

Planification tactique-opérationnelle des chaînes
d'approvisionnement durables en boucle fermée
(Logistique inverse)

Par

Lassana CAMARA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. SC. A.

MONTREAL, LE 15 OCTOBRE 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean Pierre KENNE, directeur de mémoire
Professeur département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Nathalie BOSTEL, codirectrice de mémoire
Professeur des Universités IUT de Saint-Nazaire, Équipe SLP du LS2N

M. Christian BELLEAU, président du jury,
Professeur département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Hof LUCAS, membre du jury,
Professeur département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 24 SEPTEMBRE 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La présente étude n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude en acceptant mes remerciements.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Kenne, ainsi que ma codirectrice de recherche, la professeure Nathalie Bostel, pour leur disponibilité, leurs précieuses orientations, leurs encouragements et leur soutien financier m'ayant permis de mener à bien ce travail jusqu'au bout.

Je désire aussi remercier Monsieur Pierre Déjax, auquel je dois de précieuses indications documentaires. Je remercie également Samir Ouaret pour ses conseils judicieux et sa bonne humeur devant mes nombreuses questions. Sa disponibilité et ses explications m'ont permis de mieux cerner la gestion de la planification du point de vue opérationnel.

Mes remerciements vont également à mes collègues du laboratoire d'intégration des techniques de production (LITP) de l'ÉTS au sein duquel j'ai travaillé dans une ambiance conviviale.

Je suis également reconnaissant à tous les membres de ma famille qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager pendant ce travail. Je remercie particulièrement mes frères : Makhmout Camara, Kassim Camara, Aboubacar Camara, Balla moussa Camara et Ahmed Cheikh Camara.

Je dédie ce travail à ma femme, Ramatoulaye Keita, que je tiens à remercier pour sa patience et sa compréhension à l'endroit d'un parcours académique de longue durée. Je lui suis aussi reconnaissant pour son esprit ouvert au sujet de mon ambition de carrière professionnelle dans le domaine de la recherche.

Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. Trouvez en ces mots ma profonde gratitude

PLANIFICATION TACTIQUE-OPÉRATIONNELLE D'UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT DURABLE EN BOUCLE FERMÉE

Lassana CAMARA

RÉSUMÉ

La dégradation des ressources naturelles et la pollution de l'environnement obligent les entreprises à se préoccuper des impacts néfastes que peuvent causer leurs activités sur l'environnement. Cette nouvelle façon de penser est essentielle pour atteindre un succès durable des chaînes d'approvisionnement. Par conséquent, étudier le cycle de vie des produits fabriqués peut aider les entreprises à avancer économiquement, puisque beaucoup de ces produits usagés peuvent être recyclés. Les gestionnaires se sont donc penchés sur la planification des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée. Celle-ci permet de gérer conjointement le flux direct et le flux inverse des réseaux logistiques de façon à rentabiliser les produits en fin de vie. Ce faisant, les entreprises peuvent générer des profits sans causer des dommages à leur entourage et ainsi perdurer dans le temps. C'est dans cette logique que s'inscrit ce travail de recherche, visant plus particulièrement l'optimisation conjointe de la production de nouveaux produits et du recyclage des produits usagés.

Dans ce travail, nous avons effectué une étude récente de la littérature dans le but d'analyser les différents modèles d'optimisation présentés par les chercheurs et de proposer un modèle efficace. Après avoir fait une étude de la littérature, nous avons mis en place deux modèles mathématiques : un modèle permettant d'analyser les décisions tactiques d'une chaîne approvisionnement en boucle fermée et un modèle qui tient compte des décisions opérationnelles dans la même chaîne. Le raisonnement appliqué est décrit comme suit. Tout d'abord, il faut effectuer la résolution du premier modèle mathématique permettant d'établir le plan optimal d'approvisionnement et de production dans le cas où les usines étudiées ne sont pas soumises aux phénomènes aléatoires de pannes et de réparations et ainsi valider les résultats par des analyses de sensibilité. Ensuite, on doit procéder à la résolution du deuxième modèle mis en place lorsque les usines sont soumises à des phénomènes aléatoires de pannes et de réparations. La robustesse de ce modèle est aussi testée par une des analyses de sensibilité.

Mots clés : Optimisation, gestion de la chaîne d'approvisionnement, développement durable, chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, Planification tactique-opérationnelle

PLANIFICATION TACTIQUE-OPÉRATIONNELLE D'UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT DURABLE EN BOUCLE FERMÉE

Lassana CAMARA

ABSTRACT

The degradation of natural resources and environmental pollution compels companies to be concerned about the negative impacts that their activities may have on the environment. This new way of thinking is too essential to final supply of supply chains. By the day, using the products, using this product, using this product using can-it. Managers are therefore on the planning of sustainable closed-loop supply chains. This makes it possible to directly manage the reverse flow of logistics networks in order to make end-of-life products profitable. These are the companies that can earn profits without causing harm to those around them and thus endure over time. It is in this logic that we work, that we aim more particularly the simultaneous optimization of the production of new products and the recycling of used products.

We need researchers and propose an effective model. We studied literature, two mathematical models: a model for analyzing tactical decisions with a closed-loop supply and a model with a record of decisions in the same chain. The reasoning applied is described as follows. First, we have to solve the first mathematical model, which we have opted for an optimal supply and production plan in the case where the drugs were sent. Results by an analysis of sensitivities. Then, the second model is completed when factories are subject to random events. The robustness of this model is also tested by sensitivity analysis.

Keywords: Optimization, Supply Chain Management, Sustainable Development, Closed Loop Supply Chain, Tactical-Operational Planning

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET DÉFINITION DE LA LOGISTIQUE INVERSE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 La définition de la logistique inverse.....	5
1.3 Les intérêts de la logistique inverse	6
1.3.1 Les activités impliquées dans logistique inverse.	6
1.3.2 La collecte et le tri des produits en fin de vie.	6
1.3.3 La réutilisation	8
1.3.4 La refabrication.....	8
1.3.5 Le recyclage	9
1.3.6 L'élimination des déchets	9
1.4 Les différents types de réseaux de la logistique inverse	9
1.4.1 La logistique inverse en boucle ouverte.....	10
1.4.2 La logistique inverse en boucle fermée.	11
1.5 Synthèse et classification des travaux scientifiques sur la logistique inverse.	13
1.5.1 La méthodologie de collecte de documents	13
1.5.2 Classification annuelle des articles publiés entre 2012 et 2017.....	14
1.5.3 La distribution des articles selon les revues scientifiques	16
1.5.4 Sélection et classement en fonction des domaines d'études des articles ..	16
1.5.5 Classification des articles en fonction des filières de recherche.....	17
1.5.6 Les différents niveaux décisionnels	17
1.5.7 Les différents types de modèles.....	18
1.6 Les problèmes liés à la logistique inverse.....	21
1.6.1 Nouvelles considérations en conception des réseaux manufacturiers	23
1.6.2 Technique de modélisation et de résolution des problèmes de réseaux manufacturiers.....	24
1.7 Problématique et objectifs de recherche	26
1.8 Méthodologie de la recherche.....	27
CHAPITRE 2 FORMULATION D'UN MODÈLE GÉNÉRIQUE DE LA PLANIFICATION TACTIQUE EN CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT EN BOUCLE FERMÉE	28
2.1 Introduction.....	28
2.2 Structure du réseau étudié et formulation du problème.	28
2.2.1 Le réseau étudié.	29
2.2.2 Formulation du problème.....	30
2.3 Formulation du modèle mathématique	33
2.3.1 Ensemble et indices.....	33
2.3.2 Les paramètres logistiques :.....	34
2.3.3 Les variables de décision	36
2.4 Structure des données pour le modèle tactique.....	39

2.4.1	La demande des clients :	41
2.4.2	Les coûts liés à la Production :	41
2.4.3	Les paramètres de stockage :	42
2.4.4	Les coûts de transport	43
2.5	Analyse des résultats.....	44
2.6	Analyse de sensibilité du modèle.....	46
2.6.1	Cas où le coût de remanufacturing (CRp) est supérieur au coût de manufacturing (CMp)	46
2.6.2	Cas où la quantité de produits retournés augmente (augmentation du taux de retour).....	47
2.6.3	Cas où la quantité de produits éliminés augmente.....	49
2.7	Conclusion	50

CHAPITRE 3

	PLANIFICATION TACTIQUE D'UN RÉSEAU LOGISTIQUE : ÉTUDE DE CAS	53
3.1	Introduction.....	53
3.2	Le réseau étudié.	53
3.3	Structure des données	55
3.3.1	La demande de produits des clients (magasins).....	56
3.3.2	Les coûts fixes d'activation des usines	56
3.3.3	Les paramètres liés aux coûts unitaires et aux taux de retour et d'élimination	57
3.3.4	Distance et coûts	58
3.4	Les contraintes ajoutées au modèle du chapitre II.....	59
3.4.1	Redéfinition du modèle mathématique	59
3.5	Les résultats	60
3.5.1	Solution phase (1)	63
3.5.2	Solution phase (2)	65
3.5.3	Solution phase (3)	68
3.5.4	Solution phase (4)	69
3.5.5	Solution phase (5)	71
3.5.6	Solution finale	73
3.6	Analyses de sensibilité.....	78
3.6.1	Cas où le coût de production et de recyclage change de valeur.....	78
3.6.2	Cas où la quantité de produits retournés augmente (augmentation du taux de retour).....	79
3.6.3	Cas où la quantité de produits éliminés augmente (augmentation du taux d'élimination).....	80
3.7	Conclusion	82

CHAPITRE 4 LE MODÈLE OPÉRATIONNEL ET SON APPLICATION.....83

4.1	Introduction.....	83
4.2	Notations et hypothèses de modélisation.....	84
4.2.1	Notations	84

4.2.2	Hypothèses de modélisation	85
4.3	Formulation du problème.....	86
4.3.1	Matrice des taux de transition	88
4.3.2	Domaine de commande admissible	88
4.3.3	Conditions de faisabilité	89
4.4	Dynamique du stock	89
4.5	Coût instantané.....	89
4.6	Coût total actualisé.....	90
4.7	Fonction valeur et les conditions d'optimum.....	91
4.8	Développement des équations numériques par l'approche de Kushner	92
4.8.1	Algorithme de résolution	93
4.9	Analyse des résultats et analyse de sensibilité.....	94
4.9.1	Les résultats numériques	94
4.10	Analyses de sensibilité.....	104
4.11	Conclusion	107
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	109
	LES TRAVAUX FUTURES	113
	ANNEXE I	115
	ANNEXE II PROGRAMME PRINCIPALE MATLAB.....	123
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	171

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.3	Les différents niveaux de décision et les problèmes traités18
Tableau 2.1	La demande du client C pour le produit P à la période T41
Tableau 2.2	Les données des paramètres des usines et des centres de collectes/distributions42
Tableau 2.3	La capacité de production des usines de production.....42
Tableau 2.4	Capacités des centres de distribution et des centres de collectes.....42
Tableau 2.5	Coûts unitaires de transport en dollars et la distance en km43
Tableau 2.6	La politique de production du scénario de base (cas de base).44
Tableau 3.1	la demande en milliers de produits pour les clients pendant une année.....56
Tableau 3.2	Coûts fixes d'activation des usines de production dans les différents sites localisés56
Tableau 3.3	Le tableau récapitulatif des coûts unitaires et au taux de retour et d'élimination.....57
Tableau 3.4	Distance (km) entre Usines et magasins58
Tableau 3.5	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les clients61
Tableau 3.6	Coût annuel de distribution (\$) entre les usines de manufacturing possible et les clients.....61
Tableau 3.7	La quantité annuelle minimale de produits livrés entre l'usine de remanufacturing et le client62
Tableau 3.8	Coût annuel de distribution (\$) entre usine de remanufacturing possible62
Tableau 3.9	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les clients cas de deux usines activées63
Tableau 3.10	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les clients cas de deux usines activées64

Tableau 3.11	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et clients cas où seulement deux usines sont activées64
Tableau 3.12	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et clients cas où seulement deux usines sont activées.65
Tableau 3.13	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 266
Tableau 3.14	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 266
Tableau 3.15	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 2.67
Tableau 3.16	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 2.67
Tableau 3.17	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 368
Tableau 3.18	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 368
Tableau 3.19	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 369
Tableau 3.20	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 369
Tableau 3.21	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 470
Tableau 3.22	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 470
Tableau 3.23	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 4.71
Tableau 3.24	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 4.71
Tableau 3.25	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 572
Tableau 3.26	Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 572

Tableau 3.27	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 573
Tableau 3.28	Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 573
Tableau 3.29	La solution optimale en fonction du nombre site S (usines activées)74
Tableau 4.1	Tableau des données numériques utilisées95

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Exemple du réseau d'une chaîne d'approvisionnement inversée en boucle11
Figure 1.2	Illustration d'un réseaux de logistique inverse en boucle fermée adapté.....12
Figure 1.3	La réparation annuelle des articles lus sur la logistique inverse et la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.15
Figure 1.4	La répartition annuelle des articles selon Agrawal et al. (2015).....15
Figure 1.5	La répartition des articles en fonction des revues.16
Figure 1.6	Le diagramme de Pareto en fonction des filières de recherche17
Figure 1.7	Les différentes approches de modélisation des articles sélectionnés.....19
Figure 1.8	Répartition annuelle des modèles mono/multipériodes.20
Figure 1.9	Analyses mono-objectives et multiples objectifs.....20
Figure 1.10	Analyse des approches mono-produit et multi-produit.....21
Figure 2.1	Le structure du réseau global.30
Figure 2.2	Illustration du réseau étudié32
Figure 2.3	Illustration de la chaîne simplifiée avec les variables.....33
Figure 2.4	La politique optimale du scénario de base (cas de base).45
Figure 2.5	La quantité de produits manufacturés et de produits remanufacturés.....47
Figure 2.6	La quantité de produits manufacturés et remanufacturés avec un taux 85 %.....48
Figure 2.7	La quantité de produits manufacturés et remanufacturés48
Figure 2.8	La quantité de produits manufacturés et remanufacturés49
Figure 3.1	Le réseau étudié tiré de Daskin, M. S., (1995).54

Figure 3.2	Variation du coût annuel minimal de distribution dans différents magasins75
Figure 3.3	Variation du coût fixe de manufacturing et de remanufacturing en fonction du nombre de dépôts activés.....75
Figure 3.4	Variation du coût annuel minimal de distribution dans différents magasins76
Figure 3.5	Le réseau logistique proposé.....77
Figure 3.6	Variation des coûts de manufacturing et de remanufacturing78
Figure 3.7	Variation du taux de retour de 0.25 à 0.80.....79
Figure 3.8	Les coûts totaux en fonction des taux de retour.....80
Figure 3.9	Variation du taux d'élimination de 20% à 80%.....81
Figure 3.10	Variation du coût total avec un taux d'élimination.....81
Figure 4.1	Le système manufacturier étudié avec les taux de production85
Figure 4.2	Le diagramme des états de la chaîne de Markov87
Figure 4.3	Le diagramme complet des états de transition.....87
Figure 4.4	La productivité de la Machine M1 au mode 997
Figure 4.5	Taux de production au mode 9 pour la Machine M197
Figure 4.6	Taux de production de la machine de remanufacturing 198
Figure 4.7	Taux de production de la machine de remanufacturing 199
Figure 4.8	Taux de production de la machine de manufacturing M1100
Figure 4.9	Taux de production de la machine de remanufacturing R1101
Figure 4.10	Taux de production de la machine de manufacturing M1102
Figure 4.11	Taux de production de la machine de remanufacturing R1103
Figure 4.12	Variation du seuil critique en fonction des coûts de pénurie105
Figure 4.13	Influence du coût de manufacturing avec un taux de retour de 25%.....106
Figure 4.14	Influence du coût de manufacturing avec un taux de retour 50%.....106

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CLSC	Closed Loop Supply Chain
GES	Gaz à Effet de Serre,
SCLSC	Sustainable Closed Loop Supply Chain

INTRODUCTION

De nos jours, les entreprises fonctionnent dans un contexte économique où la pollution et la rareté des ressources naturelles occupent une place importante dans la gestion des chaînes d'approvisionnement (Mbarek et *al.*, 2014). Cette situation affecte considérablement le processus de gestion de la chaîne d'approvisionnement dans les usines. Dans un tel contexte, le problème de la planification des activités des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée se pose. La gestion des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée fait référence à tous les processus directs de la chaîne logistique tels que l'achat de matières premières, la production et la distribution, mais aussi les processus inverses comme la collecte et le retraitement de produits usagés (Mtalaa & Aggoune, 2010).

Compte tenu de l'enjeu de la gestion des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée, de nombreuses études ont été menées pour trouver la meilleure façon de planifier les activités de ces types de réseau. Cependant, le questionnement sur les problèmes liés à la planification des chaînes logistiques en boucle fermée est encore relativement récent dans la littérature. De ce fait, la gestion de chaîne d'approvisionnement durable en boucle fermée s'impose comme une nouvelle approche, car elle prend l'initiative d'intégrer les préoccupations environnementales et sociales dans la gestion tout au long du cycle de vie produit (El Bounjimi, 2016). De plus, on ne peut pas parler de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée sans parler de la logistique inverse, si toutefois celle-ci contient les traces nécessitant sa réactualisation afin de s'ouvrir au développement durable. Ce processus aura lieu dans le cadre d'une extension du concept de la logistique inverse ou même sur l'ensemble de ces activités. Il s'agit de la conception d'une chaîne d'approvisionnement permettant aux systèmes manufacturiers de combiner les activités comme la production et la réutilisation tout en respectant sans nuire son environnement.

En effet, combiner la production et le recyclage des produits retournés s'avère de nos jours un impératif dont il faut tenir compte dans les chaînes d'approvisionnement, surtout s'il s'agit principalement de la réutilisation directe, de la réparation, de la remise en état ou du recyclage

des matériaux. Le problème qui se pose dans ces cas de figure est de savoir comment planifier la production de manière à satisfaire la demande et minimiser le coût total du système dans une chaîne d'approvisionnement caractérisée par des incertitudes (les retours, les matières premières, les pannes et les réparations). La décision devient complexe si les produits retournés présentent des différentes étapes de recyclage (la collecte, le démantèlement, la remise à neuf ou la fabrication des matières premières). De ce fait, une gestion efficace de production et le recyclage des produits usagés sont indispensables afin de consolider les différents maillons de la chaîne, sans oublier la nature dynamique et stochastique de l'environnement à laquelle la chaîne d'approvisionnement est assujettie (Kouedeu, 2014).

Dans ces conditions, il est incontestable qu'il y a un besoin pressant de recherche sur le développement des techniques d'optimisation intégrant les objectifs tactiques et opérationnels. En effet, cela demande aux gestionnaires une attention particulière afin de réviser en tout temps leurs approches courantes dans le but de mieux exploiter les équipements mis à leur disposition. De ce fait nous souhaitons proposer un outil d'aide à la décision pour permettre aux industriels de gérer adéquatement leurs activités, tout en permettant une adaptation rapide aux changements inattendus de leur environnement et en demeurant attentifs aux besoins du marché (Chouinard, 2003). L'objectif principal de ce mémoire s'avère donc être le développement d'un outil d'aide à la décision permettant la gestion des flux de produits dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres. Dans le **chapitre 1**, nous présentons une brève description de la logistique inverse et des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée. Nous allons dans ce même chapitre effectuer une revue critique de la littérature et situer notre travail par rapport aux travaux qui ont déjà été faits dans le domaine. Dans le **chapitre 2**, nous allons proposer un modèle générique de programmation linéaire pour planifier des activités des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée dans le domaine manufacturier. Nous aborderons à travers cet outil deux problèmes qui sont celui de la gestion des produits remanufacturés dans une chaîne logistique inverse en boucle fermée et celui de la fabrication de nouveaux produits dans une chaîne d'approvisionnement direct (Desport, 2017). Ce travail

comprendra la modélisation mathématique, la résolution et une analyse de sensibilité. Ensuite, le **chapitre 3** sera consacré à l'application du modèle générique à un problème spécifique tiré dans la littérature. Finalement, dans le **chapitre 4**, nous allons proposer un modèle de planification permettant de tenir compte des décisions opérationnelles. Dans ce même chapitre, nous allons traiter quatre machines sujettes à des phénomènes de pannes et réparations, dont le taux demande est constant et l'approvisionnement se fait en continu. Cela comprendra les points clés suivants : la formulation du problème; la modélisation du problème, les conditions optimums et la résolution numérique basée sur la méthode de Kushner & Dupuis (1992) ainsi que l'analyse de sensibilité.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ET DÉFINITION DE LA LOGISTIQUE INVERSE

1.1 Introduction

La première partie de ce chapitre consiste à présenter la définition de la logistique inverse, les différentes activités de la logistique inverse ainsi que les différentes configurations de la logistique inverse. Dans la deuxième partie, nous allons présenter une synthèse des travaux publiés entre 2012 et 2017 pour cerner les enjeux des usines du futur. La troisième partie pour terminer, exposera le contexte global de notre problématique de recherche et situera sa position par rapport aux travaux récents.

1.2 La définition de la logistique inverse

La logistique inverse est définie comme étant un système de gestion des produits retournés. Cependant, d'autres auteurs, à l'instar de Fleischmann (2001) et de Rogers & Tibben-Lembke (1999), ont cherché à élargir sa définition en s'appuyant sur celles définissant une chaîne d'approvisionnement. Selon Fleischmann (2001), la logistique inverse est un processus qui englobe les activités de la chaîne traditionnelle et les activités de récupération des produits utilisés afin de leur donner à nouveau une valeur sur le marché. Néanmoins, bien que cette définition soit complète et qu'elle trace tous les processus d'une chaîne d'approvisionnement, elle demeure complexe (Fall, 2016). C'est pourquoi nous proposons dans ce mémoire une définition générique de la logistique inverse. La logistique inverse est une chaîne d'approvisionnement dont le processus permet la fabrication de nouveaux produits et la réutilisation des produits usagés provenant des clients. Celle-ci peut être en boucle ouverte ou en boucle fermée.

1.3 Les intérêts de la logistique inverse

Pour régler les problèmes du réchauffement climatique et la rareté des ressources naturelles (matières premières), les gestionnaires se tournent vers la logistique inverse, ce qui fait que les problèmes de conception de réseaux manufacturiers ne sont plus abordés de la même façon. En effet, de nos jours, les aspects socio-environnemental et économique du développement durable occupent une place importante dans la prise de décisions managériales ; donc l'aspect économique n'est plus le seul à être considéré. Du point de vue environnemental, la logistique inverse s'intéresse à l'émission des gaz à effet de serre et à l'écoconception des produits tout comme l'a fait Trochu Jullien (2015). Pour bien cerner les intérêts de la logistique inverse, nous verrons dans le paragraphe suivant les différents types d'activités de la logistique inverse.

1.3.1 Les activités impliquées dans logistique inverse.

En vue des perspectives organisationnelles du développement durable, les entreprises de nos jours visent à redéfinir les activités de leurs chaînes d'approvisionnement afin de garantir un certain niveau de planification pour la récupération et le traitement des produits usagés, et ce, dans le but de réduire l'impact des incertitudes généralement rencontrées avec la logistique inverse. En assurant une intégration adéquate des activités de la logistique inverse aux activités principales, les organisations seront incitées à les structurer et à les organiser. Cela conduira les entreprises à utiliser trois principales activités après la collecte et le tri des produits en fin de vie, à savoir la réutilisation, la refabrication et le recyclage.

1.3.2 La collecte et le tri des produits en fin de vie.

Le déploiement de biens peut influencer de manière considérable et positive les comportements de rachat des produits chez les clients et fournir des preuves que certains d'entre eux devraient être considérés comme prioritaires dans le processus de retour (Griffis, Rao, Goldsby, & Niranjana, 2012) ; en effet les produits sont collectés auprès d'eux, puis des processus appropriés sont effectués afin que le recyclage soit fait de manière écologique (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015). La collecte des produits usagés a un objectif bien ciblé : elle sert

à la consolidation des retours. Effectivement, les activités de récupération et de traitement des produits usagés ne deviendront bénéfiques que si la quantité des produits retournés a pu être cumulée. Toutefois, les activités de collectes peuvent avoir un impact défavorable sur le service de la clientèle lorsqu'elles sont mal abordées. Par exemple, en restreignant le nombre de points de collecte, on obligera les clients à assumer des frais supérieurs pour retourner leurs produits. Le nombre de produits retournés pourra alors être moindre, ce qui aura un impact sur les coûts de traitement. Dans ce cas, une solution devrait être proposée par l'entreprise afin de renforcer le rapport client et entreprise. Cette solution pourrait être de proposer une valeur aux clients dans le but de les inciter à retourner les produits usagés. Cela permettra aux organisations d'œuvrer dans le domaine du social et de s'assurer que les activités soient réalisées de manière efficiente. Après avoir collecté les produits usagés, une activité de tri est mise en place pour les orienter vers les lignes adéquates de récupération. Le choix des alternatives de traitement des produits récupérés constitue toutefois une tâche complexe, plus particulièrement lorsqu'il s'agit d'orienter les produits récupérés dans la suite de leur cycle de vie, étant donné la multitude de facteurs à considérer (Krikke, van Harten, & Schuur, 1998). Selon Chouinard (2003), les divers facteurs dont il faut tenir compte sont les suivants :

- La faisabilité technique :
- Caractéristiques du produit récupéré (spécificités techniques, raison du retour, état, loi de dégradation) ;
- Procédures de désassemblage ;
- Ressources disponibles (équipements, main-d'œuvre, etc.) ;
- La faisabilité commerciale ;
- Débouchés au niveau de la boucle d'approvisionnement (boucle ouverte ou fermée) ;
- Politique de l'organisation ;
- Impact de la réintégration des produits sur le marché ;
- La faisabilité environnementale ;
- Respect des contraintes législatives ;
- Disposition propre des produits et de leurs composants ;
- Le flux de matériel ;

- Approvisionnement approprié en produits et composants inutilisés ;
- Demande pour les produits, les composants ou les matériaux valorisés ;
- Niveau des stocks ;
- Les coûts et les bénéfices économiques et environnementaux.

1.3.3 La réutilisation

La réutilisation est la seule activité qui permet de revaloriser un produit usagé dans un but de le revendre sur le marché au même titre que le produit originel. Souvent, la réutilisation fait appel à des opérations simples telles que le nettoyage ou une maintenance mineure lorsqu'il s'agit d'un produit retourné parce qu'il ne respecte pas les besoins de la clientèle. La réutilisation concerne aussi le démantèlement des produits non récupérables en pièces détachées dans le but de les réutiliser. Cependant, l'avantage est moindre lorsqu'une main-d'œuvre de plus en plus spécialisée est exigée, comme c'est souvent le cas dans le cadre des activités de refabrication (Chouinard, 2003).

1.3.4 La refabrication

La refabrication est un processus qui fait appel à des activités telles que le reconditionnement, le réassemblage, la cannibalisation et le recyclage dans le but de retraiter et de réutiliser des produits récupérés dans une fonction similaire ou différente de celle pour laquelle ils ont été conçus. Toutefois, ces activités n'étant pas exclusives, on peut effectuer des activités de recyclage avec les produits destinés au reconditionnement ou au réassemblage. Cependant, différents niveaux de recyclage sont nécessaires afin d'effectuer ces activités. La refabrication offre diverses alternatives de valorisation, soit celles qui peuvent s'appliquer aux produits jamais utilisés par les clients ou des produits qui ont été retournés par les clients.

1.3.5 Le recyclage

Selon Rogers & Tibben-Lembke (1999), le recyclage est une activité qui collecte et démantèle les produits en fin de vie en vue de les réduire en matériaux (matières premières). Ces matériaux servent éventuellement à la fabrication de nouveaux produits.

Les matériaux ainsi recyclés peuvent être contrôlés de manière à alimenter exclusivement les activités de production de la chaîne originale d'approvisionnement, créant ainsi une boucle fermée d'approvisionnement, ou encore servir à une réutilisation diffuse, dans le cadre d'une boucle ouverte d'approvisionnement. Comme c'est le cas dans l'industrie du papier ou de l'aluminium (Chouinard, 2003).

1.3.6 L'élimination des déchets

L'élimination des déchets constitue la dernière étape où passe les produits usagés. Cette étape consiste à la suppression sécuritaire des déchets produites par les activités préalablement décrites. Elle comprend notamment l'entreposage des déchets en lieu sécuritaire pour les matières dangereuses, l'incinération ou l'enfouissement.

1.4 Les différents types de réseaux de la logistique inverse

Depuis le début de la révolution industrielle, le monde a connu une croissance importante de la taille des industries et du niveau de complexité organisationnel au sein de ces dernières (Frederick S. Hillier & Lieberman, 2009). Cette augmentation se traduit par des chaînes d'approvisionnement de plus en plus diversifiées et complexes à gérer. Une chaîne d'approvisionnement, sous sa forme classique (chaîne d'approvisionnement directe), est une combinaison de procédés incluant un ensemble d'entités, parmi lesquelles on retrouve les fournisseurs, les fabricants, les transporteurs, les entrepôts et les détaillants, dans le but de répondre aux demandes des clients (Chopra & Meindl, 2014). Chacune de ces entités se greffe à un ensemble de défis et de problématiques que doivent surmonter les industriels. On peut ainsi citer le problème de gestion optimale des ressources de l'entreprise qui vise à minimiser les coûts de production ou à maximiser les profits. Plusieurs auteurs se sont intéressés à ce

sujet et ont développé de nombreuses approches et plusieurs modèles de gestion pour assister les gestionnaires. Ces modèles peuvent être classés selon qu'ils traitent des environnements manufacturiers à deux échelons ou plus. Dans le premier cas s'inscrit à titre d'exemple le travail de Rivera-Gómez, Gharbi, Kenné, Montaña-Arango, & Hernandez-Gress (2016) qui porte sur un problème de planification de la production pour répondre à une certaine demande. Les deux échelons sont l'entreprise manufacturière et la clientèle. Dans le même ordre d'idées, nous avons aussi le travail de Elbounjimi, Abdul-Nour, & Ait-Kadi (2015). Malgré ces efforts considérables, un point d'ombre est toujours d'actualité dans le milieu industriel. La dégradation des ressources naturelles et une forte demande présente sur le marché poussent les gestionnaires à se poser des questions sur le cycle de vie des produits. Les questions sont les suivantes : que deviennent les produits après utilisation chez les clients ? Est-ce qu'ils sont récupérables ou non récupérables ? De nos jours, la gestion des déchets est une partie intégrante de l'entreprise, ce qui fait que les gestionnaires s'intéressent particulièrement à une chaîne logistique inverse qui se préoccupe de ces déchets et permet aux produits usagers d'emprunter le chemin inverse et ainsi de remonter la chaîne d'approvisionnement des clients vers les usines de production, afin de les valoriser (Fall, 2016). En logistique inverse, il existe deux types de configuration du réseau : la logistique inverse en boucle fermée et la logistique inverse en boucle ouverte (Thierry, Salomon, Van Nunen, & Van Wassenhove, 1995 ; Yotat & Eric, 2017). Nous allons définir ces différents types de configuration dans les paragraphes suivants.

1.4.1 La logistique inverse en boucle ouverte.

Dans la logistique en boucle ouverte, les produits en fin de vie ne sont pas directement retournés au producteur initial. Les produits récupérés sont utilisés par une autre entreprise ou par l'entreprise elle-même. Dans ce cas, les matériaux récupérés pourront être réutilisés pour créer un produit similaire à celui conçu à l'origine ou un produit différent.

On retrouve souvent ce type de configuration sur le marché de l'électronique, plus particulièrement sur le marché des téléphones cellulaires. En effet, si l'on en croit Geyer et Blass (2010), les téléphones cellulaires offrent donc l'occasion rare de comparer les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée pour la réutilisation et le recyclage des appareils électroniques en fin de vie. Dans leurs travaux, ils ont examiné les aspects économiques de la

réutilisation et du recyclage des téléphones portables sur la base de données primaires détaillées recueillies lors d'opérations de logistique inversée, de réutilisation et de recyclage en 2003 au Royaume-Uni et en 2006 aux États-Unis (Geyer & Blass, 2010). En guise d'exemple, nous présentons le réseau que Gou, Liang, Huang, & Xu (2008) ont étudié dans leurs travaux de recherche. Ils ont étudié une chaîne d'approvisionnement inversée en boucle ouverte qui comprend un seul centre de retour centralisé CRC et plusieurs points de collecte locaux PCL. Le réseau est présenté dans la Figure 1-1 ci-dessous.

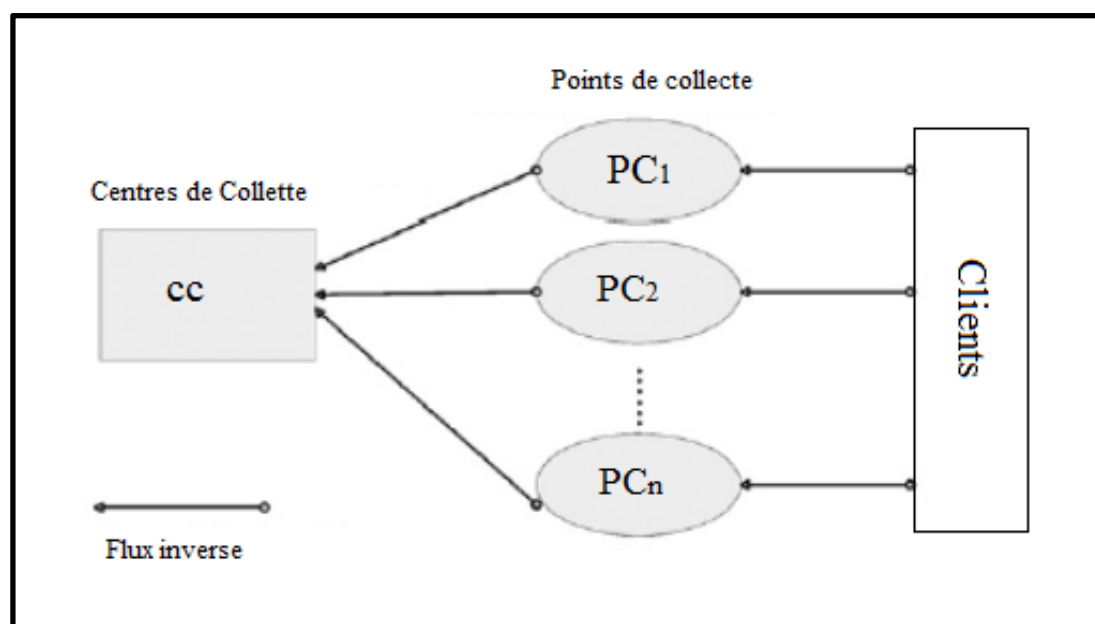


Figure 1.1 Exemple du réseau d'une chaîne d'approvisionnement inversée en boucle ouverte adapté de Gou, Liang, Huang et Xu (2008)

1.4.2 La logistique inverse en boucle fermée.

Pour sa part, la logistique inverse en boucle fermée définit un réseau dans lequel les produits retournés seront recyclés pour donner un nouveau produit dans la même entreprise. Il peut également s'agir d'une entreprise ayant un rôle qui s'ajoute à la chaîne d'approvisionnement afin de valoriser les produits usagés collectés dans la chaîne (Chouinard, 2003). Pour aller plus loin, d'autres y ajoutent l'écoconception des produits et la limitation des taux d'émissions de

gaz à effet de serre (GES) par la chaîne de l'entreprise pour être en phase avec le développement durable. En effet, les travaux de Trochu, J. (2015) en sont un parfait exemple. Dans ces travaux, il a mis en évidence le fait que l'introduction d'une gamme de produits verts présente un réel intérêt dépendamment du prix d'acquisition des composants éco-conçus, ainsi que dans le cas d'un renforcement futur des législations (Trochu, 2015). Tout cela aboutit à une amélioration de la chaîne d'approvisionnement traditionnelle vers une chaîne d'approvisionnement durable en boucle fermée pour atteindre l'efficacité des usines du futur. Khor & Udin (2012) ont défini un graphe décrivant le réseau d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée. Ce graphe définit la circulation du produit dans un système manufacturier en boucle fermée. Il montre la ligne directe et les différents niveaux de recyclage. Le schéma est illustré dans la Figure 1-2.

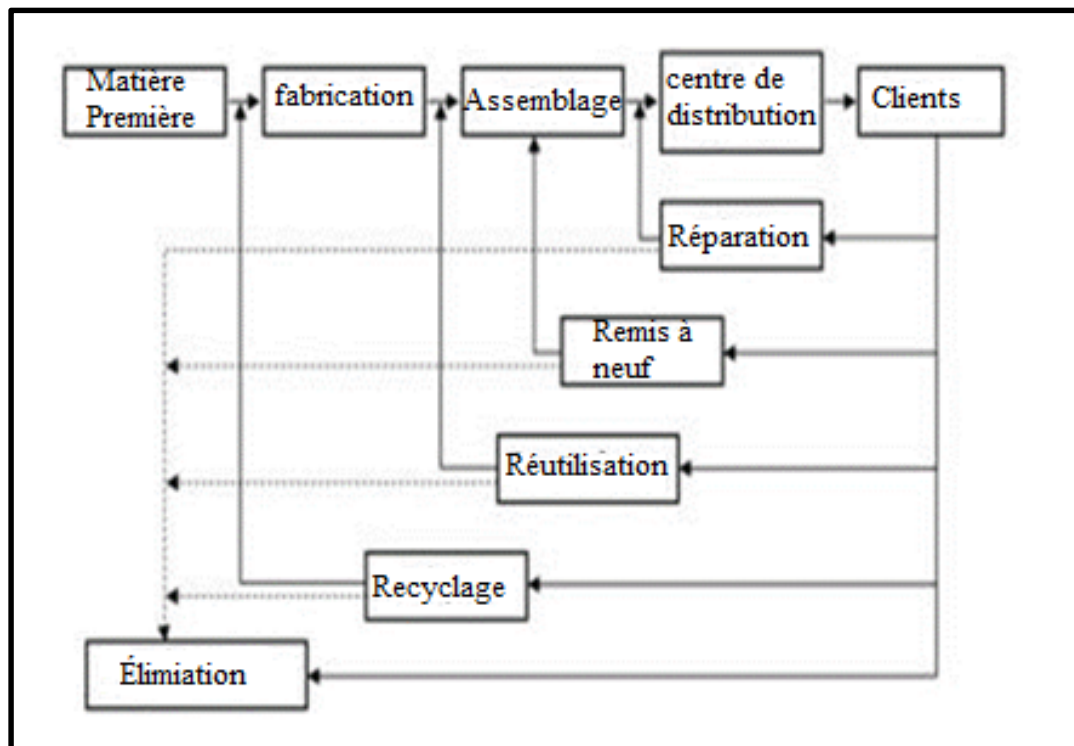


Figure 1.2 Illustration d'un réseaux de logistique inverse en boucle fermée
adapté Khor & Udin, 2012

1.5 Synthèse et classification des travaux scientifiques sur la logistique inverse.

Pour cerner les enjeux des usines du futur, un état de l'art des documents récents sur SCLSC et la logistique inverse en boucle fermée est à envisager. Cette présente revue permet de faire un état des lieux de la recherche des sujets qui combine les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée et le développement durable.

1.5.1 La méthodologie de collecte de documents

Après avoir tenu compte des différentes méthodes de documentation trouvées dans la littérature, une méthode de documentation propre à notre sujet de recherche sera établie de façon à critiquer l'état actuel des connaissances. Il faut noter que les articles de revue scientifique consultés ont proposé des méthodes de recherche de documents scientifiques. Certains de ces articles proposent de consulter les personnes compétentes dans le domaine du sujet. En revanche, d'autres ont mené des études couvrant tous les documents publiés en ligne, principalement les documents de revue scientifique rédigés en anglais. Avec des mots-clés, ils ont trouvé des documents scientifiques publiés dans des revues internationales à partir des principales sources de bibliographies électroniques (ScienceDirect, Web of Science). Le but est de collecter des sources antérieures pertinentes afin de recueillir des articles de recherche ayant un rapport avec le sujet. Des enquêtes récentes ont également été recensées dans des domaines connexes à leurs sujets afin de trouver d'autres sources, y compris quelques articles de conférence.

Des moteurs de recherche comme Google Scholar (www.scholar.google.com) et des sites Web ainsi que certains services de bibliothèque en ligne (par exemple Scopus : www.scopus.com, Metapress : ww.metapress.com) sont aussi utilisés. Maintenant que nous avons passé en revue les méthodes de recherche, une technique de recherche est adoptée pour une collecte des documents publiés dans le cadre de notre domaine d'étude. Cette technique est basée sur les six étapes suivantes :

- La première étape consiste à déterminer les mots-clés du sujet.
- Une fois les mots-clés définis, une recherche en ligne est effectuée afin d'identifier si nous avons tous les synonymes ou autres mots-clés pertinents. Notre but est de les combiner

pour couvrir un vaste domaine d'étude dans le cadre d'une période antérieure à 2017 (entre 2012 et 2017).

- Après avoir obtenu les mots-clés, la recherche est effectuée dans les bases de données de Scopus et Compendex & Inspec. Ensuite, la même recherche est réalisée dans la base de données de Google Scholar avec les mêmes mots-clés pour couvrir le maximum de documents. Cette recherche cible principalement les articles rédigés en anglais, mais aussi les documents publiés dans d'autres langues.
- Avec ces outils de recherche, nous avons procédé à un premier triage des documents en fonction des mots-clés proposés dans la zone de limitation. Par la suite, une recherche effectuée dans Scopus a permis de faire un premier classement des articles en fonction de leur impact dans notre domaine de recherche. Les articles les plus cités ont été classés comme les plus pertinents.
- Afin de garantir la couverture des parutions récentes, la même étude est réalisée pour retrouver les documents publiés en 2017 avec les mêmes mots-clés.
- Une recherche est effectuée dans la banque de données de Web of Science dans le but de contrôler l'authenticité des résultats obtenus aux étapes précédentes.
- Finalement les articles les plus appropriés sont sélectionnés en fonction de nos objectifs, plus précisément les articles qui présentent un sujet dans les domaines de la logistique inverse et des chaînes d'approvisionnement durable. Les revues sont classées et examinées en fonction de leur niveau de pertinence.

1.5.2 Classification annuelle des articles publiés entre 2012 et 2017.

Après avoir combiné et saisi les mots-clés dans la base de données de recherche Scopus, 199 articles publiés entre 2012 et 2017 ont été sélectionnés comme illustré dans la Figure 1-3 ci-dessous. Ce graphique montre l'évolution dans le temps du nombre d'articles sélectionnés dans les deux domaines (la logistique inverse et les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée) entre 2012 et 2017. Cette plage d'année a été choisie selon les études de Fall (2016) et Agrawal, Singh, & Murtaza (2015). Comme nous pouvons le voir dans la Figure 1-3 qui représente la

répartition annuelle selon Agrawal et al. (2015), c'est effectivement à ce moment que la logistique inverse a commencé à susciter un plus grand intérêt.

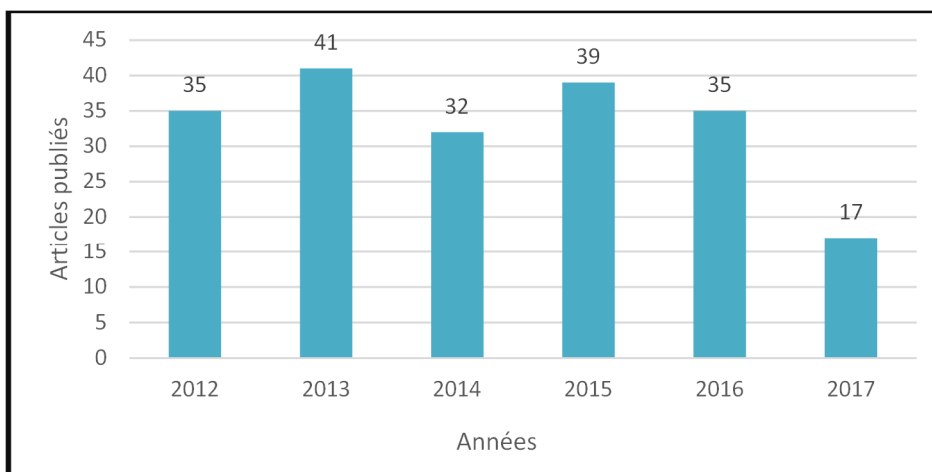


Figure 1.3 La répartition annuelle des articles lus sur la logistique inverse et la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

Le graphique représenté dans la Figure 1-3 montre l'évolution dans le temps du nombre d'articles sélectionnés dans les deux domaines (la logistique inverse (RL) et les chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée (CLSC)) entre 2012 et 2017. Le plus grand nombre d'articles (41) a été publié en 2013. Cependant, on note une baisse de publication en 2017. Comme on peut le voir la figure 1-4 montre l'analyse semblable effectuée par Agrawal et al. (2015).

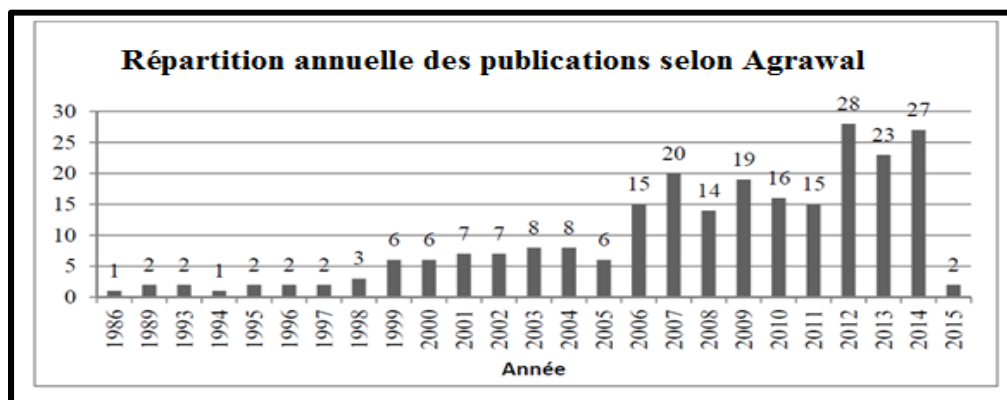


Figure 1.4 La répartition annuelle des articles selon Agrawal et al. (2015) entre 1986 et 2015.

1.5.3 La distribution des articles selon les revues scientifiques

Les articles sont distribués en fonction des revues qui les ont publiés. La Figure 1-5 ci-dessous montre la distribution des documents en fonction des journaux. Les revues avec plus de trois publications y sont illustrées. Parmi les revues, deux étaient nettement plus actives. Ces revues sont les suivantes : *International Journal of Production Economics* qui compte 21 articles à son actif et *International Journal of Production Research* qui en compte 17. Les articles publiés dans ces revues sont pour la plupart des études quantitatives et analytiques.

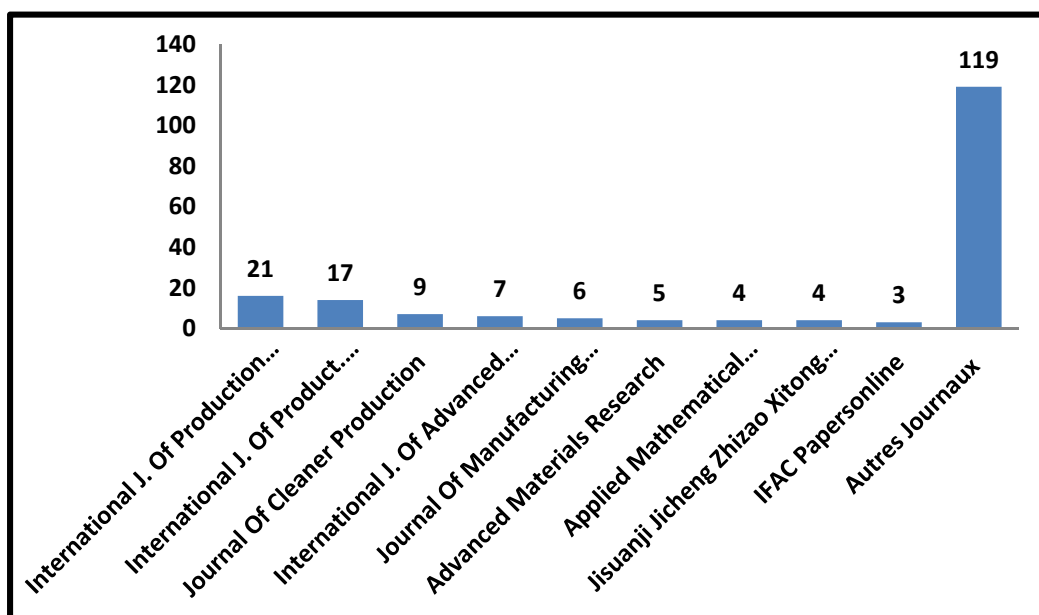


Figure 1.5: La répartition des articles en fonction des revues.

1.5.4 Sélection et classement en fonction des domaines d'études des articles

Les dimensions structurelles de cette étude et les principaux sujets d'analyse abordés sont classés dans le Tableau 1-1 présenté dans l'annexe II. Ils sont fondés sur les analyses des différents aspects d'articles retenus et examinés. Nous avons mis en place un critère lors de notre catégorisation : il s'agit de retenir les articles les plus cités à partir de 2012. Ces articles sont présentés dans le tableau 1-1 ci-dessous, selon leur domaine d'études. Ces domaines d'études concernent : **le Chaîne d'approvisionnement en boucle ouverte,**

Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (Closed Loop Supply Chain = CLSC), le manufacturing / remanufacturing et le développement durable et Le comportement du client. Les publications les plus marquantes dans ces domaines d'études sont citées dans différentes sortes de bases de données.

1.5.5 Classification des articles en fonction des filières de recherche

Cette présente étude nous permet de classer les articles en fonction des filières de recherche. L'analyse de Pareto de la Fig. 1.6 précise que 82.10 % des publications dans SCLSC sont entreprises dans cinq domaines, décrits comme suit : ingénierie ; management de gestion et de comptabilité ; informatique ; sciences de la décision ; et les mathématiques.

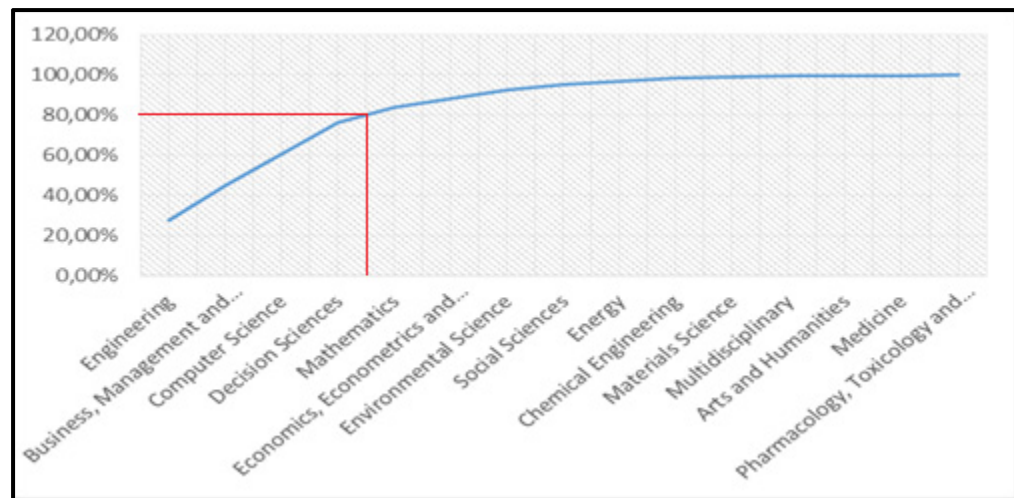


Figure 1.6 Le diagramme de Pareto en fonction des filières de recherche

1.5.6 Les différents niveaux décisionnels

Il existe trois niveaux de prise de décision basés sur le temps dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement (Chopra et Meindl, 2010) ; (Govindan et Souliemani, 2016). Ces niveaux comprennent la prise de décision stratégique (à long terme), la prise de décision tactique (à moyen terme) et opérationnelle (prise de décision à court terme) (Mtalaa et Aggoné, 2010). Le niveau stratégique présente tous les choix dans la conception des réseaux logistiques. Ces choix peuvent être basés sur la localisation et les dimensions des usines et du nombre optimal de

fournisseurs, distributeurs et usines de la chaîne. La décision tactique se penche sur l'optimisation des flux et des services tout au long du réseau logistique. Le niveau opérationnel s'occupe de l'ordonnancement de la production des usines du réseau en tout temps. À chaque niveau de décision, on adopte un modèle d'optimisation.

Les articles sélectionnés dans cette étude sont analysés dans cette perspective afin d'évaluer les différentes variables de décision des documents. Le Tableau 1-1 présente le classement des articles en fonction des niveaux de décision et définit les problèmes traités.

Tableau 1.1: Les différents niveaux de décision et les problèmes traités

Niveau de décision	Stratégique	Tactique	Opérationnelle
Nombres d'articles	(82)	(29)	(2)
Les problèmes traités aux différents niveaux de décision	1-Les problèmes de localisation (centre de collection, de réutilisation, etc.) 2-La décision stratégique concernant le comportement du client à vouloir retourner le produit en fin de vie. 3- L'utilisation des équipements spécialisés dans la chaîne.	1-Le besoin des produits en fin de vie 2-Les différents niveaux de recyclage 3- Les problèmes d'inventaire des produits (neuf ou usagé)	1-La planification du désassemblage des produits retournés. 2- L'ordonnancement des priorités en fonction des caractéristiques des produits collectés. 3- déterminer la politique optimale de production en fonction des stratégies de maintenance

La plupart des articles trouvés dans la documentation sont plutôt de niveau stratégique et tactique ; rares sont ceux qui sont du niveau opérationnel.

1.5.7 Les différents types de modèles.

Dans cette partie, une étude des différentes approches de modélisation a été menée. Cette étude nous a permis de classer les articles en fonction des approches de modélisation utilisées par les

auteurs. Les différents modèles rencontrés dans la littérature sont les modèles déterministes (programmation linéaire en nombres entiers et mixtes et programmation non linéaire) et les modèles stochastiques (programmation stochastique). Cette étude montre que la programmation linéaire mixte en nombre entier est l'approche la plus utilisée parmi les documents sélectionnés. L'approche de la description conceptuelle et la simulation viennent respectivement en deuxième et troisième position. L'étude est représentée dans la Figure 7.

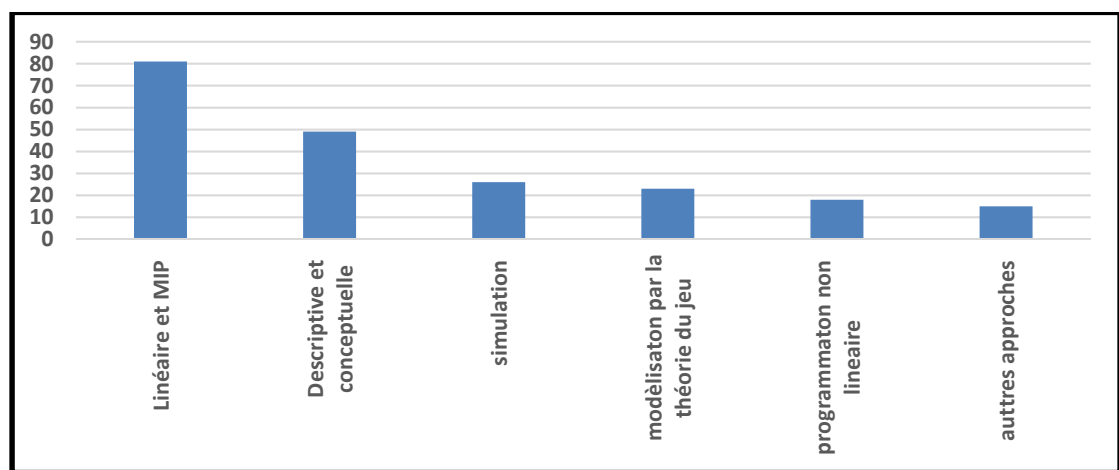


Figure 1.7: Les différentes approches de modélisation des articles sélectionnés

Parmi les articles sélectionnés, on remarque que beaucoup d'articles ont développé des modèles monopériode et multiproduit. Les figures suivantes présentent en détail les approches prenant en compte différents objectifs, périodes et produits. Celles-ci permettent de montrer l'évolution annuelle des articles en fonction des modèles. Ces figures sont inspirées des résultats de Govindan et al. (2015).

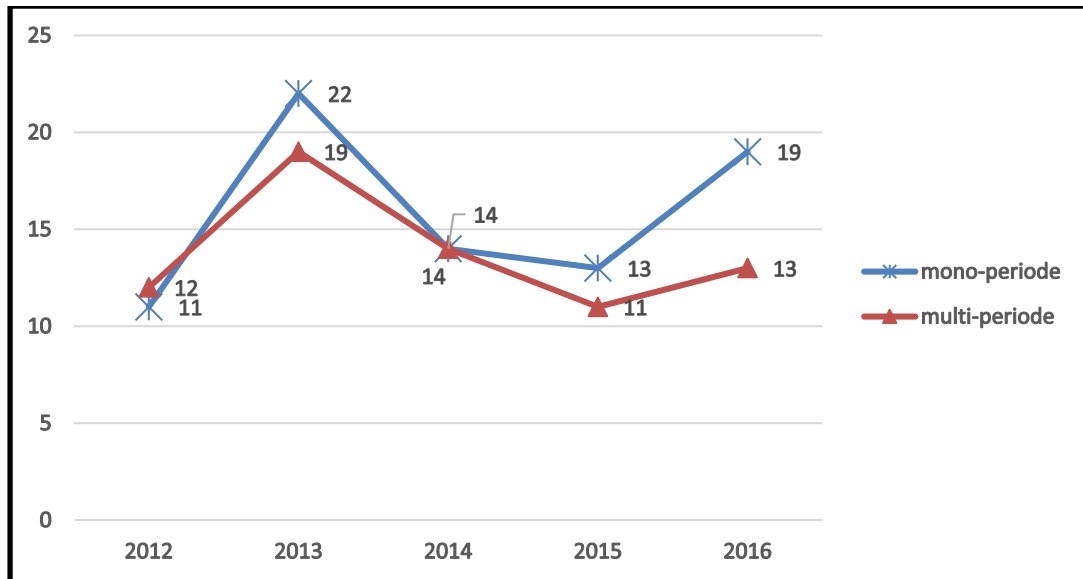


Figure 1.8 Répartition annuelle des modèles mono/multipériodes.

L'analyse de la Figure 1.8 montre que les articles présentant des modèles monopériodes sont plus élevés que les articles présentant des modèles multipériodes.

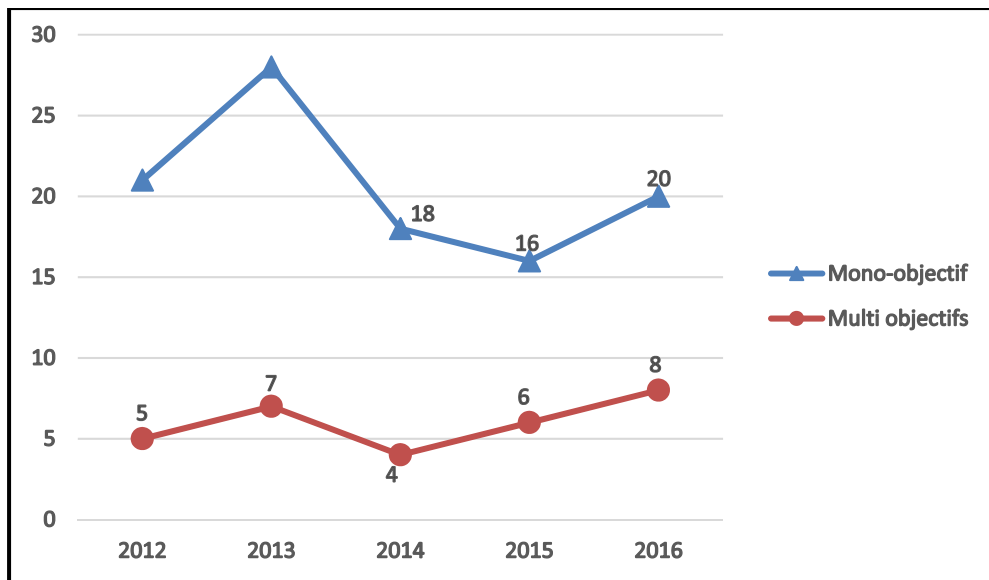


Figure 1.9: Analyses mono-objectives et multiples objectifs en fonction des années.

La Figure 1-9 ci-dessus présente le nombre d'articles utilisant des approches à mono-objectifs et multiobjectif au cours des différentes années de notre étude. Dans cette analyse, les articles

présentant le modèle multiobjectif sont peu nombreux que les articles présentant les modèle mono-objectif.

En outre, la Figure 1.10 montre que peu de recherches ont été menées sur des modèles multiproduits par rapport aux modèles monoproduits. Il semble que les difficultés informatiques de l'approche multiproduit expliquent ces résultats.

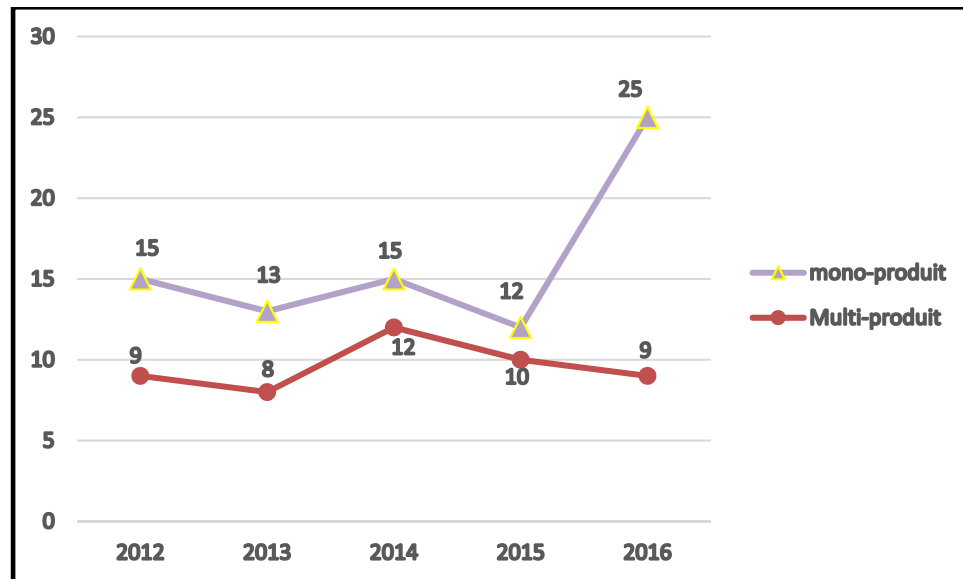


Figure 1.10: Analyse des approches mono-produit et multi-produit en fonction des années

1.6 Les problèmes liés à la logistique inverse

Depuis le début de la révolution industrielle, le monde a connu une croissance importante de la taille des industries et du niveau de complexité organisationnel au sein de ces derniers (Frederick S Hillier, 2012). Ceci se traduit par des chaînes d'approvisionnement de plus en plus diversifiées et complexes à gérer. Une chaîne d'approvisionnement, sous sa forme classique (chaîne d'approvisionnement directe), est une combinaison de procédés incluant un ensemble d'entités, parmi lesquelles on peut trouver les fournisseurs, les fabricants, les transporteurs, les entrepôts et les détaillants, dans le but de répondre aux demandes des clients (Chopra & Meindl, 2014). À chacune de ces entités se greffe un ensemble de défis et de

problématiques que doivent surmonter les industriels. On peut ainsi citer le problème de gestion optimale des ressources de l'entreprise dans le but de minimiser les coûts de production ou de maximiser les profits. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce sujet et ont développé de nombreuses approches et plusieurs modèles de gestion pour assister les gestionnaires. Ces modèles peuvent être classés selon qu'ils traitent des environnements manufacturiers à deux échelons ou plus. Dans le premier cas, on peut citer à titre d'exemple le travail de Rivera-Gómez et al. (2016) consacré à un problème de planification de la production pour répondre à une certaine demande. Les deux échelons sont l'entreprise manufacturière et la clientèle. C'est dans cette même optique que nous trouvons les travaux de Bouslah, Gharbi, & Pellerin (2016). Malgré ces efforts considérables, un point d'ombre toujours d'actualité dans le milieu industriel est la gestion des ressources de l'entreprise à l'échelle des usines de production. En revanche, les décisions de conception d'une chaîne d'approvisionnements traditionnels comprennent la fabrication des équipements de l'entreprise et impliquent de déterminer le nombre de sites, la localisation des sites ainsi que la capacité des sites. Pour aller plus loin, d'autres y ajoutent la répartition des produits, les clients, les fournisseurs du site et la sélection de modes de transport (El Bounjimi, 2016). La dégradation des ressources naturelles et une forte demande présente sur le marché poussent les gestionnaires à adopter la notion de la durabilité dans la conception des chaînes d'approvisionnement. Cela aboutit à une amélioration de la chaîne d'approvisionnement traditionnelle à une chaîne durable pour atteindre l'efficacité des usines du futur. C'est dans ce sens que les travaux de Trochu (2015) proposent un modèle d'optimisation des chaînes d'approvisionnement. Son modèle tient compte de l'émission de GES (Gaz à Effet de Serre) dans la nature, l'écoconception des produits, l'économie des ressources et la réutilisation des produits en fin de vie. En guise de solution, ils proposent un modèle d'optimisation à trois fonctions objectives, soit la minimisation de l'émission du GES, du coût logistique total à la période et de la compensation annuelle du service de collecte. D'autres auteurs, tout comme Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz (2014), se sont plutôt intéressés à l'intégration des facteurs sociaux et de développement durable dans la conception des chaînes d'approvisionnement multiobjectifs en plus des objectifs économiques. C'est également le cas de Sarkis, Zhu, & Lai (2011) qui classent cette activité comme une intégration des préoccupations environnementales dans la pratique inter-organisation de la chaîne

d'approvisionnement, y compris la logistique inverse. Chaabane, Ramudhin, & Paquet (2012), pour leur part, proposent un programme linéaire en nombres entiers mixtes pour la conception d'une chaîne d'approvisionnement écologique. Le modèle est multipériode, multiproduit et biobjectif. Il est formulé et basé sur les principes de l'analyse de cycle de vie des produits. Il a pour but d'évaluer les compromis entre la minimisation des coûts et la minimisation de la quantité d'émissions de carbone d'une chaîne intégrée des approvisionnements durables en boucle fermée.

1.6.1 Nouvelles considérations en conception des réseaux manufacturiers

En effet, de nos jours, les aspects socio-environnementaux et le développement durable occupent une place prépondérante dans la prise de décisions managériale. L'aspect économique n'est plus le seul indicateur de performance. C'est en fait ce que soulignent Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz (2014) dans leurs études. Ils s'intéressent au développement durable dans le secteur manufacturier et posent le problème de la durabilité des modèles développés. Ils définissent comme gage de durabilité des modèles et du développement durable, trois principales dimensions qui sont la performance environnementale, la responsabilité sociale et la contribution économique. Le modèle développé dans ce travail prend seulement en compte la contribution économique. Les aspects environnementaux et sociaux ne sont pas intégrés. Le modèle obtenu ne répond donc pas aux critères de développement durable selon Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz (2014). Cette dimension pourrait être considérée à travers de nouvelles contraintes et à travers de nouveaux paramètres tels que la pollution au niveau des usines (pollution par usines, par produit), la nuisance sonore des usines, la pollution due aux transports vers les clients, etc. ; de ce fait, la position de notre travail est de mettre en place une chaîne d'approvisionnement permettant d'éviter la pollution par produit.

1.6.2 Technique de modélisation et de résolution des problèmes de réseaux manufacturiers

Dans la littérature, il existe un nombre important de techniques de modélisation et de résolution des problèmes de réseaux manufacturiers plus ou moins adaptées chacune à des situations précises. Les auteurs de la référence (Govindan et al., 2015) ont recensé dans leur travail celles qui sont le plus souvent utilisées par les chercheurs. Leur objectif est de proposer aux gestionnaires un récapitulatif de l'ensemble de ces techniques de modélisation et de résolution ainsi que les conditions qui doivent guider leur choix. Concernant les techniques de modélisation, Govindan et al. (2015) regroupent d'un côté les techniques qui prennent en compte l'incertitude sur les données telles que les diverses approches stochastiques et la logique des nombres flous et de l'autre côté les approches déterministes telles que la programmation linéaire et mixte. Ils classent l'ensemble des méthodes de résolution en sept principales catégories. Ces catégories sont :

- Les méthodes analytiques ou exactes : pour des problèmes à petite échelle ;
- L'utilisation des solveurs exacts généraux : Lingo, GAMS ou CPLEX ;
- Les techniques d'approximation : utilisé aussi pour des problèmes d'optimisation stochastique ;
- Les méthodes heuristiques et les algorithmes métaheuristiques : utilisées pour les problèmes de grande taille ;
- Les méthodes expérimentales et les logiciels : méthodologies très performantes pour la prise en compte des incertitudes dans les situations réelles ;
- Les approches de solutions multicritères (ou multiobjectifs) : pareilles aux approches de la programmation d'objectifs ;
- Les techniques pour l'ordre de priorité par similarité à la solution idéale (TOPSIS) : utilisées pour résoudre des problèmes appropriés.

Par ailleurs Govindan et al. (2015) posent le problème des approches déterministes qui ne sont presque jamais caractéristiques de la situation réelle. L'incertitude est toujours existante même si le niveau peut varier. Devant cette panoplie de méthodes de résolution, la question du choix de la méthode appropriée pour un problème donné se pose presque toujours. Govindan et al.

(2015) y apportent une réponse après analyse des travaux de recherche antérieurs. Cependant, nous pouvons énumérer aussi des travaux qui mettent en confrontation directe l'une ou l'autre de ces techniques afin de montrer à l'aide d'exemples concrets les limites et les forces de chacune. C'est le cas de Bahrampour, Safari, & Taraghdari (2016) qui confrontent un problème de conception de chaîne d'approvisionnement multi-produit à plusieurs échelons, l'utilisation de l'algorithme génétique et l'utilisation de la programmation linéaire associée au Solveur LINGO. Ils ont développé deux modèles, dont l'un qu'ils ont qualifié de faible (comportant comme son nom l'indique un faible nombre d'unités facilitant la résolution du problème) et l'autre de modèle fort (recensant quant à lui un plus grand nombre d'entités rendant sa résolution bien plus complexe). Ces deux modèles ont été résolus à la fois par l'algorithme génétique et la programmation linéaire à l'aide de LINGO. Ils ont trouvé que dans le cadre du modèle faible, LINGO conduit à la solution optimale plus rapidement que l'algorithme génétique qui, lui, arrive à des résultats très convaincants, avec 3 % de différence par rapport à la solution optimale de LINGO. En revanche, lorsque le nombre de clients dépasse 30, la rapidité d'exécution de l'algorithme génétique est meilleure. Par exemple, avec 50 clients, 15 centres de distributions, 10 usines, 3 produits et 2 fournisseurs de matières premières, l'algorithme génétique dévoile une réponse en 145,7 secondes, tandis que la solution provenant de LINGO apparaît au bout de 1352,58 secondes. Les mêmes conclusions sont tirées pour le modèle fort avec lequel le logiciel LINGO atteint vite ses limites et nécessite plus de 6h de travail pour arriver à une solution. L'algorithme génétique ne dépassera pas, dans ce cas, les 924,12 secondes (15 min) pour arriver à la solution. Ce travail de Bahrampour, P et al. (2016) met en exergue la limite d'utilisation de la programmation linéaire sous LINGO, qui serait plus adaptée pour des problèmes de petite taille comme le mentionnent Govindan, K., et al. (2015).

Parmi tous les travaux trouvés dans la littérature traitant de l'optimisation de la gestion de la production en logistique inverse, peu d'entre eux s'intéressent à un modèle générique de grande taille permettant la gestion optimale des flux d'un réseau en boucle fermée. L'originalité de notre travail réside sur le développement d'un outil d'aide à la décision permettant aux gestionnaires de prendre en compte les objectifs à moyen terme et/ou les objectifs à court terme.

1.7 Problématique et objectifs de recherche

Ce présent mémoire de recherche propose de développer et d'évaluer des outils de prise de décision pour accroître les performances de l'usine du futur dans le contexte de l'entreprise étendue, impliquant des fournisseurs et activités de production et de distribution ainsi que des activités liées au retour et à la récupération des produits. La principale proposition est axée sur les défis industriels impliquant la production et la réutilisation de produits usagés. Cela aboutit à une amélioration de la chaîne d'approvisionnement traditionnelle à une chaîne durable pour atteindre l'efficacité des usines du futur. En effet, le problème de planification des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée est un sujet qui a largement été abordé par un bon nombre de chercheurs en raison de son impact sur l'avantage concurrentiel des entreprises ainsi que sur l'environnement. Il existe dans la littérature un nombre important de travaux à ce sujet, qui portent sur différentes problématiques telles que les approches de conception, l'agrégation des produits retournés dans la planification et la modélisation multi-objectifs. De ce fait, le projet vise à développer des modèles génériques et outils d'aide à la décision au niveau tactique et opérationnel.

L'une des problématiques qui a aussi motivé cette étude est la planification de la production des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée soumise à des phénomènes aléatoires tels que les pannes et réparations des machines, comme l'ont fait Kenne, Dejax, & Gharbi (2012). Cependant, cette fois-ci, nous allons évoquer un problème de taille beaucoup plus grande, soit un M4P2 (quatre machines produisant deux types de produits). Cet axe de recherche va nous permettre de tenir compte des objectifs opérationnels (objectifs à court terme). C'est-à-dire, le cas où les équipements de production sont soumis à des phénomènes de pannes et de réparations.

Après avoir donné des définitions des différents concepts de la logistique inverse et d'étudier les différents modèles proposés dans la littérature, le sujet de recherche est décrit comme suite. Il s'agit de relever de nouveaux défis et de proposer des méthodes pour la gestion et l'optimisation des flux de production et des flux de retour en respectant les limites de stockage des produits usagés, les limites de stockage des produits finis et des besoins en

quantité de produits sur le marché. Il s'agit de minimiser le coût global de production d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée en tenant compte de la dynamique des stocks (stock des produits finis et stock des retours) et de la dynamique de la machine (panne et réparation). Ce coût global tient compte du coût de stockage des produits retournés, du coût d'élimination des retours, du coût de production, du coût de maintenance des machines, du coût de stockage des produits finis, du coût de pénurie des produits finis et du coût environnemental.

Pour y arriver, nous avons considéré deux objectifs, soit :

- Déterminer les politiques conjointes de production de nouveaux produits et de recyclage des produits usagés en tenant des objectifs à moyen terme (au niveau tactique). Le réseau de la chaîne d'approvisionnement est composé de quatre échelons : les fournisseurs, usines de production et de retraitement, des centres de distribution et de collecte et les clients (magasins de détail ou clients finaux).
- Déterminer la politique optimale en tenant compte de l'aspect dynamique des équipements de production (panne et réparation). Le réseau est assimilé à quatre machines produisant deux types de produits et alimentées avec un retour à taux constant et une demande à taux constant.

1.8 Méthodologie de la recherche

Pour atteindre les objectifs fixés ci-dessus, nous allons adopter une méthodologie à cinq étapes :

- La première étape consiste à formuler un problème de planification tactique d'un réseau comportant quatre échelons ;
- La deuxième étape nous permettra d'élaborer un modèle mathématique du système considéré en utilisant la programmation linéaire afin de déterminer tous les flux du réseau
- À la troisième étape, nous allons procéder à la résolution du problème. Nous aurons ainsi de quoi faire l'analyse de sensibilité du modèle pour cerner les limites du modèle.

- À la quatrième étape, nous allons formuler un modèle mathématique du système considéré en utilisant la programmation dynamique, afin de tenir en compte de l'aspect dynamique des machines (pannes et réparations).

r finir la cinquième étape nous permettra d'effectuer une analyse de sensibilité tester la robustesse du modèle

CHAPITRE 2

FORMULATION D'UN MODÈLE GÉNÉRIQUE DE LA PLANIFICATION TACTIQUE EN CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT EN BOUCLE FERMÉE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle générique de planification des chaînes d'approvisionnement durable en boucle fermée en nous basant sur différents modèles conceptuels proposés dans la littérature. Ce modèle tient compte du cycle de vie du produit. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter un réseau logistique qui prévoit une chaîne de retour permettant de collecter et d'effectuer le tri des produits en fin de vie chez les clients pour des besoins de recyclage. Nous allons aussi dans cette même partie procéder à la formulation de la problématique et établir les hypothèses de travail. Les deuxièmes et troisièmes parties de ce chapitre seront consacrées successivement à la formulation en programmation linéaire d'un modèle de planification déterministe de ces activités, puis des analyses de sensibilité.

2.2 Structure du réseau étudié et formulation du problème.

La gestion de la chaîne d'approvisionnement (SCM) a attiré beaucoup d'attention. Il existe deux types de chaînes d'approvisionnement : les chaînes d'approvisionnement directes et les chaînes d'approvisionnement inversées. La chaîne d'approvisionnement directe contient des séries d'activités qui mènent à la conversion de matières premières en produits finis. Les gestionnaires tentent d'améliorer les performances de la chaîne d'approvisionnement dans des domaines tels

que la gestion de la demande, l'approvisionnement et l'exécution des commandes. La chaîne d'approvisionnement inverse est définie comme un réseau présentant des maillons tels que les activités de collecte-tri, le Memanufacturing ou Remanufacturing. L'intégration d'une chaîne d'approvisionnement directe et d'une chaîne d'approvisionnement inversée donne lieu à une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (CLSC) (Guide Jr & Van Wassenhove, 2009). En d'autres termes, il existe des canaux avant et arrière dans les réseaux CLSC, ce qui occasionne davantage de contraintes à considérer dans la conception des réseaux de CLSC.

2.2.1 Le réseau étudié.

Le réseau étudié est constitué : d'un fournisseur (RM), d'une usine de production (manufacturing), d'une usine de remanufacturing, d'un centre de distribution et d'un centre de collecte. Les produits fabriqués dans l'usine de production sont envoyés au centre de distribution qui sert la demande des clients. Pour assurer l'alimentation de l'usine de remanufacturing, une quantité de produits en fin de vie est collectée chez les clients, puis envoyée dans la ligne de retour. Le système de remanufacturing permet de remettre à neuf les produits collectés. Ceux-ci sont envoyés dans le centre de distribution, où ils sont stockés afin de satisfaire la demande en produits finis. Ce stock peut être aussi réapprovisionné par des produits manufacturés. Un stock de retours est mis en place pour la conservation des produits collectés. Ainsi, les produits retournés peuvent être remanufacturés ou éliminés après avoir été inspectés et stockés. Cette chaîne de réseau en boucle fermée est décrite de manière générale dans la Figure 2-1.

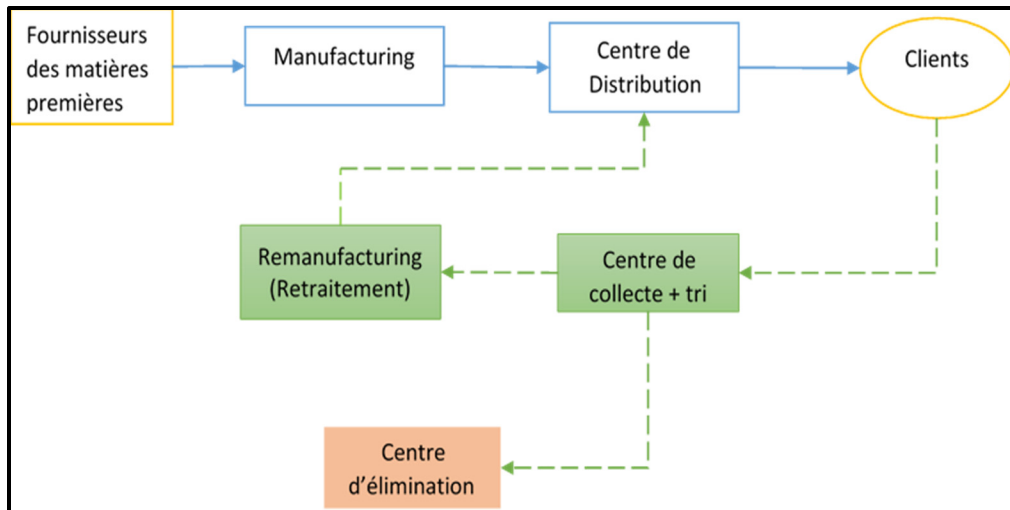


Figure 2.1 Le structure du réseau global.

Nous supposons que la quantité de produits retournés est définie comme un pourcentage de la demande et doit être collectée chez les clients. Il est supposé aussi que la demande de tous les clients est déterministe et devrait être satisfaite. Les fournisseurs ont des capacités en matières premières infinies. L'espace de stockage des produits finis est infini; toutefois, l'espace de stockage des produits retournés est limité. La matière première n'est pas stockée. Les différents coûts liés à la commande de matière première, à la production de produits finis, à l'inventaire des produits stockés (produits collectés et produits finis) et aux transports des produits sont connus. La production est planifiée par période sur un horizon temporel donné. Pour chaque période, nous supposons que la production a lieu en début de période et que les livraisons des clients sont effectuées en fin de période. En d'autres termes, toutes les unités produites à la période t sont disponibles pour satisfaire la demande de cette période. Par ailleurs, l'état de stock est déterminé après livraison aux clients, c'est-à-dire à la fin de chaque période t . Le problème consiste à déterminer tous les flux pour satisfaire la demande au coût total minimum sur l'ensemble des périodes de temps.

2.2.2 Formulation du problème

Dans cette section, nous allons proposer un problème de planification de la production d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, tel qu'illustré à la Figure 2-2. Ce problème

consiste à déterminer les flux globaux de produits entre les différentes installations. Le système fonctionnel est décrit comme suit : les fournisseurs envoient de la matière première aux usines de manufacturing (M1 et M2) qui les transforment en deux types de produits finis (P1 et P2). Ces produits finis sont transportés vers les centres de distribution (CD1 et CD2) qui servent à satisfaire la demande des clients (C1 et C2). Le flux inversé commence alors avec la collecte des produits déjà utilisés par les clients (produits en fin de vie). Ces produits collectés sont transportés aux centres de collecte (CC1 et CC2) où ils seront inspectés et partagés en deux groupes : les produits pouvant être réutilisés et les produits ne pouvant pas être réutilisés. Les produits réutilisables sont envoyés directement aux usines de remanufacturing (RM1 et RM2) pour y être remanufacturés tandis que les produits non réutilisables sont éliminés au centre d'élimination. Après le remanufacturing, ils sont transportés vers les centres de distribution où ils sont stockés avec les produits manufacturés afin de satisfaire la demande en produits finis. Un stock de retours est mis en place pour la conservation des produits collectés réutilisables.

Les hypothèses de travail :

La production est planifiée par période sur un horizon temporel donné. Pour chaque période, nous supposons que la production a lieu en début de période et que les livraisons des clients sont effectuées en fin de période. En d'autres termes, toutes les unités produites à la période t sont disponibles pour satisfaire la demande de cette période. Par ailleurs, l'état des stocks est déterminé après livraison aux clients. Les autres hypothèses sont les suivantes :

- Toutes les usines de Manufacturing et de Remanufacturing sont flexibles (elles sont capables de fabriquer les deux types de produits).
- Tous les centres de collecte sont mixtes (ils peuvent collecter les deux types de produits).
- La demande de tous les clients est déterministe, connue et devrait être satisfaite.
- Les produits neufs fabriqués à une période sont mis en stock immédiatement et peuvent être distribués aux clients à la même période.
- Les produits réutilisables sont remanufacturés et les produits non réutilisables sont éliminés dans la même période
- La quantité de produits retournés est un pourcentage de la demande des clients.

- Les installations des différents sites sont connues.
- Un coût de lancement de la production est appliqué à chaque usine de manufacturing et de remanufacturing.
- Les capacités de toutes les installations (chaîne directe et chaîne inverse) sont limitées et fixes, sauf les fournisseurs et le centre d'élimination.
- Les coûts relatifs à la commande de matière première, à la fabrication, à la remise à neuf, aux transports, aux centres de distribution et aux centres de collecte sont connus.
- La matière première n'est pas stockée (pas de gestion de stock de matière première).
- L'inspection correspond à un pourcentage d'élimination connu et fixe dans le modèle.

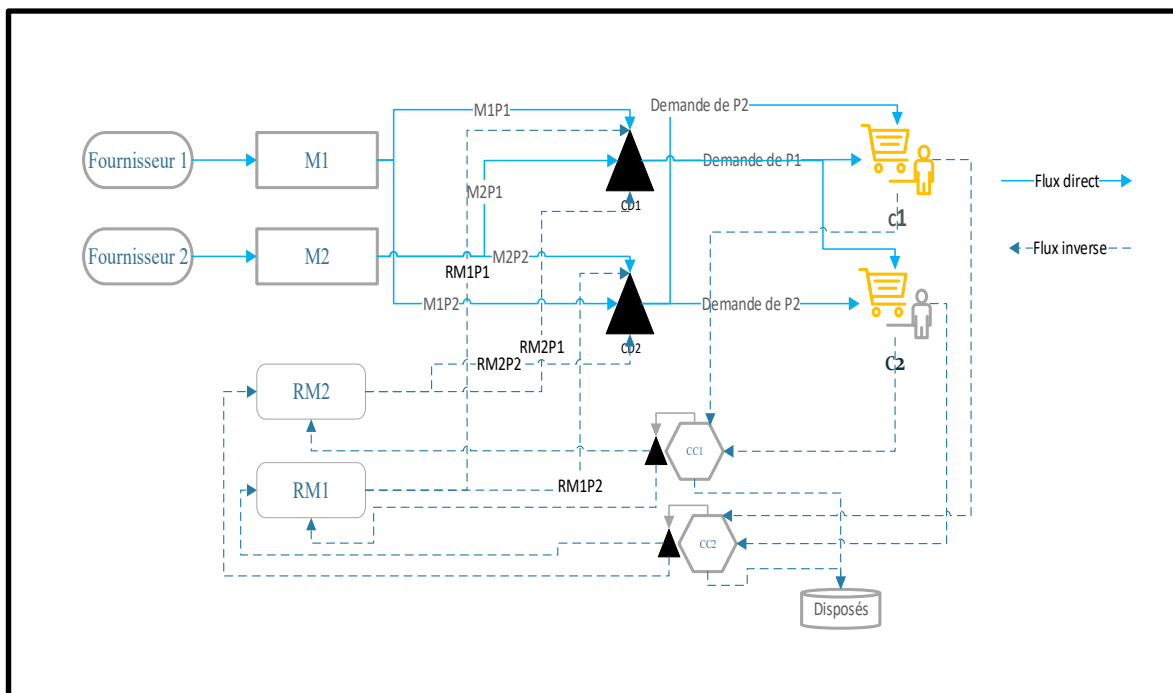


Figure 2.2 Illustration du réseau étudié

2.3 Formulation du modèle mathématique

La Figure 2-3 ci-dessous présente le réseau étudié avec les variables.

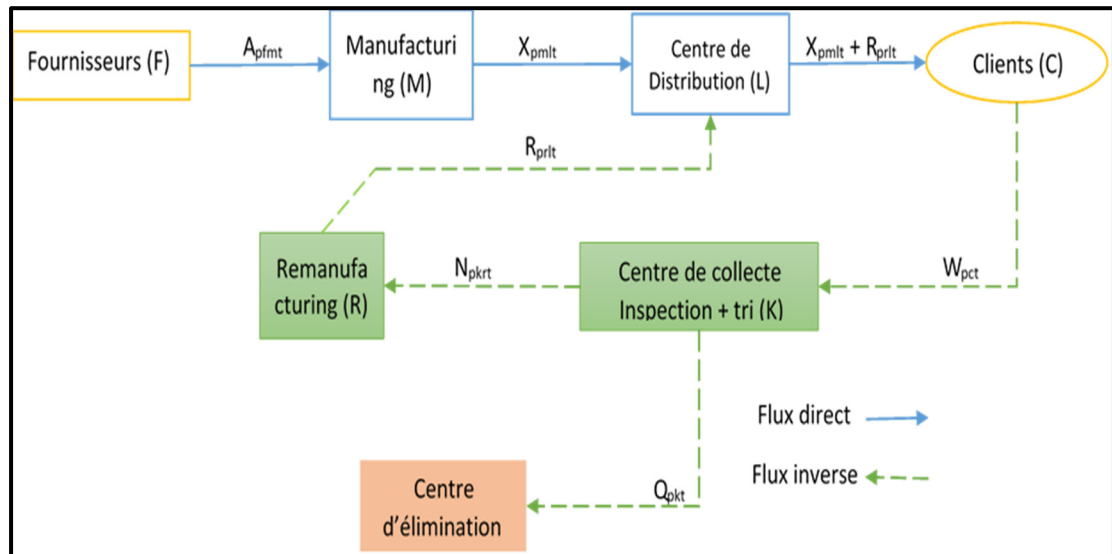


Figure 2.3 Illustration de la chaîne simplifiée avec les variables.

2.3.1 Ensemble et indices

Les ensembles et indices suivants sont utilisés dans le modèle de planification tactique.

$f \in F$ Ensemble et indices des fournisseurs

$p \in P$ Ensemble et indices des différents types de produits.

$m \in M$ Ensemble et indice des usines de manufacturing.

$r \in R$ Ensemble et indice des usines de remanufacturing.

$l \in L$ Ensemble et indice des centres de distribution.

$c \in C$ Ensembles et indices des clients.

$k \in K$ Ensemble et indice des centres de collectes.

$t \in T$ La période (l'horizon de la planification).

2.3.2 Les paramètres logistiques :

Les paramètres suivants ont été utilisés pour le modèle d'allocation des ressources aux usines.

C_{mt}^f Coûts fixes de lancement de la production de l'usine de manufacturing $m \in M$ à la période $t \in T$.

C_{rt}^f Coûts fixes de lancement de la production de l'usine de remanufacturing $r \in R$ à la période $t \in T$.

CF_p Coût unitaire d'achat de matière première pour le produit $p \in P$ chez le fournisseur $f \in F$.

CM_p Coût unitaire de production du produit $p \in P$ à l'usine de manufacturing $m \in M$

CR_p Coût unitaire de production du produit $p \in P$ à l'usine de remanufacturing $r \in R$

C_{plc}^{trans} Coût unitaire de transport pour le produit $p \in P$ des centres de distribution $l \in L$ au clients $c \in C$.

C_{FMp}^{trans} Coût unitaire de transport de la matière première pour le produit $p \in P$ du fournisseur $f \in F$ à l'usine de manufacturing $m \in M$.

C_{MLp}^{trans} Coût unitaire de transport pour le produit $p \in P$ de l'usine de manufacturing aux centres de distribution $l \in L$

C_{RLp}^{trans} Le coût unitaire de transport des produits finis $p \in P$ remanufacturés de l'usine de remanufacturing $r \in R$ au centre de distribution $l \in L$.

C_{CKp}^{trans} Coût unitaire de transport des produits en fin de vie $p \in P$ expédiés à partir des clients $c \in C$ vers le centre de collecte $k \in K$.

C_{KRp}^{trans}	Coût unitaire de transport des produits recyclables $p \in P$ expédiés du centre de collecte $k \in K$ vers l'usine de remanufacturing $r \in R$.
C_{KEp}^{trans}	Coût unitaire de transport des produits $p \in P$ non récupérables du centre de collecte $k \in K$ au centre d'élimination.
D_{cpt}	Demande du client $c \in C$ pour le produit $p \in P$ à la période $t \in T$.
C_{pl}^{inv}	Coût de l'inventaire des produits finis $p \in P$ dans le centre de distribution $l \in L$.
C_{pk}^{inv}	Coût de l'inventaire des produits recyclables stockés dans le centre de collecte $k \in K$.
θ_{elp}	Pourcentage de produits éliminés.
θ_c	Pourcentage du taux de retour des produits.
E_{pt}	Le coût d'élimination des produits $p \in P$ à la période $t \in T$.
BR_p	La capacité de production de l'usine de remanufacturing $r \in R$ pour le produit $p \in P$.
BM_p	La capacité de production de l'usine de manufacturing $m \in M$ pour le produit $p \in P$.
d_{FM}	Distance entre le fournisseur et l'usine de manufacturing.
d_{ML}	Distance entre l'usine de manufacturing et le centre de distribution.
d_{LC}	Distance entre le centre de distribution et le site des clients.
d_{RL}	Distance entre l'usine de manufacturing et le centre de distribution.
d_{CK}	Distance entre le site des clients et le centre de collecte.

d_{KR} Distance entre le centre de collecte et l'usine de remanufacturing.

d_{KE} Distance entre le centre de collecte et le site d'élimination.

2.3.3 Les variables de décision

Les variables de décisions de ce modèle sont les quantités de produits allouées aux usines.

A_{pft} La quantité de matière première commandée pour le produit $p \in P$ chez le fournisseur $f \in F$ et envoyée à l'usine de manufacturing à la période $t \in T$.

X_{pmt} Flux de produits finis $p \in P$ entre l'usine de manufacturing $m \in M$ et le centre de distribution $l \in L$ à la période $t \in T$.

R_{prt} Flux de produits finis (remanufacturés) $p \in P$ entre l'usine de remanufacturing $r \in R$ au centre distribution $l \in L$ à la période $t \in T$.

S_{plt} Quantité de produits finis $p \in P$ stockés dans le centre de distribution $l \in L$ à la fin de la période $t \in T$.

SR_{pkt} Quantité de produits recyclables stockés dans le centre de collecte $k \in K$ à la fin de la période $t \in T$.

Q_{pkt} La quantité de produits $p \in P$ expédiés à partir des centres de collecte $k \in K$ au site d'élimination à la $t \in T$.

N_{pkrt} La quantité de produits recyclables $p \in P$ transportés des centres de collecte $k \in K$ aux usines de remanufacturing $r \in R$ à la période $t \in T$.

W_{pct} La quantité de produits $p \in P$ collectés chez le client $c \in C$ transportés aux sites de collecte $k \in K$ à la période $t \in T$.

$Y_{mt} = \begin{cases} 1 & \text{Si une usine de manufacturing } m \in M \text{ est sélectionnée à la période } t \in T. \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

$$Z_{rt} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'usine de remanufacturing } r \in R \text{ est selectionnée à la période } t \in T. \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Fonction Objectif

L'objectif est de minimiser le coût total du système en tenant compte du nombre de produits usagés à recycler et la quantité de matière première à commander auprès des fournisseurs. Ce coût total est constitué des coûts de transport, des coûts d'achat de matière première, des coûts de production, des coûts de recyclage, des coûts d'inspection et des coûts d'élimination. Nous supposons que tous les coûts sont calculés par rapport à une période donnée, par exemple plusieurs mois, pour s'assurer qu'ils sont comparables.

Dans cette optique, le modèle vise à optimiser les décisions suivantes :

- La quantité de matière première commandée chez le fournisseur à la période t

$$\sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (CF_p + C_{FMp}^{trans} \cdot d_{FM}) A_{pft}$$

- La quantité de produits fabriqués et transportés vers le centre de distribution à la période t.

$$\sum_{p=1}^p \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T (CM_p + C_{MLp}^{trans} d_{ML}) X_{pmt}$$

- La quantité de produits refabriqués et transportés vers le centre de distribution à la période t.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T (CR_p + C_{RLp}^{trans} d_{RL}) R_{prt}$$

- Le coût lié à la quantité de produits recyclable transportée des centres de collecte vers les usines de remanufacturing à la période t.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (CK_p + C_{CKp}^{trans} d_{CK}) W_{pct} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (C_{KRp}^{trans} d_{KR} N_{pkt})$$

- La quantité de produits transportée vers le site d'élimination à la période t

$$\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (E_p + C_{KEp}^{trans} d_{KE}) Q_{pkt}$$

- Le coût d'inventaire des produits stockés dans les centres de distribution et les centres de collectes à la période t.

$$\begin{aligned}
& \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T C_{Lp}^{inv} S_{plt} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{Kp}^{inv} SR_{pkt} \\
& Min Z \tag{2.1} \\
& Z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M C_{mt}^f \cdot Y_{mt} + \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R C_{rt}^f \cdot Z_{rt} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T (C_{LCp}^{trans} \cdot d_{LC} (R_{prt} \\
& \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (CF_p + C_{FMP}^{trans} \cdot d_{FM}) A_{pft} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T CM_p + C_{MLp}^{trans} d_{ML}) X_p \\
& \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T (CR_p + C_{RLp}^{trans} d_{RL}) R_{prt} + \sum_{p=1}^P \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (CK_p + C_{CKp}^{trans} d_{CK}) W_{pct} \\
& \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (C_{KRp}^{trans} d_{KR} N_{pkt}) + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (E_p + C_{KEp}^{trans} d_{KE}) Q_{pkt} + \\
& \sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T C_{Lp}^{inv} S_{plt} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{Kp}^{inv} SR_{pkt}
\end{aligned}$$

Les contraintes

$$\sum_{l=1}^L S_{pl(t-1)} + \sum_{m=1}^M X_{pmlt} + \sum_{r=1}^R R_{prlt} \geq \sum_{c=1}^C D_{cpt} \quad \forall p, t \tag{2.2}$$

$$S_{plt} = S_{pl(t-1)} + \sum_{m=1}^M X_{pmlt} + \sum_{r=1}^R R_{prlt} - \sum_{c=1}^C D_{cpt} \quad \forall l, p, t \tag{2.3}$$

So = Sini

$$SR_{pkt} = S_{pk(t-1)} + \sum_{c=1}^C W_{pct} - N_{pkt} - Q_{pkt} \quad \forall k, p, t \tag{2.4}$$

SRo = SRini = 0

$$W_{pct} = \theta_c \cdot D_{cp(t-1)} \quad \forall p, c, t \tag{2.5}$$

$D_{cp0} = 0$

$$Q_{pkt} = \theta_{el} \times W_{pct} \quad \forall p, t \tag{2.6}$$

$$\sum_{l=1}^L R_{prlt} \leq \sum_{k=1}^K N_{pkrt} \quad \forall p, r, t \quad (2.7)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L X_{pmlt} \leq Y_{mt} \cdot \sum_{p=1}^P B_{mp} \quad \forall m, t \quad (2.8)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L R_{prlt} \leq Z_{rt} \cdot \sum_{p=1}^P B_{rp} \quad \forall r, t \quad (2.9)$$

$$X_{pmlt}, R_{prlt}, N_{pkrt}, Q_{pkt} \geq 0 \quad \forall m, r, p, l, k, t \quad (2.10)$$

$$Y_{mt}, Z_{rt} \in \{0, 1\} \quad \forall m, r, t \quad (2.11)$$

La contrainte (2.2) définit la faisabilité du système et la satisfaction de la demande. La contrainte (2.3) calcule la quantité de produits stockés dans le centre de distribution. La contrainte (2.4) calcule la variation de stock dans la ligne de retour. La contrainte (2.5) montre la quantité de produits retournés dans la ligne de retour : elle stipule que la quantité de produits retournés par les clients au cours d'une période est une proportion donnée des produits distribués à la période précédente, tandis que la contrainte (2.6) calcule la quantité de produits éliminés. La contrainte (2.7) stipule que la demande en produits recyclables de l'usine de Remanufacturing doit être satisfaite. Les contraintes (2.8) et (2.9) montrent respectivement que la capacité du centre de distribution et celle du centre de collecte doivent être respectées. Les contraintes (2.10) spécifient l'obligation de non-négativité pour tous les flux de produits. Les contraintes (2.11) spécifient les variables binaires.

2.4 Structure des données pour le modèle tactique

Cette section présente les principales données utilisées lors des expérimentations. De cette manière, nous aurons une meilleure idée du type de chaîne d'approvisionnement étudiée. Des

précisions sont également apportées quant aux valeurs réelles des paramètres de coût et de capacité de production. Toutefois, avant de terminer la lecture de cette section et de passer aux résultats des expérimentations, nous souhaitons éclaircir quelques points quant à l'exemple de chaîne d'approvisionnement choisi dans cette étude. Rappelons que l'intérêt de la modélisation mathématique linéaire présentée ci-dessus est d'apporter un éventuel soutien aux entreprises qui pourraient avoir besoin de support dans leur processus d'aide à la décision et de contribuer au développement durable. Ainsi, nous avons trouvé qu'il était d'un meilleur intérêt d'étudier une chaîne d'approvisionnement simple en boucle fermée. Le réseau de cette chaîne est constitué de plusieurs installations (fournisseurs, usines, centres de distribution/collecte, clients) et de deux types de produits. Le fonctionnement du réseau est décrit comme suite : les fournisseurs (F1, F2) envoient de la matière première aux usines de manufacturing (M1 et M2) qui les transforment en deux types de produits finis (P1 et P2). Ces produits finis sont transportés vers les centres de distribution (CD1 et CD2) qui servent à satisfaire la demande des clients (C1 et C2). Le flux inversé commence avec la collecte des produits déjà utilisés par les clients (produits en fin de vie). Ces produits collectés sont transportés aux centres de collecte (CC1 et CC2) où ils seront inspectés et partagés en deux groupes : les produits pouvant être réutilisés et les produits ne pouvant pas être réutilisés. Les produits réutilisables sont envoyés directement aux usines de remanufacturing (R1 et R2) pour y être remanufacturés, tandis que les produits non réutilisables sont éliminés au centre d'élimination. Après le remanufacturing, ils sont transportés vers les centres de distributions où ils sont stockés avec les produits manufacturés afin de satisfaire la demande en produits finis. Un stock de retours est mis en place pour la conservation des produits réutilisables.

Pour résoudre le problème lié à cette chaîne d'approvisionnement simple en boucle fermée, nous avons proposé un programme mathématique décrit dans LINGO. Il est bon de rappeler que la programmation mathématique proposée et la solution présentée sont appliquées pour un exemple de jeu de données hypothétique (fictif). Nous avons supposé qu'une entreprise gère deux clients et que chaque client a une demande précise dans chaque période. Dans cet exemple numérique, l'entreprise préfère satisfaire la demande tout en minimisant le profit total.

2.4.1 La demande des clients :

Nous supposons que la demande est répartie parmi deux magasins de détail (clients) qui approvisionnent l'ensemble des consommateurs. Ces derniers ne tiennent pas compte de la différenciation entre les produits fabriqués à partir de la matière première et des produits recyclés (les deux produits ont la même valeur sur le marché). Nous avons donc admis l'hypothèse qu'un consommateur qui souhaite se procurer un bien quelconque portera son attention sur ce bien en question plutôt que sur le type d'emballage qui l'accompagne. Ainsi, ce dernier se contentera de produits remanufacturés comme produits neufs. C'est sur cette hypothèse que se fonde ce travail d'optimisation, car cela laisse le choix à la compagnie de répondre à la demande attendue de ses clients de la meilleure façon possible. Ainsi, l'entreprise peut ajuster ses décisions d'approvisionnement et de production et se réserve la possibilité de fabriquer et de mettre sur le marché plus ou moins de produits remanufacturés versus les produits manufacturés. Le produit fini fait l'objet d'une demande annuelle estimée à environ un millier d'unités. La demande est répartie sur six (6) périodes de deux mois comme le montre le Tableau 2-1.

Tableau 2.1 La demande du client C pour le produit P à la période T

DemandePrec	0						
PRODUITS	CLIENTS	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	C1	11	13	14	15	15	15
	C2	10	12	13	14	14	14
P2	C1	11	13	14	15	15	15
	C2	12	14	15	16	16	16

DemandePrec représente la demande du produit dans le cas où $t=1$ ($D_{pc}(0) = \text{DemandePrec}$)

2.4.2 Les coûts liés à la Production :

La fabrication des différents produits s'effectue au sein de deux usines manufacturières $\{M1, M2\}$ de mêmes capacités de production pour les différents types de produits. Ces différents

produits finis peuvent être aussi produits par deux autres usines de remanufacturing {R1, R2} de même capacité de production. Les coûts de production sont les coûts de manufacturing (CMp) et les coûts de remanufacturing (CRp). Les différents paramètres liés aux usines de production et aux centres de collectes/distributions sont récapitulés dans le Tableau 2-2 et le Tableau 2-3.

Tableau 2.2 Les données des paramètres des usines et des centres de collectes/distributions

		Coûts de production		Coûts d'inventaire			
Produits	Fournisseurs	Manufacturing	Remanufacturing	Centres de distribution	Centres de collecte	Coût de collecte	Coût d'élimination
P1	7 \$	95 \$	90 \$	2 \$	3 \$	4 \$	3 \$
P2	6 \$	95 \$	90 \$	2 \$	2 \$	5 \$	4 \$

Tableau 2.3 La capacité de production des usines de production
en million de produits

	MANUFACTURING			REMANUFACTURING	
Bpm	M1	M2	Bpr	R1	R2
P1	75	75	P1	65	65
P2	90	95	P2	55	55

2.4.3 Les paramètres de stockage :

Les produits collectés peuvent au besoin être stockés aux centres de collecte (CC1, CC2) avant d'être remanufacturés. Les produits finis, quant à eux, sont entreposés dans des centres de distribution (CDS1, CDS2) avant d'être distribués aux clients. À titre indicatif, les centres de distribution et les centres de collectes ont des capacités de stockage allant de 55 000 produits pour le produit P1 et pouvant atteindre 65 000 produits pour le produit P2. Le Tableau 2-4 présente les données des paramètres de stockage.

Tableau 2.4 Capacités des centres de distribution et des centres de collectes

en millier de produits

	CENTRES DE DISTRIBUTION			CENTRES DE COLLECTES	
CAPL	L1	L2	CAPK	K1	K2
P1	55	55	P1	55	55
P2	65	65	P2	65	65

Le stock initial en produits recyclables est nul, pour la simple raison que le client ne peut pas retourner des produits usagés dans la ligne de retour à la première période. Le niveau de stock initial en produits finis est nul.

2.4.4 Les coûts de transport

Notre flotte est composée d'un seul type de véhicule pour tous les transports effectués dans le réseau (le transport de la matière première, le transport des produits finis, le transport des produits collectés/recyclables et le transport des produits à éliminer).

Le coût unitaire de transport englobe tous les paramètres liés au transport des produits. Le Tableau 2-5 résume les attributs des coûts unitaires entre les différentes installations du réseau.

Tableau 2.5 Coûts unitaires de transport en dollars et la distance en km
entre les différentes installations.

		dfm	dml	drl	dlc	dck	dkr	dke
Distances km		7	5	6	5	4	4	8
Coûts unitaires de transport CTp	P1	4 \$	2 \$	2 \$	2 \$	3 \$	3 \$	6 \$
	P2	5 \$	8 \$	3 \$	7 \$	2 \$	2 \$	4 \$

Avec ces paramètres de données décrits ci-dessus, le lecteur aura une bonne compréhension des hypothèses émergeant lors de la modélisation. Même si certaines des données sont fictives, nous avons cependant tenté d'utiliser un maximum des données cohérentes. Le chapitre suivant présente en détail les résultats de nos expérimentations. Le problème a été résolu à l'aide du solveur Lingo 10.

2.5 Analyse des résultats.

Dans cette section, nous étudions les résultats de la simulation. Dans les conditions actuelles, la totalité des produits finis est de type manufacturé et remanufacturé. Les caractéristiques des données de base sont : $CR_p < CM_p$ avec un pourcentage de retour 75 % et un pourcentage d'élimination de 15 %. À titre indicatif, le Tableau 2-6 et la Figure 2-4 donnent également les valeurs numériques correspondant à ces résultats.

Tableau 2.6 La politique de production du scénario de base (cas de base).

Manufacturing (Xpmt)							
MANUFACT	PROUITS	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	M1	0	12	11	0	0	11
	M2	21	0	0	12	10	0
P2	M1	0	13	12	0	0	12
	M2	23	0	0	12	11	0
Remanufacturing (Rpmt)							
REMANUFACT	PROUITS	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	R1	0	13	16	17	19	18
	R2	0	0	0	0	0	0
P2	R1	0	14	17	19	20	19
	R2	0	0	0	0	0	0

Les décisions tactiques d'approvisionnement et de production de l'entreprise sont présentées dans le Tableau 6 ci-dessus. La politique de production réside dans le fait que l'entreprise choisit les usines de manufacturing et les usines de remanufacturing en fonction des coûts, puisqu'il s'agit de satisfaire la demande des clients à un moindre coût. Cette politique de production a été proposée tout en minimisant les coûts totaux. Cette décision tactique de production proposer est décrite comme suit : à la période T1, T4 et T5, l'usine de manufacturing M2 est activée à la place de l'usine de manufacturing M1, tandis qu'à la période T2, T3 et T6, l'usine de manufacturing M1 est activée et M2 est désactivée. Ceci

s'explique par le fait que le système choisit l'usine de manufacturing la moins chère dans une période pour satisfaire la demande. Pour les produits remanufacturés, le système active l'usine de remanufacturing R1 à toutes les périodes et l'usine de remanufacturing R2 reste désactivée. La Figure 4.1 ci-dessous montre clairement la quantité de produits manufacturés et la quantité de produits remanufacturés.

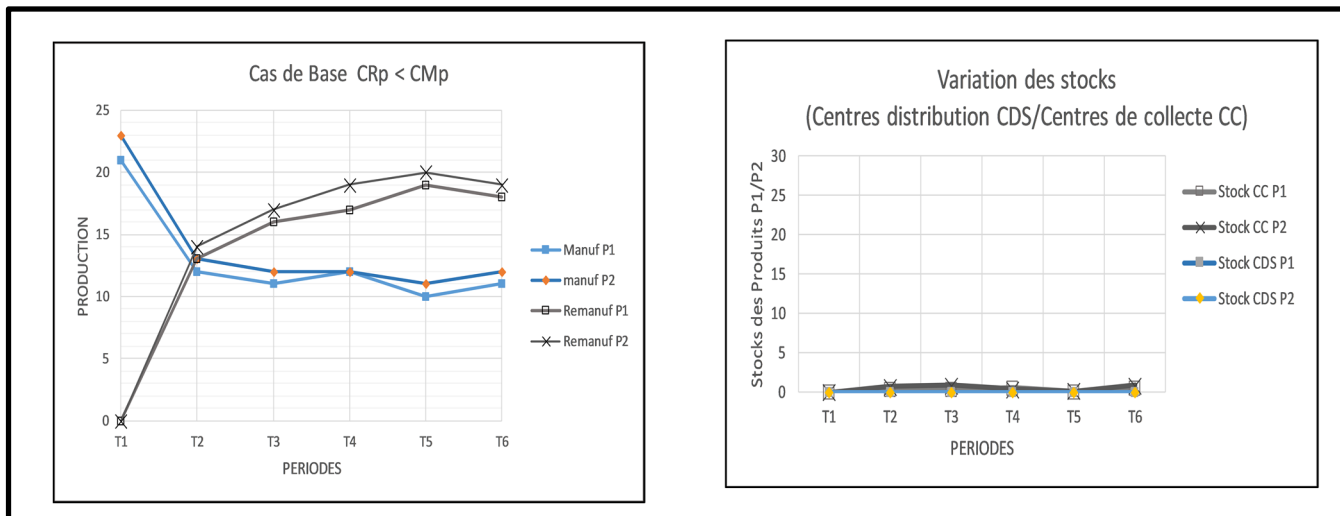


Figure 2.4 La politique optimale du scénario de base (cas de base).

Comme nous pouvons le constater, le système combine les produits manufacturés et les produits remanufacturés pour satisfaire la demande. Cependant, le système fabrique un peu plus de produits remanufacturés par rapport aux produits manufacturés. Le stock de produits recyclables dans les centres de collectes avoisine le zéro, puisque que tous les produits recyclables ont été transformés en produits remanufacturés. Cependant, si le coût de remanufacturing CR_p diminue considérablement, la politique de production reste la même, mais la configuration du système change en fonction des paramètres de coûts pour satisfaire la demande.

2.6 Analyse de sensibilité du modèle

Les expérimentations conduites dans cette section ont pour premier objectif d'identifier l'impact des décisions tactiques d'approvisionnement et de production de l'entreprise. Par la suite, une analyse de sensibilité sera réalisée sur la hausse du prix de remanufacturing (CRp) afin de mettre en évidence l'influence majeure de ce paramètre sur le plan optimal de production adopté. L'idée est tout d'abord d'observer la structure de la chaîne d'approvisionnement sans aucun changement des paramètres préétablis. De cette manière, nous mettrons en évidence les décisions optimales d'approvisionnement et de production dans le cas où la compagnie n'est soumise à aucun changement. Par décisions optimales, nous entendons les meilleures décisions en termes de coûts logistiques pour l'entreprise. Ensuite, différents scénarios seront envisagés, parmi lesquels celui où le coût de remanufacturing (CRp) est supérieur au coût de manufacturing (CMp). Plus tard, nous étudierons le cas où la quantité de produits retournés est plus importante. Nous mettrons en évidence les modifications tactiques éventuelles à apporter quant aux décisions optimales, de production, puis nous étudierons dans quelles mesures les deux cas peuvent s'avérer contraignants pour la chaîne d'approvisionnement.

2.6.1 Cas où le coût de remanufacturing (CRp) est supérieur au coût de manufacturing (CMp)

Après ce bref constat de la situation dans laquelle se trouve la compagnie lorsque le coût de remanufacturing est inférieur au coût de manufacturing (cas de base), supposons maintenant que CRp devient supérieur à CMp. L'entreprise opte pour la fabrication des produits manufacturés en désactivant toutes les usines de remanufacturing parce qu'elles sont trop coûteuses. Ainsi, nous supposons qu'aucune décision n'est prise pour la fabrication de produits remanufacturés, car ils ne sont plus rentables. Cependant, les produits recyclables qui ne sont pas remanufacturés sont stockés dans les centres de collectes. Les résultats de cette analyse sont illustrés dans la Figure 2-5.

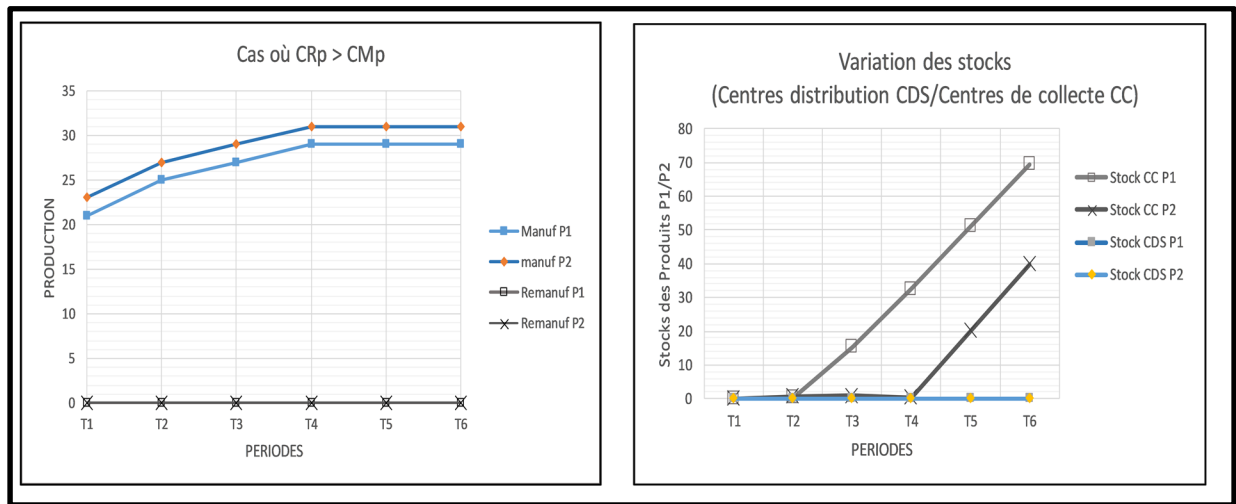


Figure 2.5 La quantité de produits manufacturés et de produits remanufacturés dans le cas où $CR_p > CM_p$

Tout d'abord, nous observons sans surprise que la quantité de produits manufacturés est nettement plus grande que la quantité de produits remanufacturés. Les usines de remanufacturing étant désactivées, la quantité de produits remanufacturés est nulle. Ensuite, nous pouvons constater qu'une grande quantité de produits recyclables est stockée dans les centres de collectes.

2.6.2 Cas où la quantité de produits retournés augmente (augmentation du taux de retour).

Dans ce cas-ci, nous allons étudier l'impact de l'augmentation du pourcentage de retour sur les décisions tactiques d'approvisionnement et de production. Cette analyse est effectuée avec les paramètres de coûts du cas de base, de taux de retour du cas de base (75 %) et de taux d'élimination du cas de base (15 %). Dans cette analyse, nous avons fait varier le pourcentage de retour de 75% à 85% et ensuite de 85% à 95%. Les résultats obtenus avec cette analyse sont illustrés dans les Figures 2-6 et 2-7.

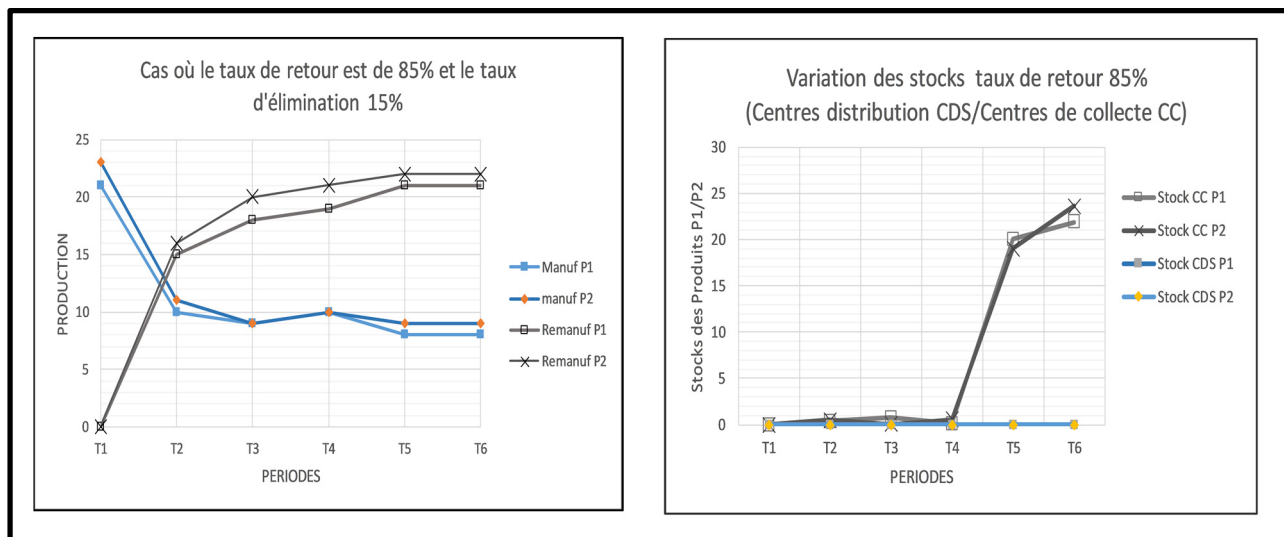


Figure 2.6 La quantité de produits manufacturés et remanufacturés avec un taux 85 %

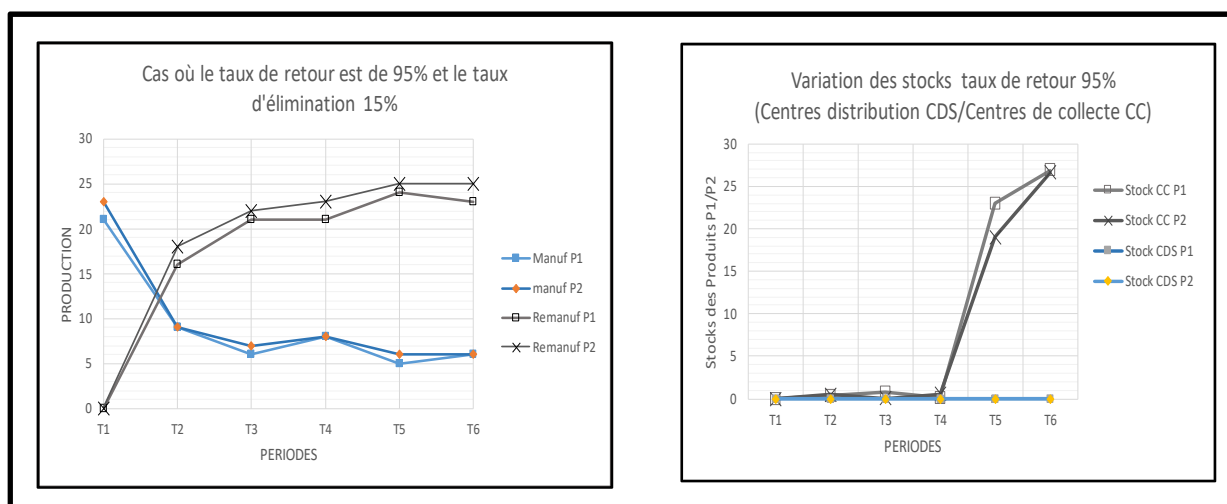


Figure 2.7 La quantité de produits manufacturés et remanufacturés avec un taux de retour de 95%

Comme nous pouvons l'observer sur les figures 2-6 et 2-7, plus le pourcentage de produits retournés augmente, plus la quantité de produits remanufacturés augmente. Avec les pourcentages de retour de 85 % et 95 %, nous constatons que la quantité de produits remanufacturés est supérieure à la quantité de produits manufacturés. À la deuxième période, le système favorise les recyclages. Par conséquent, le coût de récupération augmentera dans

une certaine plage. Cependant, la quantité de produits recyclables stockés dans les centres de collecte augmente, ce qui peut engendrer des coûts.

2.6.3 Cas où la quantité de produits éliminés augmente.

Dans cette section, nous faisons une étude pour déterminer comment va se comporter le système, si le taux d'élimination venait à changer, c'est-à-dire ce que serait la politique de production si une grande quantité de produits collectés était éliminée après inspection ou si une grande quantité de produits recyclables était disponible (soit un taux d'élimination faible). Les résultats de cette analyse sont illustrés dans la Figure 2-8.

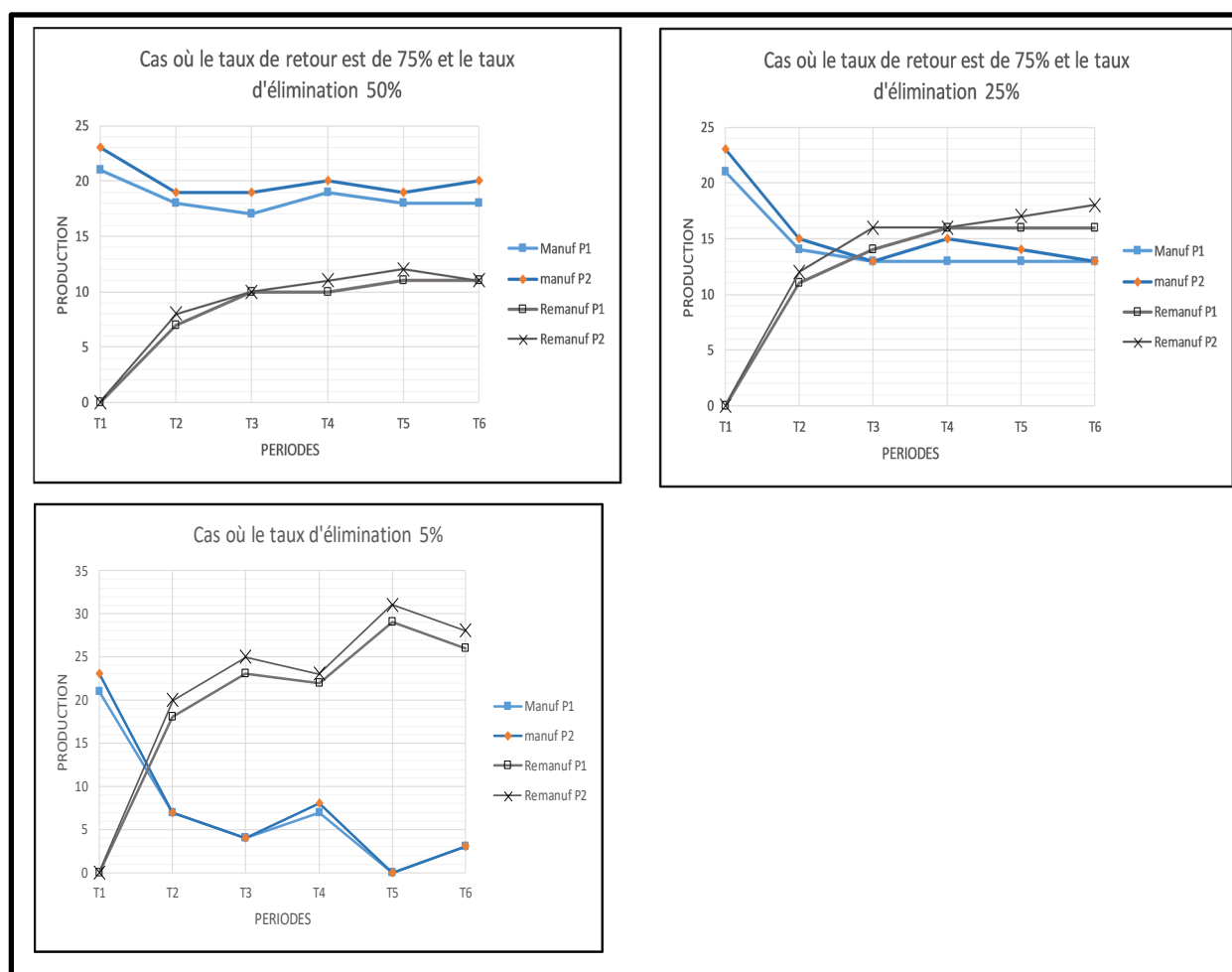


Figure 2.8 La quantité de produits manufacturés et remanufacturés avec variation du taux d'élimination 50 % à 5 %

Avec un taux d'élimination de 50 %, nous remarquons que l'entreprise active les usines de manufacturing et les usines de remanufacturing pour rentabiliser les produits manufacturés ainsi que les produits remanufacturés. Cependant, la quantité de produits manufacturés est bien supérieure à la quantité de produits remanufacturés, car le système ne dispose pas beaucoup de produits recyclables pour fabriquer de produits remanufacturés. Dans la deuxième image de la Figure 2-9, nous optons pour un taux d'élimination de 25 % et pour un taux de retour de 75 %, pour constater que le système se débrouille pour combiner les produits manufacturés et les produits remanufacturés. Nous voyons également que le système produit quasiment la même quantité de produits manufacturés et de produits remanufacturing. Pour une grande quantité (5 % de taux d'élimination) de produits retournés, le système favorise le remanufacturing par rapport au manufacturing, ce qui est justifié, car il obtiendra plus de produits à remanufacturer.

2.7 Conclusion

Nous avons tout d'abord établi la situation de l'entreprise étudiée avant qu'elle ne soit soumise à des variations de coûts et de taux de retour. Par la suite, nous avons évalué l'impact de ces variations de coûts et de taux de retour. Nous avons dans un premier temps mis en évidence l'importance des coûts de remanufacturing par rapport aux coûts de manufacturing dans le cas où les produits remanufacturés seraient vendus à un prix similaire à celui des produits manufacturés. Ensuite, nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur le pourcentage de collecte et le pourcentage d'élimination. Par cette analyse, nous avons été en mesure d'établir le plan optimal de production en fonction des paramètres de pourcentage de collecte, des paramètres de pourcentage d'élimination et des paramètres coûts. Ce plan optimale de production nous indiquent dans quelle mesure il est préférable de remplacer les produits manufacturés par des produits remanufacturés. Pour établir ainsi le meilleur plan de production avec 50 % de produits manufacturés et 50 % de produits de produits remanufacturés, la valeur du taux de retour devrait être fixer à 75% et celle du taux d'élimination à 25%. Cependant, dans un souci de la hausse du prix de la matière première, le taux d'élimination devrait être à 5 % pour rentabiliser davantage les produits remanufacturés. Les résultats suggèrent que malgré des variations des paramètres de coûts, des taux de retour ou des taux d'élimination,

notre modèle d'optimisation permettrait d'amortir de manière significative la hausse du coût total de la chaîne d'approvisionnement considérée qui demeure pour ainsi dire stable au fil du temps.

CHAPITRE 3

PLANIFICATION TACTIQUE D'UN RÉSEAU LOGISTIQUE : ÉTUDE DE CAS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter le problème étudié pour ensuite présenter les données caractéristiques de l'étude cas. Les données présentées sont caractéristiques au problème étudié dans ce mémoire. Ensuite, nous décrirons la méthode utilisée pour générer des scénarios permettant une meilleure prise de décision par les gestionnaires. Il se terminera alors par la présentation des résultats obtenus et de leurs analyses.

L'objectif de ce chapitre est de transposer le modèle générique décrit au chapitre 2 ci-dessus pour résoudre un problème posé. Le but est de prouver que le modèle mathématique décrit ci-dessus est assez général et peut s'appliquer à de nombreuses situations de logistique inverse dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée. Malgré la souplesse du modèle mathématique décrit dans le chapitre 2, il convient de noter qu'un certain nombre d'aspects supplémentaires ne sont pas pris en compte dans le modèle susmentionné. Nous pouvons penser notamment à l'extension graduelle du nombre d'installations (usines) que nous avons désignée comme une caractéristique majeure du problème pour trouver une meilleure structure du réseau afin de satisfaire la demande qui n'est pas explicitement modélisée. Nous aborderons ces questions en détail plus tard dans la section structuration des données. De plus, des détails supplémentaires pourraient être inclus dans le problème étudié, tels que des restrictions de capacité ou des options de fabrication et de récupération alternatives. Nous discutons de celles-ci et d'autres extensions possibles dans la section structuration des données. À ce stade, nous maintenons le modèle aussi simple que possible afin de nous concentrer sur les caractéristiques essentielles et d'éviter une surcharge des paramètres.

3.2 Le réseau étudié.

Le problème d'optimisation considéré dans ce chapitre concerne un réseau logistique composé de douze sites existant où on peut faire des activités de manufacturing et de remanufacturing; ces sites sont notés d'A à L. Ces zones d'activités reçoivent de leurs clients des demandes de

produits. Dans le but de satisfaire la demande des clients, l'entreprise prévoit de sélectionner (activer) un ou plusieurs usines dans ces zones d'activités. Pour ce faire, différents scénarios seront étudiés afin de proposer une conception optimisée de la chaîne d'approvisionnement. L'objectif de ce problème est de déterminer quelle est la meilleure structure de réseau en termes de nombre et de localisation des usines dans les différentes zones ; et de déterminer aussi la zone de livraison de chaque dépôt, la distance maximale entre les magasins et le dépôt alloué, ainsi que le coût total fixe et les totaux variables du système. Le réseau considéré est représenté à la Figure (3.1).

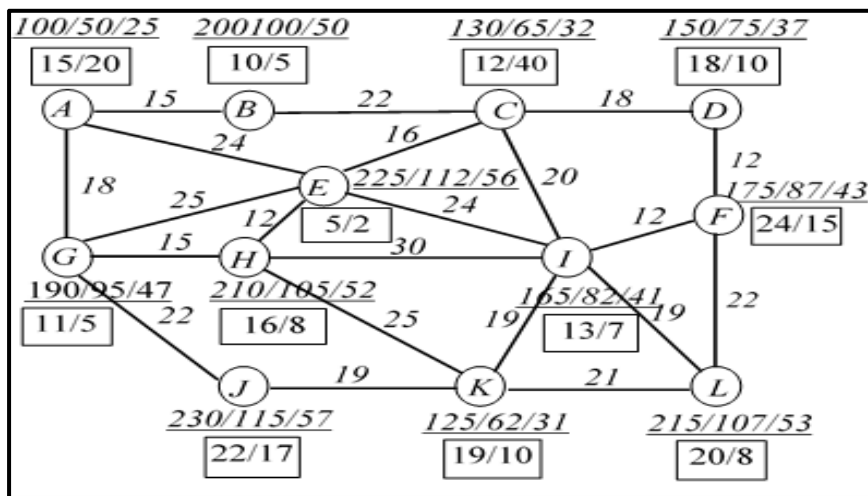


Figure 3.1 Le réseau étudié tiré de Daskin, M. S., (1995).

Les hypothèses simplificatrices prises en compte :

- Les usines peuvent être localisées dans les différents sites.
- Les usines ne possèdent pas de limite de capacité en termes de stockage ou de débit.
- Le coût de distribution d'une usine au magasin (clients) de mêmes zones est négligeable.
- Étant donné que la capacité maximale des véhicules de transport (volume) n'a pas été spécifiée, ces véhicules sont donc capables de prendre le chargement pour l'approvisionnement des produits des usines aux dépôts (clients).
- Le plan de production tactique est réalisé sur une année de production.
- Les coûts de production, de manutention, de stockage et de transport sont inclus dans les coûts variables.

- La quantité de produits retournés est un pourcentage de la demande des clients.
- Les installations des différents sites sont connues.
- Un coût d'activation de la production est appliqué à chaque usine de manufacturing et de remanufacturing.
- L'inspection correspond à un pourcentage d'élimination connu et fixe dans le modèle.

Étant donné que chaque usine a une capacité illimitée en termes de stockage, si un seul site est localisé à un emplacement donné, sera-t-il capable de satisfaire la demande totale annuelle de tous les clients ? La réponse pourrait être oui. Cependant, cette solution comporte des inconvénients. Les inconvénients de cette solution sont que les distances entre le dépôt éventuel et les magasins augmentent, ce qui entraînera une augmentation des coûts de transports ainsi que des délais de livraison et conduira le solveur lingo à minimiser à zéro. Avec les hypothèses décrites ci-dessus, nous allons étudier différents scénarios qui vont être énumérés au fur et à mesure. Ces scénarios partent avec l'activation des sites de deux par deux jusqu'à ouvrir tous les sites au complet.

3.3 Structure des données

Dans cette section, nous allons structurer les données du problème et les paramètres seront choisis dans un ordre de grandeur réaliste. Toutefois, nous ne prétendons pas modéliser la situation économique d'une société donnée.

Pour qu'un produit usagé ait les mêmes qualités qu'un nouveau produit, il doit respecter certaines normes de qualité, qui sont vérifiées lors de l'inspection sur le site de collecte. La récupération de produit est souvent effectuée dans les usines de fabrication d'origine en utilisant les mêmes équipements. Les produits qui ne peuvent pas être recyclés dans leur ensemble peuvent toujours fournir de pièces de rechange (matière première). Les restes sont généralement envoyés dans des usines externes pour le recyclage des matériaux. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les options de recyclage et d'élimination. Comme mentionné précédemment, notre modèle peut être étendu pour inclure des options de récupération supplémentaires telles que le démontage des pièces de rechange. Néanmoins, cette extension ne change pas l'essence de notre analyse.

3.3.1 La demande de produits des clients (magasins)

La demande est répartie entre douze magasins (clients) qui peuvent approvisionner l'ensemble de consommateurs pendant une année. L'entreprise combine les nouveaux produits et les produits remanufacturés (les produits finis) pour satisfaire la demande, car ils ont les mêmes qualités sur le marché. La demande annuelle de ces produits finis est estimée à des milliers d'unités. La demande est répartie sur une période d'une année de planification. De ce fait, dans notre modèle décrit au chapitre 2, la période est égale à un. La demande est représentée dans Tableau 3-1 ci-dessous.

Tableau 3.1 la demande en milliers de produits pour les clients pendant une année

	Magasins											
	DA	DB	DC	DD	DE	DF	DG	DH	DI	DJ	DK	DL
Quantité de produits demandée	15	10	12	18	5	24	11	16	13	22	19	20

3.3.2 Les coûts fixes d'activation des usines

Les activités de production et de recyclage s'effectuent au niveau des douze sites décrits dans le réseau étudié. Pour chaque site, nous avons une usine de manufacturing pour la fabrication de nouveaux produits, une usine de remanufacturing pour la fabrication de produits de seconde main et un centre de distribution (magasins ou clients). Les paramètres-coûts liés aux différentes installations des sites sont représentées dans le Tableau (3-2) suivant.

Tableau 3.2 Coûts fixes d'activation des usines de production dans les différents sites localisés

Les différentes Installations	Les différents sites existants											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Usines de manufacturing	100	200	130	150	225	175	190	210	165	230	125	215
Usines de remanufacturing	50	100	65	75	112	87	95	105	82	115	62	107
Centres de distribution/collectes	25	50	32	37	56	43	47	52	41	57	31	53

3.3.3 Les paramètres liés aux coûts unitaires et aux taux de retour et d'élimination

La fabrication des produits dans les différentes installations des sites occasionne des coûts unitaires de production. Ces coûts sont identiques pour toutes les usines de manufacturing activées dans les différents sites. Nous retrouvons la même configuration pour les usines de remanufacturing, soit le même coût unitaire de recyclage qui est appliqué pour toutes les installations de remanufacturing localisées dans les sites. Le coût de transport applicable pour transporter une unité de produit dans le flux direct et le flux inverse a été fixé.

Le volume de retour des produits utilisés est proportionnel à la demande des magasins (clients) et atteint 60% pour chaque détaillant, car la récupération de produits en fin de vie est introduite en tant qu'activité supplémentaire au réseau de retransmission existant. De plus, pour des raisons de réglementation environnementale, tous les produits retournés doivent être collectés. Après inspection, 50% des produits retournés s'avèrent être remanufacturables, le reste, soit 30%, devant être envoyé à un recycleur de matériaux externe. Cette inspection occasionne des coûts de collecte et d'élimination qui sont fixes pour chacun des centres de collectes. Le Tableau (3-3) ci-dessous récapitule les coûts unitaires de production, de transport ainsi que les coûts de collectes et d'élimination ; il nous montre aussi les taux de retour et d'élimination.

Tableau 3.3 Le tableau récapitulatif des coûts unitaires, des taux de retour et des taux d'élimination

	Flux direct	Flux inverse
COÛTS UNITAIRES DE TRANSPORTS	0,10 \$	0,80 \$
	Manufacturing	Remanufacturing
COÛTS UNITAIRES DES PRODUITS	20,00 \$	7,00 \$
COÛTS DE COLLECTE DE PRODUITS	2,00 \$	
COÛTS D'ÉLIMINATION	0,20 \$	
TAUX DE RETOUR	0,6	
TAUX D'ÉLIMINATION	0,3	

3.3.4 Distance et coûts

Le Tableau (3-4) ci-dessous représente la distance minimale entre les usines et les magasins (clients); où l'ensemble des distances relie un nœud d'une usine $m \in M$ la même zone de local m avec un nœud de client (centre de distribution) $l \in L$ dans une autre zone l . La distance est supposée être en *km*.

Tableau 3.4: Distance (km) entre Usines et magasins

USINES		MAGASINS (CLIENTS)											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
MA	RA	0	15	37	55	24	60	18	33	48	40	58	67
MB	RB	15	0	22	40	38	52	33	48	42	55	61	61
MC	RC	37	22	0	18	16	30	41	28	20	58	39	39
MD	RD	55	40	18	0	34	12	59	46	24	62	43	34
ME	RE	24	38	16	34	0	36	25	12	24	47	37	43
MF	RF	60	52	30	12	36	0	57	42	12	50	31	22
MG	RG	18	33	41	59	25	57	0	15	45	22	40	61
MH	RH	33	48	28	46	12	42	15	0	30	37	25	46
MI	RI	48	42	20	24	24	12	45	30	0	38	19	19
MJ	RJ	40	55	58	62	47	50	22	37	38	0	19	40
MK	RK	58	61	39	43	37	31	40	25	19	19	0	21
ML	RL	67	61	39	34	43	22	61	46	19	40	21	0

Cette solution fournira d'abord la quantité annuelle minimale de produits livrés entre une usine localisée et un magasin (clients). Nous donnerons ensuite le coût annuel minimal de distribution de la demande annuelle de chaque client (magasins) à chacune des usines en fonction de la quantité minimale livrée. Les résultats seront présentés dans les tableaux (3-5), (3-6), (3-7) et (3-8). Le modèle traite d'un problème de localisation dont l'objectif est de minimiser le coût total (les coûts fixes + les coûts variables). Le modèle décrit ci-dessous pour résoudre ce problème est tiré du modèle générique décrit dans le chapitre 2.

3.4 Les contraintes ajoutées au modèle du chapitre II

Dans le problème étudié, nous avons la possibilité d'ouvrir des installations (usines de manufacturing et usines de remanufacturing) localisées au niveau des douze sites existants. Cette possibilité nous permet d'ouvrir graduellement le nombre d'usines afin de trouver une meilleure structure du réseau pour satisfaire la demande. De ce fait, pour tenir compte de cette condition, nous devons ajouter des contraintes qui stipulent l'extension graduelle du nombre d'installations (usines), ce qui constitue une caractéristique majeure du problème étudié. Ces contraintes nous permettent d'activer et/ou de désactiver les différents sites des usines. Pour pouvoir anticiper ces objectifs tactiques, nous allons ajouter une hypothèse au modèle tactique. L'hypothèse est décrite comme suit :

- Nous assumons maintenant que nous avons le choix de conserver ou de fermer les installations existantes (usines). Si nous fermons une installation, nous économisons sur les coûts fixes et les coûts variables d'opération.

Les notations additionnelles à la première partie (Modèle 1) sont les suivantes :

Paramètres et données :

NM : Nombre maximal d'usines de manufacturing existantes

NR : Nombre maximal d'usines de remanufacturing existantes

3.4.1 Redéfinition du modèle mathématique

Dans le modèle, il faut ajouter une contrainte permettant de fixer le nombre maximal d'usines de manufacturing et de remanufacturing, c'est-à-dire une contrainte permettant d'ouvrir ou de fermer les usines existantes. Les contraintes à ajouter au Modèle 1 sont les suivantes :

- 1) Contrainte de nombre maximal d'usines de manufacturing

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M y_m &\leq NM & \forall m \in NM \\ \sum_{m=1}^M y_m &= 0 & \forall m \notin NM \end{aligned} \quad (3.1)$$

2) Contrainte de nombre maximal d'usines de remanufacturing

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M Z_m &\leq NR & \forall m \in NR \\ \sum_{m=1}^M Z_m &= 0 & \forall m \notin NR \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.4.2 Méthode de résolution.

Pour résoudre ce problème, nous nous sommes basés sur les principes des heuristiques générales. En fait, il s'agit de principes algorithmiques permettant d'obtenir une solution en respectant certains principes de construction.

La méthode de résolution est donc de partir d'une solution incomplète que l'on complète au fur et à mesure jusqu'à obtenir un choix de solution définitif. À chaque étape, on impose au système le nombre d'usines qu'il doit activer parmi les douze existantes pour la satisfaire la demande des clients. On traite successivement les solutions sans revenir sur les décisions prises à propos des solutions précédentes. On part de deux sites choisis par le système lors de la première résolution et on augmente graduellement le nombre d'usine à activer. Pour chaque de résolution, on laisse libre le système de nous donner la meilleure configuration du réseau en fonction du nombre de site activé afin de répondre à la demande des clients. Cependant en fonction des coûts d'activation des usines le système pourra choisir les sites qu'il faut pour satisfaire la demande à un moindre coût. On constate qu'à chaque résolution, le système choisit les usines qui ont le plus faible coût d'activation, et qu'il relie les sites précédemment sélectionnés à son plus proche voisin parmi. Ce qui nous conduit néanmoins à une solution exacte.

3.5 Les résultats

La solution de ce modèle avec le logiciel LINGO donne un coût total optimal de **Z = 101790 \$** avec la possibilité d'ouvrir toutes les usines de manufacturing et remanufacturing. La quantité annuelle minimale de produits et le coût de distribution annuel minimal entre les usines et les magasins sont présentés dans les tableaux (3-5), (3-6), (3-7) et

Tableau 3.7 La quantité annuelle minimale de produits livrés entre l'usine de remanufacturing et le client

	PRODUCTIN DU FLUX INVERS R_{mL}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
RA	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	7	0	10	0	0	5	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	2	0	4	7	0	0	0	0
RI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
RK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8

Tableau 3.8 Coût annuel de distribution (\$) entre usine de remanufacturing possible et le client

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	67	0	0	0	0	48	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	19	0	48	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les figures ci-dessus montrent que le système favorise les produits de seconde main par rapport aux nouveaux produits, car il coûte cher de produire de nouveaux produits. Donc, la solution proposée est d'ouvrir plus d'usines de remanufacturing que d'usines de manufacturing, ce qui permettra de produire plus de produits recyclés afin d'amortir le coût total.

Tableau 3.12 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et clients cas où seulement deux usines sont activées.

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	0	0	0	0	0	0	370	0	352	0	0
EB	0	0	158	288	122	458	185	0	437	0	439	439
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5.2 Solution phase (2)

Cette étude se base sur l'activation de nouveaux sites en plus de garder les premiers. Les nouveaux sites qui sont activés sont les sites C et D. Les magasins vont être livrés depuis les usines qui seront activées dans les sites localisés. La quantité minimale de produits entre les usines activées dans les sites A, B, C, D et les magasins (clients) est présentée dans les tableaux (3-13) et (3-14). Les usines qui sont activées dans quatre sites localisés permettent de satisfaire la demande entre les usines m et les magasins l avec un coût total de $Z = 102\ 136$. Les coûts annuels minimaux sont présentés dans les tableaux (3-15) et (3-16).

Tableau 3.13 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 2

	PRODUCTION DU FLUX DIRECT X _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
MA	9	3	0	0	0	0	7	0	0	22	0	0
MB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MC	0	3	7	0	3	0	0	16	10	0	19	0
MD	0	0	0	11	0	14	0	0	3	0	0	20
ME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ML	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.14 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 2

	PRODUCTIN DU FLUX INVERSE R _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
RA	6	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
RB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	0	0	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0
RD	0	0	0	7	0	10	0	0	0	0	0	0
RE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Dans cette solution, nous remarquons que les produits fabriqués sont plus élevés que les produits recyclés et que les magasins H, I, J, K et L ont été desservis uniquement par les usines de manufacturing. Le site B n'a pas été activé, car il coûte cher de produire dans ce site en raison de ses coûts fixes élevés.

Tableau 3.15 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 2.

	COÛTS FIXE DU FLUX DIRECT											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	5	0	0	0	0	13	0	0	88	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	7	0	0	5	0	0	45	20	0	74	0
ED	0	0	0	0	0	17	0	0	7	0	0	68
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.16 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 2.

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	48	0	0	0	0	58	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La différence entre la solution phase (1) avec deux sites localisés où des usines sont activées et la solution phase (2) avec quatre sites localisés réside dans le coût total qui entraîne l'activation de deux autres sites avec un $Z = 133\,921$ à $Z = 102\,136$. Le but est d'éviter l'augmentation des coûts de transport liée aux distances entre les usines éventuelles et les magasins, mais aussi l'augmentation dans les délais de livraison pour les magasins éloignés.

3.5.3 Solution phase (3)

Dans cette solution, nous décidons de localiser deux autres sites en plus des quatre déjà localisés. Donc, le choix des usines pour desservir les magasins se fait sur les six sites localisés. La solution de cette phase (3) est présentée dans les tableaux suivants. Les produits d'un magasin proviennent de plusieurs usines de façon à minimiser le coût total $Z = 102\ 067$

Tableau 3.17 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 3

	PRODUCTION DU FLUX DIRECT X _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
MA	9	3	0	0	0	0	7	0	0	22	0	0
MB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MC	0	3	7	0	3	0	0	16	0	0	0	0
MD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MF	0	0	0	11	0	14	0	0	8	0	19	20
MG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ML	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.18 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 3

	PRODUCTIN DU FLUX INVERSE R _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
RA	6	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
RB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	0	0	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0
RD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	7	0	10	0	0	5	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les tableaux (3-17) et (3-18) donnent les solutions de la phase (3). Cette solution propose d'activer les usines se trouvant sur les sites A, C et F parmi les six sites localisés afin de

desservir la demande des magasins (clients). Les tableaux (3-19) et (3-20) présentent les coûts annuels de distribution pour la solution phase (3).

Tableau 3.19 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 3

	COÛTS FIXE DU FLUX DIRECT											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	5	0	0	0	0	13	0	0	88	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	7	0	0	5	0	0	45	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	13	0	0	0	0	10	0	59	44
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.20 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 3

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	48	0	0	0	0	58	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	67	0	0	0	0	48	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5.4 Solution phase (4)

Dans cette phase, nous allons continuer d'augmenter le nombre de dépôts activés tout en gardant les précédents activés dans le but de voir comment la structure du réseau logistique se comporte. Pour ce modèle, la seule contrainte à réviser est celle en fonction du nombre de

dépôts possibles. La meilleure solution s'avère celle avec huit sites localisés : les usines A, B, C, F, G et H. La quantité annuelle minimale entre les usines activées et les magasins est présentée dans les tableaux ci-dessous. Le coût total s'élève à $Z = 101\ 994$.

Tableau 3.21 : Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 4.

	PRODUCTION DU FLUX DIRECT X _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
MA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MF	0	0	7	11	0	14	0	0	8	0	15	20
MG	9	6	0	0	3	0	7	9	0	22	4	0
MH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ML	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.22 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 4

	PRODUCTIN DU FLUX INVERSE R _{mi}											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
RA	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	7	0	10	0	0	5	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	2	0	4	7	0	0	0	0
RI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nous constatons que dans cette solution, nous avons deux usines de manufacturing et de remanufacturing qui sont activées. Donc, la demande des magasins est satisfaite par deux usines de manufacturing et quatre usines de remanufacturing. Les tableaux (3-23) et (3-24)

présentent les coûts annuels de distribution entre les usines et les magasins dans la solution phase 4.

Tableau 3.23 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 4.

	COÛTS FIXE DU FLUX DIRECT											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	21	13	0	0	0	0	10	0	47	44
EG	16	20	0	0	8	0	0	14	0	48	16	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.24 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 4.

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	67	0	0	0	0	48	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	19	0	48	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5.5 Solution phase (5)

Dans les mêmes conditions que les phases précédentes, nous présentons les résultats de la solution phase 5 dans les tableaux (3-25), (3-26), (3-27) et (3-28).

Tableau 3.25 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de manufacturing et les magasins solution phase 5

	PRODUCTION DU FLUX DIRECT Xmi											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
MA	9	6	0	0	3	0	7	0	0	0	0	0
MB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MI	0	0	7	11	0	14	0	9	8	13	19	20
MJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ML	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.26 Quantité minimale de nouveaux produits livrés entre les usines de remanufacturing et les magasins solution phase 5

	PRODUCTIN DU FLUX INVERSE Rmi											
	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ	EK	EL
RA	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RF	0	0	0	7	0	10	0	0	5	0	0	0
RG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RH	0	0	0	0	2	0	4	7	0	0	0	0
RI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
RK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Cette solution propose d'activer les sites A, C, F, H, I et J pour desservir la demande des magasins. En ce qui concerne le site A, le système choisit de faire du manufacturing et du remanufacturing tandis que pour le site I, il choisit uniquement de faire du manufacturing. Les tableaux (3-27) et (3-28) présentent les coûts annuels de distribution entre les usines et les magasins dans la solution phase 5.

Tableau 3.27 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de manufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 5

	COÛTS FIXE DU FLUX DIRECT											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	9	0	0	7	0	13	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EI	0	0	14	26	0	17	0	27	0	49	36	38
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3.28 Coût annuel de distribution (\$) entre usines de remanufacturing possible et les magasins (clients) solution phase 5

	COÛTS FIXE DU FLUX INVERSE											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
EA	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EF	0	0	0	67	0	0	0	0	48	0	0	0
EG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EH	0	0	0	0	19	0	48	0	0	0	0	0
EI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5.6 Solution finale

Dans cette section, nous présentons la solution optimale en gardant les hypothèses des phases précédentes (12 sites autorisés et aucune restriction de distance). La solution optimale est déterminée en fonction du nombre de sites S activer. Ces solutions sont testées avec S= 2 à S=12. Les résultats d'optimisation pour ces scénarios sont présentés dans le Tableau (3-29).

Ce tableau montre la solution optimale en fonction du nombre de sites activés pour chaque résolution. Le coût total le plus élevé est $Z = 133\,921$, cas où $S=2$. Ce résultat montre que la politique est inefficace, car elle oblige le système à établir des liens entre les usines et les magasins (clients) les plus éloignés pour la satisfaire. Dans le cas contraire, lorsque le nombre d'usines incluses au site S augmente, nous remarquons que cette solution offre plus de choix aux magasins d'être desservis par les usines plus proche, ce qui permet réduire le coût total à $Z = 101790$

Tableau 3.29 La solution optimale en fonction du nombre site S (usines activées)

Nombres d'usines imposées : S	Le nombre de d'usines activées imposées	Les usines sélectionnées pour satisfaire la demande	Coût total : Z
$S = 2$	A, B	A, B	133921
$S = 4$	A, B, C, D	A, C, D	102136
$S = 6$	A, B, C, D, F, K	A, C, F	102067
$S = 8$	A, B, C, D, F, K, G, H	A, C, F, G, H	101994
$S = 10$	A, B, C, D, F, K, G, H, I, J	A, C, F, H, I, J	101872
$S = 12$	A, B, C, D, F, K, G, H, I, J, K, L	A, C, F, H, J, K, L	101790

Les figures (3-2) et (3-3) présentent les détails des variations des coûts annuels minimaux de distribution au sujet de chaque usine ouverte. Ces figures montrent que les coûts variables dépendent de la distance de distribution et de la quantité livrée. Nous remarquons que les magasins (clients) sont principalement desservis par l'usine K, ensuite par l'usine la plus proche A et le reste des produits sont livrés par les usines les plus éloignées.

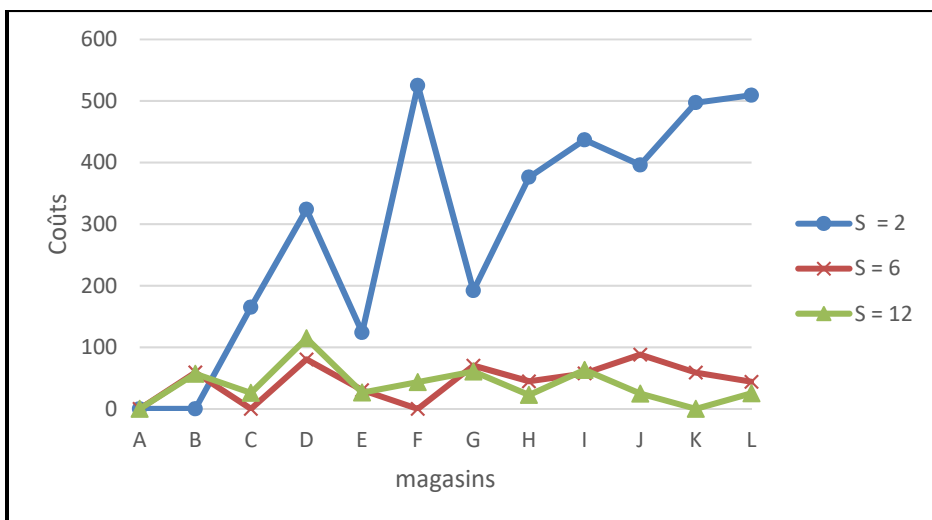


Figure 3.2 Variation du coût annuel minimal de distribution dans différents magasins

La figure (3-3) suivante montre que le coût annuel de distribution commence à se stabiliser en fonction de l'augmentation du nombre d'usines activées.

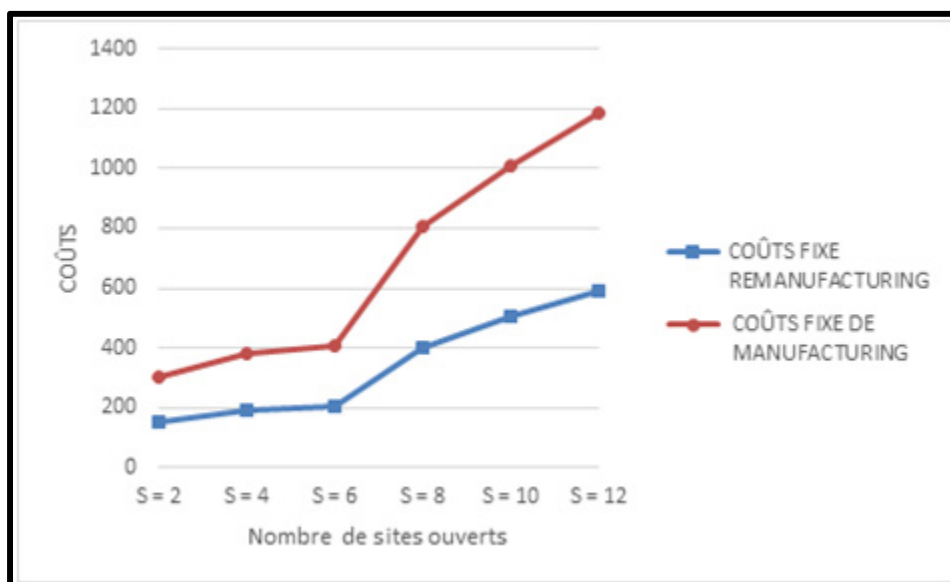


Figure 3.3 variation du coût fixe de manufacturing et de remanufacturing en fonction du nombre de dépôts activés

Nous observons que dans la Figure (3-3), les coûts de manufacturing sont plus élevés que les coûts de remanufacturing, ce qui est avantageux, car le système pourra favoriser les produits recyclés.

Nous remarquons qu'avec les variations des coûts (coûts fixes, coûts variables), la politique d'ouvrir des usines s'arrête lorsqu'il n'y a pas de changement dans le coût annuel de distribution ou lorsque l'usine à ouvrir ne permet pas de réduire le coût total de distribution ou bien encore lorsque le coût total augmente avec l'augmentation du nombre de sites (usines) activés. La meilleure solution que nous pouvons proposer est celle avec l'autorisation d'ouvrir les usines A, C, F, K pour desservir les 12 magasins avec un service de qualité (voir la figure suivante).

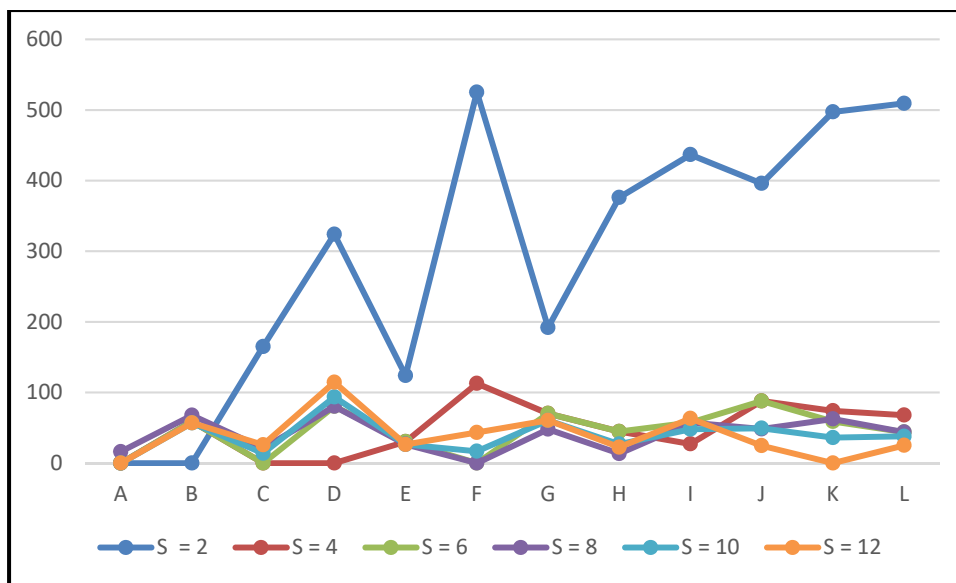


Figure 3.4 Variation du coût annuel minimal de distribution dans différents magasins

La Figure 3-5 présente la solution optimale proposée au gestionnaire de la logistique. Le réseau proposé est composé du site des usines de manufacturing et de remanufacturing et du site des clients (magasins). Sur les arcs, on trouve la quantité de produits livrés aux clients. La somme sur les arcs représente respectivement les produits fabriqués et les produits recyclés dans le même site. Une autre solution pourrait être adoptée si le gestionnaire ne souhaite pas que les magasins reçoivent les livraisons des usines situées à plus de 50 km. Étant donné qu'il n'y a

pas de restriction sur l'activation des usines, la solution donnée par le système est que chaque usine satisfasse la demande de son magasin local avec un coût total de $Z = 103\ 680$. Cette solution donne un coût annuel de distribution nul, car chaque usine dessert son magasin local. Donc, le système minimise à zéro la distance maximale par rapport aux sites alloués.

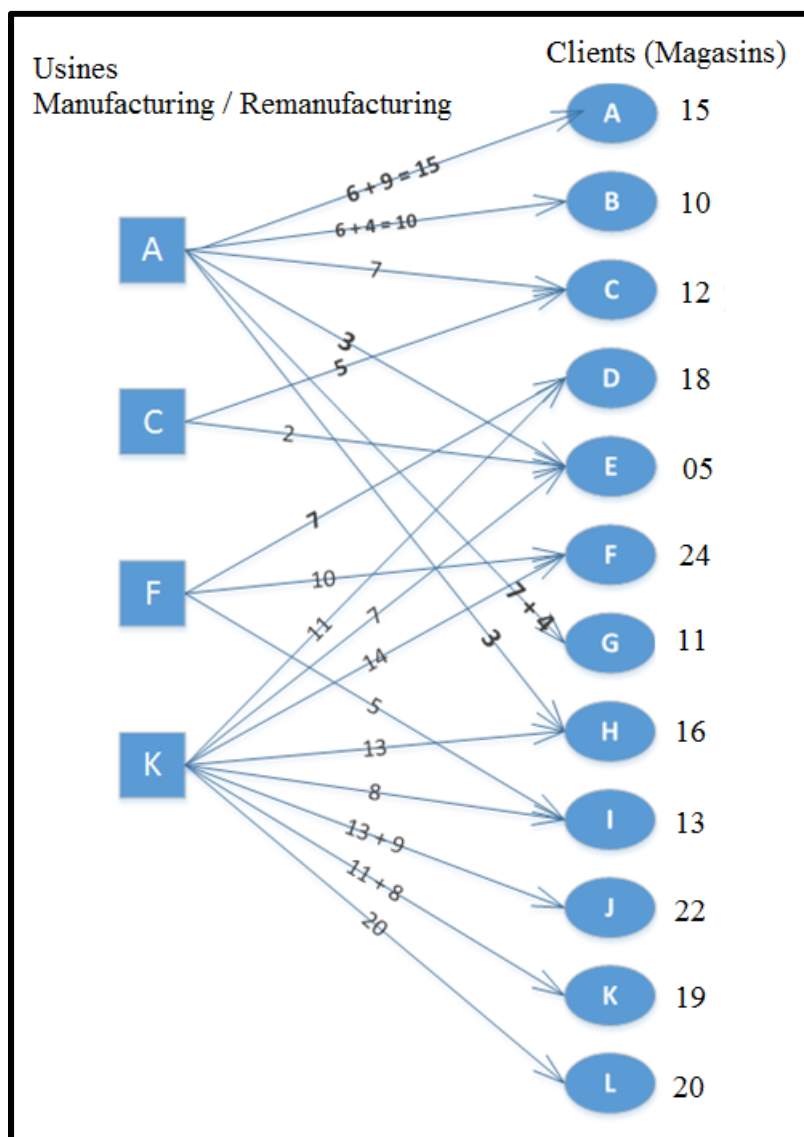


Figure 3.5 Le réseau logistique proposé

3.6 Analyses de sensibilité

Dans cette section, nous allons étudier le comportement du système en fonction des variations des coûts de manufacturing, des coûts de remanufacturing, du taux de recyclage et du taux d'élimination.

3.6.1 Cas où le coût de production et de recyclage change de valeur

La Figure (3-6) représente la variation du coût total en fonction de l'augmentation des coûts de production de nouveaux produits et des coûts de recyclage des produits usagés.

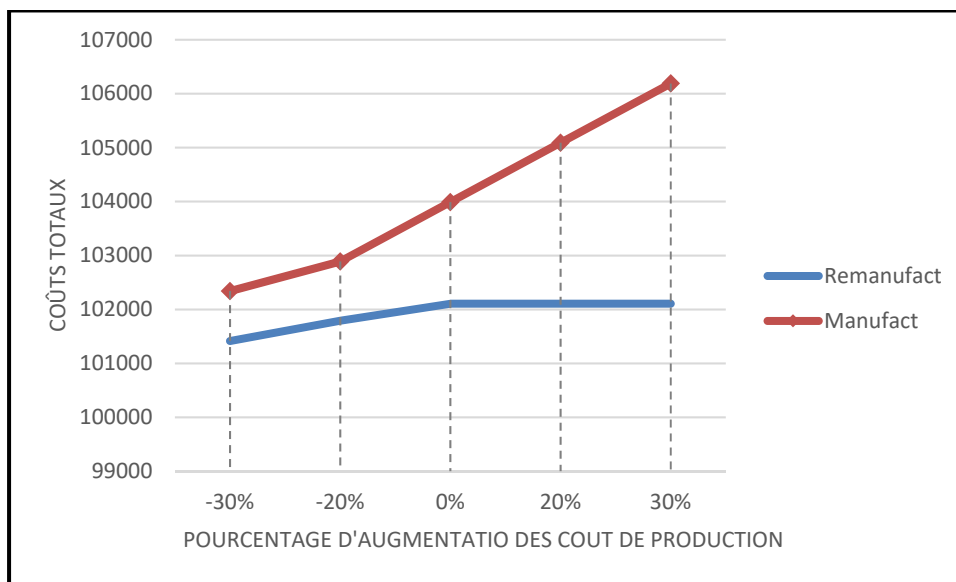


Figure 3.6 Variation des coûts de manufacturing et de remanufacturing

Nous constatons dans cette figure que le coût total de manufacturing est plus élevé que le coût total de remanufacturing. Par contre, les deux coûts ont tendance à se croiser si les coûts totaux de production des usines de manufacturing et des usines de remanufacturing s'affaiblissent. Car le système combine les nouveaux produits et les produits de seconde main pour satisfaire la demande. Toutefois, s'ils dépassent les 0%, nous notons une grande différence entre les coûts. Avec l'augmentation du coût de manufacturing le système ne fabrique de moins en moins des nouveaux produits et favorise les produits de seconde main.

3.6.2 Cas où la quantité de produits retournés augmente (augmentation du taux de retour).

Dans ce cas-ci, nous allons étudier l'impact de l'augmentation du pourcentage de retour sur les décisions tactiques d'approvisionnement et de production. Le taux de retour pour le cas de base est de 60% avec un taux d'élimination de 30%. Dans cette analyse, nous avons fait varier le taux de retour (pourcentage de retour de produit 25% à 80%). Les résultats de cette analyse sont présentés dans la Figure (3-7) ci-dessous.

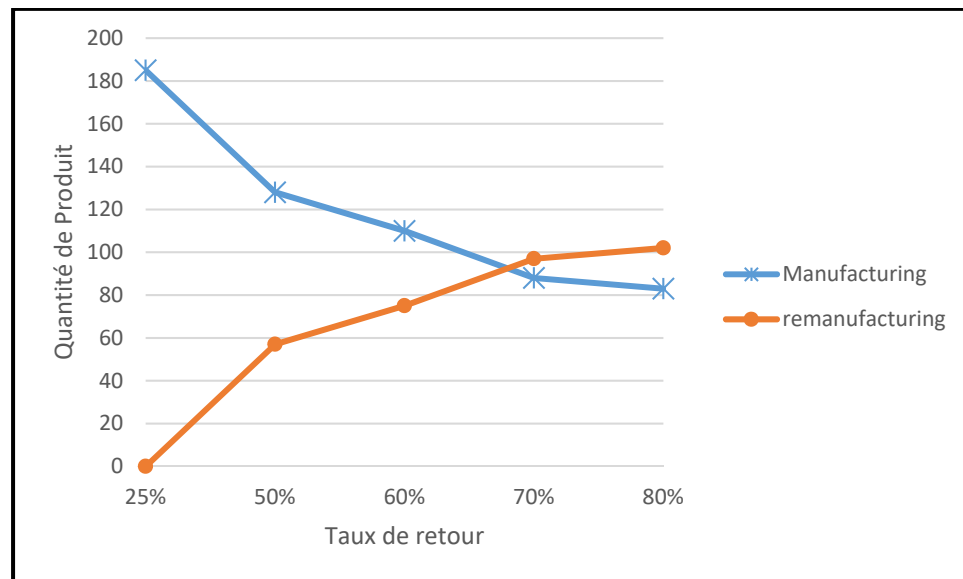


Figure 3.7 Variation du taux de retour de 0.25 à 0.80

Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 3-7, plus le pourcentage de produits retournés augmente, plus la quantité de produits remanufacturés augmente et la quantité de produits manufacturés diminue. Avec les pourcentages de retours de 70%, nous observons que la quantité de produits remanufacturés est supérieure à la quantité de produits manufacturés, ce qui est raisonnable, car avec un taux de 70%, nous disposons de largement de matière pour fabriquer des produits de seconde main.

Cependant, cette configuration occasionne l'augmentation du coût de recyclage. Dans le cas contraire, si le taux de retour est faible, soit 50% ou 25%, la fabrication de nouveaux produits

est priorisée. La Figure 3-8 donne la variation du coût total en fonction de l'augmentation du taux de retour.

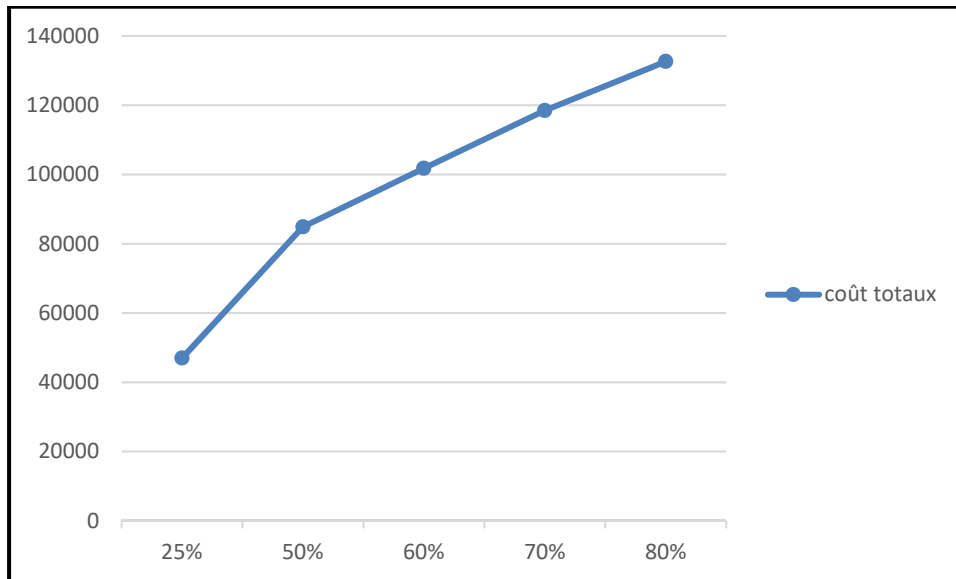


Figure 3.8 Les coûts totaux en fonction des taux de retour

Le coût total augmente si toutefois le taux de retour augmente, ce qui est justifié, car la quantité de produits recyclés augmente aussi.

3.6.3 Cas où la quantité de produits éliminés augmente (augmentation du taux d'élimination).

Dans cette section, nous effectuons une étude pour voir comment va se comporter le système si le taux d'élimination venait à changer. Autrement dit, le comportement du système est étudié si on dispose d'une grande quantité de produits à recycler (taux d'élimination faible) ou si la quantité de produits recyclage est faible (taux d'élimination élevé). Les résultats de cette analyse sont illustrés dans la Figure 3-9 ci-dessous.

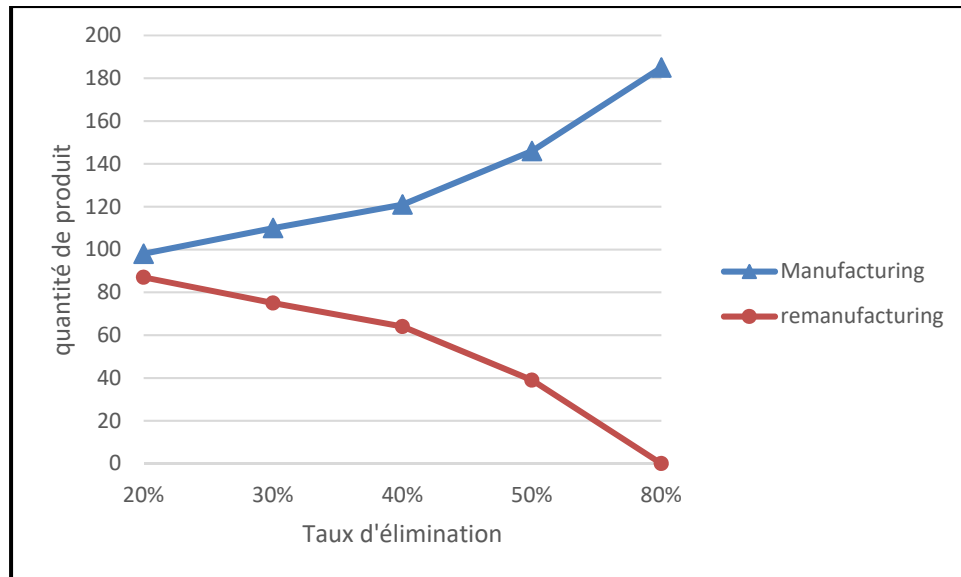


Figure 3.9 Variation du taux d'élimination de 20% à 80%

Avec un taux de retour de 80%, le système favorise la fabrication de nouveaux produits au lieu de fabriquer des produits recyclés. La Figure (3-9) montre que la courbe de remanufacturing passe de zéro à 80%. Cependant, plus le taux d'élimination est faible, plus la quantité de produits recyclés augmente ; cependant, la quantité de produits manufacturés diminue.

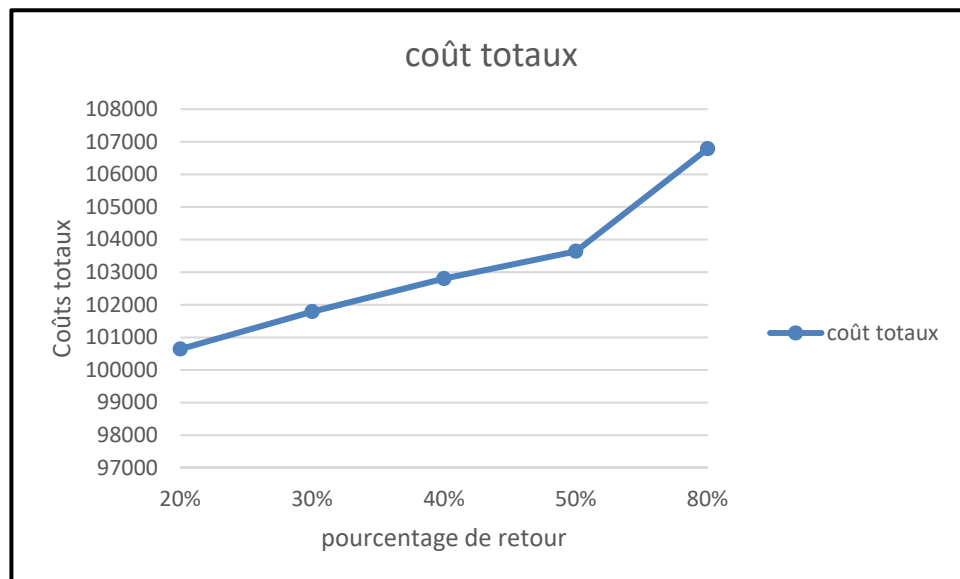


Figure 3.10 Variation du coût total avec un taux d'élimination allant de 20% à 80%

La Figure 3-10 montre la variation du coût total en fonction du taux de retour. Nous constatons que si le taux de retour augmente, le coût total augmente aussi, car à 80% il y a plus de produits à recycler, donc le système opte pour la fabrication de nouveaux produits (manufacturing), ce qui occasionne cette augmentation du coût total.

3.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'appliquer notre modèle générique décrit dans le chapitre 2 à un cas spécifique afin de le valider. Il s'agissait de résoudre un problème de réseau dans lequel on trouve 12 sites où on peut faire des activités de manufacturing et des activités de remanufacturing afin de satisfaire la demande de 12 clients. Le problème a été résolu à l'aide de la programmation linéaire (méthode heuristique ascendante). Nous avons présenté différents cas de solution jusqu'à opter pour une solution optimale. Ensuite, nous avons établi une analyse de sensibilité afin de valider le modèle décrit pour résoudre le problème. L'analyse de sensibilité portait sur la variation des coûts tels que le coût de production CP et le coût de recyclage CR. Par la suite, nous avons mené une étude sur les paramètres tels que le taux de retour et le taux d'élimination. Toutes ces études nous ont permis de mettre en évidence l'importance des coûts de remanufacturing par rapport aux coûts de manufacturing dans le cas où les produits remanufacturés seraient vendus à un prix similaire à celui des produits manufacturés. Le chapitre qui suit va nous permettre d'étudier la dynamique des machines, soit la planification du niveau opérationnelle.

CHAPITRE 4

LE MODÈLE OPÉRATIONNEL ET SON APPLICATION

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de planification permettant de prendre en compte les objectifs à courts termes. Il s'agit d'optimiser la production après avoir déterminé la planification tactique dans les chapitres précédents. La gestion d'une telle unité de production en environnement manufacturier passe par le contrôle de certains facteurs dont la variabilité peut être aléatoire ou déterministe. En ce qui concerne les facteurs aléatoires, nous pouvons avoir les arrivées de pannes et de réparations des machines de production. C'est ce contrôle qui rend la fonction de gestion assez complexe. Ceci peut être encore plus complexe lorsqu'on a des tailles importantes d'unité de production (nombre de machines, nombre de produits).

C'est le cas dans ce chapitre, dont le but est de déterminer les taux de production optimal d'un système manufacturier afin de minimiser les coûts de production. Il s'agit d'un système M4P2 (système constitué de quatre machines produisant deux types de produits) et pour lequel le coût de lancement de production est pris en compte. Nous couvrirons un ensemble d'étapes généralement présentées dans les problèmes d'optimisation de production en système manufacturier.

Le contrôle optimal permet à chaque instant de prendre des décisions sur l'action à entreprendre sur le système afin de produire au coût minimal possible, c'est-à-dire de savoir à quel taux de production nous devons produire, qu'il s'agisse des produits fabriqués avec de la matière première ou des produits recyclés.

Pour ce faire, nous allons dans un premier temps procéder au développement du modèle mathématique du système en nous appuyant sur des hypothèses précises. Une fois ceci fait, une résolution numérique du modèle mathématique sera effectuée pour un cas de base à l'aide du logiciel MATLAB. Ceci nous permettra pour ce cas de base d'obtenir la politique optimale de production. Tout ceci sera conclu par une analyse de sensibilité basée sur les données du problème afin de tester la robustesse du modèle et l'influence de certains paramètres sur le critère de performance étudié qui, dans notre cas, est le coût de production.

4.2 Notations et hypothèses de modélisation

Cette section présente les notations et les hypothèses que nous utiliserons dans le développement du modèle mathématique du système.

4.2.1 Notations

Les éléments définissant notre modèle analytique sont :

$u_{ji}(t)$	Taux de production de la machine j pour le produit i
\overline{u}_{ji}	Taux de production max de la machine j pour le produit i
d_i	Taux de demande des produits finis (PF) de type i
r_i	Taux de retour pour le produit de type i
$\alpha(t)$	Processus stochastique décrivant le système M_4P_2
$x(t)$	Dynamique du stock des différents types de produits
B	Espace des modes possibles du système = $\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$
$q_{ij}(\cdot)$	Taux de transition entre les modes du système $\forall (i, j) \in B$
$MTBF$	Temps moyen de bon fonctionnement avant panne
$MTTR$	Taux de panne des machines
c^+	Coût de mise en inventaire
c^-	Coût de pénurie
c_r	Coût de remanufacturing pour les différents types de produits
c_u	Coût de production pour les différents types de produits
c^α	Coût de la maintenance corrective
ρ	Taux d'actualisation
$disp$	Le nombre de produits éliminés

4.2.2 Hypothèses de modélisation

Afin de modéliser notre système, nous émettons les hypothèses préalables suivantes ;

- Le modèle est à temps continu état discret
- Les matières premières pour la production de chaque type de produit sont disponibles et illimitées.
- La demande de produits finis pour chaque type de produit est connue et représentée par un taux constant dans le temps.
- Le taux de production maximal de chaque type de produit est connu.
- Toutes les défaillances sont instantanément détectées et réparées. Une action de maintenance corrective renouvelle le système de production à son état initial.
- Les machines produisent deux types de produits.
- Le coût de la pénurie dépend de la quantité et du temps de pénurie.
- Pour chaque type de produit, une fois que la production commence à un débit donné, aucun réglage de la vitesse n'est autorisé tant que la machine n'est pas en panne (mode défaillant) ou si l'unité actuelle est terminée.

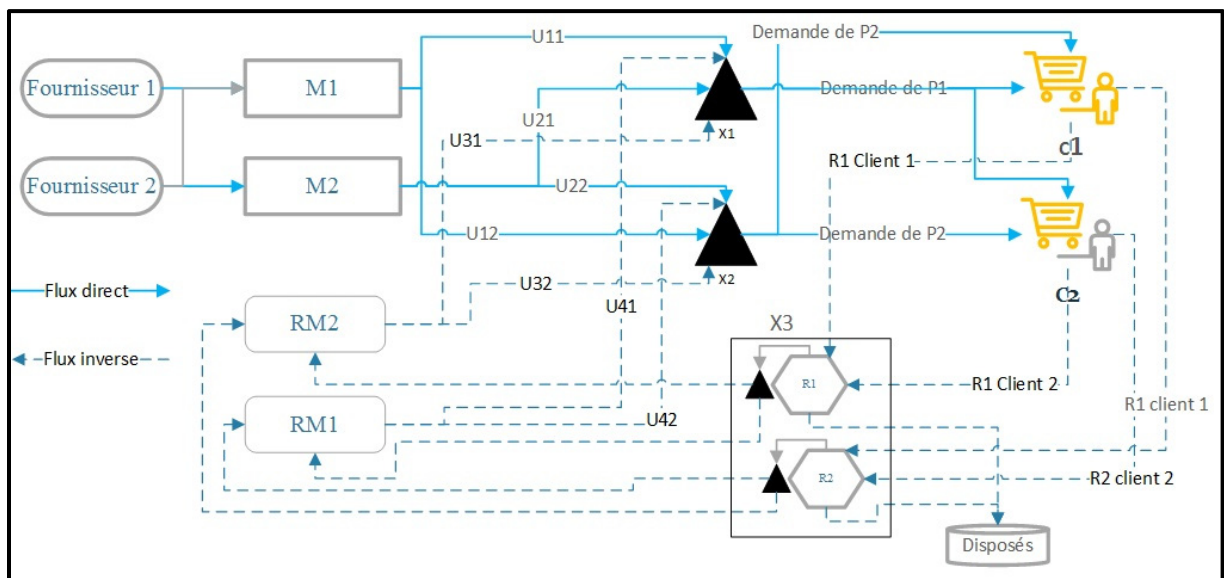


Figure 4.1 Le système manufacturier étudié avec les taux de production

4.3 Formulation du problème

Le système de production étudié est composé de quatre machines capables de produire deux types de produits différents. Le système étudié est dynamique et les coûts associés au changement de configuration (setup) de la machine d'un type de produit à l'autre sont négligeables, ce qui n'entraîne pas un temps et un coût de setup à chaque fois qu'une décision est prise pour commuter la production de P_1 à P_2 .

Les différents produits nécessitent un temps de production moyen noté $P_i > 0$ ($i = 1, 2$) et commandé avec un taux de demande constant d_i .

Soit $x_i(t)$ le niveau de stock des deux types de produits P_i , ($i = 1, 2$) et $u_{ij}(t)$ le taux de production des deux types de produits P_i , ($i = 1, 2$) pour chaque machine M_j ($j = 1, 2, 3, 4$).

Soit x, u et d les vecteurs $(x_1, x_2, x_3)^T$, $(u_{11}, u_{12}, u_{21}, u_{22}, u_{31}, u_{32}, u_{41}, u_{42})^T$ est $(d_1, d_2)^T$, respectivement, sachant que la notation A^T désigne la transposition de A . À un moment donné, on peut décrire le système par un état hybride qui consiste en une portion continue (dynamique des stocks) et une partie discrète (mode des machines). Un processus stochastique est utilisé pour décrire le mode des machines comme suit: $\xi(t) \in B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$

$$\xi(t) = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{si aucune des machines n'est opérationnelle.} \\ 2 \rightarrow \text{si une seule machine de remanufacturing est opérationnelle.} \\ 3 \rightarrow \text{si deux machines de remanufacturing sont opérationnelles.} \\ 4 \rightarrow \text{si une seule machine de manufacturing est opérationnelle.} \\ 5 \rightarrow \text{si une machine de manufacturing et une machine de remanufacturing sont opérationnelles.} \\ 6 \rightarrow \text{si deux machines de remanufacturing et une machine de manufacturing sont opérationnelles.} \\ 7 \rightarrow \text{si uniquement deux machines de manufacturing sont opérationnelles.} \\ 8 \rightarrow \text{si deux machines de manufacturing et une machine de remanufacturing sont opérationnelles.} \\ 9 \rightarrow \text{si toutes les machines sont opérationnelles.} \end{cases}$$

Nous supposons que les temps de fonctionnement et les temps d'arrêt des machines sont distribués de façon exponentielle avec des vitesses p et r , respectivement. Par conséquent, l'état des machines évolue selon un processus de Markov en temps continu avec des modes

$\xi(t) \in M = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. Le diagramme de transition des états de la chaîne de Markov associé à la dynamique des machines est montré à la Figure 4-2. L'évolution des états des machines dans l'intervalle $(t, t + \delta t)$.

Où r désigne le taux de réparation telle que $q_{12} = \frac{1}{MTBF} > 0$ et p désigne le taux de panne telle que $q_{21} = \frac{1}{MTTR} > 0$

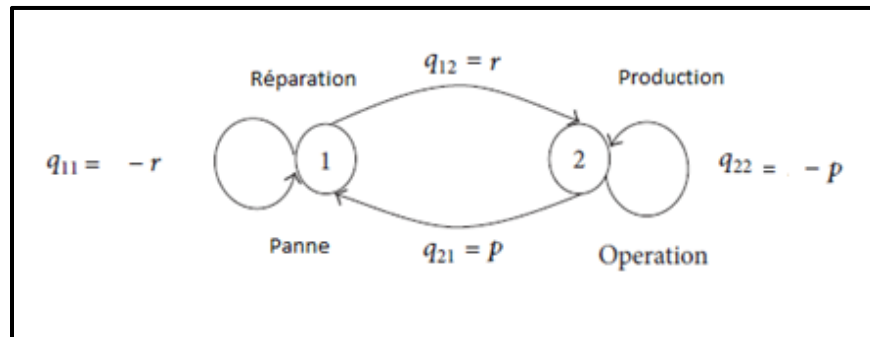


Figure 4.2 Le diagramme des états de la chaîne de Markov associé à la dynamique d'une machine.

Le graphe complet de transition de changement d'état du système est donné par la Figure 4-3 ci-dessous.

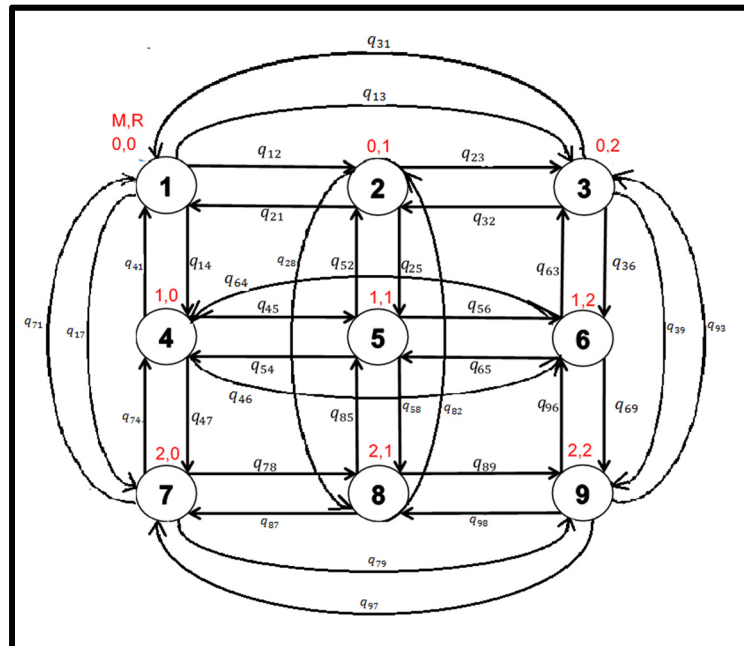


Figure 4.3 Le diagramme complet des états de transition du système étudié.

4.3.1 Matrice des taux de transition

L'état du processus est modélisé par une chaîne de Markov à temps continu et à états discrets avec une matrice des taux de transition $Q = (q_{\alpha\beta})$. Les taux de transition et la matrice des taux de transition sont définis de la manière suivante :

$$\Pr[\zeta(t + \delta t) = \beta / \zeta(t) = \alpha] = \begin{cases} q_{\alpha\beta}\delta t + o(\delta t) \rightarrow si \alpha \neq \beta \\ 1 + q_{\alpha\alpha}\delta t + o(\delta t) \rightarrow si \alpha = \beta \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\rightarrow \alpha \text{ et } \beta \in B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

Le processus $\xi(t)$ peut être décrit par une matrice de taux de transition $Q = \{q_{\alpha\beta}\}$, définie par

$$q_{\alpha\beta} \geq 0 \text{ si } \alpha \neq \beta \text{ et } q_{\alpha\alpha} = - \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta}, \text{ sachant que } \alpha, \beta \in B. \quad (4.2)$$

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & 0 & 0 & q_{17} & 0 & 0 \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & 0 & q_{26} & 0 & 0 & q_{28} & 0 \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & 0 & 0 & q_{36} & 0 & 0 & q_{39} \\ q_{41} & 0 & 0 & q_{44} & q_{45} & q_{46} & q_{47} & 0 & 0 \\ 0 & q_{52} & 0 & q_{54} & q_{55} & q_{56} & 0 & q_{58} & 0 \\ 0 & 0 & q_{63} & q_{64} & q_{65} & q_{66} & 0 & 0 & q_{69} \\ q_{71} & 0 & 0 & q_{74} & 0 & 0 & q_{77} & q_{78} & q_{79} \\ 0 & q_{82} & 0 & 0 & q_{85} & 0 & q_{87} & q_{88} & q_{89} \\ 0 & 0 & q_{93} & 0 & 0 & q_{96} & q_{97} & q_{98} & q_{99} \end{pmatrix}$$

Le taux de transition d'un état $\alpha \in B$ à un état $\beta \in B$ au temps t est défini par

$$q_{\alpha\beta} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} [\text{prob}(\xi(t + \delta t) = \beta \mid \xi(t) = \alpha) / \delta t], \alpha \neq \beta$$

Sachant que $\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{0(\delta t)}{\delta t} = 0$, nous pouvons conclure que $q_{12} = r$ et $q_{21} = p$

4.3.2 Domaine de commande admissible

L'ensemble des commandes admissibles est donné par l'inéquation ci-dessous :

$$\Gamma(\alpha) = \left\{ u = (u_{ij}(t)) \mid 0 \leq u_{ij}(\cdot) \leq U_{ij}^+, \text{ avec } \rightarrow \begin{cases} i=1,2,3,4 & j=1,2 \\ t \in R \end{cases} \right\} \quad (4.3)$$

Soit $u_{ij}(t) \in R^n$ le vecteur du taux de production du système au temps t ($t > 0$).

4.3.3 Conditions de faisabilité

La production doit pouvoir satisfaire la demande à chaque mode de fonctionnement. Autrement dit, pour que le système de production soit viable, il est nécessaire qu'il soit capable de produire plus que la demande à son taux de production maximal. A défaut il est assurément impossible de trouver une solution à ce problème. Cette condition est décrite dans l'équation 4.4.

$$0 \leq u_{ij}(\cdot) \leq U_{ij}^+, \quad \{i = 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2\} \quad (4.4)$$

$$\pi_1 \cdot u_{11} + \pi_2 \cdot u_{12} + \pi_3 \cdot u_{21} + \pi_4 \cdot u_{22} + \pi_5 \cdot u_{31} + \pi_6 \cdot u_{32} + \pi_7 \cdot u_{41} + \pi_8 \cdot u_{42} + \pi_9 (u_{11} + u_{12} + u_{21} + u_{22} + u_{31} + u_{32} + u_{41} + u_{42}) > d$$

4.4 Dynamique du stock

La variation du stock au cours du temps durant la production est régie par les équations (4.5) ci-dessous :

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = u_{11}^M(t) + u_{21}^M(t) + u_{11}^R(t) + u_{21}^R(t) - d_1, & x_1(0) = x_{10} = 0; \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = u_{12}^M(t) + u_{22}^M(t) + u_{12}^R(t) + u_{22}^R(t) - d_2, & x_2(0) = x_{20} = 0 \\ \frac{dx_3(t)}{dt} = r_1 - (u_{11}^R(t) + u_{21}^R(t)) + r_2 - (u_{12}^R(t) + u_{22}^R(t)) - disp, & x_3(0) = x_{30} = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Où x_{10}, x_{20}, x_{30} sont les stocks des retours et des produits finis à l'instant initial.

4.5 Coût instantané

Dans le coût instantané, si nous nous référons aux hypothèses énoncées, nous ne considérons que seulement les coûts de mise en inventaire, de pénurie, de production et de transition de l'état de panne à l'état opérationnel.

Soit A l'ensemble des décisions admissibles $(u_{11}, u_{21}, u_{12}, u_{22}, u_{31}, u_{41}, u_{32}, u_{42})$. Le coût instantané en fonction des coûts de stockage et des pénuries est donné par :

$$g(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} c_1^+ x_1^+ + c_1^- x_1^- + c_2^+ x_2^+ + c_2^- x_2^- + c_3^+ x_3^+ + \\ cm_1(u_{11}(t) + u_{21}(t)) + cm_2(u_{12}(t) + u_{22}(t)) + \\ cr_1(u_{31}(t) + u_{41}(t)) + cr_2(u_{32}(t) + u_{42}(t)) + c^\alpha \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec $\begin{cases} x_i^+ = \max(0, x_i) \\ x_i^- = \max(-x_i, 0) \end{cases}$

Où

C_i^+, C_i^- Sont des constantes positives qui représentent le coût de stockage et le coût de pénurie dus au retard de produit de type i avec $i = \{1, 2, 3\}$

Les pénalités chargées sur la production et les pannes sont considérées comme constantes et n'interviennent pas d'une façon directe dans le modèle d'optimisation. En effet, la pénalité des pannes s'exprime par la chute des stocks, tandis que pour la production, elle est pénalisée quand elle excède la demande, ce qui se manifeste par une hausse des niveaux d'inventaire.

Notons par ρ le taux d'actualisation : il s'agit d'un scalaire compris entre 0 et 1 qui va nous permettre de prendre en compte la valeur de l'argent dans le temps.

4.6 Coût total actualisé

Le coût total actualisé est donné par l'équation (4.7) suivante

$$j(\alpha, x_1, x_2, x_3, u_{11}, u_{21}, u_{12}, u_{22}, u_{31}, u_{41}, u_{32}, u_{42}) = \quad (4.7)$$

$$E \left\{ \int_0^\infty e^{-\rho t} g(\alpha, x_1, x_2, x_3) dt \mid \alpha(0) = \alpha, x_1(0) = x_1, \right. \\ \left. x_2(0) = x_2, x_3(0) = x_3 \right\} \quad \forall \alpha \in B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

Où

$E(B|A)$ est l'espérance mathématique de B sachant A

Et que ρ est le taux d'actualisation et elle tient compte de la dépréciation de la valeur de la monnaie dans le temps.

4.7 Fonction valeur et les conditions d'optimum

La solution aux problèmes peut être obtenue à partir des équations d'Hamilton-Jacobi-Bellman, communément appelées l'équation d'HJB. Pour ce faire, nous faisons appel à la fonction valeur sur un horizon de temps infini.

Selon Kenné & Gharbi (2004), la fonction valeur est une fonction liptchitzienne, donc elle est continue, strictement convexe et différentiable. Elle satisfait les équations d'HJB et cela justifie bien le fait que le coût obtenu par cette expression soit optimal (Yotat & Eric, 2017). La fonction valeur est donnée par l'équation (4.8).

$$v(\alpha, x) = \inf_{(u(.)) \in \Gamma(\alpha)} J(\alpha, x, u), \quad \alpha \in B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \quad (4.8)$$

L'équation d'HJB est donnée par la relation (4.9) et (4.10). Elle est la solution de l'équation (4.8) aux dérivées partielles non linéaires du premier ordre. Cette équation est obtenue en se basant sur les travaux de R. C. Merton en 1971, de Paul A. Samuelson, 1969 et de Richard Bellman en 1957.

$$\rho v(\alpha, x) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left\{ g(u, x) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} (v(\beta, x) + (u - d) \left(\frac{\partial v(\alpha, x)}{\partial x} \right)) \right\} \quad (4.9)$$

$$\rho v(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left\{ \begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} (v(\beta, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{dx_1(t)}{dt} \left(\frac{\partial v(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} \right) + \\ & \frac{dx_2(t)}{dt} \left(\frac{\partial v(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} \right) + \frac{dx_3(t)}{dt} \left(\frac{\partial v(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

4.8 Développement des équations numériques par l'approche de Kushner

L'idée principale de l'approche de Kushner consiste à utiliser une approximation du gradient de la fonction valeur $v(\alpha, x_1, x_2, x_3)$. Nous allons développer ces équations pour les deux cas traités ci-dessus, notamment pour un système de quatre machines produisant deux types de produits (M4P2).

Soit h le pas de discrétisation de l'intervalle fini des valeurs possible du stock x_j , la fonction

$v_k(\alpha, x_j)$ est approximée par $v_k^h(\alpha, x_j)$ et le gradient $\frac{\partial v_k^h(\alpha, x_j)}{\partial x_j}$ ($j = (1, 2, 3)$) a pour valeur :

$$(v_k)_{x_j}(\alpha, x) = \begin{cases} \frac{1}{h}(v_k^h(x_1, \dots, x_j + h_j, \dots, x_n) - v_k^h(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)), & \text{si } u_j - d_j \geq 0 \\ \frac{1}{h}(v_k^h(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) - v_k^h(x_1, \dots, x_j - h_j, \dots, x_n)), & \text{si } u_j - d_j < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Avec la relation 4.11, nous obtiendrons les équations (4.12) suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} &= \begin{cases} \frac{1}{h_1}(v_k^h(\alpha, x_1 + h_1, x_2, x_3) - v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)) & \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 \\ \frac{1}{h_1}(v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3) - v_k^h(\alpha, x_1 - h_1, x_2, x_3)) & \text{sinon} \end{cases} \\ \frac{\partial v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} &= \begin{cases} \frac{1}{h_2}(v_k^h(\alpha, x_1, x_2 + h_2, x_3) - v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)), & \text{Ind } \dot{x}_2 \geq 0 \\ \frac{1}{h_2}(v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3) - v_k^h(\alpha, x_1, x_2 - h_2, x_3)), & \text{Sinon} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = \begin{cases} \frac{1}{h_3} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3 + h_3) - v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3)) \text{Ind } \dot{x}_3 \geq 0 \\ \frac{1}{h_3} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3) - v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3 - h_3)) & \text{sinon} \end{cases}$$

Où h_j ($j = 1, 2, 3$) est le pas de discrétisation de la variable d'état x_j .

Ainsi, nous pouvons avoir l'expression de l'équation d'HJB suivante :

$$v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + \sum_{\alpha \neq \beta} q_{\alpha\beta} v_k^h(\beta, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_k^h(\alpha, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_1} (v_k^h(\alpha, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_2} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 \geq 0) + \frac{1}{h_2} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_3} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 \geq 0) + \right. \\ & \quad \left. \frac{1}{h_3} (v_k^h(\alpha, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \quad (4.13)$$

$$\left[\begin{aligned} & \rho + |q_{\alpha\alpha}| + \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \end{aligned} \right]$$

4.8.1 Algorithme de résolution

Théorème :

Soit $v^h(x, \alpha)$ la solution de l'équation HJB. Supposons les constantes C_g et k_g telles que :

$$0 \leq v^h(x, \alpha) \leq C_g \left(1 + |x|^{k_g} \right)$$

Nous avons :

$$\lim_{h \rightarrow 0} v^h(x, \alpha) = v(x, \alpha)$$

Étape 1 : Initialisation

Choisir $\delta \in R^+$, poser $n := 1, \left(v_k^h(x_1, x_2, x_3, \alpha)\right)^n := 0 \forall \alpha \in B$

Étape 2 : Calculer

$$(v_k^h(x_1, x_2, x_3))^{(n-1)} = (v_k^h(x_1, x_2, x_3))^n$$

Étape 3 : Calculer la fonction valeur pour obtenir la politique de commande

$$T(v_k^h(x_1, x_2, x_3))^{(n-1)} = (v_k^h(x_1, x_2, x_3))^n = T^*(v_k^h(x_1, x_2, x_3))^{(n-1)}$$

Étape 3 : Test de convergence

$$\bar{c} := \min_{x_1, x_2, x_3} \left\{ \left(v_k^h(x_1, x_2, x_3, \alpha)\right)^n - \left(v_k^h(x_1, x_2, x_3, \alpha)\right)^{n-1} \right\}$$

$$\underline{c} := \max_{x_1, x_2, x_3} \left\{ \left(v_k^h(x_1, x_2, x_3, \alpha)\right)^n - \left(v_k^h(x_1, x_2, x_3, \alpha)\right)^{n-1} \right\}$$

$$C_{\min} = \frac{\rho}{1-\rho} \bar{c}; C_{\max} = \frac{\rho}{1-\rho} \underline{c};$$

Si $|c_{\min} - c_{\max}| \leq \delta$, alors stop

Sinon $n = 1$ et aller à l'étape suivante

4.9 Analyse des résultats et analyse de sensibilité

Dans cette section, nous illustrons la résolution du modèle ci-dessus avec un exemple numérique. L'analyse de sensibilité des paramètres du système est également présentée pour illustrer l'importance et l'efficacité du modèle proposé.

4.9.1 Les résultats numériques

Dans cette section, nous présentons un exemple numérique pour le système hybride de fabrication et de réutilisation présenté dans la section 5.3. Un processus de Markov à neuf états avec les modes dans $B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ décrit la capacité du système. Le coût instantané est décrit par l'équation (4.7).

Le domaine D considéré dans la résolution numérique sur le logiciel Matlab est décrit dans l'équation (4.14) :

$$D = \left\{ \begin{array}{l} x_1 : -5 \leq x_1 \leq 5 \\ x_2 : -5 \leq x_2 \leq 5 \\ x_3 : 0 \leq x_3 \leq 10 \end{array} \right\} \quad (4.14)$$

Les probabilités limites des modes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 sont calculées comme suit :

$$\pi \cdot Q(\cdot) = 0 \quad \text{and} \quad \sum_i^9 \pi_i = 1 \quad (4.15)$$

Où $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$ et $Q(\cdot)$ correspondent à une matrice des taux de transition de dimension 9×9 donnés par l'équation (4.2).

Les données utilisées pour l'expérimentation du modèle sont listées dans le Tableau (4-1) ci-dessous. Elles sont collectées à partir des résultats du chapitre 2.

Tableau 4.1 Tableau des données numériques utilisées

C₁₊	C₁₋	C₂₊	C₂₋	C₃₊	C₃₋	hx₁	hx₂	hx₃	U_{Mmax}	U_{Rmax}
5	250	5	250	1	0	0.5	0.5	0.5	0.75	0.85
d₁	d₂	Taux de réparation		Taux de panne		ρ	Cu	Cr	C^α	
0.39	0.26	1/15		1/60		0.9	200	150	250	

La condition pour répondre aux demandes des clients sur un horizon infini est donnée par :

$$D = \left\{ u_{ij \max}(\cdot) \in R^2, 0 \leq u_{ij}(\cdot) \leq u_{ij \max}(\cdot) \right\} \quad (4.16)$$

Ainsi, les politiques de production $u(\alpha, x_1, x_2, x_3)$ obtenues indiquent quels sont les taux de production à appliquer aux machines de production M1 et M2 et de remanufacturing R1 et R2 pour les différentes configurations d'états stocks x_1 et x_2 et états du système (9,3,7,5). Bien entendu, les politiques attendues devraient être de type Hedging point policy (une politique de

type seuil critique).

Au mode 9, toutes les machines (M1, M2, R1 et R2) sont opérationnelles. En examinant ces courbes, nous pouvons voir que le seuil de production est très bas, car toutes les machines sont opérationnelles. Les résultats montrent que les taux de production sont mis à zéro lorsqu'on a atteint un niveau de stock confortable. À ce stade, il n'est pas nécessaire de produire des produits pour assurer un niveau de stock confortable. D'après les résultats obtenus, le domaine de calcul est divisé en deux étapes comme l'on fait Kenne et al. (2012). Nos résultats montrent que pour la machine M1, la politique de contrôle de production optimale comprend l'une des règles suivantes.

$$u_{11}(x_1, x_2, x_3, 9) = \begin{cases} u_{11\max} & \text{si } x_1 < Z_1 \\ 0 & \text{si } x_1 > Z_1 \end{cases} \quad \text{et} \quad u_{12}(x_1, x_2, x_3, 9) = \begin{cases} u_{12\max} & \text{si } x_2 < Z_2 \\ 0 & \text{si } x_2 > Z_2 \end{cases} \quad (4.17)$$

Z_1 et Z_2 représentent respectivement les seuils critiques de production au mode 9 des produits 1 et 2. Les figures 4-4 et 4-5 présentent la politique de production de la machine M1 au mode 9. L'analyse de cette figure indique au mode 9 que lorsque le niveau de stock x_1 pour le produit P1 est inférieur à $Z_1 = -1$, il faut produire au taux maximal de la machine. Si le seuil est égal à Z_1 , il faut produire à la demande moins le retour. Cependant, si le stock est supérieur au niveau du stock confortable, il faut garder le taux de production de la machine à zéro.

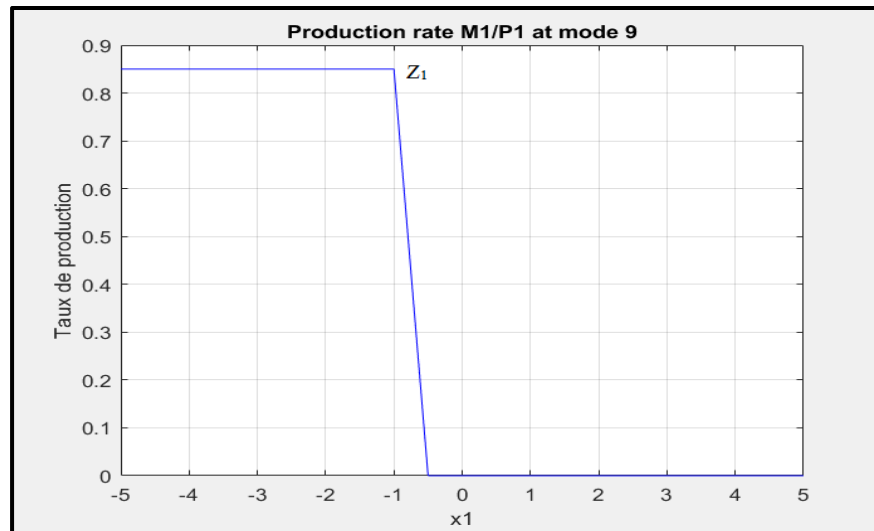


Figure 4.4 La productivité de la Machine M1 au mode 9
avec le produit 1

En ce qui concerne la Figure (4-5) ci-dessous, nous trouvons la politique de production de la machine M1 avec la demande 2. Cette politique indique qu'il faut produire au taux maximal si le seuil critique est inférieur au niveau de stock confortable ($Z_2 = -1$). S'il est égal à Z_2 , nous devons produire à la demande. Cependant, s'il est supérieur à Z_2 , nous ne produisons rien.

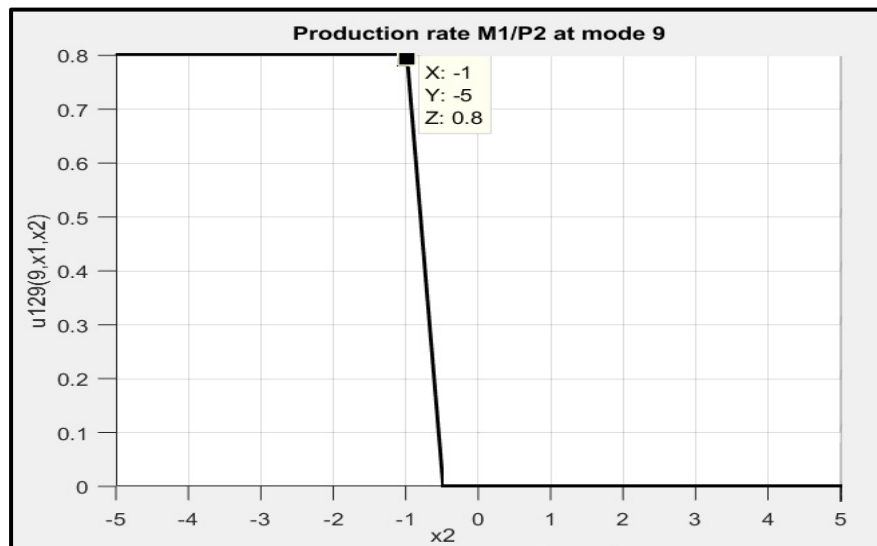


Figure 4.5 Taux de production au mode 9 pour la Machine M1
avec le produit 2

La politique de production de la machine de manufacturing M2 est similaire à la machine M1. Les figures (4-6) et (4-7) indiquent la politique de production des machines de remanufacturing R1 et R2. Selon ces résultats, les productivités optimales pour les deux machines de remanufacturing peuvent être exprimées dans l'équation (4.18).

$$u_{31}(x_1, x_2, x_3, 9) = \begin{cases} u_{31\max} & \text{si } x_1 < z_3 \\ r_1 & \text{si } x_1 = z_4 \\ 0 & \text{si } x_1 > z_5 \end{cases} \quad \text{et} \quad u_{32}(x_1, x_2, x_3, 9) = \begin{cases} u_{32\max} & \text{si } x_2 < z_6 \\ r_2 & \text{si } x_2 = z_7 \\ 0 & \text{si } x_2 > z_8 \end{cases} \quad (4.18)$$

Où $Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$ représentent respectivement les seuils critiques pour les machines de remanufacturing.

La figure (4-6) montre qu'avec la demande 1, nous devons produire au taux maximal de la machine si le stock est inférieur à $Z_3 = -0.5$. Toutefois, s'il est supérieur à $Z_5 = 0.5$, nous ne produisons pas du tout. S'il est égal à $Z_4 = 0$, nous ne produisons qu'avec le taux de retour. Pour la demande 2 (figure 4-7), il faut produire au taux maximal si le seuil est inférieur à $Z_6 = -0.5$ et ne rien produire si le seuil est supérieur à $Z_8 = 0.5$. En revanche, s'il est égal à $Z_7 = 0$, il faut produire au taux de retour de produit.

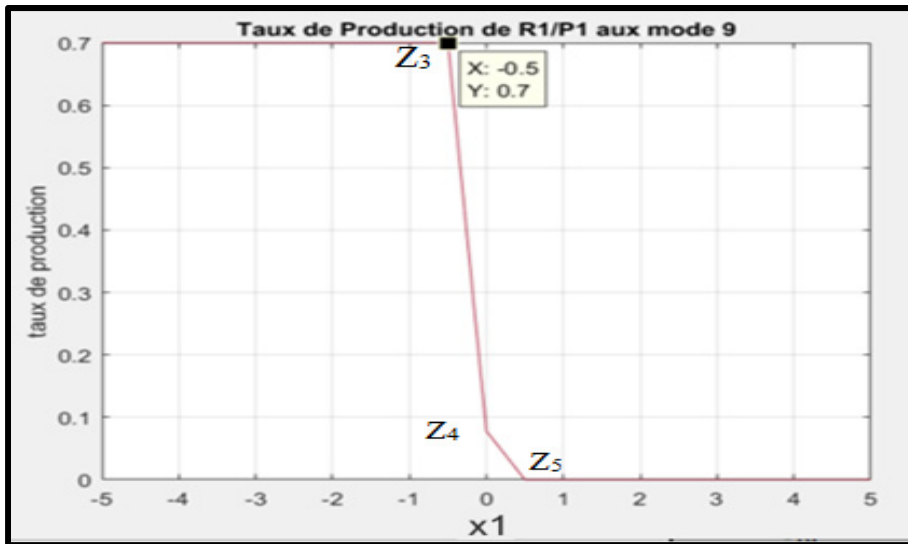


Figure 4.6 Taux de production de la machine de remanufacturing 1 avec le Produit 1 au mode 9

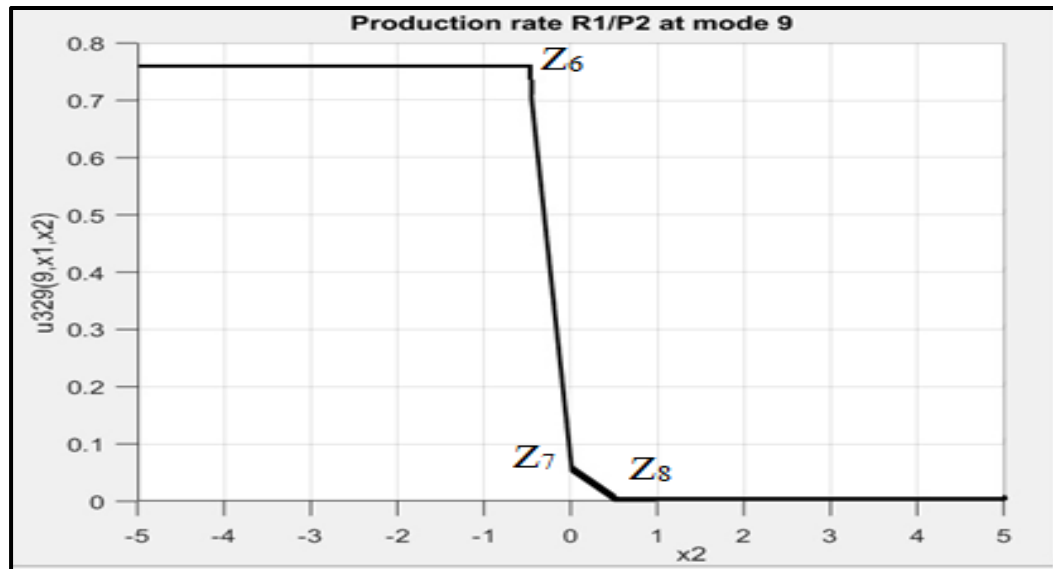


Figure 4.7 Taux de production de la machine de remanufacturing 1
avec le Produit 2 au mode 9

La politique de la machine de remanufacturing R2 est similaire à celle décrite ci-dessus pour la machine R1.

Au mode 5, la politique de production change, car le nombre de machines opérationnelles a diminué. Dans ce mode, nous avons une machine de manufacturing soit M1 ou M2 et une de remanufacturing, soit R1 ou R2 qui sont disponibles. Dans le cadre de notre analyse, nous choisissons les machines M1 et R1, car la politique de production pour les deux produits est similaire.

La politique de production de la machine M1 au mode 5 du système est présentée à la Figure (4-8). Contrairement au cas illustré à la Figure (4-4), où la tendance était d'utiliser le taux de production maximale des machines en mode 5, le seuil critique du stock confortable est supérieur au seuil critique ($z_1 = -0.5$) sur la Figure (4-4), car elle est la seule machine de manufacturing qui fonctionne. Toutefois, la stratégie de contrôle reste une stratégie de HPP.

Où Z_9, Z_{10}, Z_{11} est la valeur minimale du seuil de stock confortable qu'on peut considérer au mode 5. Cette politique est décrite par l'équation (4.19). La Figure 4.8 présente la politique de production de la machine M1 au mode 5.

$$u_{11}(x_1, x_2, x_3, 5) = \begin{cases} u_{11\max} & \text{si } x_1 > z_9 \\ d_1 - r_1 & \text{si } x_1 = z_{10} \\ 0 & \text{si } x_1 < z_{11} \end{cases} \quad (4.19)$$

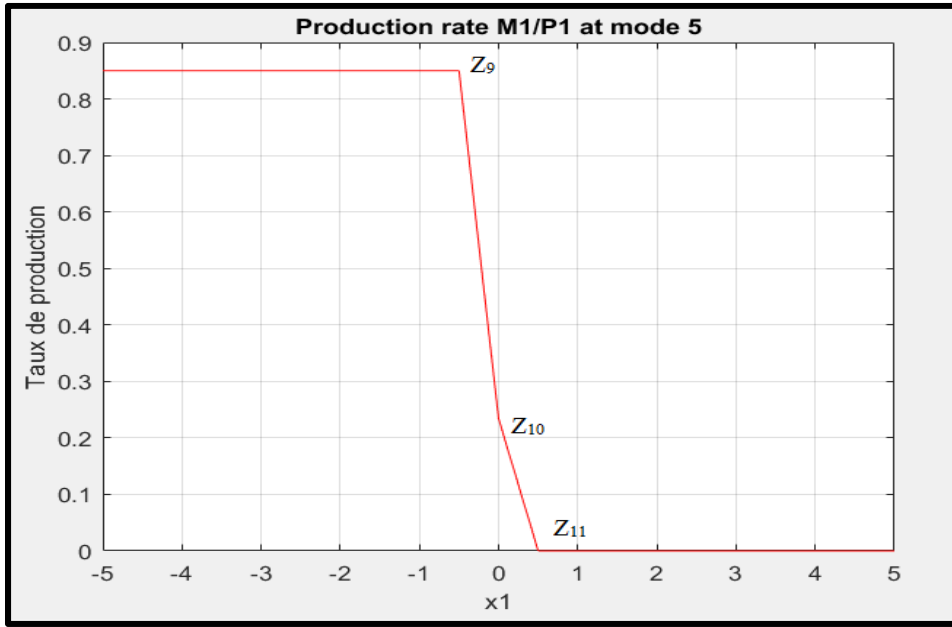


Figure 4.8 Taux de production de la machine de manufacturing M1 au mode 5

La politique de production décrit à la figure 4-8 indique que si le seuil est inférieur à Z_9 , nous devons produire au taux maximal. Il faut ne rien produire si le seuil est supérieur à Z_{11} . Toutefois, s'il est égal au seuil Z_{10} , nous devons produire à la demande moins le retour, car le reste sera complété par l'usine de remanufacturing. La Figure 4-9 indique la politique de production à adopter pour l'usine de remanufacturing R1. Elle est décrite dans l'équation (4.20).

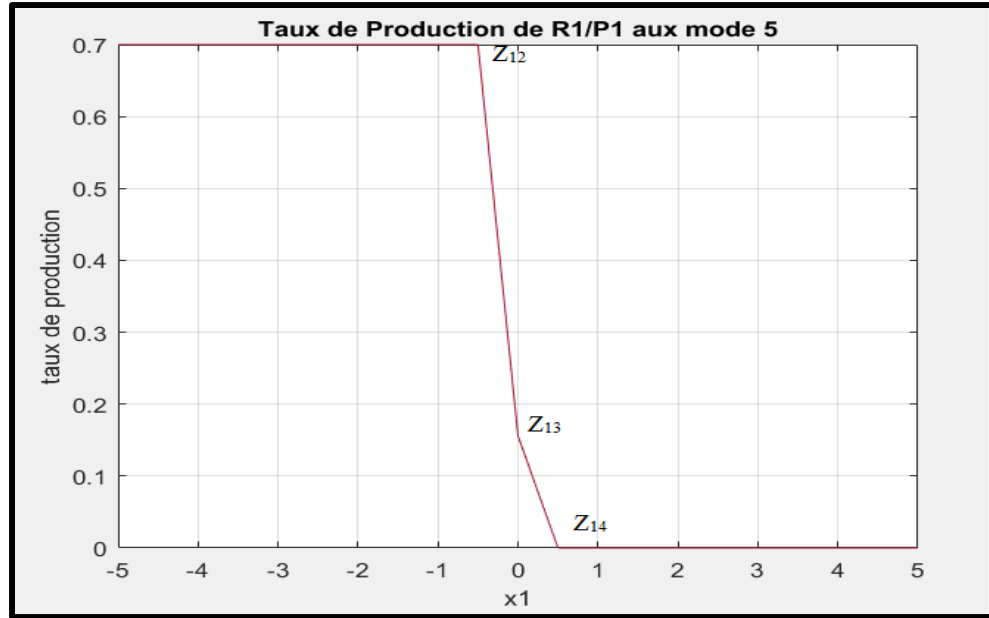


Figure 4.9 Taux de production de la machine de remanufacturing R1 au mode 5

$$u_{31}(x_1, x_2, x_3, 5) = \begin{cases} u_{31\max} & \text{si } x_1 > z_{12} \\ r_1 & \text{si } x_1 = z_{13} \\ 0 & \text{si } x_1 < z_{14} \end{cases} \quad (4.20)$$

L'usine produit au taux maximal si le seuil est inférieur à Z_{12} et elle produit au taux de retour si le seuil est égal à Z_{13} . En revanche, son taux de production est réduit à zéro si le seuil est supérieur à Z_{14} .

Au mode 7, nous nous retrouvons dans le cas où les deux machines de manufacturing sont les seules machines opérationnelles. Dans ce mode, la politique de production est indiquée par l'équation (4.21). Elle stipule que si le seuil est inférieur Z_{15} qui est le seuil confortable, nous devons produire au taux maximal. Cependant, s'il est supérieur au seuil confortable, nous ne devons rien produire, mais s'il est égal à Z_{15} , nous produisons à la demande. La politique de production la machine de manufacturing M2 est semblable à celle de la machine M1, où seuls les taux de production maximaux changent en fonction des produits.

$$u_{11}(x_1, x_2, x_3, 7) = \begin{cases} u_{11\max} & \text{si } x_1 < z_{15} \\ d_1 & \text{si } x_1 = z_{15} \\ 0 & \text{si } x_1 > z_{15} \end{cases} \quad \text{et} \quad u_{12}(x_1, x_2, x_3, 7) = \begin{cases} u_{12\max} & \text{si } x_2 < z_{15} \\ d_2 & \text{si } x_2 = z_{15} \\ 0 & \text{si } x_2 > z_{15} \end{cases} \quad (4.21)$$

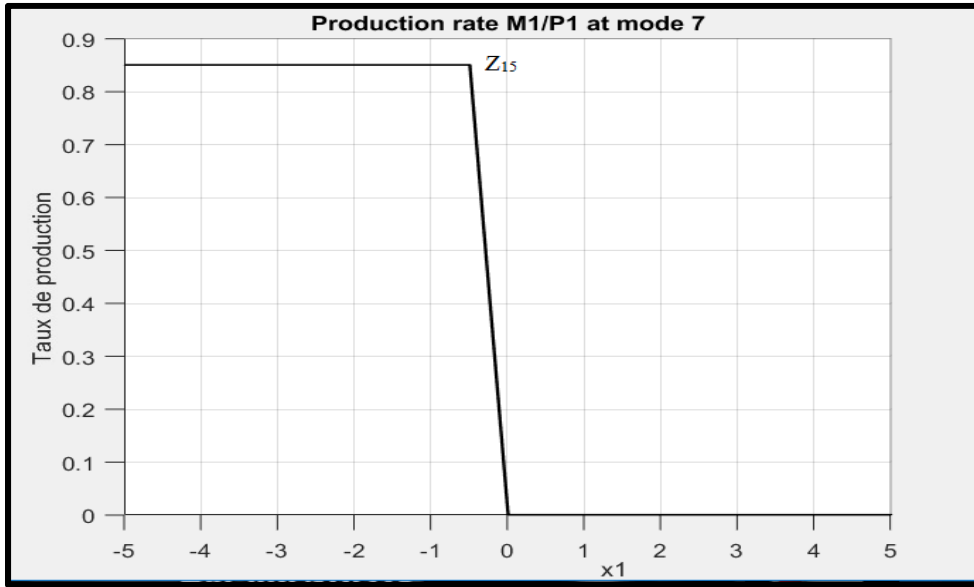


Figure 4.10 Taux de production de la machine de manufacturing M1 au mode 7

Dans le mode 3, nous n'avons que deux machines de remanufacturing (R1 et R2) qui sont opérationnelles. L'équation (4.22) décrit la politique à adopter pour les machines.

$$u_{31}(x_1, x_2, x_3, 3) = \begin{cases} u_{31\max} & \text{si } x_1 < z_{16} \\ r_1 & \text{si } x_1 = z_{17} \\ 0 & \text{si } x_1 > z_{18} \end{cases} \quad \text{et} \quad u_{32}(x_1, x_2, x_3, 3) = \begin{cases} u_{32\max} & \text{si } x_2 < z_{19} \\ r_2 & \text{si } x_2 = z_{20} \\ 0 & \text{si } x_2 > z_{21} \end{cases} \quad (4.22)$$

Où Z_{16} et Z_{17} représente respectivement les seuils critiques au mode 3. La politique de production est semblable à la politique de production des machines de remanufacturing au mode 5.

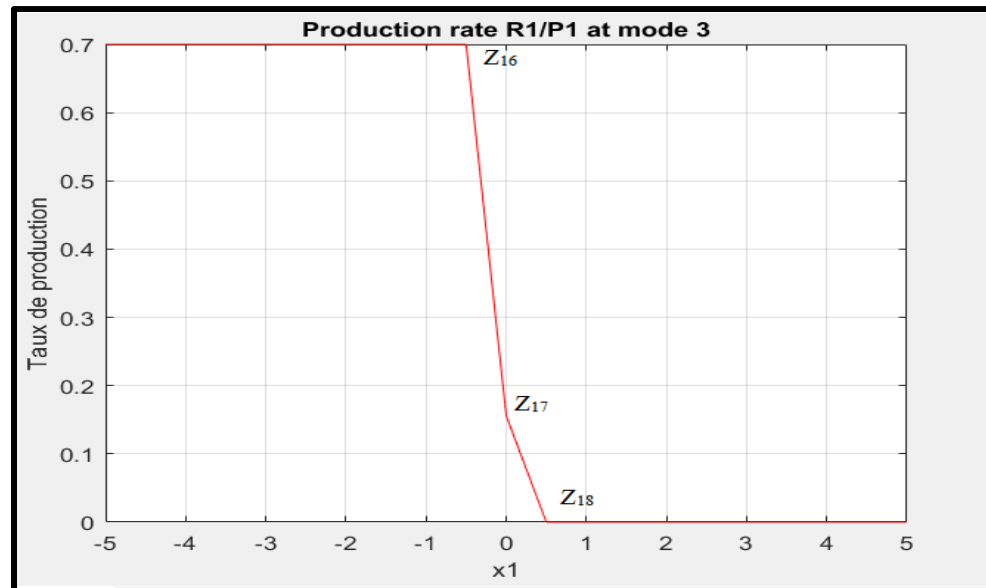


Figure 4.11 Taux de production de la machine de remanufacturing R1
au mode 3

Notons que ces illustrations (résultat de la résolution numérique) constitueront le point de départ pour la détermination de la politique de commande optimale de production pour notre système.

Les cadences de production des machines de manufacturing et des machines de recyclage dans leur mode opérationnel (c.-à-d. Le mode 9) sont présentées aux figures (4.4), (4.5), (4.6) et (4.7). Les politiques de production obtenues au mode 3, 5 et 7 des machines de manufacturing et de remanufacturing recommandent de mettre le taux de production des machines à sa valeur maximale, si l'inventaire a atteint un seuil ou non, étant donné que le système hybride n'est réalisable qu'en mode 9. Pour la politique de production de machines de manufacturing, les figures (4.4) et (4.5) montrent qu'il n'est pas nécessaire de produire en utilisant M1 et M2 pour des niveaux de stock confortables. Ensuite, le taux de production est mis à zéro lorsque le niveau des stocks de produits manufacturés est supérieur à (-0.5). La structure de la politique de contrôle des machines de remanufacturing est indiquée aux figures (4.6) et (4.7). Le taux de production est mis à zéro lorsque le niveau des stocks de produits recyclés est supérieur à Z_8 pour P1 ou Z_5 pour P2. Il est mis au taux de « r » lorsque le niveau de stock est égal Z_4 ou Z_7 . Les résultats suggèrent que pour obtenir des gains de disponibilité des machines principale

(manufacturing). Et pour réduire le coût total de fabrication, il peut être avantageux de réduire la vitesse de productivité de la valeur maximale à la valeur économique lorsque le niveau de stock se rapproche des valeurs de seuil maximales.

4.10 Analyses de sensibilité

Dans cette partie, nous effectuerons une analyse approfondie des résultats obtenus lors de la simulation Matlab du système manufacturier étudié. Plusieurs paramètres influent sur le modèle et donc sur les politiques optimales. Il semble ainsi important de voir comment réagirait notre modèle en cas de variation significative de ces derniers. Pour ce faire, nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur les 3 paramètres ci-dessous. Nous rappelons que comme il est de rigueur pour une analyse de sensibilité, nous avons fait varier un seul paramètre à la fois. De ce fait, nous avons observé l'évolution des seuils déclenchant les paliers de production, pour chacune des machines dans des modes choisis.

- **Coût de mise en inventaire du stock principal**

Nous remarquons qu'en général, les seuils de basculement de production (correspondant à des valeurs de x_1 et x_2) chutent tous lorsqu'on revoit à la hausse le coût de mise en inventaire du stock principal x_1 , ce qui est complètement cohérent. En effet, avec la hausse du coût de mise en stock, nous voulons limiter au plus les quantités stockées et donc commencer à produire le plutôt possible. Nous remarquons aussi que pour un coût mis en inventaire inférieur à 5 avec comme repère (X3), la machine M2 reste en production permanente quelles que soient les valeurs de stock x_1 et x_2 . Seul le palier de production U11m de M1 est assez difficile à franchir, car M2 satisfait déjà la demande dans la majorité des cas.

La Figure (4.12) indique la variation du seuil critique en fonction du coût de pénurie. Nous remarquons que plus le coût de pénurie augmente, les niveaux de seuils critiques augmentent également. Nous devons stocker en grande quantité pour prévenir la rupture de stock

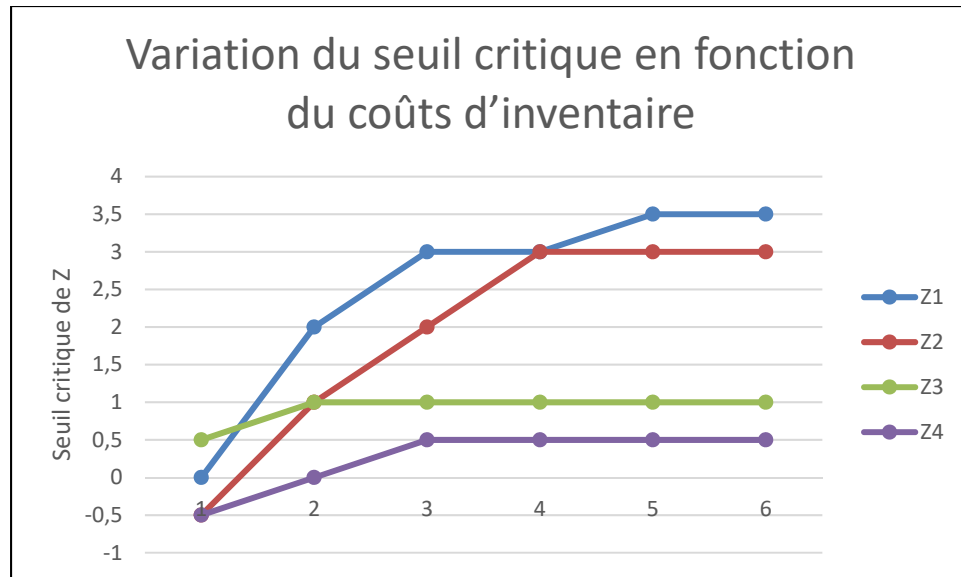


Figure 4.12 Variation du seuil critique en fonction du coûts de pénurie

En simulant le modèle avec différentes valeurs du taux de retour r , nous observons les résultats suivants représentés dans les figures (4-13) et (4-14) :

La Figure (4-13) nous montre l'influence du coût de manufacturing avec un taux de retour de 25%. Les zones A et B représentent respectivement la zone de production (manufacturing) et la zone de recyclage. Nous constatons qu'avec une diminution des coûts manufacturing, la zone A s'agrandit, ce qui veut dire que le produit fabriqué est plus rentable que les produits recyclés.

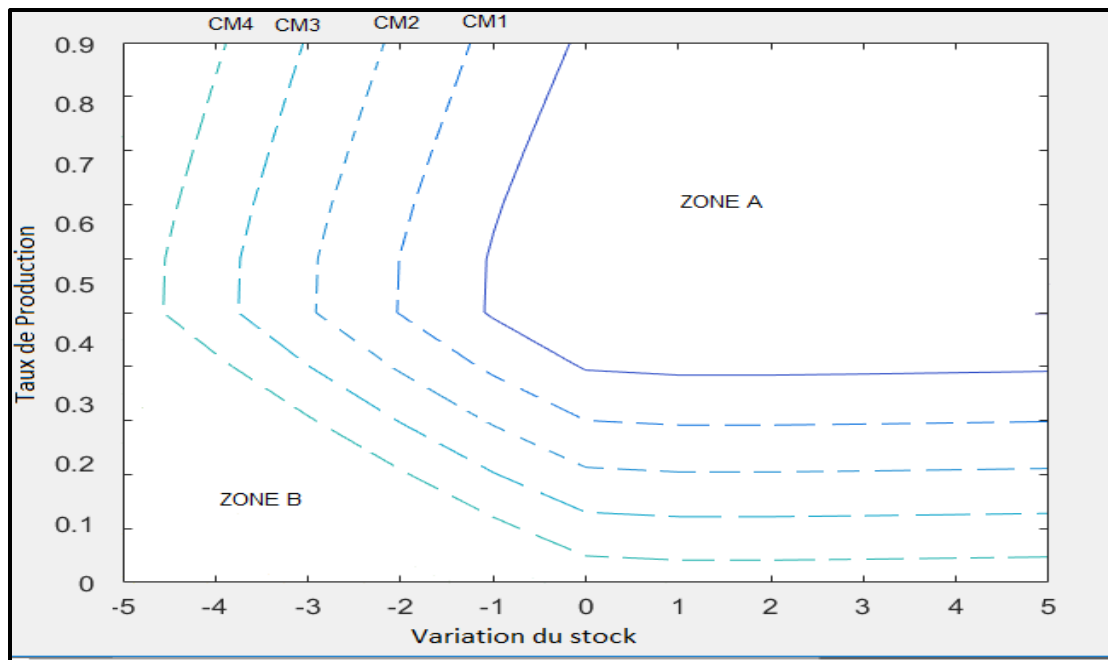


Figure 4.13 Influence du coût de manufacturing avec un taux de retour de 25%

Avec un taux de retour de 75%, nous constatons que la zone de A perd sa surface tandis que les coûts manufacturing augmentent.

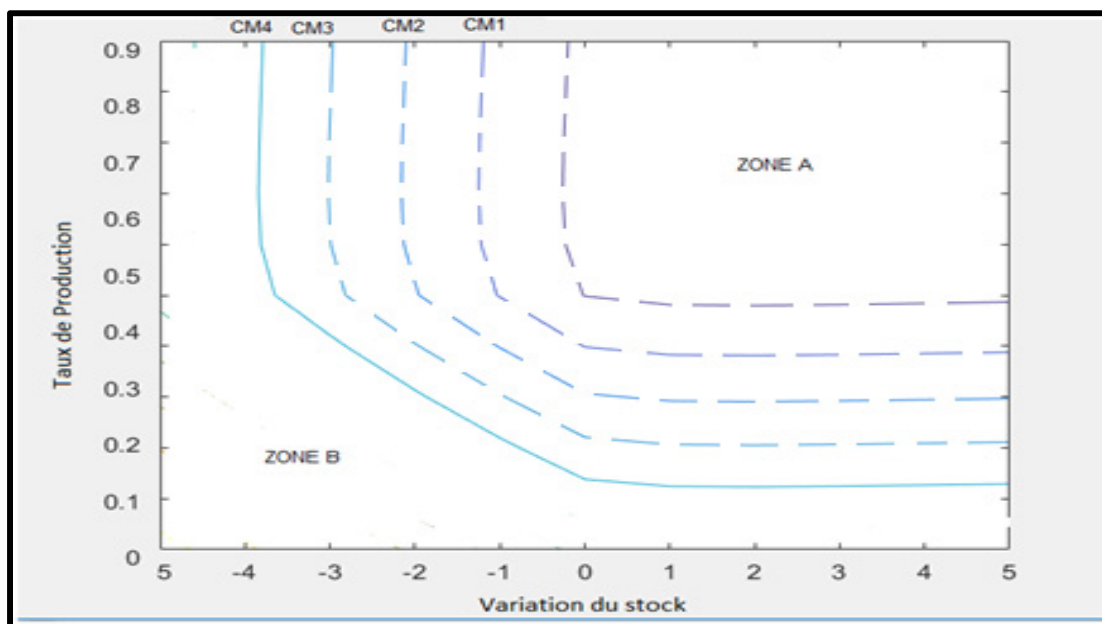


Figure 4.14 Influence du coût de manufacturing avec un taux de retour 50%

4.11 Conclusion

Dans ce travail, à partir de la résolution numérique des équations d'HJB par la méthode de Kushner, nous avons à peu près déterminé la structure de la politique de production et de recyclage des produits retournés. Dans ce présent travail, nous avons pu obtenir des résultats préliminaires et déterminer la loi de commande optimale avec une bonne précision. Mais ces travaux devraient être achevés par une analyse de sensibilité beaucoup plus poussée qui permettrait de montrer que notre modèle réagit bien selon les attentes lorsque nous ferons varier un paramètre à la fois, validant ainsi les résultats obtenus.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La notion de « logistique inverse en boucle fermée » qui est fortement répandue durant ces dernières années, se doit de démontrer qu'une entreprise ne doit pas se limiter à un seul critère de performance, que ce soit l'économie, l'environnement ou les éléments sociaux. Bien vrai que le coût (économie) est un point important dans l'entreprise, mais on s'est vite rendu compte que si l'on se limite à cela, ce serait de limiter sa performance dans le futur. Donc pour se développer pleinement, l'entreprise se doit de tenir compte des trois critères en même temps. D'où la place de la conception et de la planification des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée avec en particulier les trois axes du développement durable.

Dans le **chapitre 1**, nous avons tout d'abord présenté une étude bibliographique qui touche aux différents domaines liés aux travaux de ce mémoire. Ce faisant, nous avons présenté le contexte de la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, les définitions de la chaîne logistique inverse et les différents niveaux décisionnels d'une chaîne d'approvisionnement. Évidemment, notre revue de littérature n'est pas exhaustive, mais vise à permettre aux lecteurs de mieux appréhender les enjeux et les objectifs d'une chaîne de logistique inverse en boucle fermée ainsi que les outils d'optimisation au niveau tactique et opérationnel. De plus nous avons présenté les différentes activités de la logistique inverse ainsi que les différentes configurations existantes.

Dans le **chapitre 2**, nous avons présenté un modèle de programmation linéaire mixte pour la planification d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée. Le modèle proposé est générique dans le sens où il peut s'adapter à plusieurs maillons de la logistique inverse; en particulier pour la planification tactique des systèmes de fabrication et de remise à neuf. L'objectif global du modèle est de minimiser les coûts associés à la production, au recyclage, aux transports, l'inventaire et à l'élimination des déchets. Le modèle s'opère à la minimisation des coûts associés aux produits retournés et des coûts associés aux nouveaux. Les coûts associés aux produits retournés sont les coût d'acquisition des produits usagé, les coûts d'installation pour les opérations d'inspection et les coûts d'inventaire des produits retournés. Tandis que les coûts associés aux produits neufs sont les coûts de production, les coûts de stockages des nouveaux produits aux centres de distribution et les coûts d'inventaire des produits finis.

Par ailleurs, un certain nombre d'indicateurs de performance ont été mis en place afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans différentes situations. En effet, nous avons testé un jeu de données pour obtenir un scénario de base. Ensuite nous avons effectué des variations à partir de ce scénario de base en modifiant certains paramètres, comme la quantité de produits approvisionnés (taux de retour ou taux d'élimination) en regard de la quantité de demandes, ou encore les paramètres coûts (les coûts de manufacturing, les coûts de remanufacturing). Cela permet d'évaluer le comportement de la chaîne pour trouver la politique optimale de ce dernier.

La validation du modèle en programmation linéaire a été faite au **chapitre 3** avec un jeu de données issues de la littérature. Les jeux de données ont été tirés du livre de Daskin, M. S., (1995). Avec ces jeux de données, nous avons étudié des configurations différentes du réseau étudié dans ce chapitre. Ces différents ont été obtenus avec la possibilité d'ouvrir et de fermer les usines de « manufacturing » et des usines de « remanufacturing ». Les résultats obtenus amènent certaines conclusions qui dépendent de du jeu de données et qui ne sont pas donc forcément généralisables. Ces résultats montrent clairement qu'il vaut mieux, pour un réseau donné, opter pour une politique où il faut ouvrir quatre sites dans lequel on peut faire du « manufacturing » et du « remanufacturing ». Cette dernière donne plus de marge de manœuvre dans les décisions de livraison de produits afin de satisfaire au mieux les demandes des clients. Concernant les tests avec des variations des coûts et des quantités approvisionnées, il s'avère qu'il est préférable, pour un maillon, de limiter ses approvisionnements et ainsi de travailler plutôt avec des ruptures de stock. Il est clair que ce bilan dépend directement des coûts de stockage et de rupture de stock. De plus ces tests nous ont permis de mettre en évidence l'importance des coûts de réutilisation par rapport aux coûts de fabrication dans le cas où les produits de second main seraient vendus à un prix similaire à celui des nouveaux produits

Au **chapitre 4** de ce mémoire, nous avons assimilé la chaîne décrite au chapitre 2 à une unité de production et de recyclage comportant quatre (4) machines produisant deux type de produits (M4P2). Un modèle mathématique du système considéré a été développé selon les hypothèses émises. L'objectif de ce modèle était de trouver une politique optimale de planification de la production tout en tenant compte que les équipements sont sujets à des

phénomènes de pannes et de réparations. Le modèle mathématique a été formulé avec les équations d'HJB. Après avoir résolu les équations d'HJB obtenues par une méthode numérique, nous avons montré que la solution optimale est du type seuil critique. Ces résultats obtenus ont été validés par une analyse de sensibilité.

LES TRAVAUX FUTURES

Les travaux réalisés dans la cadre de ce mémoire ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Nous décrivons brièvement ci-dessous quelques pistes qui nous semblent intéressantes pour la logistique inverse en boucle fermée.

En termes de perspective, les extensions du modèle décrit au chapitre 2 pourraient être intéressantes pour des recherches futures. Les extensions possibles pour le modèle sont les suivantes :

- Intégrer des contraintes telles que la limitation du taux d'émission de gaz à effet de serre (GES). Cela permettrait certainement de contrôler les émissions de gaz à effet serre des moyens de transports et des installations
- Introduction du taux de rendement des produits usagés, les retards de production, la qualité des produits retournés et le délai constituent aussi des pistes de recherche.
- Envisager des approches stochastiques en deux étapes et des techniques d'optimisation robustes comme orientations futures de la recherche, au lieu d'une programmation stochastique régulière afin de combler les lacunes techniques récemment utilisées.
- Intégrer différentes approches pour aborder les situations telle que la demande et le retour sont tous les deux à taux variables.

Les extensions possibles pour le modèle présenté au chapitre 4 :

- Tenir compte de l'âge des machines. Cela nous permettra d'intégrer la maintenance préventive dans notre modèle. Nous pourrions nous baser sur Rivera-Gomez et al. (2016) pour formuler une hypothèse mathématique de l'impact de l'âge sur la dynamique de la machine.

ANNEXE I

L'expression de la fonction valeur aux différents modes

Nous pouvons ainsi définir l'expression de la fonction valeur aux différents modes en fonction des produits :

Où k est le différent cas pour chaque mode.

Au mode 1 : Dans ce mode, nous n'avons qu'un seul cas possible.

$$v_1^h(1, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{\begin{aligned} &g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{12} \cdot v_1^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{13} \cdot v_1^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{14} \cdot v_1^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{17} \cdot v_1^h(7, x_1, x_2, x_3) \\ &+ \frac{|d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(1, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \frac{|d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_2} (v_1^h(1, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ &\frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_3} (v_1^h(1, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_3 \geq 0) \right\} \end{aligned}}{\left[\rho + |q_{11}| + \frac{|d_1|}{h_1} + \frac{|d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \right]} \right] \quad (4.23)$$

Au mode 2 : Dans ce mode, une des deux machines de remanufacturing est opérationnelle.

Donc, deux cas sont possibles.

Cas 1 : Le cas où seulement la machine de remanufacturing R1 est opérationnelle

Cas 2 : Le cas où seulement la machine de remanufacturing R2 est opérationnelle

$$\begin{aligned} &\text{Cas 1 : R1} \\ &\text{opérationnelle} \end{aligned} \quad v_1^h(2, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{\begin{aligned} &g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{21} \cdot v_1^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{23} \cdot v_1^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{25} \cdot v_1^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{28} \cdot v_1^h(8, x_1, x_2, x_3) + \\ &\frac{|u_{31} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(2, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_1} (v_1^h(2, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ &\frac{|u_{32} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_2} (v_1^h(2, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 \geq 0) + \frac{1}{h_2} (v_1^h(2, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ &\frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_3} (v_1^h(2, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_3 \geq 0) + \frac{1}{h_3} (v_1^h(2, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned}}{\left[\rho + |q_{22}| + \frac{|u_{31} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{32} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \right]} \right] \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 2 : R2} \\
& \text{opérationnelle} \\
v_2^h(2, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{21} \cdot v_2^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{23} \cdot v_2^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{25} \cdot v_2^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{28} \cdot v_2^h(8, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(2, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_2^h(2, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(2, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_2^h(2, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(2, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_2^h(2, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \\ & \left[\rho + |q_{22}| + \frac{|u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{42} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - \text{disp}|}{h_3} \right] \end{aligned} \right] \quad (4.25)
\end{aligned}$$

Au mode 3 : Il n'y a qu'un seul cas possible dans ce mode. Les deux machines de remanufacturing sont en mode production.

$$\begin{aligned}
v_1^h(3, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{31} \cdot v_1^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{32} \cdot v_1^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{36} \cdot v_1^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{39} \cdot v_1^h(9, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(3, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_1^h(3, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(3, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_1^h(3, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(3, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \right. \\ & \left. \frac{1}{h_3} (v_1^h(3, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \\ & \left[\rho + |q_{33}| + \frac{|u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \right] \end{aligned} \right] \quad (4.26)
\end{aligned}$$

Au mode 4 : Il y a deux cas possibles dans ce mode, car seulement une des machines de manufacturing est opérationnelle.

Cas 1 : Dans ce cas-ci, nous avons la machine de manufacturing (M1) qui est opérationnelle.

Cas 2 : Dans ce cas-ci, nous avons la machine de manufacturing (M2) qui est opérationnelle.

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 1 : M1} \\
& \text{opérationnelle} \\
v_1^h(4, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in I(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{41} \cdot v_1^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{45} \cdot v_1^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{46} \cdot v_1^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{47} \cdot v_1^h(7, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_1 - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(4, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_1} (v_1^h(4, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_2 - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(4, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_2} (v_1^h(4, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(4, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \right. \\ & \left. \frac{1}{h_3} (v_1^h(4, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind} \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \quad (4.27) \\
& \left[\rho + |q_{44}| + \frac{|u_1 - d_1|}{h_1} + \frac{|u_2 - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 2 : M2} \\
& \text{opérationnelle} \\
v_2^h(4, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in I(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{41} \cdot v_2^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{45} \cdot v_2^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{46} \cdot v_2^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{47} \cdot v_2^h(7, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{21} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(4, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_1} (v_2^h(4, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{22} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(4, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_2} (v_2^h(4, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind} \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(4, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind} \dot{x}_1 \geq 0) + \right. \\ & \left. \frac{1}{h_3} (v_2^h(4, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind} \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \quad (4.28) \\
& \left[\rho + |q_{44}| + \frac{|u_{21} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{22} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \right]
\end{aligned}$$

Au mode 5 : Quatre cas sont possibles, car une des machines de manufacturing et une des machines remanufacturing sont opérationnelles.

Cas 1 : Nous avons les machines (M1 et R1) qui sont opérationnelles.

Cas 2 : Nous avons les machines (M2 et R2) qui sont opérationnelles.

Cas 3 : Nous avons les machines (M1 et R2) qui sont opérationnelles.

Cas 3 : Nous avons les machines (M2 et R1) qui sont opérationnelles.

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 1 : M1 et R1} \\
& \text{opérationnelles} \\
& v_1^h(5, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{52} \cdot v_1^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{54} \cdot v_1^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{56} \cdot v_1^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{58} \cdot v_1^h(8, x_1, x_2, x_3) +}{\left[\rho + |q_{55}| + \frac{|u_{11} + u_{31} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{32} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \right]} \right. \\
& \quad \left. \frac{|u_{11} + u_{31} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(5, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_1^h(5, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \right. \\
& \quad \frac{|u_{12} + u_{32} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(5, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_1^h(5, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\
& \quad \left. \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(5, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_1^h(5, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\} \right] \quad (4.29)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 2 : M2 et R2} \\
& \text{opérationnelles} \\
& v_2^h(5, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{52} \cdot v_2^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{54} \cdot v_2^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{56} \cdot v_2^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{58} \cdot v_2^h(8, x_1, x_2, x_3) +}{\left[\rho + |q_{55}| + \frac{|u_{21} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{22} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \right]} \right. \\
& \quad \left. \frac{|u_{21} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(5, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_2^h(5, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \right. \\
& \quad \frac{|u_{22} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(5, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_2^h(5, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\
& \quad \left. \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(5, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_2^h(5, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\} \right] \quad (4.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 3 : M1 et R2} \\
& \text{opérationnelles} \\
& v_3^h(5, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{52} \cdot v_3^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{54} \cdot v_3^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{56} \cdot v_3^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{58} \cdot v_3^h(8, x_1, x_2, x_3) +}{\left[\rho + |q_{55}| + \frac{|u_{21} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{22} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \right]} \right. \\
& \quad \left. \frac{|u_{11} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_3^h(5, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_3^h(5, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \right. \\
& \quad \frac{|u_{12} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_3^h(5, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_3^h(5, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\
& \quad \left. \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_3^h(5, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_3^h(5, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\} \right] \quad (4.31)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 3 : M2 et R1} \\
& \text{opérationnelles} \\
v_4^h(5, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{52} \cdot v_4^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{54} \cdot v_4^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{56} \cdot v_4^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{58} \cdot v_4^h(8, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{21} + u_{31} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_4^h(5, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_4^h(5, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{22} + u_{32} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_4^h(5, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_4^h(5, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_4^h(5, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_4^h(5, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \\ & \left[\rho + |q_{55}| + \frac{|u_{21} + u_{31} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{22} + u_{32} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - \text{disp}|}{h_3} \right] \end{aligned} \right] \quad (4.32)
\end{aligned}$$

Au mode 6 : Dans ce mode, une des machines de manufacturing et les deux machines de remanufacturing sont opérationnelles. Donc, nous avons deux cas possibles.

Cas1 : Il y a les machines (M1, R1 et R2) qui sont opérationnelles.

Cas 2 : Il y a les machines (M2, R1 et R2) qui sont opérationnelles.

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 1 : M1, R1 et} \\
& \text{R2 opérationnelles} \\
v_1^h(6, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{63} \cdot v_1^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{64} \cdot v_1^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{65} \cdot v_1^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{69} \cdot v_1^h(9, x_1, x_2, x_3) + \\ & \frac{|u_{11} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(6, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_1^h(6, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{12} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(6, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_1^h(6, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(6, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0 + \right. \\ & \quad \left. \frac{1}{h_3} (v_1^h(6, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \\ & \left[\rho + |q_{66}| + \frac{|u_{11} + u_{31} + u_{41}|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{32} + u_{42}|}{h_2} + \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \right] \end{aligned} \right] \quad (4.33)
\end{aligned}$$

Cas 2 : M2, R2 et R1 opérationnelles

$$v_2^h(6, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{63} \cdot v_2^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{64} \cdot v_2^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{65} \cdot v_2^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{69} \cdot v_2^h(9, x_1, x_2, x_3) + \frac{|u_{21} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(6, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_2^h(6, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \frac{|u_{22} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(6, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_2^h(6, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(6, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_3} (v_2^h(6, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\}}{\left[\rho + |q_{66}| + \frac{|u_{21} + u_{31} + u_{41}|}{h_1} + \frac{|u_{22} + u_{32} + u_{42}|}{h_2} + \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - disp|}{h_3} \right]} \right] \quad (4.34)$$

Au mode 7 : Dans ce mode, nous avons les deux machines de manufacturing qui sont en mode opérationnel.

$$v_1^h(7, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\alpha)} \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{71} \cdot v_1^h(1, x_1, x_2, x_3) + q_{74} \cdot v_1^h(4, x_1, x_2, x_3) + q_{78} \cdot v_1^h(8, x_1, x_2, x_3) + q_{79} \cdot v_1^h(9, x_1, x_2, x_3) + \frac{|u_{11} + u_{21} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(7, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_1^h(7, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \frac{|u_{12} + u_{22} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(7, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_1^h(7, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(7, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0) \right\}}{\left[\rho + |q_{77}| + \frac{|u_{11} + u_{21}|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{22}|}{h_2} + \frac{|r_1 + r_2 - disp|}{h_3} \right]} \right] \quad (4.35)$$

Au mode 8 : Nous avons deux cas possibles, car dans ce mode, les deux machines de manufacturing et une des machines de remanufacturing sont opérationnelles.

Cas1 : Nous avons les machines (R1, M1 et M2) qui sont opérationnelles.

Cas 2 : Nous avons les machines (R2, M1 et M2) qui sont opérationnelles.

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 2 : R1, M1 et} \\
& \text{M2} \\
v_1^h(8, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\mathcal{O})} & \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{82} \cdot v_1^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{88} \cdot v_1^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{87} \cdot v_1^h(7, x_1, x_2, x_3) + q_{89} \cdot v_1^h(9, x_1, x_2, x_3) +}{\left[\rho + |q_{88}| + \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \right]} \right. \\
& \left. \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(8, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_1^h(8, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \right. \\
& \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(8, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_1^h(8, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\
& \left. \frac{|r_1 - u_{31} + r_2 - u_{32} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(8, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0) \right\} \right] \quad (4.36)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Cas 2 : R2, M1 et} \\
& \text{M2} \\
v_2^h(8, x_1, x_2, x_3) = \min_{i \in \Gamma(\mathcal{O})} & \left[\frac{g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{82} \cdot v_2^h(2, x_1, x_2, x_3) + q_{88} \cdot v_2^h(5, x_1, x_2, x_3) + q_{87} \cdot v_2^h(7, x_1, x_2, x_3) + q_{89} \cdot v_2^h(9, x_1, x_2, x_3) +}{\left[\rho + |q_{88}| + \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \right]} \right. \\
& \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(8, x_1 + h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_1} (v_2^h(8, x_1 - h_1, x_2, x_3), Ind \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\
& \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(8, x_1, x_2 + h_2, x_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \frac{1}{h_2} (v_2^h(8, x_1, x_2 - h_2, x_3), Ind \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\
& \frac{|r_1 - u_{41} + r_2 - u_{42} - disp|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_2^h(8, x_1, x_2, x_3 + h_3), Ind \dot{x}_1 \geq 0 + \right. \\
& \left. \frac{1}{h_3} (v_2^h(8, x_1, x_2, x_3 - h_3), Ind \dot{x}_3 < 0) \right\} \left. \right] \quad (4.37)
\end{aligned}$$

Au mode 9 : Toutes les machines sont opérationnelles.

$$\begin{aligned}
v_k^h(9, x_1, x_2, x_3) = \min_{u \in \Gamma(\mathcal{A})} & \left[\begin{aligned} & g(\alpha, x_1, x_2, x_3) + q_{93} \cdot v_1^h(3, x_1, x_2, x_3) + q_{96} \cdot v_1^h(6, x_1, x_2, x_3) + q_{97} \cdot v_1^h(7, x_1, x_2, x_3) + q_{98} \cdot v_1^h(8, x_1, x_2, x_3) \\ & \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} \left\{ \frac{1}{h_1} (v_1^h(9, x_1 + h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 \geq 0) + \frac{1}{h_1} (v_1^h(9, x_1 - h_1, x_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_1 < 0) \right\} + \\ & \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} \left\{ \frac{1}{h_2} (v_1^h(9, x_1, x_2 + h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 \geq 0) + \frac{1}{h_2} (v_1^h(9, x_1, x_2 - h_2, x_3), \text{Ind } \dot{x}_2 < 0) \right\} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \left\{ \frac{1}{h_3} (v_1^h(9, x_1, x_2, x_3 + h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 \geq 0) + \right. \\ & \left. \frac{1}{h_3} (v_1^h(9, x_1, x_2, x_3 - h_3), \text{Ind } \dot{x}_3 < 0) \right\} \end{aligned} \right] \\
& \left[\begin{aligned} & \rho + |q_{99}| + \frac{|u_{11} + u_{21} + u_{31} + u_{41} - d_1|}{h_1} + \frac{|u_{12} + u_{22} + u_{32} + u_{42} - d_2|}{h_2} + \\ & \frac{|r_1 - (u_{31} + u_{41}) + r_2 - (u_{32} + u_{42}) - \text{disp}|}{h_3} \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{4.38}$$

ANNEXE II

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

	Chaîne d'approvisionnement en boucle ouverte	Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	Manufacturing et Remanufacturing	Le comportement du client	Développement durable
(Madjid Ramzanie et al 2013)		X	X		
(Calmon, Andre P. et Graves, Stephen C. 2017)	X			X	
(H, Badri. Et al 2017)		X			
(M, Bennekrouf et al 2012)		X	X		
(Abdulrahman et al., 2015)			X		
(Bai and Sarkis, 2013);		X			
(Binnemans et al., 2013);		X			
(Bouzon et al, 2016);		X			
(Cristóbal Andrade et al., 2012);		X			
(Ding et al., 2013);		X			
(Dwivedy and Mittal, 2012);		X			
(Frota Neto et Van Wassenhove, 2013);		X			
(Hu et al. 2016);				X	
(Lai, Wu et Wong, 2013);		X			
(Liu, 2014);		X			

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

(Yurt et Baltacioglu, 2012)		X			X
(Buyukozkan et Cifci 2012)					x
(Govindan, Sarkis, Jabbour, Zhu et Geng, 2014)		X			X
(Ohnishi et al., 2012);		X			
(Ortegon et al., 2013);		X			
(J. TRochu, A. Chaabanne, M. Ouhimmou, 2015)	X				X
(Ravi, 2012);		X			
(Saavedra et al., 2013);			X		
(Wang et al. 2015);		X			
Cruz 2013);				X	
(X. Sun, Zhang, and Zhou 2016)				X	
(Xia et al., 2015);			X		
(Ye, Zhao, Prahinski et Li,2013)		X			
(Zeng et al., 2013);		X			
(Zhu and Geng, 2013);		X			
(Gelbmann and Hammerl, 2014);		X			
(Ait-Kadi et al. 2015);	X				
(Al-Salem et al. 2016);	X				
(Al-salem. M et al. 2016);	X				
(Amine Chabane et Mark paquet 2012)	X	X			X

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

(Annie Francie et al., 2014)			X		
(Binnemans et al., 2013)		X			
(GA Blengini et al., 2012)		X			X
(Blume and Walther, 2013);		X			
(S Cannella, M Bruccoleri, and JM Framinan 2016)	X				
(Chardine-Baumann and Botta-Genoulaz, 2014)		X			
(Chen and Sheu, 2013)		X			
(L. Chen et al. 2017)	X				
(Corum et al., 2014)	X				
(Demirel et al., 2016)		X			
(Dindarian et al., 2012)		X			
(Ding et al., 2015);		X			
(Du et al., 2012);			X		
(Elia and Gnoni 2015);	X				
(Eskadarpour et al. 2014);	X				X
(Fahimnia et al., 2013);	X				
(Frota Neto et Van Wassenhove , 2013);		X			
(Ghayebloo et al. 2015);	X				
(Giannetti et al., 2013);		X			
(Goodall et al., 2014) ;			X		
(Govindan et al., 2013) ;	X	X			X
(Govindan et Soleimani, 2016);	X				

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

(Griffis et al, 2012);		X			
(Hatcher et al., 2011);			X		
(Hu et al., 2015);		X			
(Huysveld et al., 2013);	X				
(Jefferies et al., 2012);		X			
(Jia and Zhang 2013);				X	
(Jiménez-Parra et al., 2014);	X				
(Kadambala et al., 2017);	X				
(Kafa, Hani, & Mhamedi, 2015);					X
(Kubek et al. 2016);	X				
(JP Kenne, P Dejax, A Gharbi, 2012)			X		
(Kumar and Rahman, 2014);	X	-			
(Kurdve et al., 2015) ;		X			
(Lin et al., 2012);		X			
(Ling and Poon, 2012);		X			
(Barbara, 2015);		X			
(Low et al., 2014);	X				
(Mafakheri and Nasiri, 2013);	X				X
(Nikolaou et al., 2013);		X			
(Ning et al., 2013);		X			
(Ohnishi et al., 2012);		X			
(Ayvaz & Bolat, 2014)		X	X		
(Ouaret et al., 2013);			X		

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

(Demirel et al., 2014)	X	X			
(Pialot et al., 2012);		X			
(Polotski et al., 2017);			X		
(Qiang et al., 2013);				X	
(Queiruga et al., 2012);		X			
(Rashid et al., 2013);	X				
(Ravi, 2012);		X			
(Rezapour et al., 2015);	X				
(Shaharudin et al., 2015) ;		X			
(Shaharudin, Zailani, & Ismail, 2014);					X
(Shao, Taisch, and Ortega-Mier 2016);				X	
(Shi et al. 2015);	X				
(Shrouf and Miragliotta 2015);				X	
(Shrouf and Miragliotta 2017);				X	
(Shuzhu Zhang et al. 2015);	X				
(Sifaleras and Konstantaras 2015);	X				
(Silva et al., 2013);		X			
(Simpson, 2012);		X			
(Simpson, 2012);		X			
(Soleimani et Kannan, 2015);		X			

Tableau 1.1 Les articles les plus marquants en fonction des domaines d'études (suite).

(Soleimani, Seyyed-Esfahani, and Shirazi 2016);	X				
(Hatefi & Jolai, 2014)		X			
(Subramoniam et al., 2013);			X		
(Subulan et al. 2015);	X				
(Sun, Zhang, and Zhou 2016);				X	
(Tian, Guangdong, et al.2013)		X			
(Ziout et al., 2014);		X			
(Agrawal, Singh, & Murtaza, 2015)		X			
(N Bostel, M Zhang, P Dejax, 2014)	X	X			
(T, Boukherroub. et al 2014)		X	X		X
(Hatefi & Jolai, 2014)			X		
(Zhifang, Feng, Zhiping, Wang. 2012)	X	X			

ANNEXE III

PROGRAMME PRINCIPALE MATLAB

```
clear
clc
close all
%% Variables à valeur numérique
hx1 = 1;%0.5;    % pas suivant x1
hx2 = 1;%0.5;    % pas suivant x2
hx3 = 1;%0.5;    % pas suivant x3
d1 = 0.32;%0.2;   % taux de demande pour le produit P1
d2 = 0.26;%0.3;   % taux de demande pour le produit P2
R1 = 0.25*d1;    % taux de retour pour le produit P1
R2 = 0.25*d2;    % taux de retour pour le produit P2
% r = R1+R2      % Total des taux de retour
disp = 0.10;     % Taux de rejet sur les retours
rho = 0.9;       % taux d'actualisation
c1p = 5;%10;     % pénalise le stock x1 positif
c1m = 200;       % pénalise le stock x1 négatif
c2p = 5;         % pénalise le stock x2 positif
c2m = 200;       % pénalise le stock x2 négatif
c3p = 5;%20;     % pénalise le stock x3 positif
c3m = 0;
cu1 = 200;       % coût de production P1
cu2 = 200;       % coût de production P2
cr1 = 100;       % cout de remanufacturing P1
cr2 = 100;       % cout de remanufacturing P2
cr = 100;        % coût de réparation
U11m = 0.85;     % taux de production max de la machine manufacturing M1 pour le
produit P1
U21m = 0.85;     % taux de production max de la machine manufacturing M2 pour le
produit P1
U12m = 0.80;     % taux de production max de la machine manufacturing M1 pour le
produit P2
U22m = 0.80;     % taux de production max de la machine manufacturing M2 pour le
produit P2
U31m = 0.70;     % taux de production max de la machine remanufacturing R1 pour le
produit P1
U32m = 0.75;     % taux de production max de la machine remanufacturing R1 pour le
produit P2
```

$U_{41m} = 0.70$; % taux de production max de la machine remanufacturing R2 pour le produit P1

$U_{42m} = 0.75$; % taux de production max de la machine remanufacturing R2 pour le produit P2

% taux de réparation pour les machines de Manufacturing

$q_{12} = 1/15$; %0.15;

$q_{45} = q_{12}$;

$q_{78} = q_{45}$;

$q_{23} = q_{78}$;

$q_{56} = q_{23}$;

$q_{89} = q_{56}$;

$q_{13} = 0.01$; % q_{78} ;

$q_{79} = q_{13}$;

$q_{46} = q_{79}$;

% taux de réparation pour les machines de Remanufacturing

$q_{14} = 1/15$; %0.15;

$q_{25} = q_{14}$;

$q_{36} = q_{25}$;

$q_{47} = q_{36}$;

$q_{58} = q_{47}$;

$q_{69} = q_{58}$;

$q_{17} = 0.01$; % q_{69} ;

$q_{39} = q_{17}$;

$q_{28} = q_{39}$;

% taux de panne pour les machines de Manufacturing

$q_{21} = 1/60$; %0.04;

$q_{54} = q_{21}$;

$q_{87} = q_{54}$;

$q_{32} = q_{87}$;

$q_{65} = q_{32}$;

$q_{98} = q_{65}$;

$q_{31} = 0.0125$;

$q_{97} = q_{31}$;

$q_{64} = q_{97}$;

% taux de panne pour les machines de Remanufacturing


```

q41 = 1/60;%0.04;
q52 = q41;
q63 = q52;
q74 = q63;
q85 = q74;
q96 = q85;

q71 = 0.0125;
q82 = q71;
q93 = q82;

%%%%%% les bornes
x1inf = -5; % borne inferieure du stock x1
x1sup = 5; % borne superieure du stock x1
x2inf = -5; % borne inferieure du stock x2
x2sup = 5; % borne superieure du stock x2
x3inf = 0; % borne inferieure du stock x3
x3sup = 10; % borne inferieure du stock x3
Nx1 = 1 + (x1sup - x1inf)/hx1;
Nx2 = 1 + (x2sup - x2inf)/hx2;
Nx3 = 1 + (x3sup - x3inf)/hx3;
mx3=5;
%% Matrices à initialsier
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 1 %%%%%%%%%%%%%
cont112 = [];
cont114 = [];
cont115 = [];
cont511 = [];
cont116 = [];
cont117 = [];
cont118 = [];
cont811 = [];
cont119 = [];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 2 %%%%%%%%%%%%%
cont212 = [];
cont214 = [];
cont215 = [];
cont521 = [];
cont621 = [];
cont217 = [];
cont218 = [];
cont821 = [];

```

```

cont219 = [];
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R1 %%%%%%%%%%
cont312 = [];
cont313 = [];
cont315 = [];
cont531 = [];
cont316 = [];
cont631 = [];
cont318 = [];
cont319 = [];
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R2 %%%%%%%%%%
cont241 = [];
cont413 = [];
cont415 = [];
cont541 = [];
cont641 = [];
cont841 = [];
cont419 = [];
cont416 = [];
%%%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usine 2 %%%%%%%%%%
cont122 = [];
cont124 = [];
cont125 = [];
cont126 = [];
cont127 = [];
cont128 = [];
cont812 = [];
cont129 = [];
%%%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usines 2 %%%%%%%%%%
cont222 = [];
cont224 = [];
cont225 = [];
cont522 = [];
cont622 = [];
cont227 = [];
cont228 = [];
cont822 = [];
cont229 = [];
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R1 %%%%%%%%%%
cont322 = [];
cont323 = [];
cont325 = [];

```

```

cont532 = [];
cont326 = [];
cont632 = [];
cont328 = [];
cont329 = [];
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R2 %%%%%%%%%
cont242 = [];
cont423 = [];
cont425 = [];
cont542 = [];
cont426 = [];
cont642 = [];
cont842 = [];
cont429 = [];
UU1 = [];
UU2 = [];
UU3 = [];
UU4 = [];
UU5 = [];
UU6 = [];
UU7 = [];
UU8 = [];
Va1 = [];
Va2 = [];
Va3 = [];
Va4 = [];
Va5 = [];
Va6 = [];
Va7 = [];
Va8 = [];
Va9 = [];
Va10 = [];
Va11 = [];
Va12 = [];
Va13 = [];
Va14 = [];
Va15 = [];
Va16 = [];
VP1M = [];
VP21M = [];
VP22M = [];
VP3M = [];

```

```

VP41M = [];
VP42M = [];
VP51M = [];
VP52M = [];
VP53M = [];
VP54M = [];
VP61M = [];
VP62M = [];
VP7M = [];
VP81M = [];
VP82M = [];
VP9M = [];
xx1 = [];
xx2 = [];
xx3 = [];
% Seuil de production sur M1 produit P1
UU1(1)= 0;
UU1(2)= d1-R1;
UU1(3)= U11m;
% Seuil de production sur M1 produit P2
UU2(1)= 0;
UU2(2)= d2-R2;
UU2(3)= U12m;

% Seuil de production sur M2 produit P1
UU3(1)=0;
UU3(2)=d1-R1;%d1+d2;
UU3(3)=U21m;
% Seuil de production sur M2 produit P2
UU4(1)=0;
UU4(2)=d2-R2;
UU4(3)=U22m;
% Seuil de production sur R1 produit P1
UU5(1)= 0;
UU5(2)= R1;
UU5(3)= U31m;
% Seuil de production sur R1 produit P2
UU6(1)= 0;
UU6(2)= R2;%d2+d1;
UU6(3)= U32m;
% Seuil de production sur R2 produit P1
UU7(1)= 0;

```

```

UU7(2)= R1;
UU7(3)= U41m;
% Seuil de production sur R2 produit P2
UU8(1)= 0;
UU8(2)= R2;
UU8(3)= U42m;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vp1 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp21 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp22 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp3 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp41 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp42 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp51 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp52 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp53 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp54 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp61 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp62 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp7 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp81 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp82 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Vp9 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Va1 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va2 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va3 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va4 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va5 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va6 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va7 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va8 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va9 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va10 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va11 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va12 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va13 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va14 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va15 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
Va16 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Manufacturing produit 1 usine 1 %%%%%%%%%%

```

```

cont112 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont114 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont115 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont511 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont116 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont117 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont118 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont811 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont119 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 2 %%%%%%%%%%%%%%%
cont212 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont214 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont215 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont521 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont621 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont217 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont218 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont821 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont219 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R1 %%%%%%%%%%%
cont312 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont313 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont315 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont531 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont316 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont631 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont318 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont319 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R2 %%%%%%%%%%%
cont241 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont413 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont415 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont541 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont641 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont841 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont419 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont416 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usine 2 %%%%%%%%%%%
cont122 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont124 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont125 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont512 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);

```

```

cont126 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont127 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont128 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont812 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont129 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%% manufacturing produit 2 usines 2 %%%%%%%%%%
cont222 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont224 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont225 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont522 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont622 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont227 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont228 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont822 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont229 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R1 %%%%%%%%%%
cont322 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont323 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont325 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont532 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont326 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont632 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont328 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont329 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R2 %%%%%%%%%%
cont242 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont423 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont425 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont542 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont426 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont642 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont842 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);
cont429 = zeros(Nx1,Nx2,Nx3);

%% Boucle itérative%%%%%%%%%
it = 0;
precis = 0.01;
Err = 100000;
for i = 1:Nx1
    for j = 1:Nx2
        for k = 1:Nx3
%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 1 %%%%%%%%%%

```

```

cont112 (i,j,k) = 0;
cont114 (i,j,k) = 0;
cont115 (i,j,k) = 0;
cont511 (i,j,k) = 0;
cont116 (i,j,k) = 0;
cont117 (i,j,k) = 0;
cont118 (i,j,k) = 0;
cont811 (i,j,k) = 0;
cont119 (i,j,k) = 0;

```

%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 2 %%%%%%%%%%%

```

cont212 (i,j,k) = 0;
cont214 (i,j,k) = 0;
cont215 (i,j,k) = 0;
cont521 (i,j,k) = 0;
cont621 (i,j,k) = 0;
cont217 (i,j,k) = 0;
cont218 (i,j,k) = 0;
cont821 (i,j,k) = 0;
cont219 (i,j,k) = 0;

```

%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R1 %%%%%%%%%%%

```

cont312 (i,j,k) = 0;
cont313 (i,j,k) = 0;
cont315 (i,j,k) = 0;
cont531 (i,j,k) = 0;
cont316 (i,j,k) = 0;
cont631 (i,j,k) = 0;
cont318 (i,j,k) = 0;
cont319 (i,j,k) = 0;

```

%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R2 %%%%%%%%%%%

```

cont241 (i,j,k) = 0;
cont413 (i,j,k) = 0;
cont415 (i,j,k) = 0;
cont541 (i,j,k) = 0;
cont641 (i,j,k) = 0;
cont841 (i,j,k) = 0;
cont419 (i,j,k) = 0;
cont416 (i,j,k) = 0;

```

%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usine 2 %%%%%%%%%%%

```

cont122 (i,j,k) = 0;
cont124 (i,j,k) = 0;
cont125 (i,j,k) = 0;
cont512 (i,j,k) = 0;

```



```

cont126 (i,j,k) = 0;
cont127 (i,j,k) = 0;
cont128 (i,j,k) = 0;
cont812 (i,j,k) = 0;
cont129 (i,j,k) = 0;
%%%%%% manufacturing produit 2 usines 2 %%%%%%%%%
cont222 (i,j,k) = 0;
cont224 (i,j,k) = 0;
cont225 (i,j,k) = 0;
cont522 (i,j,k) = 0;
cont622 (i,j,k) = 0;
cont227 (i,j,k) = 0;
cont228 (i,j,k) = 0;
cont822 (i,j,k) = 0;
cont229 (i,j,k) = 0;
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R1 %%%%%%%%%
cont322 (i,j,k) = 0;
cont323 (i,j,k) = 0;
cont325 (i,j,k) = 0;
cont532 (i,j,k) = 0;
cont326 (i,j,k) = 0;
cont632 (i,j,k) = 0;
cont328 (i,j,k) = 0;
cont329 (i,j,k) = 0;
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R2 %%%%%%%%%
cont242 (i,j,k) = 0;
cont423 (i,j,k) = 0;
cont425 (i,j,k) = 0;
cont542 (i,j,k) = 0;
cont426 (i,j,k) = 0;
cont642 (i,j,k) = 0;
cont842 (i,j,k) = 0;
cont429 (i,j,k) = 0;
end
end
end

C1MAX = 0; C1MIN = 5e+10;
q11=-(q12+q13+q14+q17);
q22=-(q21+q23+q25+q28);
q33=-(q31+q32+q36+q39);
q44=-(q41+q45+q46+q47);

```

```

q55=-(q52+q54+q56+q58);
q66=-(q63+q64+q65+q69);
q77=-(q71+q74+q78+q79);
q88=-(q82+q85+q87+q89);
q99=-(q93+q96+q97+q98);
Q = []; B = []; NU=[];
Q = [q11 q12 q13 q14 0 0 q17 0 0
      q21 q22 q23 0 q25 0 0 q28 0
      q31 q32 q33 0 0 q36 0 0 q39
      q41 0 0 q44 q45 q46 q47 0 0
      0 q52 0 q54 q55 q56 0 q58 0
      0 0 q63 q64 q65 q66 0 0 q69
      q71 0 0 q74 0 0 q77 q78 q79
      0 q82 0 0 q85 0 q87 q88 q89
      0 0 q93 0 0 q96 q97 q98 q99];
Q([1:9],1)=[1 1 1 1 1 1 1 1 1];
B=[-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1];
C= 1/B;
NU =transpose(Q);
Faissa = NU(1)*U11m + NU(2)*U12m + NU(3)*U21m + NU(4)*U22m +
NU(5)*U31m + NU(6)*U32m + NU(7)*U41m + NU(8)*U42m +
NU(9)*(U11m+U12m+U21m+U22m+U31m+U32m+U41m+U42m);
STOP=0;
if Faissa > (d1+d2)
    display('Système faisable')
else
    display('Système non faisable')
    STOP=1;
End

while (Err > precis)&&(STOP==0) % boucle d'itération
    %Er = 0;
    C1MAX = 0;
    C1MIN = 5e+10;
    it = it + 1;
    %%%%%%%%%%%%% Policy Evaluation
    %%%%%%%%%%%%%
    % tic
    for i=1:Nx1
        x1=x1inf+(i-1)*hx1;
        xx1(i)=x1;
    for j=1:Nx2

```

```

x2=x2inf+(j-1)*hx2;
xx2(j)=x2;
for k=1:Nx3
    x3=x3inf+(k-1)*hx3;
    xx3(k)=x3;
    %-----
    u112 = cont112 (i,j,k);
    u114 = cont114 (i,j,k);
    u115 = cont115 (i,j,k);
    u511 = cont511 (i,j,k);
    u116 = cont116 (i,j,k);
    u117 = cont117 (i,j,k);
    u118 = cont118 (i,j,k);
    u811 = cont811 (i,j,k);
    u119 = cont119 (i,j,k);
    %%%%%%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 2 %%%%%%%%%%%%%%%
    u212 = cont212 (i,j,k);
    u214 = cont214 (i,j,k);
    u215 = cont215 (i,j,k);
    u521 = cont521 (i,j,k);
    u621 = cont621 (i,j,k);
    u217 = cont217 (i,j,k);
    u218 = cont218 (i,j,k);
    u821 = cont821 (i,j,k);
    u219 = cont219 (i,j,k);
    %%%%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R1 %%%%%%%%%%%%%%%
    u312 = cont312 (i,j,k);
    u313 = cont313 (i,j,k);
    u315 = cont315 (i,j,k);
    u531 = cont531 (i,j,k);
    u316 = cont316 (i,j,k);
    u631 = cont631 (i,j,k);
    u318 = cont318 (i,j,k);
    u319 = cont319 (i,j,k);
    %%%%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R2 %%%%%%%%%%%%%%%
    u241 = cont241 (i,j,k);
    u413 = cont413 (i,j,k);
    u415 = cont415 (i,j,k);
    u541 = cont541 (i,j,k);
    u641 = cont641 (i,j,k);
    u841 = cont841 (i,j,k);
    u419 = cont419 (i,j,k);

```

```

    u416 = cont416 (i,j,k) ;
%%%%%% manufacturing produit 2 usine 1 %%%%%%%%%%
    u122 = cont122 (i,j,k);
    u124 = cont124 (i,j,k) ;
    u125 = cont125 (i,j,k) ;
    u512 = cont512 (i,j,k) ;
    u126 = cont126 (i,j,k) ;
    u127 = cont127 (i,j,k) ;
    u128 = cont128 (i,j,k) ;
    u812 = cont812 (i,j,k) ;
    u129 = cont129 (i,j,k) ;
%%%%%% manufacturing produit 2 usines 2 %%%%%%%%%%
    u222 = cont222 (i,j,k) ;
    u224 = cont224 (i,j,k) ;
    u225 = cont225 (i,j,k) ;
    u522 = cont522 (i,j,k) ;
    u622 = cont622 (i,j,k) ;
    u227 = cont227 (i,j,k) ;
    u228 = cont228 (i,j,k) ;
    u822 = cont822 (i,j,k) ;
    u229 = cont229 (i,j,k) ;
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R1 %%%%%%%%%%
    u322 = cont322 (i,j,k) ;
    u323 = cont323 (i,j,k) ;
    u325 = cont325 (i,j,k) ;
    u532 = cont532 (i,j,k) ;
    u326 = cont326 (i,j,k) ;
    u632 = cont632 (i,j,k) ;
    u328 = cont328 (i,j,k) ;
    u329 = cont329 (i,j,k) ;
%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R2 %%%%%%%%%%
    u242 = cont242 (i,j,k) ;
    u423 = cont423 (i,j,k) ;
    u425 = cont425 (i,j,k) ;
    u542 = cont542 (i,j,k) ;
    u426 = cont426 (i,j,k) ;
    u642 = cont642 (i,j,k) ;
    u842 = cont842 (i,j,k) ;
    u429 = cont429 (i,j,k) ;
    %-----

```

```
[Va91, Va82, Va81, Va71, Va62, Va61, Va54, Va53, Va52, Va51, Va42,
Va41, Va31, Va22, Va21,
Va11]=coutb(i,j,k,x1,x2,x3,hx1,hx2,hx3,u112,u122,u312,u322,u212,u222,u241,u242,
u313,u413,u323,u423,u114,u124,u214,u224,u115,u315,u125,u325,u215,u415,u225,u
425,u511,u541,u512,u542,u521,u531,u522,u532,u116,u316,u416,u126,u326,u426,u6
21,u631,u641,u622,u632,u642,u117,u217,u127,u227,u118,u218,u318,u128,u228,u32
8,u811,u821,u841,u812,u822,u842,u119,u219,u319,u419,u129,u229,u329,u429,R1,R
2,q12,q13,q14,q17,q21,q23,q25,q28,q31,q32,q36,q39,q41,q45,q46,q47,q52,q54,q56,q
58,q63,q64,q65,q69,q71,q74,q78,q79,q82,q85,q87,q89,q93,q96,q97,q98,Vp1,Vp21,V
p22,Vp3,Vp41,Vp42,Vp51,Vp52,Vp53,Vp54,Vp61,Vp62,Vp7,Vp81,Vp82,Vp9,d1,d
2,Nx1,Nx2,Nx3,rho,c1p,c1m,c2p,c2m,c3p,c3m,cu1,cu2,cr1,cr2,cr,disp);
```

```
Va16(i,j,k) = Va91;
Va15(i,j,k) = Va82;
Va14(i,j,k) = Va81;
Va13(i,j,k) = Va71;
Va12(i,j,k) = Va62;
Va111(i,j,k) = Va61;
Va10(i,j,k) = Va54;
Va9(i,j,k) = Va53;
Va8(i,j,k) = Va52;
Va7(i,j,k) = Va51;
Va6(i,j,k) = Va42;
Va5(i,j,k) = Va41;
Va4(i,j,k) = Va31;
Va3(i,j,k) = Va22;
Va2(i,j,k) = Va21;
Va1(i,j,k) = Va11;
```

```
if abs(Va1(i,j,k) - Vp1(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va1(i,j,k) - Vp1(i,j,k));
end
if abs(Va1(i,j,k) - Vp1(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va1(i,j,k) - Vp1(i,j,k));
end
if abs(Va2(i,j,k) - Vp21(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va2(i,j,k) - Vp21(i,j,k));
end
if abs(Va2(i,j,k) - Vp21(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va2(i,j,k) - Vp21(i,j,k));
end
if abs(Va3(i,j,k) - Vp22(i,j,k)) > C1MAX
```

```

    C1MAX = abs(Va3(i,j,k) - Vp22(i,j,k));
end
if abs(Va3(i,j,k) - Vp22(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va3(i,j,k) - Vp22(i,j,k));
end
if abs(Va4(i,j,k) - Vp3(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va4(i,j,k) - Vp3(i,j,k));
end
if abs(Va4(i,j,k) - Vp3(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va4(i,j,k) - Vp3(i,j,k));
end
if abs(Va5(i,j,k) - Vp41(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va4(i,j,k) - Vp41(i,j,k));
end
if abs(Va5(i,j,k) - Vp41(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va4(i,j,k) - Vp41(i,j,k));
end
if abs(Va6(i,j,k) - Vp42(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va6(i,j,k) - Vp42(i,j,k));
end
if abs(Va6(i,j,k) - Vp42(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va6(i,j,k) - Vp42(i,j,k));
end
if abs(Va7(i,j,k) - Vp51(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va7(i,j,k) - Vp51(i,j,k));
end
if abs(Va7(i,j,k) - Vp51(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va7(i,j,k) - Vp51(i,j,k));
end
if abs(Va8(i,j,k) - Vp52(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va8(i,j,k) - Vp52(i,j,k));
end
if abs(Va8(i,j,k) - Vp52(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va8(i,j,k) - Vp52(i,j,k));
end
if abs(Va9(i,j,k) - Vp53(i,j,k)) > C1MAX
    C1MAX = abs(Va9(i,j,k) - Vp53(i,j,k));
end
if abs(Va9(i,j,k) - Vp53(i,j,k)) < C1MIN
    C1MIN = abs(Va9(i,j,k) - Vp53(i,j,k));
end
if abs(Va10(i,j,k) - Vp54(i,j,k)) > C1MAX

```

```

        C1MAX = abs(Va10(i,j,k) - Vp54(i,j,k));
    end
    if abs(Va10(i,j,k) - Vp54(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va10(i,j,k) - Vp54(i,j,k));
    end
    if abs(Va11(i,j,k) - Vp61(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va11(i,j,k) - Vp61(i,j,k));
    end
    if abs(Va11(i,j,k) - Vp61(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va11(i,j,k) - Vp61(i,j,k));
    end
    if abs(Va12(i,j,k) - Vp62(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va12(i,j,k) - Vp62(i,j,k));
    end
    if abs(Va12(i,j,k) - Vp62(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va12(i,j,k) - Vp62(i,j,k));
    end
    if abs(Va13(i,j,k) - Vp7(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va13(i,j,k) - Vp7(i,j,k));
    end
    if abs(Va13(i,j,k) - Vp7(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va13(i,j,k) - Vp7(i,j,k));
    end
    if abs(Va14(i,j,k) - Vp81(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va14(i,j,k) - Vp81(i,j,k));
    end
    if abs(Va14(i,j,k) - Vp81(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va14(i,j,k) - Vp81(i,j,k));
    end
    if abs(Va15(i,j,k) - Vp82(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va15(i,j,k) - Vp82(i,j,k));
    end
    if abs(Va15(i,j,k) - Vp82(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va15(i,j,k) - Vp82(i,j,k));
    end
    if abs(Va16(i,j,k) - Vp9(i,j,k)) > C1MAX
        C1MAX = abs(Va16(i,j,k) - Vp9(i,j,k));
    end
    if abs(Va16(i,j,k) - Vp9(i,j,k)) < C1MIN
        C1MIN = abs(Va16(i,j,k) - Vp9(i,j,k));
    end
end
end

```

end
end

```
vmin = (rho/(1 - rho))*C1MIN;
vmax = (rho/(1 - rho))*C1MAX;
Err = abs(vmin - vmax)
    Vp1 = Va1;
    Vp21 = Va2;
    Vp22 = Va3;
    Vp3 = Va4;
    Vp41 = Va5;
    Vp42 = Va6;
    Vp51 = Va7;
    Vp52 = Va8;
    Vp53 = Va9;
    Vp54 = Va10;
    Vp61 = Va11;
    Vp62 = Va12;
    Vp7 = Va13;
    Vp81 = Va14;
    Vp82 = Va15;
    Vp9 = Va16;
```

%%%%%%%%%% Policy Improvement %%%%%%%%%%%

```
V1_op = 5e20;
V21_op = 5e20;
V22_op = 5e20;
V3_op = 5e20;
V41_op = 5e20;
V42_op = 5e20;
V51_op = 5e20;
V52_op = 5e20;
V53_op = 5e20;
V54_op = 5e20;
V61_op = 5e20;
V62_op = 5e20;
V7_op = 5e20;
V81_op = 5e20;
V82_op = 5e20;
V9_op = 5e20;
```

for i = 1:Nx1


```

for j = 1:Nx2
    for k = 1:Nx3
        VP1M = 5e20;
        VP21M = 5e20;
        VP22M = 5e20;
        VP3M = 5e20;
        VP41M = 5e20;
        VP42M = 5e20;
        VP51M = 5e20;
        VP52M = 5e20;
        VP53M = 5e20;
        VP54M = 5e20;
        VP61M = 5e20;
        VP62M = 5e20;
        VP7M = 5e20;
        VP81M = 5e20;
        VP82M = 5e20;
        VP9M = 5e20;
        x1 = x1inf+(i-1)*hx1;
            xx1(i) = x1;
        x2 = x2inf+(j-1)*hx2;
            xx2(j) = x2;
        x3 = x3inf+(k-1)*hx3;
            xx3(k) = x3;
    for c1 = 1:3 % M1 OU M2 PRODUIT 1
        %Les modes possibles avec M1 ET M2 PRODUIT 1
            u112 = UU1(c1);
            u114 = UU1(c1);
            u115 = UU1(c1);
            u511 = UU1(c1);
            u116 = UU1(c1);
            u117 = UU1(c1);
            u118 = UU1(c1);
            u811 = UU1(c1);
            u119 = UU1(c1);
        %%%%%%%%%%%%%%% Manufacturing produit 1 usine 2 %%%%%%%%%%%%%%%
            u212 = UU3(c1);
            u214 = UU3(c1);
            u215 = UU3(c1);
            u521 = UU3(c1);
            u621 = UU3(c1);
            u217 = UU3(c1);

```

```

u218 = UU3(c1);
u821 = UU3(c1);
u219 = UU3(c1);
for c2 = 1:3 % M1 ou M2 PRODUIT 2
%Les modes possibles avec M1 ET M2 PRODUIT 2
%%%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usine 1 %%%%%%%%%%%%%
    u122 = UU2(c2);
    u124 = UU2(c2);
    u125 = UU2(c2);
    u512 = UU2(c2);
    u126 = UU2(c2);
    u127 = UU2(c2);
    u128 = UU2(c2);
    u812 = UU2(c2);
    u129 = UU2(c2);
%%%%%%%%%%%% manufacturing produit 2 usines 2 %%%%%%%%%%%%%
    u222 = UU4(c2);
    u224 = UU4(c2);
    u225 = UU4(c2);
    u522 = UU4(c2);
    u622 = UU4(c2);
    u227 = UU4(c2);
    u228 = UU4(c2);
    u822 = UU4(c2);
    u229 = UU4(c2);
    for c3 = 1:3
% R1 ou R2 Produit 1 %Les modes possibles avec R1 ET R2 PRODUIT 1
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R1 %%%%%%%%%%%%%
        u312 = UU5(c3);
        u313 = UU5(c3);
        u315 = UU5(c3);
        u531 = UU5(c3);
        u316 = UU5(c3);
        u631 = UU5(c3);
        u318 = UU5(c3);
        u319 = UU5(c3);
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 1 usine R2 %%%%%%%%%%%%%
        u241 = UU7(c3);
        u413 = UU7(c3);
        u415 = UU7(c3);
        u541 = UU7(c3);
        u641 = UU7(c3);

```

```

u841 = UU7(c3);
u419 = UU7(c3);
u416 = UU7(c3);

for c4 = 1:3 % R1 ou R2 Produit 2
%Les modes possibles avec R1 ET R2 PRODUIT 2
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R1 %%%%%%%%%%%%%%
u322 = UU6(c4);
u323 = UU6(c4);
u325 = UU6(c4);
u532 = UU6(c4);
u326 = UU6(c4);
u632 = UU6(c4);
u328 = UU6(c4);
u329 = UU6(c4);
%%%%%%%%%%%% Remanufacturing produit 2 usine R2 %%%%%%%%%%%%%%
u242 = UU8(c4);
u423 = UU8(c4);
u425 = UU8(c4);
u542 = UU8(c4);
u426 = UU8(c4);
u642 = UU8(c4);
u842 = UU8(c4);
u429 = UU8(c4);

```

```

[Va91, Va82, Va81, Va71, Va62, Va61, Va54, Va53, Va52, Va51, Va42,
Va41, Va31, Va22, Va21,
Val1]=coutb(i,j,k,x1,x2,x3,hx1,hx2,hx3,u112,u122,u312,u322,u212,u222,u241,u242,
u313,u413,u323,u423,u114,u124,u214,u224,u115,u315,u125,u325,u215,u415,u225,u
425,u511,u541,u512,u542,u521,u531,u522,u532,u116,u316,u416,u126,u326,u426,u6
21,u631,u641,u622,u632,u642,u117,u217,u127,u227,u118,u218,u318,u128,u228,u32
8,u811,u821,u841,u812,u822,u842,u119,u219,u319,u419,u129,u229,u329,u429,R1,R
2,q12,q13,q14,q17,q21,q23,q25,q28,q31,q32,q36,q39,q41,q45,q46,q47,q52,q54,q56,q
58,q63,q64,q65,q69,q71,q74,q78,q79,q82,q85,q87,q89,q93,q96,q97,q98,Vp1,Vp21,V
p22,Vp3,Vp41,Vp42,Vp51,Vp52,Vp53,Vp54,Vp61,Vp62,Vp7,Vp81,Vp82,Vp9,d1,d
2,Nx1,Nx2,Nx3,rho,c1p,c1m,c2p,c2m,c3p,c3m,cu1,cu2,cr1,cr2,cr,disp);

```

```

if Va91 < VP9M
    VP9M = Va91;
    cont119(i,j,k) = u119 ;
    cont219(i,j,k) = u219 ;

```

```

cont129(i,j,k) = u129 ;
cont229(i,j,k) = u229 ;
cont319(i,j,k) = u319 ;
cont419(i,j,k) = u419 ;
cont329(i,j,k) = u329 ;
cont429(i,j,k) = u429 ;
end

```

```

if Va82 < VP82M
    VP82M = Va82;
    cont811(i,j,k) = u811 ;
    cont821(i,j,k) = u821 ;
    cont812(i,j,k) = u812 ;
    cont822(i,j,k) = u822 ;
    cont841(i,j,k) = u841 ;
    cont842(i,j,k) = u842 ;

```

```

end

```

```

if Va81 < VP81M
    VP81M = Va81;
    cont118(i,j,k) = u118 ;
    cont218(i,j,k) = u218 ;
    cont128(i,j,k) = u128;
    cont228(i,j,k) = u228 ;
    cont318(i,j,k) = u318 ;
    cont328(i,j,k) = u328;

```

```

end

```

```

if Va71 < VP7M
    VP7M = Va71;
    cont117(i,j,k) = u117 ;
    cont217(i,j,k) = u217 ;
    cont127(i,j,k) = u127 ;
    cont227(i,j,k) = u227 ;

```

```

end

```

```

if Va62 < VP62M
    VP62M = Va62 ;
    cont621(i,j,k) = u621 ;
    cont622(i,j,k) = u622 ;

```

```

cont631(i,j,k) = u631 ;
cont641(i,j,k) = u641 ;
cont632(i,j,k) = u632 ;
cont642(i,j,k) = u642 ;
end
if Va61 < VP61M
    VP61M = Va61;
    cont116(i,j,k) = u116 ;
    cont126(i,j,k) = u126 ;
    cont316(i,j,k) = u316 ;
    cont416(i,j,k) = u416 ;
    cont326(i,j,k) = u326 ;
    cont426(i,j,k) = u426 ;
end
if Va54 < VP54M
    VP54M = Va54;
    cont521(i,j,k) = u521 ;
    cont522(i,j,k) = u522 ;
    cont541(i,j,k) = u531 ;
    cont542(i,j,k) = u532 ;
end
if Va53 < VP53M
    VP53M = Va53;
    cont511(i,j,k) = u511 ;
    cont512(i,j,k) = u512 ;
    cont531(i,j,k) = u541 ;
    cont532(i,j,k) = u542 ;
end
if Va52 < VP52M
    VP52M = Va52;
    cont215(i,j,k) = u215 ;
    cont225(i,j,k) = u225 ;
    cont415(i,j,k) = u415 ;
    cont425(i,j,k) = u425 ;

end
if Va51 < VP51M
    VP51M = Va51;
    cont115(i,j,k) = u115 ;
    cont125(i,j,k) = u125 ;
    cont315(i,j,k) = u315 ;
    cont325(i,j,k) = u325 ;

```

```

end
if Va42 < VP42M
    VP42M = Va42;
    cont214(i,j,k) = u214 ;
    cont224(i,j,k) = u224 ;

```

```

end
if Va41 < VP41M
    VP41M = Va41;
    cont114(i,j,k) = u114 ;
    cont124(i,j,k) = u124 ;

```

```

end
if Va31 < VP3M
    VP3M = Va31;
    cont313(i,j,k) = u313 ;
    cont413(i,j,k) = u413 ;
    cont323(i,j,k) = u323 ;
    cont423(i,j,k) = u423 ;

```

```

end
if Va22 < VP22M
    VP22M = Va22;
    cont241(i,j,k) = u241;
    cont242(i,j,k) = u242 ;

```

```

end
if Va21 < VP21M
    VP21M = Va21;
    cont312(i,j,k) = u312 ;
    cont322(i,j,k) = u322 ;

```

```

end
if Va11 < VP1M
    VP1M = Va11;
end

```

```

if Va91 < V9_op
    V9_op = Va91;
    X56_op = x1;
    X57_op = x2;

```

```

        X58_op = x3;
    end
    if Va82 < V82_op
        V82_op = Va82;
        X53_op = x1;
        X54_op = x2;
        X55_op = x3;
    end
    if Va81 < V81_op
        V81_op = Va81;
        X50_op = x1;
        X51_op = x2;
        X52_op = x3;
    end
    if Va71 < V7_op
        V7_op = Va71;
        X47_op = x1;
        X48_op = x2;
        X49_op = x3;
    end
    if Va62 < V62_op
        V62_op = Va62;
        X44_op = x1;
        X45_op = x2;
        X46_op = x3;
    end
    if Va61 < V61_op
        V61_op = Va61;
        X41_op = x1;
        X42_op = x2;
        X43_op = x3;
    end
    if Va54 < V54_op
        V54_op = Va54;
        X38_op = x1;
        X39_op = x2;
        X40_op = x3;
    end
    if Va53 < V53_op
        V53_op = Va53;
        X35_op = x1;
        X36_op = x2;

```

```

    X37_op = x3;
end
if Va52 < V52_op
    V52_op = Va52;
    X32_op = x1;
    X33_op = x2;
    X34_op = x3;
end
if Va51 < V51_op
    V51_op = Va51;
    X29_op = x1;
    X30_op = x2;
    X31_op = x3;
end
if Va42 < V42_op
    V42_op = Va42;
    X26_op = x1;
    X27_op = x2;
    X28_op = x3;
end
if Va41 < V41_op
    V41_op = Va41;
    X23_op = x1;
    X24_op = x2;
    X25_op = x3;
end
if Va31 < V3_op
    V3_op = Va31;
    X20_op = x1;
    X21_op = x2;
    X22_op = x3;
end
if Va22 < V22_op
    V22_op = Va22;
    X17_op = x1;
    X18_op = x2;
    X19_op = x3;
end
if Va21 < V21_op
    V21_op = Va21;
    X14_op = x1;
    X15_op = x2;

```



```

        X16_op = x3;
    end
    if Va11 < V1_op
        V1_op = Va11;
        X11_op = x1;
        X12_op = x2;
        X13_op = x3;
    end

    end
end
end
end
Va16(i,j,k) = VP9M;
Va15(i,j,k) = VP82M;
Va14(i,j,k) = VP81M;
Va13(i,j,k) = VP7M;
Va12(i,j,k) = VP62M;
Va11(i,j,k) = VP61M;
Va10(i,j,k) = VP54M;
Va9 (i,j,k) = VP53M;
Va8 (i,j,k) = VP52M;
Va7 (i,j,k) = VP51M;
Va6 (i,j,k) = VP42M;
Va5 (i,j,k) = VP41M;
Va4 (i,j,k) = VP3M;
Va3 (i,j,k) = VP22M;
Va2 (i,j,k) = VP21M;
Va1 (i,j,k) = VP1M;
end
end
end
end
end
% toc

%% Afficher les résultats
save resulta_m4p2_lass.mat Va91 Va82 Va81 Va71 Va62 Va61 Va54 Va53 Va52
Va51 Va42 Va41 Va31 Va22 Va21 Va11 cont119 cont219 cont129 cont229 cont319
cont419 cont329 cont429 ;
%% Points optimaux
fprintf('Hedging point 16: (%d,%d)\n',X11_op,X12_op,X13_op);
fprintf('Hedging point 15: (%d,%d)\n',X14_op,X15_op,X16_op);

```

```

fprintf('Hedging point 14: (%d,%d)\n',X17_op,X18_op,X19_op);
fprintf('Hedging point 13: (%d,%d)\n',X20_op,X21_op,X22_op);
fprintf('Hedging point 12: (%d,%d)\n',X23_op,X24_op,X25_op);
fprintf('Hedging point 11: (%d,%d)\n',X26_op,X27_op,X28_op);
fprintf('Hedging point 10: (%d,%d)\n',X29_op,X30_op,X31_op);
fprintf('Hedging point 9: (%d,%d)\n',X32_op,X33_op,X34_op);
fprintf('Hedging point 8: (%d,%d)\n',X35_op,X36_op,X37_op);
fprintf('Hedging point 7: (%d,%d)\n',X38_op,X39_op,X40_op);
fprintf('Hedging point 6: (%d,%d)\n',X41_op,X42_op,X43_op);
fprintf('Hedging point 5: (%d,%d)\n',X44_op,X45_op,X46_op);
fprintf('Hedging point 4: (%d,%d)\n',X47_op,X48_op,X49_op);
fprintf('Hedging point 3: (%d,%d)\n',X50_op,X51_op,X52_op);
fprintf('Hedging point 2: (%d,%d)\n',X53_op,X54_op,X55_op);
fprintf('Hedging point 1: (%d,%d)\n',X56_op,X57_op,X58_op);

```

```

%% Afficher les graphiques %%

```

```

Va91hedpoint=min(Va91(:))

```

```

Va51hedpoint=min(Va51(:))

```

```

Va11hedpoint=min(Va11(:))

```

```

%%%%%%%%%%%%%% PRODUIT 1

```

```

%%%%%%%%%%%%%%

```

```

figure(1)

```

```

surf(xx1,xx2,cont119(:, :,mx3),'FaceColor','green')

```

```

xlabel('x2')

```

```

ylabel('x1')

```

```

zlabel('u119(9,x1,x2)')

```

```

title('Production rate M1/P1 at mode 9')

```

```

figure(2)

```

```

surf(xx1,xx2,cont219(:, :,mx3),'FaceColor','green')

```

```

xlabel('x2')

```

```

ylabel('x1')

```

```

zlabel('u219(9,x1,x2)')

```

```

title('Production rate M2/P1 at mode 9')

```

```

figure(3)

```

```

surf(xx1,xx2,cont319(:, :,mx3),'FaceColor','green')

```

```

xlabel('x2')

```

```

ylabel('x1')

```

```

zlabel('u319(9,x1,x2)')

```

```

title('Production rate R1/P1 at mode 9')

```

```

figure(4)
surf(xx1,xx2,cont419(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u419(9,x1,x2)')
title('Production rate R2/P1 at mode 9')
%%%%%%%%%%%%% PRODUIT 2
%%%%%%%%%%%%%

```

```

figure(5)
surf(xx1,xx2,cont129(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u129(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/P2 at mode 9')

```

```

figure(6)
surf(xx1,xx2,cont229(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u229(9,x1,x2)')
title('Production rate M2/P2 at mode 9')

```

```

figure(7)
surf(xx1,xx2,cont329(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u329(9,x1,x2)')
title('Production rate R1/P2 at mode 9')

```

```

figure(8)
surf(xx1,xx2,cont429(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u429(9,x1,x2)')
title('Production rate R2/P2 at mode 9')

```

```

%%%%%%%%%%%%% PRODUCTION RATE FOR MANUF FOR PRODUCT 1&2
%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%-taux de production usine M1 for P1 et P2 au mode 9--%%
figure(9)
surf(xx1,xx2,cont119(:,:,mx3),'FaceColor','red')

```

```

hold on
surf(xx1,xx2,cont129(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate at mode 9')
legend('u119', 'u129')
%%--taux de production usine M2 au mode 9--%%
figure(10)
surf(xx1,xx2,cont219(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont229(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate at mode 9')
legend('u219', 'u229')
%%%%%%%%%% PRODUCTION RATE FOR REMANUF FOR PRODUCT 1&2
%%%%%%%%%%
%%--taux de production usine RM1 for P1&P2 au mode 9--%%
figure(11)
surf(xx1,xx2,cont319(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont329(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate at mode 9')
legend('u319', 'u329')
%%--taux de production usine RM1/RM2 for P2 au mode 9--%%
figure(12)
surf(xx1,xx2,cont419(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont429(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate at mode 9')
legend('u419', 'u429')

%%%%%%%%%% MANUF / REMABUF FOR PRODUCT 1 %%%%%%%%%%
%%--taux de production usine M1/RM1 for P1 au mode 9--%%

```

```

figure(13)
surf(xx1,xx2,cont119(:, :, mx3), 'FaceColor', 'yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont319(:, :, mx3), 'FaceColor', 'blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM1 at mode 9 for P1')
legend('u119', 'u319')
%%--taux de production usine M1/RM2 for P1 au mode 9--%%

```

```

figure(14)
surf(xx1,xx2,cont119(:, :, mx3), 'FaceColor', 'yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont419(:, :, mx3), 'FaceColor', 'blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM2 at mode 9 for P1')
legend('u119', 'u419')
%%--taux de production usine M2/RM1 au mode 9--%%

```

```

figure(15)
surf(xx1,xx2,cont219(:, :, mx3), 'FaceColor', 'yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont319(:, :, mx3), 'FaceColor', 'blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM1 at mode 9 for P1')
legend('u219', 'u319')
%%--taux de production usine M2/RM2 au mode 9--%%

```

```

figure(16)
surf(xx1,xx2,cont219(:, :, mx3), 'FaceColor', 'yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont419(:, :, mx3), 'FaceColor', 'blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM2 at mode 9 for P1')
legend('u219', 'u419')

```

```

%%%%%%%%%% MANUF / REMABUF FOR PRODUCT 2
%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%--taux de production usine M1/RM1 au mode 9--%%%%%%%%
figure(17)
surf(xx1,xx2,cont129(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont329(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM1 at mode 9 for P2')
legend('u129','u329')
%%%%%%%%--taux de production usine M1/RM2 au mode 9--%%%%%%%%
figure(18)
surf(xx1,xx2,cont129(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont429(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM2 at mode 9 for P2')
legend('u129','u429')
%%%%%%%%--taux de production usine M2/RM1 au mode 9--%%%%%%%%
figure(19)
surf(xx1,xx2,cont229(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont329(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM1 at mode 9 for P2')
legend('u229','u329')
%%%%%%%%--taux de production usine M2/RM2 au mode 9--%%%%%%%%
figure(20)
surf(xx1,xx2,cont229(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont429(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(9,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM2 at mode 9 for P2')
legend('u229','u429')

%%%%%%%%%%%%% LES FONCTIONS VALEURS %%%%%%%%%

```

```

% la fonction valeur au mode 5%%%
figure(21)
surf(xx1,xx2,Vp51(:, :,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x1')
ylabel('x2')
zlabel('v(5,x1,x2,x3)')
title ('Value function at mode 5')
%%%%% la fonction valeur au mode 1
figure(22)
surf(xx1,xx2,Vp1(:, :,mx3),'FaceColor','yellow')
xlabel ('x1')
ylabel('x2')
zlabel('v(1,x1,x2)')
title ('Value function at mode 1')
%%% la fonction vateur au mode 9
figure(24)
surf(xx1,xx2,Vp9(:, :,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x1')
ylabel('x2')
zlabel('v(9,x1,x2)')
title ('Value function at mode 9')
%%
%courbe du stock 1 en fonction de nombre de pannes pour M9-Mod9
figure(26)
surf(xx1,xx2,Vp9(:, :,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x1')
ylabel('x2')
zlabel('v(9,x1,x2)')
title ('Value function at mode 9')
contour(xx1,xx2,Vp9(:, :,mx3));

figure(111)
surf(xx1,xx3,cont119(:, :,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x1')
ylabel('x3')
zlabel('u119(9,x1,x2)')
title('Production rate M1/P1 at mode 9')

%%%%%%%%%%%%% FIGURES TRACER POUR LE MODES 5
%%%%%%%%%%%%% PRODUIT 1
%%%%%%%%%%%%%
figure(111)

```

```
surf(xx1,xx2,cont115(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u115(5,x1,x2)')
title('Production rate M1/P1 at mode 5')
```

```
figure(112)
surf(xx1,xx2,cont215(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u215(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/P1 at mode 5')
```

```
figure(113)
surf(xx1,xx2,cont315(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u315(5,x1,x2)')
title('Production rate R1/P1 at mode 9')
```

```
figure(114)
surf(xx1,xx2,cont415(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u415(5,x1,x2)')
title('Production rate R2/P1 at mode 5')
%%%%%%%%% PRODUIT 2
%%%%%%%%% %%%%%%%%%%
```

```
figure(115)
surf(xx1,xx2,cont125(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u125(5,x1,x2)')
title('Production rate M1/P2 at mode 5')
```

```
figure(116)
surf(xx1,xx2,cont225(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u225(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/P2 at mode 5')
```



```
figure(117)
surf(xx1,xx2,cont325(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u325(5,x1,x2)')
title('Production rate R1/P2 at mode 5')
```

```
figure(118)
surf(xx1,xx2,cont425(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u425(5,x1,x2)')
title('Production rate R2/P2 at mode 5')
```

%%%%%%%% PRODUCTION RATE FOR MANUF FOR PRODUCT 1&2 %%%%%%%%%%
 %%%--taux de production usine M1 for P1 et P2 au mode 9--%

```
figure(119)
surf(xx1,xx2,cont115(:,:,mx3),'FaceColor','red')
hold on
surf(xx1,xx2,cont125(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate at mode 5')
legend('u115','u125')
```

%%%%%%%%%%--taux de production usine M2 au mode 9--
 %%%%%%%%%%

```
figure(110)
surf(xx1,xx2,cont215(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont225(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate at mode 5')
legend('u215','u225')
```

%%%%%%%%%% PRODUCTION RATE FOR REMANUF FOR PRODUCT 1&2
 %%%--taux de production usine RM1 for P1&P2 au mode 9--%%%%%%%%%

```
figure(1111)
surf(xx1,xx2,cont315(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont325(:,:,mx3),'FaceColor','red')
```

```

xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate at mode 5')
legend('u315','u325')
%%%--taux de production usine RM1/RM2 for P2 au mode 9-%%%
figure(1112)
surf(xx1,xx2,cont415(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont425(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate at mode 9')
legend('u415','u425')

```

```

%%% MANUF / REMABUF FOR PRODUCT 1 %%%%%%%%%%
%%%--taux de production usine M1/RM1 for P1 au mode 9-%%%

```

```

figure(1113)
surf(xx1,xx2,cont115(:,:,mx3),'FaceColor','yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont315(:,:,mx3),'FaceColor','blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM1 at mode 5 for P1')
legend('u115','u315')
%%%--taux de production usine M1/RM2 for P1 au mode 9-%%%
figure(1114)
surf(xx1,xx2,cont115(:,:,mx3),'FaceColor','yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont415(:,:,mx3),'FaceColor','blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM2 at mode 5 for P1')
legend('u115','u415')
%%%%%%%%%--taux de production usine M2/RM1 au mode 9--%%%%%%%%

```

```

figure(1115)
surf(xx1,xx2,cont215(:,:,mx3),'FaceColor','yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont315(:,:,mx3),'FaceColor','blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM1 at mode 5 for P1')
legend('u215','u315')
%%-%--taux de production usine M2/RM2 au mode 9---%%%
figure(1116)
surf(xx1,xx2,cont219(:,:,mx3),'FaceColor','yellow')
hold on
surf(xx1,xx2,cont419(:,:,mx3),'FaceColor','blue')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM2 at mode 5 for P1')
legend('u215','u415')

```

```

%%MANUF / REMABUF FOR PRODUCT 2 %%%
%%-%--taux de production usine M1/RM1 au mode 5---%%%
figure(17)
surf(xx1,xx2,cont125(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont325(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M1/RM1 at mode 5 for P2')
legend('u125','u325')
%%-%--taux de production usine M1/RM2 au mode 9---%%%
figure(18)
surf(xx1,xx2,cont125(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont425(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')

```

```

title('Production rate M1/RM2 at mode 5 for P2')
legend('u125','u425')
%%%%%%%%--taux de production usine M2/RM1 au mode 9--%%%%%%%%
figure(19)
surf(xx1,xx2,cont225(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont325(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM1 at mode 5 for P2')
legend('u225','u325')
%%%%%%%%--taux de production usine M2/RM2 au mode 9--%%%%%%%%
figure(20)
surf(xx1,xx2,cont225(:,:,mx3),'FaceColor','green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont425(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate M2/RM2 at mode 5 for P2')
legend('u225','u425')

%%%%%%%%%% MODE 7%%%%%%%%%%

figure(121)
surf(xx1,xx2,cont117(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u119(7,x1,x2)')
title('Production rate M1/P1 at mode 7')

figure(122)
surf(xx1,xx2,cont217(:,:,mx3),'FaceColor','green')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u217(7,x1,x2)')
title('Production rate M2/P1 at mode 7')

%%%%%%%%%% PRODUIT 2
%%%%%%%%%%
figure(125)

```

```

surf(xx1,xx2,cont127(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u129(7,x1,x2)')
title('Production rate M1/P2 at mode 7')

```

```

figure(126)
surf(xx1,xx2,cont227(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u227(7,x1,x2)')
title('Production rate M2/P2 at mode 7')

```

```

figure(500)
surf(xx1,xx2,cont117(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
hold on
surf(xx1,xx2,cont127(:, :, mx3), 'FaceColor', 'red')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('U(5,x1,x2)')
title('Production rate at mode 7')
legend('u117', 'u127')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MODE 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Figure (133)
surf (xx1,xx2,cont313(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u313(3,x1,x2)')
title('Production rate R1/P1 at mode 3')

```

```

figure(134)
surf(xx1,xx2,cont413(:, :, mx3), 'FaceColor', 'green')
xlabel ('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u413(3,x1,x2)')
title('Production rate R2/P1 at mode 3')

```

```
%%%%%%%%%%%%%% PRODUIT
2%%%%%%%%%
```

```
figure(137)
surf(xx1,xx2,cont323(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u323(3,x1,x2)')
title('Production rate R1/P2 at mode 3')
```

```
figure(138)
surf(xx1,xx2,cont423(:,:,mx3),'FaceColor','red')
xlabel('x2')
ylabel('x1')
zlabel('u423(3,x1,x2)')
title('Production rate R2/P2 at mode 3')
```

```
figure(350)
plot(xx1,cont313(:,:,mx3),'r')
xlabel('x1')
ylabel('Taux de production')
title('Production rate R1/P1 at mode 3')
grid on
```

```
figure(456)
plot(xx1,cont217(:,:,mx3))
xlabel('x1')
ylabel('taux de production')
title('Taux de Production de M2/P1 aux mode 5')
grid on
```

```
%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
figure(357)
plot(xx1,cont319(:,:,mx3),'b')
xlabel('x1')
ylabel('Taux de production')
title('Production rate R1/P1 at mode 9')
grid on
figure(458)
plot(xx3,cont429(:,:,mx3))
```

```

xlabel('x')
ylabel('taux de production')
title('Taux de Production de M2/P1 aux mode 3')
grid on
figure(666)
plot(xx3, Vp9(:, :, mx3))
xlabel('x1')
ylabel('fonction valeur')
title('fonction valeur au mode 9')
grid on
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(669)
plot(xx3, Vp51(:, :, mx3))
xlabel('x1')
ylabel('fonction valeur')
title('fonction valeur au mode 9')
grid on

figure(457)
plot(xx1, cont119(:, :, mx3))
hold on
plot(xx1, cont115(:, :, mx3))
hold on
plot(xx1, cont117(:, :, mx3))
xlabel('x3')
ylabel('taux de production')
title('Taux de Production de M1/R1 aux mode 9')
grid on

```


LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah, T., Diabat, A., & Simchi-levi, D. (2012). Sustainable supply chain design: A closed-loop formulation and sensitivity analysis. *Production Planning and Control*, 23(2-3), 120-133. doi: 10.1080/09537287.2011.591622. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2011.591622>
- Abu-Hassan, Z., Luong, L., & Sang-Heon, L. (2012). Integrated Production-inventory Model in a Multi-echelon Closed-loop Supply Chain with product returns. *Advanced Materials Research*, 472-475(4), 3305-3311. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.3305. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.3305>
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76-92.
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Prioritizing critical success factors for reverse logistics implementation using fuzzy-TOPSIS methodology. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(1), 15-27.
- Al-Salem, M., Diabat, A., Dalalah, D., & Alrefaei, M. (2016). A closed-loop supply chain management problem: Reformulation and piecewise linearization. *Journal of Manufacturing Systems*, 40, 1-8.
- Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316-330. doi: 10.1016/j.apm.2016.08.030. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Amin, S. H., Guoqing, Z., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 73, 82-91. doi: 10.1016/j.eswa.2016.12.024. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024>
- Andiç, E., Yurt, Ö., & Baltacıoğlu, T. (2012). Green supply chains: Efforts and potential applications for the Turkish market. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 50-68.
- Andrade, L. C., Míguez, C. G., Gómez, M. T., & Bugallo, P. B. (2012). Management strategy for hazardous waste from atomised SME: application to the printing industry. *Journal of Cleaner Production*, 35, 214-229.
- Ayvaz, B., & Bolat, B. (2014). Proposal of a stochastic programming model for reverse logistics network design under uncertainties. *International Journal of Supply Chain Management*, 3(3), 33-42.

- Badri, H., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Hejazi, T. H. (2017). A two-stage stochastic programming approach for value-based closed-loop supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 1-17. doi: 10.1016/j.tre.2017.06.012. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.012>
- Badri, H., Ghomi, S. F., & Hejazi, T.-H. (2017). A two-stage stochastic programming approach for value-based closed-loop supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 1-17.
- Bahrampour, P., Safari, M., & Taraghdari, M. B. (2016). Modeling Multi-Product Multi-Stage Supply Chain Network Design. *Procedia Economics and Finance*, 36, 70-80.
- Bai, C., & Sarkis, J. (2013). Flexibility in reverse logistics: a framework and evaluation approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, 306-318.
- Bennekrouf, M., Mtalaa, W., Boudhari, F., & Sari, Z. (2012). Modèle générique pour la conception de réseaux logistiques impliquant des activités de refabrication. Dans.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22.
- Blengini, G. A., Busto, M., Fantoni, M., & Fino, D. (2012). Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. *Waste management*, 32(5), 1000-1008.
- Blume, T., & Walther, M. (2013). The end-of-life vehicle ordinance in the German automotive industry—corporate sense making illustrated. *Journal of Cleaner Production*, 56, 29-38.
- Bostel, N., Zhang, M., & Dejax, P. (2014). A new model for the capacitated single allocation hub location-routing problem. Dans.
- Boukherroub, T., LeBel, L., & Ruiz, A. (2014). A methodology for sustainable forest resource allocation.
- Boukherroub, T., Ruiz, A., Guinet, A., & Fondreville, J. (2015). An integrated approach for sustainable supply chain planning. *Computers & Operations Research*, 54, 180-194.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, 61, 110-126.

- Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C. M. T., & Campos, L. M. (2016). Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 182-197.
- Boysen, N., Emde, S., Hoeck, M., & Kauderer, M. (2015). Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, 242(1), 107-120.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). Evaluation of the green supply chain management practices: a fuzzy ANP approach. *Production Planning & Control*, 23(6), 405-418.
- Calmon, A. P., & Graves, S. C. (2017). Inventory management in a consumer electronics closed-loop supply chain. *Manufacturing & Service Operations Management*, 19(4), 568-585.
- Cannella, S., Bruccoleri, M., & Framinan, J. M. (2016). Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance? *International Journal of Production Economics*, 175, 35-49.
- Carr, A. S., & Joohyung, K. (2017). Closed loop supply chain for glass recycling: current practices and challenges. *International Journal of Integrated Supply Management*, 11(4), 316-331.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., & Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37-49.
- Chardine-Baumann, E., & Botta-Genoulaz, V. (2014). A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 138-147.
- Chen, L., Yucel, S., & Zhu, K. (2017). Inventory management in a closed-loop supply chain with advance demand information. *Operations Research Letters*, 45(2), 175-180. doi: 10.1016/j.orl.2017.02.002. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.orl.2017.02.002>
- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D. T., . . . Ma, J. (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 151, 147-160.
- Cheng, C. C., Yang, C.-l., & Sheu, C. (2014). The link between eco-innovation and business performance: a Taiwanese industry context. *Journal of Cleaner Production*, 64, 81-90.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2014). Allocating capacity to multiple segments. *Supply chain management. international edition. Pearson Education Limited*, 486.

- Chouinard, M. (2003). Système organisationnel et architecture d'un support d'information sur l'intégration des activités de logistique inversée au sein d'un centre de réadaptation.
- Corum, A., Vayvay, Ö., & Bayraktar, E. (2014). The impact of remanufacturing on total inventory cost and order variance. *Journal of Cleaner Production*, 85, 442-452.
- Daoming, D., Fengshan, S., & Jing, W. (2017). Stability and Complexity Analysis of a Dual-Channel Closed-Loop Supply Chain with Delayed Decision under Government Intervention. *Entropy*, 19(11), 577 (521 pp.). doi: 10.3390/e19110577. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/e19110577>
- Demirel, E., Demirel, N., & Gökçen, H. (2016). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2101-2113.
- Demirel, Y. K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A., & Schultz, M. P. (2014). A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. *Ocean Engineering*, 89, 21-31.
- Desport, P. (2017). *Planification tactique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée: modélisation, résolution, évaluation* (Université d'Angers).
- Desport, P., Lardeux, F., Lesaint, D., Di Cairano-Gilfedder, C., Liret, A., & Owusu, G. (2017). A combinatorial optimisation approach for closed-loop supply chain inventory planning with deterministic demand. *European Journal of Industrial Engineering*, 11(3), 303-327.
- Dindarian, A., Gibson, A., & Quariguasi-Frota-Neto, J. (2012). Electronic product returns and potential reuse opportunities: a microwave case study in the United Kingdom. *Journal of Cleaner Production*, 32, 22-31.
- Ding, B., & Liu, Q.-m. (2017). Research on financing decision of car rental closed-loop supply chain under capital constraints. *Industrial Engineering and Management*, 22(1), 58-64. doi: 10.19495/j.cnki.1007-5429.2017.01.008. Repéré à <http://dx.doi.org/10.19495/j.cnki.1007-5429.2017.01.008>
- Ding, M. J., Kam, B. H., Zhang, J. Y., & Jie, F. (2015). Effects of human resource management practices on logistics and supply chain competencies—evidence from China logistics service market. *International Journal of Production Research*, 53(10), 2885-2903.
- Ding, R., Kang, S., Zhang, Y., Hao, X., Tong, L., & Du, T. (2013). Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agricultural water management*, 127, 85-96.

- Dwivedy, M., & Mittal, R. (2012). An investigation into e-waste flows in India. *Journal of Cleaner Production*, 37, 229-242.
- El Bounjimi, M. (2016). *Contribution à la conception de la chaîne logistique verte en boucle fermée* (Université du Québec à Trois-Rivières).
- Elia, V., & Gnani, M. G. (2015). Designing an effective closed loop system for pallet management. *International Journal of Production Economics*, 170, 730-740.
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32.
- Espelage, D. L., Low, S. K., & Jimerson, S. R. (2014). Understanding school climate, aggression, peer victimization, and bully perpetration: Contemporary science, practice, and policy. *School psychology quarterly*, 29(3), 233.
- Esteves, V. M. C., Sousa, J. M. C., Silva, C. A., Pova, A. P. B., & Gomes, M. I. (2012). SCant-design: closed loop supply chain design using ant colony optimization. Dans *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 10-15 June 2012* (pp. 8 pp.). IEEE. doi: 10.1109/CEC.2012.6252944. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2012.6252944>
- Esteves, V. M. C., Sousa, J. M. C., Silva, C. A., Pova, A. P. B., & Gomes, M. I. (2012). SCant-design: Closed loop supply chain design using ant colony optimization. Dans *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2012, June 10, 2012 - June 15, 2012*. IEEE Computer Society. doi: 10.1109/CEC.2012.6252944. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/CEC.2012.6252944>
- Fagundes, L. D., Amorim, E. S., & da Silva Lima, R. (2017). Action research in reverse logistics for end-of-life tire recycling. *Systemic Practice and Action Research*, 30(5), 553-568.
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., & Rahman, S. (2013). The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 59, 210-225.
- Fang, H., & Li, H. (2017). Network design and resilient management research on closed-loop supply chain in electronics industry. *Computer Engineering and Applications*, 53(9), 263-270. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1609-0151. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1609-0151>
- FENG, Z., & WANG, Z. (2012). THE OPTIMIZATION OF A MULTI-COMMODITY FLOW CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN SUPERNETWORK WITH

STOCHASTIC CHOICE. *ICIC express letters. an international journal of research and surveys. Part B, Applications*., 3(3), 557-563.

Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2), 156-173.

Gao, J.-h., Li, M.-m., & Han, B. (2017). Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering the Risk of Carbon Emissions Reduction. *Industrial Engineering and Management*, 22(2), 8-14. doi: 10.19495/j.cnki.1007-5429.2017.02.002. Repéré à <http://dx.doi.org/10.19495/j.cnki.1007-5429.2017.02.002>

Gao, J.-H., & Li, X.-J. (2012). Equilibrium of closed-loop supply chain in automobile industry. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, 18(1), 169-175.

Gaur, J., Amini, M., & Rao, A. K. (2017). Closed-loop supply chain configuration for new and reconditioned products: an integrated optimization model. *Omega*, 66, 212-223. doi: 10.1016/j.omega.2015.11.008. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.008>

Gaur, J., Subramoniam, R., Govindan, K., & Huisingh, D. (2017). Closed-loop supply chain management: from conceptual to an action oriented framework on core acquisition. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1415-1424. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.098. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.098>

Gelbmann, U., & Hammerl, B. (2015). Integrative re-use systems as innovative business models for devising sustainable product-service-systems. *Journal of Cleaner Production*, 97, 50-60.

Gengui, Z., Yuxiang, Y., & Jian, C. (2012). Competition and integration in closed-loop supply chain network with variational inequality. *Mathematical Problems in Engineering*, 524809 (524821 pp.). doi: 10.1155/2012/524809. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1155/2012/524809>

Geyer, R., & Blass, V. D. (2010). The economics of cell phone reuse and recycling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 515-525.

Ghayebloo, S., Tarokh, M. J., Venkatadri, U., & Diallo, C. (2015). Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: the impact of parts reliability and product greenness on the recovery network. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 76-86.

- Gianesello, P., Ivanov, D., & Battini, D. (2017). Closed-loop supply chain simulation with disruption considerations: a case-study on Tesla. *International Journal of Inventory Research*, 4(4), 257-280.
- Giannetti, M., & Simonov, A. (2013). On the real effects of bank bailouts: Micro evidence from Japan. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 5(1), 135-167.
- Giovanni, P. (2017). Closed-loop supply chain coordination through incentives with asymmetric information. *Annals of Operations Research*, 253(1), 133-167. doi: 10.1007/s10479-016-2334-x. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-016-2334-x>
- Giri, B. C., & Glock, C. H. (2017). A closed-loop supply chain with stochastic product returns and worker experience under learning and forgetting. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6760-6778. doi: 10.1080/00207543.2017.1347301. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1347301>
- Goodall, P., Rosamond, E., & Harding, J. (2014). A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility. *Journal of Cleaner Production*, 81, 1-15.
- Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66-83.
- Govindan, K., Sarkis, J., Jabbour, C. J. C., Zhu, Q., & Geng, Y. (2014). Eco-efficiency based green supply chain management: Current status and opportunities. *European Journal of Operational Research*, 2(233), 293-298.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
- Griffis, S. E., Rao, S., Goldsby, T. J., & Niranjan, T. T. (2012). The customer consequences of returns in online retailing: An empirical analysis. *Journal of Operations Management*, 30(4), 282-294.
- Gu, Q., & Gao, T. (2012). Management of two competitive closed-loop supply chains. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(4), 325-337. doi: 10.1080/19397038.2012.718808. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2012.718808>
- Guide Jr, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations research*, 57(1), 10-18.

- Hamidieh, A., & Fazli-Khalaf, M. (2017). A possibilistic reliable and responsive closed loop supply chain network design model under uncertainty. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 16(4), 317-338. doi: 10.1142/S0219686717500196. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1142/S0219686717500196>
- Han, X., Wu, H., Yang, Q., & Shang, J. (2017). Collection channel and production decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruption. *International Journal of Production Research*, 55(4), 1147-1167. doi: 10.1080/00207543.2016.1230684. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1230684>
- Hatcher, J., Studts, C. R., Dignan, M., Turner, L. M., & Schoenberg, N. E. (2011). Predictors of cervical cancer screening for rarely or never screened rural Appalachian women. *Journal of health care for the poor and underserved*, 22(1), 176.
- Hatefi, S., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10), 2630-2647.
- He, Y. (2017). Supply risk sharing in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 39-52. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.10.012. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.012>
- Heydari, J., Govindan, K., & Jafari, A. (2017). Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 379-398. doi: 10.1016/j.trd.2017.03.008. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.008>
- Hillier, F. S. (2012). *Introduction to operations research*. Tata McGraw-Hill Education.
- Hong Wei, J. (2012). Study on discrimination pricing model of closed-loop supply chain with product remanufacturing. Dans *2011 International Conference on Management, Manufacturing and Materials Engineering (ICMMM 2011)*, 8-10 Dec. 2011 (Vol. 452-453, pp. 663-668). Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.452-453.663. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.452-453.663>
- Hu, P., & Long, M. (2016). Cobalt-catalyzed sulfate radical-based advanced oxidation: a review on heterogeneous catalysts and applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 181, 103-117.
- Hu, W., Qian, Y., Soong, F. K., & Wang, Y. (2015). Improved mispronunciation detection with deep neural network trained acoustic models and transfer learning based logistic regression classifiers. *Speech Communication*, 67, 154-166.

- Huang, Y., Sun, H., & Da, Q.-l. (2012). Coordination of Closed-Loop Remanufacturing Supply Chain with Stochastic and Flexible Demands. *Industrial Engineering Journal*, 15(6), 63-69. doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2012.06.011. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1007-7375.2012.06.011>
- Huang, Y., & Wang, Z. (2017). Closed-loop supply chain models with product take-back and hybrid remanufacturing under technology licensing. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3917-3927. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.065. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.065>
- Huang, Z.-S., & Nie, J.-J. (2012). Dynamic closed-loop supply chain model with product remanufacturing. Dans *2012 International Conference of Logistics Engineering and Management: Logistics for Sustained Economic Development - Technology and Management for Efficiency, ICLEM 2012, October 8, 2012 - October 10, 2012* (pp. 1039-1045). American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Huysveld, S., Peiren, N., Muylle, H., Lauwers, L., & Dewulf, J. (2013). Development of an exergetic life cycle assessment (ELCA) tool to evaluate environmental impact of dairy farms in Flanders (Belgium). Dans *5th Greenhouse Gases and Animal Agriculture conference (GGAA 2013)* (Vol. 4, pp. 439-439).
- J. Kushner, H., & G. Dupuis, P. (1994). *Numerical Methods for Stochastic Control Problems in Continuous Time*. doi: 10.1007/978-1-4684-0441-8
- Jauhari, W. A., Dwicahyani, A. R., & Kurdhi, N. A. (2017). Lot sizing decisions in a closed-loop supply chain system with remanufacturing. *International Journal of Procurement Management*, 10(3), 381-409.
- Jerbia, R., Sehli, M. A., Jemai, Z., & Boujelben, M. K. (2017). Considering multiple recovery options and uncertainties in a closed-loop supply chain network design problem. Dans *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 5-7 April 2017* (pp. 0533-0538). IEEE. doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102648. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/CoDIT.2017.8102648>
- Jia, W.-H., Zhang, B., Matsuo, K., Shin, A., Xiang, Y.-B., Jee, S. H., . . . Long, J. (2013). Genome-wide association analyses in East Asians identify new susceptibility loci for colorectal cancer. *Nature genetics*, 45(2), 191.
- Jiang, H. (2012). Research on Coordination in the Closed-loop Supply Chain with Remanufacturing. *Applied Mechanics and Materials*, 220-223(1), 319-322. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.319. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.319>

- Jie, X., & Nan, L. (2017). Research on closed loop supply chain with reference price effect. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(1), 51-64. doi: 10.1007/s10845-014-0961-0. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-014-0961-0>
- Jiménez-Parra, B., Rubio, S., & Vicente-Molina, M.-A. (2014). Key drivers in the behavior of potential consumers of remanufactured products: a study on laptops in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 85, 488-496.
- Jing, Z., Jie, W., & Xiaochen, S. (2017). Coordination of fuzzy closed-loop supply chain with price dependent demand under symmetric and asymmetric information conditions. *Annals of Operations Research*, 257(1-2), 469-489. doi: 10.1007/s10479-016-2123-6. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-016-2123-6>
- Kadambala, D. K., Subramanian, N., Tiwari, M. K., Abdulrahman, M., & Liu, C. (2017). Closed loop supply chain networks: Designs for energy and time value efficiency. *International Journal of Production Economics*, 183, 382-393.
- Kafa, N., Hani, Y., & El Mhamedi, A. (2014). Sustainable approach for third-party reverse logistics provider selection. Dans *International Conference on Green Supply chain (GSC)*.
- Kafa, N., Hani, Y., & El Mhamedi, A. (2015). An integrated sustainable partner selection approach with closed-loop supply chain network configuration. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1840-1845.
- Keivanpour, S., Ait Kadi, D., & Mascle, C. (2015). End of life aircrafts recovery and green supply chain (a conceptual framework for addressing opportunities and challenges). *Management Research Review*, 38(10), 1098-1124.
- Kenne, J.-P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 81-93.
- Khor, K. S., & Udin, Z. M. (2012). *Impact of reverse logistics product disposition towards business performance in Malaysian E&E companies*. *Journal of Supply Chain and Customer Relationship Management*, 2012, 1.
- Kotachi, M., Rabadi, G., Msakni, M. K., Al-Salem, M., & Diabat, A. (2016). A discrete event simulation for the logistics of Hamad's container terminal of Qatar. Dans *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference* (pp. 2262-2271). IEEE Press.
- Kouedeu, A. F. (2014). *Optimisation conjointe des stratégies de production et de réutilisation en environnements incertains* (École de technologie supérieure).

- Krikke, H., van Harten, A., & Schuur, P. C. (1998). On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products. *International Journal of Production Research*, 36(1), 111-140.
- Kubek, D., & Więcek, P. (2019). An integrated multi-layer decision-making framework in the Physical Internet concept for the City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 221-230.
- Kubek, D., Więcek, P., & Chwastek, K. (2016). The impact of short term traffic forecasting on the effectiveness of vehicles routes planning in urban areas. *Transportation Research Procedia*, 18, 172-179.
- Kumar, A., & Rahman, S. (2014). RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 85, 382-394.
- Kumar, D., & Rahman, Z. (2015). Sustainability adoption through buyer supplier relationship across supply chain: A literature review and conceptual framework. *International strategic management review*, 3(1-2), 110-127.
- Kurdve, M., Shahbazi, S., Wendin, M., Bengtsson, C., & Wiktorsson, M. (2015). Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: a case study approach. *Journal of Cleaner Production*, 98, 304-315.
- Kurka, T., Jefferies, C., & Blackwood, D. (2012). GIS-based location suitability of decentralized, medium scale bioenergy developments to estimate transport CO₂ emissions and costs. *Biomass and bioenergy*, 46, 366-379.
- Lai, K.-h., Wu, S. J., & Wong, C. W. (2013). Did reverse logistics practices hit the triple bottom line of Chinese manufacturers? *International Journal of Production Economics*, 146(1), 106-117.
- Li-na, F., & Shu-qi, L. (2012). Study on Value of Information Synergy in Steel Closed-loop Supply Chain Based on Response Time. *Applied Mechanics and Materials*, 220-223(1), 285-289. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.285. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.220-223.285>
- Li, C., Liu, S., & Fang, Z. (2012). Closed- loop supply chain strategy analysis based on product reliability and product time-utility value. *China Mechanical Engineering*, 23(13), 1587-1592. doi: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.13.016. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1004-132X.2012.13.016>
- Li, C., Yucel, S., & Kaijie, Z. (2017). Inventory management in a closed-loop supply chain with advance demand information. *Operations Research Letters*, 45(2), 175-180. doi: 10.1016/j.orl.2017.02.002. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.orl.2017.02.002>

- Lin, Y., Xiong, H., Chen, M., Liu, Z., Xu, J., Li, Y., . . . Wu, J. (2012). Using system dynamics to study the logistics outsourcing cost of risk. *Kybernetes*.
- Lingcheng, K., Zhiyang, L., Yafei, P., Jiaping, X., & Guang, Y. (2017). Pricing and service decision of dual-channel operations in an O2O closed-loop supply chain. *Industrial Management & Data Systems*, 117(8), 1567-1588. doi: 10.1108/IMDS-12-2016-0544. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1108/IMDS-12-2016-0544>
- Liu, D., Li, T., & Liang, D. (2014). Incorporating logistic regression to decision-theoretic rough sets for classifications. *International Journal of Approximate Reasoning*, 55(1), 197-210.
- Lundin, J. F. (2012). Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 596-603. doi: 10.1016/j.ijpe.2011.01.010. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.010>
- Lundin, J. F. (2012). Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks. Dans (2 éd., Vol. 140, pp. 596-603). Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.ijpe.2011.01.010. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.010>
- Ma, L., Zhang, Y., Zheng, L., & Chen, L. (2017). Research on the impact of products exchange policy on bullwhip effect of remanufacturing closed-loop supply chain. Dans 2017 Chinese Automation Congress (CAC), 20-22 Oct. 2017 (pp. 3590-3596). IEEE. doi: 10.1109/CAC.2017.8243404. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/CAC.2017.8243404>
- Mafakheri, F., & Nasiri, F. (2013). Revenue sharing coordination in reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 59, 185-196.
- Masoudipour, E., Amirian, H., & Sahraeian, R. (2017). A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products. *Journal of Cleaner Production*, 151, 344-355. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.067. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.067>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
- Minner, S., & Kiesmuller, G. P. (2012). Dynamic product acquisition in closed loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 50(11), 2836-2851. doi: 10.1080/00207543.2010.539280. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.539280>
- Mitra, S. (2012). Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4), 870-

879. doi: 10.1016/j.cie.2011.12.008. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.008>
- Mitra, S. (2012). Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns. *Computers and Industrial Engineering*, 62(4), 870-879. doi: 10.1016/j.cie.2011.12.008. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.12.008>
- Moshtagh, M. S., & Taleizadeh, A. A. (2017). Stochastic integrated manufacturing and remanufacturing model with shortage, rework and quality based return rate in a closed loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1548-1573. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.173. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.173>
- Nakashima, K., & Gupta, S. M. (2012). A study on the risk management of multi Kanban system in a closed loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 139(1), 65-68. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.03.016. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.016>
- Nakashima, K., & Gupta, S. M. (2012). A study on the risk management of multi Kanban system in a closed loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 139(1), 65-68. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.03.016. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.016>
- Ndiaye, M. M. (2012). Material Selection and Process Design Optimization Framework Under Closed-Loop Supply Chain. *Advanced Materials Research*, 445, 601-606. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.445.601. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.601>
- Nikolaou, I. E., Evangelinos, K. I., & Allan, S. (2013). A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 56, 173-184.
- Ning, Y., Zhong-qin, W., Malekian, R., Ru-chuan, W., & Abdullah, A. H. (2013). Design of accurate vehicle location system using RFID. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 19(8), 105-110.
- Ohnishi, S., Fujita, T., Chen, X., & Fujii, M. (2012). Econometric analysis of the performance of recycling projects in Japanese Eco-Towns. *Journal of Cleaner Production*, 33, 217-225.
- Olugu, E. U., & Kuan Yew, W. (2012). An expert fuzzy rule-based system for closed-loop supply chain performance assessment in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 375-384. doi: 10.1016/j.eswa.2011.07.026. Repéré à
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.026>

- Olugu, E. U., & Wong, K. Y. (2012). An expert fuzzy rule-based system for closed-loop supply chain performance assessment in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 375-384. doi: 10.1016/j.eswa.2011.07.026. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.026>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191-199.
- Ozgir, V., & Basligil, H. (2012). Modelling Product-recovery Processes in Closed-loop Supply-chain Network Design. *International Journal of Production Research*, 50(8), 2218-2233. doi: 10.1080/00207543.2011.575092. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.575092>
- Panda, S., Mohan Modak, N., & Cardenas-Barron, L. E. (2017). Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling. *International Journal of Production Economics*, 188, 11-21. doi: 10.1016/j.ijpe.2017.03.010. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.010>
- Peng, M., Li, K. W., & Zhou-Jing, W. (2017). Pricing decisions in closed-loop supply chains with marketing effort and fairness concerns. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6710-6731. doi: 10.1080/00207543.2017.1346324. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1346324>
- Phan Nguyen Ky, P., Yu, V. F., & Shou-Yan, C. (2012). Optimizing the fuzzy closed-loop supply chain for electrical and electronic products. Dans *2012 International Conference on Fuzzy Theory and it's Applications (iFUZZY)*, 16-18 Nov. 2012 (pp. 316-321). IEEE. doi: 10.1109/iFUZZY.2012.6409723. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/iFUZZY.2012.6409723>
- Phuc, P. N. K., Yu, V. F., & Chou, S.-Y. (2012). Optimizing the fuzzy closed-loop supply chain for electrical and electronic products. Dans *2012 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications, iFUZZY 2012, November 16, 2012 - November 18, 2012* (pp. 316-321). IEEE Computer Society. doi: 10.1109/iFUZZY.2012.6409723. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/iFUZZY.2012.6409723>
- Pialot, O., Millet, D., & Tchertchian, N. (2012). How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. *Journal of Cleaner Production*, 22(1), 19-31.
- Polotski, V., Kenne, J.-P., & Gharbi, A. (2017). Production and setup policy optimization for hybrid manufacturing–remanufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 183, 322-333.

- Prakash, S., Soni, G., & Rathore, A. P. S. (2017). Multi-echelon closed-loop supply chain network design and configuration under supply risks and logistics risks. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 28(1), 1-23.
- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T., & Dong, J. (2013). The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties. *Omega*, 41(2), 186-194.
- Qiaolun, G., & Tiegang, G. (2012). Management of two competitive closed-loop supply chains. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(4), 325-337. doi: 10.1080/19397038.2012.718808. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2012.718808>
- Qingyu, Z., Lily, W., & Helin, M. (2017). Multi-objective optimization for a sustainable closed-loop supply chain network. Dans *2017 14th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 16-18 June 2017* (pp. 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/ICSSSM.2017.7996153. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996153>
- Quariguasi Frota Neto, J., & Van Wassenhove, L. N. (2013). Original Equipment Manufacturers' Participation in Take-Back Initiatives in Brazil: An Analysis of Engagement Levels and Obstacles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(2), 238-248.
- Queiruga, D., Benito, J. G., & Lannelongue, G. (2012). Evolution of the electronic waste management system in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 24, 56-65.
- Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1-2), 328-344.
- Rashid, A., Asif, F. M., Krajnik, P., & Nicolescu, C. M. (2013). Resource Conservative Manufacturing: an essential change in business and technology paradigm for sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 57, 166-177.
- Ravi, V., & Shankar, R. (2012). Evaluating alternatives in reverse logistics for automobile organisations. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(1), 32-51.
- Rezapour, S., Hassani, A., & Farahani, R. Z. (2015). Concurrent design of product family and supply chain network considering quality and price. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 81, 18-35.
- Richter, A., van der Laan, E., Ketter, W., & Valogianni, K. (2012). Transitioning from the traditional to the smart grid: lessons learned from closed-loop supply chains. Dans *2012 International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-*

- TEP), 3-4 Dec. 2012 (pp. 7 pp.). IEEE. doi: 10.1109/SG-TEP.2012.6642382. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/SG-TEP.2012.6642382>
- Rivera-Gómez, H., Gharbi, A., Kenné, J.-P., Montañó-Arango, O., & Hernandez-Gress, E. S. (2016). Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, 171, 134-150.
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). *Going backwards: reverse logistics trends and practices* (Vol. 2). Reverse Logistics Executive Council Pittsburgh, PA.
- Roll, H. U. (2016). *Physics of the Marine Atmosphere: International Geophysics Series* (Vol. 7). Elsevier.
- Ruel, S., Zouari, D., & Samuel, K. E. (2010). Design des chaînes logistiques intégrées: tester la validité du modèle de Fisher dans le secteur de l'informatique. Dans *Journées thématique: Systèmes d'information-Logistique et Innovation (SILOGIN)*.
- Saavedra, Y. M., Barquet, A. P., Rozenfeld, H., Forcellini, F. A., & Ometto, A. R. (2013). Remanufacturing in Brazil: case studies on the automotive sector. *Journal of Cleaner Production*, 53, 267-276.
- Safaei, A. S., Roozbeh, A., & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1154-1168. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.085. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085>
- Safaei, A. S., Roozbeh, A., & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1154-1168. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.085. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085>
- Sang, S. (2012). Closed-loop supply chain coordination mechanism with fuzzy demand. *Computer Engineering and Applications*, 48(17), 36-40. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2012.17.007. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.2012.17.007>
- Sarkar, B., Ullah, M., & Namhun, K. (2017). Environmental and economic assessment of closed-loop supply chain with remanufacturing and returnable transport items. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 148-163. doi: 10.1016/j.cie.2017.07.003. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.003>
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K.-h. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 1-15.

- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Keah Choon, T., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144-1156. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.133. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144-1156. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.133. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Shaharudin, M. R., & Zailani, S. (2012). Perspectives in closed-loop supply chains. Dans *2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research (CHUSER 2012)*, 3-4 Dec. 2012 (pp. 10-14). IEEE. doi: 10.1109/CHUSER.2012.6504272. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/CHUSER.2012.6504272>
- Shaharudin, M. R., Zailani, S., & Ismail, M. (2015). Third-party logistics strategic orientation towards the reverse logistics service offerings. *International Journal of Management Practice*, 8(4), 356-374.
- Shao, J., Taisch, M., & Ortega-Mier, M. (2016). A grey-DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) analysis on the barriers between environmentally friendly products and consumers: practitioners' viewpoints on the European automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3185-3194.
- Shirazi, N., Seyyed Esfahani, M., & Soleimani, H. (2015). Modeling and solving a three-stage fixed charge transportation problem considering stochastic demand and price. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 2(1), 27-40.
- Shrouf, F., Gong, B., & Ordieres-Meré, J. (2017). Multi-level awareness of energy used in production processes. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2570-2585.
- Shrouf, F., & Miragliotta, G. (2015). Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production*, 100, 235-246.
- Shumin, L., & Young-Tae, C. (2017). Manufacturers' Closed-Loop Orientation for Green Supply Chain Management. *Sustainability*, 9(2), 222 (229 pp.). doi: 10.3390/su9020222. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/su9020222>
- Shuting, X., Lili, S., Zhe, T., Jiajing, L., & Zhaowei, M. (2017). Optimal pricing decisions for closed-loop supply chain with different disposal responsibilities. Dans *2017 14th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, 16-

18 June 2017 (pp. 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/ICSSSM.2017.7996150. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996150>

Sifaleras, A., & Konstantaras, I. (2017). Variable neighborhood descent heuristic for solving reverse logistics multi-item dynamic lot-sizing problems. *Computers & Operations Research*, 78, 385-392.

Silva, J. V., & Rezende, R. A. (2013). Additive Manufacturing and its future impact in logistics. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24), 277-282.

Simpson, D. (2012). Institutional pressure and waste reduction: The role of investments in waste reduction resources. *International Journal of Production Economics*, 139(1), 330-339.

Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 191-203. doi: 10.1016/j.cie.2017.04.038. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.038>

Soleimani, H., Seyyed-Esfahani, M., & Shirazi, M. A. (2016). A new multi-criteria scenario-based solution approach for stochastic forward/reverse supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 242(2), 399-421.

Songtao, Z., Xue, L., & Chunyang, Z. (2017). A Fuzzy Control Model for Restraint of Bullwhip Effect in Uncertain Closed-Loop Supply Chain With Hybrid Recycling Channels. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 25(2), 475-482. doi: 10.1109/TFUZZ.2016.2574910. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/TFUZZ.2016.2574910>

Su, L.-x., Wang, Z.-h., Yang, Z.-m., & Zhang, B. (2012). MFA-based Resource Cycling Efficiency Analysis for a Closed-loop Supply Chain System. *Industrial Engineering Journal*, 15(4), 35-40. doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2012.04.007. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1007-7375.2012.04.007>

Subramanian, P., Ramkumar, N., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2012). A technical note on 'analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation'. *International Journal of Production Research*, 50(2), 593-602. doi: 10.1080/00207543.2011.593348. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.593348>

Subramoniam, R., Huisingh, D., Chinnam, R. B., & Subramoniam, S. (2013). Remanufacturing Decision-Making Framework (RDMF): research validation using the analytical hierarchical process. *Journal of Cleaner Production*, 40, 212-220.

- Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 243-264.
- Sun, Q. (2017). Research on the influencing factors of reverse logistics carbon footprint under sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 22790-22798.
- Taleizadeh, A. A., Moshtagh, M. S., & Moon, I. (2017). Optimal decisions of price, quality, effort level and return policy in a three-level closed-loop supply chain based on different game theory approaches. *European Journal of Industrial Engineering*, 11(4), 486-525.
- Tang, Y., Li, J., & Zhang, J.-h. (2012). Cloud manufacturing service platform design of closed-loop supply chain oriented to remanufacturing. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 18(7), 1554-1562.
- Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California management review*, 37(2), 114-136.
- Trochu, J. (2015). *Modèle de planification tactique de chaîne d'approvisionnement soumise à des régulations environnementales* (École de technologie supérieure).
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2015). Planification tactique de chaîne d'approvisionnement dans le contexte de législations environnementales.
- Wang, X., Zhang, N., & Wang, Y.-h. (2012). Coordination strategy for closed-loop supply chain with price-discount contract. *Application Research of Computers*, 29(7), 2450-2453. doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.013. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.013>
- Wang, Y., Wallace, S. W., Shen, B., & Choi, T.-M. (2015). Service supply chain management: A review of operational models. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 685-698.
- Wu, S., & Guo, J. (2012). The text mining and classification analyses on the relationship between green supply chain management and closed-loop supply chain research trends (2000-2010). *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6(23), 281-288. doi: 10.4156/jdcta.vol6.issue23.32. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4156/jdcta.vol6.issue23.32>
- Wu, Y., & Gan, J. (2017). A multi-objective stochastic programming model for low carbon closed-loop supply chain network design. Dans *2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS)*, 3-5 June 2017 (pp.

- 6 pp.). IEEE. doi: 10.1109/EIIS.2017.8298706. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298706>
- Xia, D., Kelleher III, R. J., & Shen, J. (2016). Loss of A β 43 production caused by presenilin-1 mutations in the knockin mouse brain. *Neuron*, 90(2), 417-422.
- Xiaofeng, L., Tong, S., Shou, C., Shouyang, W., Kin Keung, L., & Yan, Y. (2017). Strategy analysis of recycling and remanufacturing by remanufacturers in closed-loop supply chain. *Sustainability*, 9(10), 1818 (1829 pp.). doi: 10.3390/su9101818. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/su9101818>
- Xiaohua, H., Haiyan, W., Qianxia, Y., & Shang, J. (2017). Collection channel and production decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruption. *International Journal of Production Research*, 55(4), 1147-1167. doi: 10.1080/00207543.2016.1230684. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2016.1230684>
- Xu, J., & Liu, N. (2017). Research on closed loop supply chain with reference price effect. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(1), 51-64. doi: 10.1007/s10845-014-0961-0. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-014-0961-0>
- Xu, J., Zhang, Y., Liu, B., & Zhao, L. (2012). Coordinative operations of distributed decision-making closed-loop supply chain: A review. Dans *2011 International Conference on Business, Economics, and Financial Sciences, Management, BEFM 2011, December 30, 2011 - December 31, 2011* (Vol. 143 AISC, pp. 441-448). Springer Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-27966-9_61. Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27966-9_61
- Yang, H., Ma, X., & Chen, H. (2012). Differential price decision and coordination of closed-loop supply chain. Dans *2012 31st Chinese Control Conference (CCC 2012), 25-27 July 2012* (pp. 7525-7529). IEEE.
- Yanting, H., & Zongjun, W. (2017). Closed-loop supply chain models with product take-back and hybrid remanufacturing under technology licensing. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3917-3927. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.065. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.065>
- Ye, F., Zhao, X., Prahinski, C., & Li, Y. (2013). The impact of institutional pressures, top managers' posture and reverse logistics on performance—Evidence from China. *International Journal of Production Economics*, 143(1), 132-143.
- Yi, Y.-y., & Liang, J.-m. (2012). Closed-loop supply chain model with premium and penalty mechanism under uncertain demand. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 18(9), 2040-2051.

- Yotat, K., & Eric, F. (2017). *Optimisation des stratégies de fabrication et de réutilisation de l'aluminium en logistique inverse* (École de technologie supérieure).
- Young-woo, K., Tai-Woo, C., & Jinwoo, P. (2017). Gen2 RFID-based system framework for resource circulation in closed-loop supply chains. *Sustainability*, 9(11), 1995 (1917 pp.). doi: 10.3390/su9111995. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/su9111995>
- Yuanjie, H. (2017). Supply risk sharing in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 39-52. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.10.012. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.012>
- Zeng, X., Song, Q., Li, J., Yuan, W., Duan, H., & Liu, L. (2015). Solving e-waste problem using an integrated mobile recycling plant. *Journal of Cleaner Production*, 90, 55-59.
- Zhang, M., Bostel, N., Dejax, P., & Hoang, H. M. (2014). An exact method for the capacitated single allocation hub location-routing problem. Dans *XIII ISOLDE Symposium*.
- Zhang, Q., Weng, L., & Ma, H. (2017). Multi-objective optimization for a sustainable closed-loop supply chain network. Dans *14th International Conference on Services Systems and Services Management, ICSSSM 2017, June 16, 2017 - June 18, 2017* (pp. Dongbei University of Finance and Economics; IEEE Systems, Man and Cybernetics Society (SMC); The Chinese University of Hong Kong; Tsinghua University). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ICSSSM.2017.7996153. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996153>
- Zhang, S.-h., Zhang, J.-l., & Leng, K.-j. (2012). Pricing strategy and coordination mechanism of remanufacturing closed-loop supply chain based on government incentives. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 18(12), 2750-2755.
- Zhang, S., Lee, C. K., Chan, H. K., Choy, K. L., & Wu, Z. (2015). Swarm intelligence applied in green logistics: A literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 37, 154-169.
- Zhang, S., & Zhao, X. (2012). An uncertain discrete switched fuzzy model and fuzzy robust control of closed-loop supply chain. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 4(14), 447-457. doi: 10.4156/ijact.vol4.issue14.49. Repéré à <http://dx.doi.org/10.4156/ijact.vol4.issue14.49>
- Zhou, X.-w., Xiong, H.-w., & Chen, X.-h. (2017). Reverse channel selection in closed-loop supply chain based on quality of recycled products. *Control and Decision*, 32(2), 193-202. doi: 10.13195/j.kzyjc.2016.0070. Repéré à <http://dx.doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0070>
- Zhou, X., Sun, X., Zhang, W., Liang, S., & Wei, Y. (2016). Deep kinematic pose regression. Dans *European Conference on Computer Vision* (pp. 186-201). Springer.

- Zhu, Q., & Geng, Y. (2013). Drivers and barriers of extended supply chain practices for energy saving and emission reduction among Chinese manufacturers. *Journal of Cleaner Production*, 40, 6-12.
- Zhuo, D., & Zaiyue, L. (2017). Design of a dynamic closed-loop supply chain network using fuzzy bi-objective linear programming approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(5), 330-343. doi: 10.1080/21681015.2017.1305994. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2017.1305994>
- Ziout, A., Azab, A., & Atwan, M. (2014). A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of Cleaner Production*, 65, 497-516.
- Zongsheng, H., Jiajia, N., & Sang-Bing, T. (2017). Dynamic Collection Strategy and Coordination of a Remanufacturing Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty. *Sustainability*, 9(5), 683 (618 pp.). doi: 10.3390/su9050683. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/su9050683>