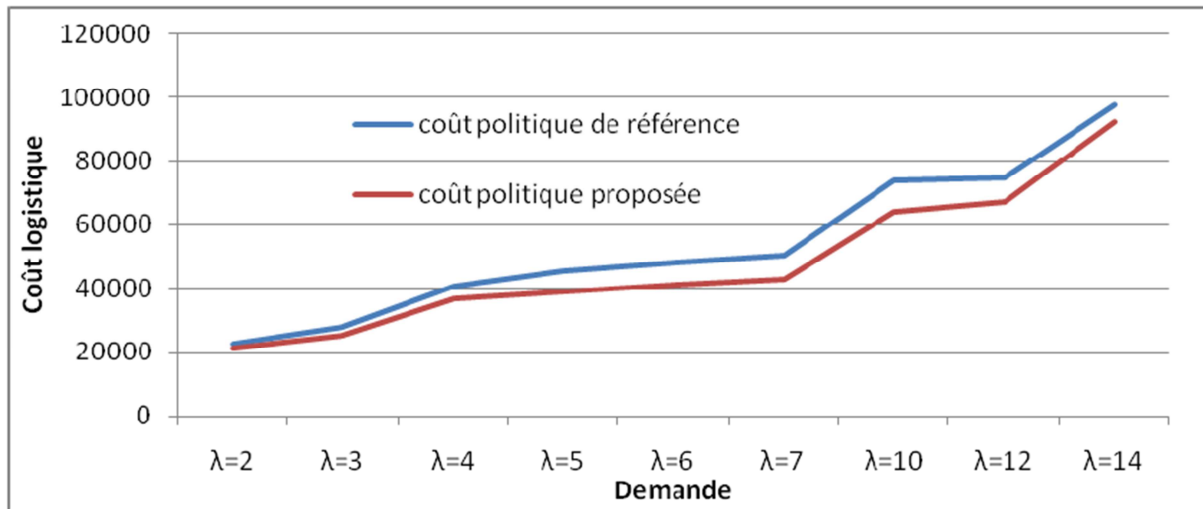


Figure 42 : comparaison des coûts logistiques en fonction de la demande

Pour des petites valeurs de λ , l'écart entre les deux politiques est faible, tandis que pour les valeurs plus grandes, le coût logistique de la politique de référence dépasse celui de la politique proposée. Cet écart se réduit pour les grandes valeurs quand $\lambda=12$ ou $\lambda=14$. Dans ces deux derniers cas, la demande devient très importante avec des grandes quantités, et nous sortons du contexte principal de la politique proposée.

Nous détaillons dans la Figure 43 les pourcentages de gain obtenus en appliquant la politique proposée par rapport à la politique de référence pour les différentes valeurs de λ .

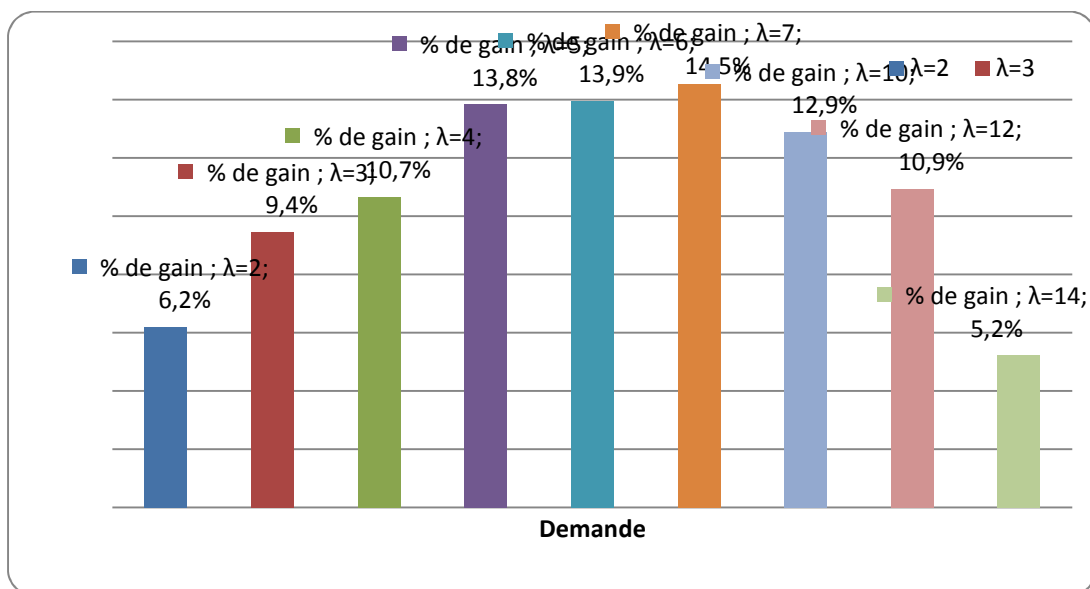


Figure 43 : pourcentage des gains obtenus en fonction de la demande

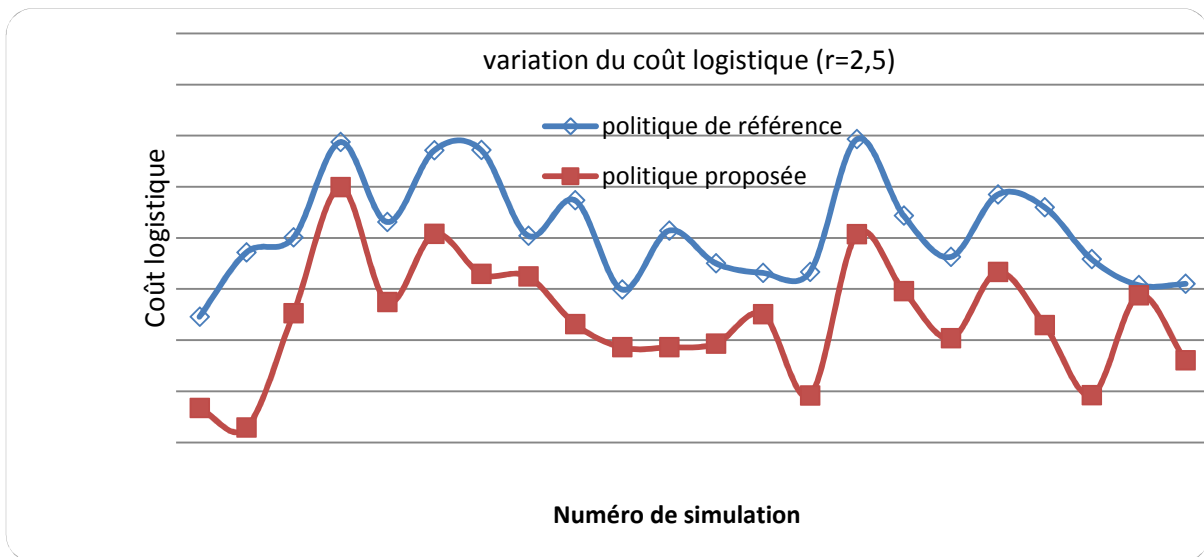
Les pourcentages de gain les plus élevés correspondent aux valeurs de λ comprises entre $\lambda=5$ et $\lambda=10$. Ces valeurs définissent une demande aléatoire avec des quantités importantes ; ce qui peut contraindre à mettre en place une politique appropriée pour une meilleure gestion d'approvisionnement.

6.3.5 Analyse par rapport au ratio : coût de commande normale / coût de commande urgente

Nous pouvons constater que les écarts de coût entre la politique proposée et la politique de référence dépendent principalement de l'écart entre le coût de commande normale et le coût de commande urgente. Puisque nous nous basons que sur des commandes urgentes dans la politique proposée et combinons commandes normales et urgente pour l'autre. Nous pouvons alors définir, comme dans le cas précédent, un paramètre de proportion entre les deux coûts.

$$r = \frac{\text{coût de commande urgente}}{\text{coût commande normale}}$$

La figure ci-dessous (Figure 44) montre la variation des coûts des deux politiques en fonction de ce ratio.



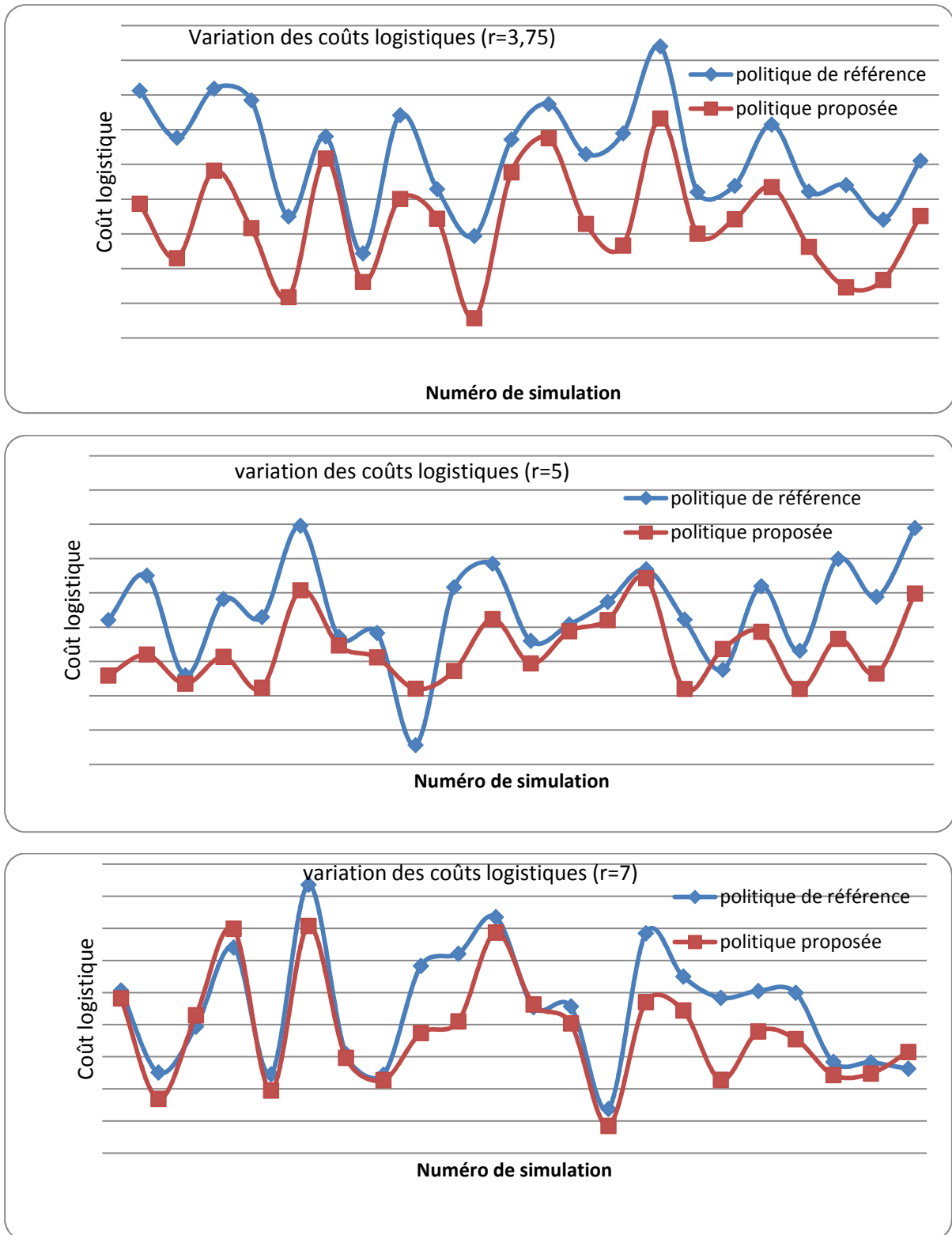


Figure 44 : analyse des coûts

Pour les vingt simulations réalisées, nous remarquons que la politique proposée présente presque toujours un gain significatif par rapport à la politique de référence, et ceci, pour les trois premières valeurs du ratio r . Nous pouvons en conclure que même lorsque le coût de commande urgente est

cinq fois plus élevé que le coût de commande normale, notre politique est préférable. Ce n'est que lorsque le coût de commande urgente est sept fois plus élevé que le coût normal, que le coût de la politique proposée peut dépasser celui de la politique de référence.

Lorsque ce ratio prend successivement les valeurs 2.5, 3.75, 5 et 7 les gains respectifs sont de 12.1 %, 10.8 %, 5.3 % et 2.7 % par rapport à la politique de référence (Tableau 16 et Figure 45). Nous nous sommes basés sur les valeurs numériques présentées précédemment pour réaliser ces simulations.

Tableau 16 : variation des taux de gain par rapport aux ratios

	r = 2.5		r = 3.75		r = 5		r = 7,5	
	Politique proposée	Politique classique	Politique proposée	Politique classique	Politique proposée	Politique classique	Politique proposée	Politique classique
Moyenne des coûts	14138€	12422€	18286€	16320€	21490€	20348€	27528€	26776€

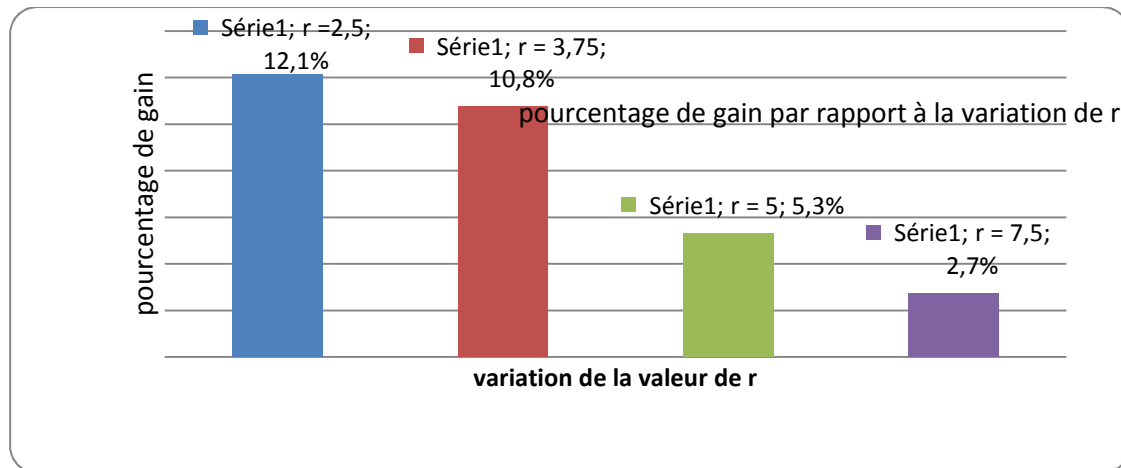


Figure 45 : pourcentage de gain

Nous pouvons conclure que la politique proposée est préférable à la politique traditionnelle tant que le coût d'une commande urgente n'est pas excessif, au regard du coût d'une commande normale.

6.3.6 Synthèse

Dans cette partie, nous avons étudié un contexte particulier d'approvisionnement. Ce contexte est caractérisé par la gestion de produits présentant des caractéristiques assez sensibles (prix élevés, demande très aléatoire et ponctuelle, interdiction de rupture, ...). La politique proposée pour une meilleure gestion avec un coût minimal se base sur la notion des commandes rapides et sur le regroupement des produits en familles homogènes. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour la mise en œuvre de cette politique. Nous avons été contraints à réaliser des expérimentations et des analyses, afin de préciser le contexte d'application de la politique de réapprovisionnement proposée, et de montrer la variation des gains par rapport à plusieurs paramètres.

L'analyse de sensibilité réalisée sur les trois paramètres « coût de produits », « demande » et « rapport entre coût de passation d'une commande urgente / normale » permet de tirer quelques conclusions :

- La gestion en familles de produits permet de minimiser le nombre de commandes passées, surtout du fait que nous adoptons dans la politique proposée le principe de la commande urgente déclenchée lorsqu'un des produits de la famille arrive en rupture de stock. Il est important, dans ce cas, de regrouper les produits qui présentent les mêmes caractéristiques afin d'avoir un comportement similaire pour l'ensemble des produits d'une famille : par exemple, quand un produit arrive au niveau de rupture, le reste des produits y parvient, ou presque).
- L'utilisation des commandes urgentes permet de minimiser les quantités en stock, et de supprimer les stocks de sécurité. Le gain obtenu au niveau du coût de possession de stock dépasse alors généralement le surcoût induit en termes de transport. L'analyse réalisée par rapport au ratio r montre l'ampleur de ce gain ainsi que les limites de la proposition.

6.4 Conclusion

Nous avons pu montrer dans ce chapitre les gains réalisés par les politiques proposées si on les compare aux politiques de références dans différents contextes. Nous avons réalisé des analyses par rapport aux trois paramètres : « coût de produits », « demande » et « rapport entre coût de passation d'une commande urgente / normale » pour les deux politiques proposées. Ces analyses ont conduit aux résultats suivants :

- (i) Par rapport au paramètre « coût de produits » : les résultats obtenus confirment le choix de chaque politique dans son contexte d'étude. La politique proposée dans le troisième chapitre présente des gains significatifs pour les prix faibles de produits, alors que la deuxième politique (chapitre 4) a les mêmes effets dans le cas de prix élevés.
- (ii) Par rapport au paramètre « demande » : les résultats issus des expérimentations confirment que la première politique proposée est destinée à une demande aléatoire répétitive et la deuxième politique à une demande très aléatoire et ponctuelle.
- (iii) Par rapport au paramètre r : nous réalisons des gains importants dans le cas où la différence entre le coût d'une commande urgente et celui d'une commande normale n'est pas trop importante, et ce, dans les deux politiques. Cependant, nous enregistrons des gains plus importants dans la deuxième politique quand ce ratio est élevé ; ce qui est normal puisque la politique proposée est basée sur les commandes urgentes dans tous les cas.

Finalement, les résultats trouvés dans ce chapitre confirment l'intérêt ainsi que les domaines d'application de chacune des méthodes proposées.

Chapitre 7 : Conclusion générale

SOMMAIRE

Chapitre 7	: Conclusion générale	139
7.1	Problématique étudiée.....	140
7.2	Bilan de notre approche et des résultats obtenus.....	140
7.3	Perspectives.....	141

Dans cette conclusion générale, nous rappelons la **problématique étudiée** puis présentons un **bilan de notre démarche et des résultats obtenus** pour l'aide à l'optimisation des coûts logistiques dans deux contextes différents. Enfin, des **perspectives** seront proposées.

7.1 Problématique étudiée

La chaîne logistique peut être assimilée à un modèle séquentiel d'activités organisées autour d'un réseau d'entreprises dont le but est de mettre un produit ou un service à la disposition du client dans des conditions optimales en termes de quantité, de date, de lieu, ...

A cet égard, la gestion de la chaîne logistique suppose de planifier et de contrôler les stocks et le transport de manière coordonnée des fournisseurs jusqu'aux utilisateurs finaux.

Dans ce contexte, la compétitivité d'une entreprise nécessite la prise en compte simultanée de nombreux facteurs. Les nouvelles formes de concurrence, en particulier la mondialisation des marchés, ont conduit à porter une attention particulière aux fonctions d'approvisionnement et de distribution physique des marchandises.

Dans notre thèse, nous nous intéressons au problème d'optimisation des coûts liés au stockage et aux flux physiques des produits. Le but est de proposer des méthodes de gestion combinée de stock et de transport adaptées à des contextes particuliers afin de minimiser les coûts logistiques engendrés dans un réseau logistique multi produits, multi niveaux avec une demande probabiliste.

7.2 Bilan de notre approche et des résultats obtenus

Nous présentons nos apports scientifiques en rappelant les problématiques traitées et les solutions proposées.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés aux verrous scientifiques suivants :

- Gestion combinée de stock et de transport.

→ Nous proposons une optimisation intégrée des coûts de stockage et de transport dans la même fonction objective en considérant plusieurs modes de transport (livraison normale et livraison d'urgence) et en prenant en compte des contraintes liées aux moyens de transport (capacités de camion par type).

- Identification des problèmes liés à des contextes particuliers et proposition de méthodes de gestion spécifiques

→ Nous avons identifié une liste de critères discriminants pour caractériser des problématiques de gestion des approvisionnements et proposer des méthodes de gestion adaptées à ces contextes.

- Une première politique de réapprovisionnement a été proposée pour gérer des produits caractérisés par une demande aléatoire avec des variations importantes. Il s'agit d'une politique de gestion périodique par famille de produits. A chaque période, une décision d'approvisionnement est prise au regard de l'atteinte ou non du niveau de commande pour chacun des produits avec possibilité d'approvisionnement par anticipation de certains produits pour minimiser les coûts de transport. Ce raisonnement est implémenté à l'aide de

méthodes heuristiques. Le contexte optimal d'application de cette politique est celui où un même fournisseur fournit un nombre limité de produits à un même client et que ces produits présentent des caractéristiques fort différentes en termes de demande et de coût.

- Une deuxième politique de réapprovisionnement a été proposée pour gérer des produits faisant l'objet d'une demande très aléatoire et ponctuelle. Cette politique est basée sur les ruptures de stock. A chaque rupture d'un produit, il y a déclenchement d'un réapprovisionnement de tous les produits de sa même famille. Les quantités commandées sont calculées en se basant sur des modèles mathématiques définissant les probabilités de rupture de stock à chaque instant t en fonction de la quantité commandée Q .

- Constitution de familles de produits

→ Nous avons proposé une méthode de classification multicritères afin de constituer des groupes de produits relevant d'une méthode de gestion déterminée. Nous avons déroulé cette démarche sur un exemple en se basant sur données réelles issues d'une chaîne pharmaceutique aval.

- Analyse de performances de ces politiques d'approvisionnement

→ Nous avons réalisé des simulations pour comparer les politiques de réapprovisionnement proposées et des politiques de références définies dans la littérature et effectué des analyses de sensibilités par rapport à plusieurs critères afin de définir le contexte d'application idéal de chaque politique de réapprovisionnement.

7.3 Perspectives

Ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherche.

La gestion de la chaîne logistique doit aujourd'hui intégrer la problématique du développement durable. Il serait intéressant d'intégrer des critères environnementaux et sociétaux pour le choix des politiques d'approvisionnement et l'optimisation de leurs paramètres.

Nous envisageons par ailleurs d'intégrer la possibilité de fractionnement de lots afin d'optimiser les coûts logistiques liées.

Enfin une meilleure prise en compte des délais de péremption, que ce soit dans le domaine alimentaire ou le domaine pharmaceutique semble nécessaire. En particulier, nous envisageons d'intégrer dans nos modèles les coûts liés à la perte des produits périmés en vue de l'optimisation des quantités commandées.

Références

- Abdul-Jalbara, B., J. Gutierrez, et al. (2003). "Policies for inventory/distribution systems: The effect of centralization vs. decentralization." Int. J. Production Economics **81-82**: 281-293.
- Abou-El-Ata, M. O. and K. A. M. Kotb (1997). "Multi-item EOQ inventory model with varying holding cost under two restrictions: a geometric programming approach." Production Planning & Control : The Management of Operations **8(6)**: 608 - 611.
- Akbalik, A. (2006). Optimisation de la gestion intégrée des flux physiques dans une chaîne logistique : extensions du problème de dimensionnement de lot. Grenoble, Institut National Polytechnique De Grenoble.
- Akbari Jokaar, M. R., Y. Frein, et al. (2000). Sur l'évolution du concept de logistique. RIRL 2000. Trois Rivières
- Akbari Jokaar, M. R., Y. Frein, et al. (2002). "L'évolution du concept de logistique. ." Revue Française de Gestion Industrielle, **21(3)**.
- Akcali, E. and Z. P. Bayindir (2006). "Analyzing the effects of inventory cost setting rules in a disassembly and recovery environment." International Journal of Production Research **99(1)**: 1 - 22.
- Alwan, L. C., J. J. Liu, et al. (2003). "Stochastic characterization of upstream demand processes in a supply chain." IIE Transactions **35(3)**: 207 - 219.
- Angerhofer, B. J. and M. C. Angelides (2000). System dynamics modelling in supply chain management: research review. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, .
- Arntzen, B. C., G. G. Brown, et al. (1995). "Global supply chain management at digital equipment corporation." Interfaces **vol 25(N°1)**: 69-93
- ASLOG (2003). Référentiel de la performance logistique. E. ASLOG.
- Atkins, D. R. and P. O. Iyogun (1988). "Periodic versus 'can-order' policies for coordinated multi-item inventory systems. ." Management Science **34(6)** 791–796.
- Aydin, A. and S. T. Christopher (2004). "A model for analyzing multi-channel distribution systems." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics **163**: 802-824.
- Baboli, A., M. a. Pirayesh Neghab, et al. (2008). "An algorithm for the determination of the economic order quantity in a two-level supply chain with transportation costs: comparison of decentralized with centralized decision." Journal of systems science and systems engineering **vol. 17**: 353-366.
- Babuska, R., Ed. (1998). Fuzzy Modeling for control. Massachusetts, USA.
- Bahloul, K., A. Baboli, et al. (2010). A new replenishment policy based on mathematical modeling of inventory and transportation costs with probabilistic demand. International Conference of Modeling and Simulation Tunisia.

- Balintfy, J. L. (1964). "On a basic class of multi-item inventory problems." Management Science **10(2)** 287–297.
- Barnes-Schuster, D., Y. Bassok, et al. (2002). "Optimizing delivery lead time/inventory placement in a two-stage production/distribution system." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics
- Bartezzaghi, E. and R. Verganti (1995). "Managing demand uncertainty through order overplanning." International Journal of Production Economics **No. 40**: 107-120.
- Beamon, B. M. (1998). "Supply chain design and analysis : Models and methods." International Journal of Production Economics **55(3)** 281-294.
- Beamon, B. M. and V. C. P. Chen (2001). "Performance Analysis of Conjoined Supply Chain." International Journal of Production Research **39(14)**: 3195-3218.
- Benkherouf, L. and S. P. Sethi (2010). "Optimality of (s,S) policies for a stochastic inventory model with proportional and lump-sum shortage costs." Operations Research Letters **38**: 252-255.
- Bennett, S. A. (1986). "Decentralized Purchasing with Centralized Control." Management Quarterly **vol. 27(n° 1)**: 40-42.
- Bertazzi, L. and M. G. Speranza (1999). "Inventory control on sequences of links with given transportation frequencies." Int. J. Production Economics **59**: 261-270.
- Bhatnagar, R., P. Chandra, et al. (1993). "Models for multi-plant coordination. ." European Journal of Operational Research **67**: 141-160.
- BONTOUX, B. (2008). Techniques hybrides de recherche exacte et approchée : application à des problèmes de transport. Information, Structures, Systèmes Laboratoire d'Informatique (EA 931). MARSEILLE, UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE.
- Bouchriha, H. (2002). faire ou faire-faire dans la conception d'une chaine logistique:un outil d'aide a la decision. Grenoble, Institut National Polytechnique De Grenoble.
- Burns, L. D., R. W. Hall, et al. (1985). "Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs." Operation research **vol 33**: pp 469-490, .
- Burns, L. D., R. W. Hall, et al. (1985). "Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. ." Operations Research, **33(3)** 469-490.
- Cardos, M. and J. P. Garcia-Sabater (2005). "Designing a consumer products retail chain inventory replenishment policy with the consideration of transportation costs." International Journal of Production Economics **104**: 525–535.
- Cavinato, J. L. (1991). "Evolving Procurement Organizations: Logistics Implications." Journal of Business Logistics **13**: 27-45.
- Cetinkaya, S., F. Mutlu, et al. (2005). "A comparison of outbound dispatch policies for integrated inventory and transportation decisions." European Journal of Operational Research

- Cetinkaya, S., F. Mutlu, et al. (2006). "A comparison of outbound dispatch policies for integrated inventory and transportation decisions." European Journal of Operational Research **171**: 1094-1112.
- Chan, F. T. S., S. H. Chung, et al. (2004). "A heuristic methodology for order distribution in a demand driven collaborative supply chain." International Journal of Production Research **42(1)**: 1--19.
- Chandra, P. and M. Fisher (1994.). "Coordination of production and distribution planning." European Journal of Operational Research, **72**: 503-517.
- Cheaitou, A. (2008). Stochastic Models for Production/Inventory Planning: Application to Short Life-Cycle Products. Paris ÉCOLE CENTRALE PARIS.
- Chen, J.-M. and T.-H. Chen (2005). "The multi-item replenishment problem in a two-echelon supply chain: the effect of centralization versus decentralization." Computers & Operations Research **32**: 3191–3207.
- Cheng-Liang, C., W. Bin-Wei, et al. (2003). The Optimal Profit Distribution Problem in A Multi-Echelon Supply Chain Network: A Fuzzy Optimization Approach.
- Cheng-Liang, C. and L. Wen-Cheng (2004). "Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices." Computers and Chemical Engineering **28**: 1131–1144.
- Chi, C. (2001). "A note on optimal policies for a periodic inventory system with emergency orders." Computers & Operations Research **28**: 93-103.
- Chiang, C. and G. J. Gutierrez (1997). "Optimal Control Policies for a Periodic Review Inventory System with Emergency Orders." Naval Research Logistics, **Vol. 45**
- Ching-Wu, C., L. Gin-Shuh, et al. (2008). "Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification." Computers & Industrial Engineering **55**: 841–851.
- Colin, J. and G. Paché (1988). La logistique de distribution. Paris.
- Corbett, C. J. and K. Rajaram (2006). "A generalization of the inventory pooling effect to nonnormal dependent demand. ." Manufacturing & Service Operations Management **8** 330–350.
- Croom, S., O. Romano, et al. (2000). "Supply chain management: an analytical framework for critical literature review. ." European Journal of Purchasing & Supply Management **6**: 67-83, .
- Das, C. and R. Tyagi (1997). "Role of inventory and transportation costs in determining the optimal degree of centralization " Transportation Research **33**: 171-179.
- Devernay, P. (1997). "Le transport, "moteur" de la chaîne logistique " LOGISTIQUE ET MANAGEMENT **vol 5 (n°1)**: p. 75-79, .
- Dubois, D. and H. Prade (2004). "Possibilistic logic : a retrospective and prospective view." Fuzzy Sets and Systems **144**: 3-23.

- Duda, R., P. Hart, et al. (2001). Pattern Classification. Chapitre 4: Nonparametric Technique.
- Dullaert, W., B. Vernimmen, et al. (2007). "Revisiting Service-level Measurement for an Inventory System with Different Transport Modes." Transport Reviews : A Transnational Transdisciplinary Journal **27(3)**: 273 - 283.
- Edward A., S., P. David F., et al. (2003). Inventory Management and Production Planning and Scheduling.
- Elghazel, H. (2007). Classification et Prédiction des Données Hétérogènes : Application aux Trajectoires et Séjours Hospitaliers. LIESP. Lyon, UCBL.
- Eppen, G. D. (1979). "Effects of centralization on expected costs in a multi-location newsboy problem." Management Science **25(5)**: 498–501.
- Ernst, R. and M. A. Cohen (1990). "Operations related groups (ORGs) : A clustering procedure for production / inventory systems." Journal of Operations Management **9 (4)**: 574–598.
- Fargier, H. and C. Thierry (2000). "The use of possibilistic decision theory in manufacturing planning and control: recent results in Fuzzy Master Production Scheduling." Advances in Scheduling and Sequencing under fuzziness: p. 45-59, .
- Farmer., D. (1997). "Purchasing myopia-revisited. ." European Journal of Purchasing & Supply Management, **3**: 1-8.
- Federgruen, A., H. Groenevelt, et al. (1984). "Coordinated replenishments in a multi-item inventory system with compound poisson demands." Management Science **30(3)** 344–357.
- Federgruen, A. and P. Zipkin (1984). "A combined vehicle routing and inventory allocation problem." Operations Research **32(5)** 1019-1037.
- Feng, H., K. Muthuraman, et al. (2007). The Impact of Demand Correlation on Replenishment Policies for Multi-Product Stochastic Inventory Systems with Joint-Replenishment Costs. M. R. P. S. N. IROM-08-08. Texas.
- Flores, B. E. and D. C. Whybark (1986). "Multiple criteria ABC analysis." International Journal of Operations and Production Management **6(3)**: 38–46.
- Gajpal, P. P., L. S. Ganesh, et al. (1994). "Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process." International Journal of Production Economics **35 (1–3)**: 293–297.
- Galasso, F. (2007). Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible. Toulouse, Institut national polytechnique de Toulouse.
- Geunes, J. and P. M. Pardalos (2003). "Network optimization in supply chain management and nancial engineering : an annotated bibliography. ." Networks, **42(2)** 66-84,.
- Geunes, J. and A. Z. Zeng (2001). "Impacts of inventory shortage policies on transportation requirements in two-stage distribution systems." European Journal of Operational Research **129**: 299-310.

- Giri, B. C. and T. Dohi (2009). "Cost-effective ordering policies for inventory systems with emergency order." computers & Industrial Engineering **57**: 1336-1341.
- Gorder, V. (1990). Moving back to centralization. Credit. **vol.16**, : pp.12-15.
- Grobot, B., L. Geneste, et al. (2005). "Integration of uncertain and imprecise orders in the MRP II method." International Journal of Intelligent Manufacturing, **No. 16(2)**.
- Güvenir, H. A. and E. Erel (1998). "Multi criteria inventory classification using a genetic algorithm." European Journal of Operational Research **105**: 29–37.
- Güvenir, H. A. and E. Erel (1998). "Multi criteria inventory classification using a genetic algorithm." European Journal of Operational Research **05**: 29–37.
- Hadi-Vencheh, A. (2010). "An improvement to multiple criteria ABC inventory classification." European Journal of Operational Research **201(3)**: 962-965.
- Haksever, C. and J. Moussourakis (2005). "A model for optimizing multi-product inventory systems with multiple constraints." International Journal of Production Economics **97(1)**: 18-30.
- Hassan, T. (2006). *Logistique hospitalière : organisation de la chaîne logistique pharmaceutique aval et optimisation des flux de consommables et des matériels à usage unique*. Lyon, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON 1.
- Heskett, J. (1978). "La logistique élément clef de la stratégie." 53-65.
- Hill, R. M. (1999). "The optimal production and shipment policy for the single-vendor single-buyer integrated production-inventory problem. ." International Journal of Production Research, **37(11)**: 2463-2475.
- Hnaïen, F., X. Delorme, et al. (2010). "Multi-objective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times." computers & Operations Research **37**: 1835-1843.
- Hoque, M. A. (2007). "An alternative model for integrated vendor–buyer inventory under controllable lead time and its heuristic solution." International Journal of Systems Science **38(6)**: 501 - 509.
- Hsieh, T.-P. and C.-Y. Dye (2010). "Optimal replenishment policy for perishable items with stock-dependent selling rate and capacity constraint." computers & Industrial Engineering **59**: 251-258.
- Huang, G. Q., J. S. K. Lau, et al. (2003). "The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature." International Journal of Production Research **41(7)**: 1483 - 1517.
- Huang, H. C., E. P. Chew, et al. (2004). "A two-echelon inventory system with transportation capacity constraint." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics **167**: 129–143.

- Hui-Ling, Y. (2004). "Two-warehouse inventory models for deteriorating items with shortages under inflation." European Journal of Operational Research **157** 344–356.
- Huiskonen, J. (2001). "Maintenance spare parts logistics : Special characteristics and strategic choices." International Journal of Production Economics **71**: 125–133.
- Hwang, H. B., C. S. P. Chong, et al. (2005). "Modelling a complex supply chain: understanding the effect of simplified assumptions." International Journal of Production Research **43**(13): 2829 - 2872.
- Iglehart, D. (1963). "Optimality of (s,S) policies in infinite-horizon dynamic inventory problem." Management Science **9** 259–267.
- Ignall, E. (1969). " Optimal continuous review policies for two product inventory systems with joint setup costs." Management Science **15**(5): 278–283.
- Iyogun, P. (1992). "Lot-sizing algorithm for a coordinated multi-item, multi-source distribution problem." European Journal of Operational Research, **59** 393-404.
- Jain, A. K., M. N. Murty, et al. (1999). "Data clustering: A review." ACM Computing Surveys **31**(3).
- Jambu, M. (1999). Introduction au Data Mining. Paris.
- Jong, J. F. and H. M. Wee (2007). "A near optimal solution for integrated production inventory supplier-buyer deteriorating model considering JIT delivery batch." International Journal of Computer Integrated Manufacturing **99999**(1): 1 - 12.
- Kanchanasuntorn, K. and A. Techanitisawad (2004). "An approximate periodic model for fixed-life perishable products in a two-echelon inventory–distribution system." Int. J. Production Economics **100**: 101–115.
- Kanaoui Nadia, "Contribution à l'Etude et à la Mise en Oeuvre d'Approches Hybrides d'Aide au Diagnostic aux Domaines Biomédical et Industriel", at Paris-East University, Senart, France, December 17, 2007,
- Kang, J.-H. and Y.-D. Kim (2010). "Coordination of inventory and transportation managements in a two-level supply chain." Production Economics **123**: 137-145.
- Kaufman, L. and P. J. Rousseeuw (1990). Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley. New York.
- Kempowsky, T. (2004). Surveillance de processus à base de méthodes de classification : conception d'un outil d'aide pour la detection et le diagnostic des défaillances. Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS. Toulouse, INSA.
- Kim, S.-L. and D. Ha (2003). "A JIT lot-splitting model for supply chain management : Enhancing buyer-supplier linkage. ." International Journal of Production Economics, **86**: 1-10.
- Kirche, E. and R. Srivastava (2005). "An ABC-based cost model with inventory and order level costs: a comparison with TOC." International Journal of Production Research **43**(8): 1685 - 1710.

- Kok, T. G. and J. C. Fransoo (2003). Planning Supply Chain Operations: definition and comparison of planning concepts.
- Kutanoglu, E. and D. Lohiya (2007). "Integrated inventory and transportation mode selection : A service parts logistics system." Transportation Research Part E
- Kutanoglu, E. and D. Lohiya (2008). "Integrated inventory and transportation mode selection : A service parts logistics system." Transportation Research Part E **44**: 665-683.
- Labidi, K. (2005). Contribution à la modélisation et à l'analyse de performances des systèmes logistiques à l'aide d'un nouveau modèle de réseau de Petri stochastiques Troyes Université de technologie de Troyes
- Lakhal, S., A. Martel, et al. (2001). "On the optimization of supply chain networking decisions." European journal of operational research **N° 129**, : pp 259-270,.
- Lambert, D. M., J. R. Stock, et al. (1998). Fundamentals of Logistics Management. Burr Ridge, Illinois.
- Lechevallier, Y. (2010). Approche Data Mining par WEKA INRIA-Rocquencourt.
- Lee, D.-J. and I.-J. Jeong (2009). "Regression approximation for a partially centralized inventory system considering transportation costs." computers & Industrial Engineering **56**: 1169-1176.
- Lee, S. B. and P. H. Zipkin (1989). "A dynamic lot-size model with make or buy decision." Management sciences **vol 35**, (No 4.): pp 447-458, .
- Lee, W.-C. (2005). "Inventory model involving controllable backorder rate and variable lead time demand with the mixtures of distribution." Applied Mathematics and Computation **160**: 701-717.
- Lei, L., S. Liu, et al. (2006). "On the integrated production, inventory, and distribution routing problem." IIE Transactions **38**(11): 955 - 970.
- Li, J., T. C. E. Cheng, et al. (2007). "Analysis of postponement strategy for perishable items by EOQ-based models." international Journal of Production Economics **107**: 31-38.
- Li, J. and L. Liu (2005). "Supply chain coordination with quantity discount policy." Int. J. Production Economics **101**: 89-98.
- Lian, Z., X. Liu, et al. (2009). "A perishable inventory model with Markovian renewal demands." Int. J. Production Economics **121**: 176-182.
- Liang, T. F. (2006). "Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains." International Journal of Production Research **9**(1): 1 - 18.
- Lin, F. R. and M. J. Shaw (1998). ""Reengineering the Order Fulfillment Process in Supply Chain Networks",." International Journal of Flexible Manufacturing Systems, **10**: 197-229, .
- Liu, H. and H. Motoda (1998). Feature Extraction, Construction and Selection : A data mining perspective.

- Lo, H. K. and W. Y. Szeto (2001). "ADVANCED TRANSPORTATION INFORMATION SYSTEMS: A COST-EFFECTIVE ALTERNATIVE FOR NETWORK CAPACITY EXPANSION?" Journal of Intelligent Transportation Systems **6(4)**: 375 - 395.
- Lodree, E., W. Jang, et al. (2004). "Minimizing response time in a two-stage supply chain system with variable lead time and stochastic demand." International Journal of Production Research **42(11)**: 2263 - 2278.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceeding of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability USA.
- Madadi, A., M. E. Kurz, et al. (2010). "Multi-level inventory management decisions with transportation cost consideration." Transportation Research Part E **46**: 719-734.
- Martel, A. (2001). Coûts logistiques et création de valeur. Cours MBA gestion manufacturière et logistique : Conception et Gestion de chaînes logistiques. U. L. Faculté de sciences et d'Administration. Québec, Canada. **chapitre 2**, : pp 51-94, .
- Martel, A. (2001b). choix de moyens de transport. Cours MBA gestion manufacturière et logistique : Conception et Gestion de chaînes logistiques. U. L. Faculté de sciences et d'Administration. Québec, Canada,.
- Martel, A. and U. Vankatadri (1999). Optimizing supply network structures under economies of scale. Canada, Université Laval.
- Mason, S. J., P. M. Ribera, et al. (2003). "Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. ." Transportation Research, Part E **39** 141-159,.
- Matta, R. D. and T. Miller (2004). "Production and inter-facility transportation scheduling for a process industry. ." European Journal of Operational Research, **158**: 72-88, .
- Mehrabikoushki, A. (2008). Partage d'information dans la chaîne logistique : "Évaluation des impacts sur la performance d'une chaîne logistique des modes de collaboration mis en oeuvre entre les partenaires et des informations échangées". Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Melchior, P. (2002). "Calculating can-order policies for the joint replenishment problem by the compensation approach." European Journal of Operation Research **141** 587–595.
- Michie, D., D. J. Spiegelhalter, et al. (1994). "Machine learning, Neural and Statistical Classification." Ellis Horwood series in artificial Intelligence.
- Mishra, A. K. (2004). "Selective discount for supplier–buyer coordination using common replenishment epochs." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics **153**: 751-756.
- Mitchell, T. (1997). "Decision Tree Learning " Machine Learning, The McGraw-Hill Companies Inc. : 52-78.
- Mousseau, V., B. Roy, et al. (2000). "Elaboration d'un outil d'aide à la décision en vue de l'évolution de la tarification des transports publics en Ile de France." Journal of Decision Systems **9(2)** 289-315.

- Nielsen, C. and C. Larsen (2005). "An analytical study of the $q(s, s)$ policy applied to the joint replenishment problem. ." European Journal of Operation Research **163**: 721–732.
- Ouyang, L.-Y. and H.-C. Chang (2002). "Lot size reorder point inventory model with controllable lead time and set-up cost." international Journal of Systems Science **33(8)**: 635 - 642.
- Pan, Z., J. Tang, et al. (2009). "Synchronization of inventory and transportation under flexible vehicle constraint: A heuristics approach using sliding windows and hierarchical tree structure." Operations Research : Production, Manufacturing and Logistics **192**: 824-836.
- Park, Y. B. (2005). "An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management." International Journal of Production Research, **43(6)** 1205-1224.
- Partovi, F. Y. and M. Anandarajan (2002). "Classify inginventory using an artificial neural network approach." Computers and Industrial Engineering **41**: 389–404.
- Partovi, F. Y. and M. Anandarajan (2002). "Classifying inventory using an artificial neural network approach." international Journal Computers and Industrial Engineering **41**: 389–404.
- Partovi, F. Y. and J. Burton (1993). "Using the analytic hierarchy process for ABC analysis." International Journal of Production and Operations Management **13 (9)**: 29–44.
- Partovi, F. Y. and W. E. Hopton (1994). "The analytic hierarchy process as applied to two types of inventory problems." International Journal of Production and Inventory Management **35 (1)**: 13–19.
- Pichot, L. (2006). Stratégie de déploiement d'outils de pilotage de chaines logistiques : Apport de la classification. PRISMA. Lyon, INSA.
- Qin, J., F. Shi, et al. (2009). "Optimal Model and Algorithm for Multi-Commodity Logistics Network Design Considering Stochastic Demand and Inventory Control." Systems Engineering - Theory & Practice **29(4)**: 176-183.
- Qu, W. W., J. H. Bookbinder, et al. (1999). "An integrated inventory±transportation system with modified periodic policy for multiple products
" European Journal of Operational Research **115**: 254-269.
- Quinlan, J. R. (1986). "Introduction of decision Trees " Machine Learning **1**: 81-106.
- Ramanathan, R. (2006). "ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization." international Journal Computers and Operations Research **33 (3)**: 695–700.
- Rieksts, B. Q. and J. Ventura (2008). "Optimal inventory policies with two modes of freight transportation." operations Research : Production, Manufacturing and Logistics **186**: 576-585.
- Riopel, D., A. Langevin, et al. (2003). The network of logistics decisions. Technical Report GERAD-2003-13, GERADE.

- Rosenblatt, M. J. (1981). "Multi-item inventory system with budgetary constraint: A comparison between the Lagrangian and the fixed cycle approach." International Journal of Production Research **19 (4)**: 331–339.
- Roy, B. and D. Bouyssou (1993). Aide multicritères à la décision : méthodes et cas Economica.
- Rushton, A. and R. Saw (1992). "A Methodology for Logistics Strategic Planning." International Journal of Logistics Management **vol 3, n°1**.
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. NY:McGraw-Hill, NewYork.
- Sabri, E. H. and B. M. Beamon (2000). "A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design." OMEGA, The International Journal of Management Science, **28**: pp 581-598.
- Schmitt, A. J., L. V. Snyder, et al. (2010). "Inventory systems with stochastic demand and supply : Properties and approximations." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics **206**: 313–328.
- Selda, T. and J. L. J. Emmett (2010). "Inventory decisions for emergency supplies based on hurricane count predictions." Int. J. Production Economics **126**: 66–75.
- Sgren Glud, J. and T. Anders (1998). "An inventory model with Poisson demands and emergency orders." Int. J. Production Economics **56-57** 275-289
- Silver, E. A. (1974). " A control system for coordinated inventory replenishment." International Journal of Production Research **12**: 647–670.
- Silver, E. A. and D. P. Bischak (2011). "The exact fill rate in a periodic review base stock system under normally distributed demand." OMEGA, The International Journal of Management Science **39**: 346–349.
- Simchi-Levi and S.-L. Kaminsky (2000). Designing and Managing the Supply Chain
- Simchi-Levi, D., P. Kaminsky, et al. (2003). Designing & Managing the Supply Chain. Mc-Graw Hill, .
- Simos, J. (1989). l'évaluation environnementale : un processus cognitif négocié. DEPARTEMENT DE GENIE RURAL. LAUSANNE, EPFL.
- Skouri, K. and S. Papachristos (2002). "A continuous review inventory model, with deteriorating items, time-varying demand, linear replenishment cost, partially time-varying backlogging." Applied Mathematical Modelling **26**: 603–617.
- Song, J. (1998). "On the order fill rate in a multi-item, base-stock inventory system. ." Operations Research **46(6)**: 831-845.
- Srinivasa Raghavan, N. R. and N. Viwanadham (2002). Stochastic models for analysis of supply chain networks, . Proceedings of the American Control Conference,, Anchorage, AK.

- Stanislaw, B. (2005). "Turnpike policies for periodic review inventory model with emergency orders." Int. J. Production Economics **93–94** 357–373.
- Sven, A. (2007). "A heuristic for triggering emergency orders in an inventory system." European Journal of Operational Research : Production, Manufacturing and Logistics **176**: 880-891.
- Sven, A. and Z. Wen-Fa (1999). "A joint replenishment policy for multi-echelon inventory control." International Journal Production Economics **59**: 243-250.
- Swenseth, S. R. and M. R. Godfrey (2002). "Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions." Int. J. Production Economics **77**: 113-130.
- Tan, K. C. (2001). "A framework of supply chain management literature. ." European Journal of Purchasing & Supply Management **7**: 39-48,.
- Tchokogué, A. and J. Nollet (1998). Le pendule de la centralisation – décentralisation : une analyse de la dynamique des structures en gestion des achats Cahier de recherche. G. d. r. CHAÎNE. Montréal **98-01**: 15
- Tersin, R. (1980). Principles of Inventory and Material Management. . New York.
- Teunter, R. and D. Vlachos (2001). "An inventory system with periodic regular review and flexible emergency review " IIE Transactions **33**: 625-635.
- Toomey, J. W. (2000). Inventory Management: Principles, Concepts and Techniques. . Kluwer Academic Publishers.
- Tufféry, S. (2005). Data Mining et statistique décisionnelle L'intelligence dans les bases de données. Paris.
- Tyworth, J. E. and A. Ruis-Torres (2000). "Transportation's role in the sole – versus dual-sourcing decision." International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, **vol 30**, (N° 2,): pp 128-144, .
- Vallin, P. (1999). La logistique : modèles et méthodes du pilotage des flux. Paris.
- Vallin, P. (2003). La logistique - modèles et méthode du pilotage des flux, .
- Veinott, A. and H. Wagner (1965). "Computing optimal (s,S) inventory policies. ." Management Science **11** 525-552.
- Verwijmeren, M., P. Van Der Vlist, et al. (1996). "Networked inventory management information systems: Materializing supply chain management. ." International Journal of Physical Distribution and Logistics Management **vol. 26, n 6**: pp. 16-31. .
- Vidal, C. J. and M. Goetschalckx (1998). "Strategic production-distribution models : A critical review with emphasis on global supply chain models." European Journal of Operational Research: 1-18.
- Viswanathan, S. (1997). "Periodic review (s, s) policies for joint replenishment inventory systems." Management Science **43(10)** 1447–1454.

Waters, C. D. J. (1992). Inventory Control and Management.

Watson, K. and T. Polito (2003). "Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment." international Journal of Production Research **41**(4): 741 - 765.

Xu, S. H. (1999). "Structural analysis of a queueing system with multiclassses of correlated arrivals and blocking." Operations Research **47**(2) 264–276.

Yokoyama, M. (2002). "Integrated optimization of inventory-distribution systems by random local search and a genetic algorithm." Computers & Industrial Engineering **42**: 175-188.

Zadeh, L. A. (1978). " Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility." Fuzzy Sets and Systems **1**(1): 3-18.

Zermati, P. and F. Mocellin (2005). Pratique de la Gestion des Stocks. .

Zhao, Q. h., S. Chen, et al. (2010). "Integration of inventory and transportation decisions in a logistics system." Transportation Research Part E **46**: 913-925.

Zhaoa, Q.-H., S.-Y. Wang, et al. (2004). "Model and algorithm of an inventory problem with the consideration of transportation cost." Computers & Industrial Engineering **46**: 389-397.

Zheng, Y. and A. Federgruen (1991). "Finding optimal (s,S) poolicies is about as simple as evaluating a single policy." Operations Research **39**: 654–665.

Zhou, E. and A. Khotanzad (2007). "Fuzzy classifier design using genetic algorithm." international journal of the Pattern Recognition **40**: 3401–3414.