

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

DOCTORAT PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE
OFFERT EN EXTENSION
EN VERTU D'UN PROTOCOLE D'ENTENTE
AVEC L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

PAR
MBAREK EL BOUNJIMI

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE EN
BOUCLE FERMÉE

AVRIL-2016

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE EN
BOUCLE FERMÉE

MBAREK EL BOUNJIMI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INDUSTRIEL
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)

AVRIL 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Cette thèse intitulée :

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE EN
BOUCLE FERMÉE

présentée par : EL BOUNJIMI, Mbarek
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

ABDUL-NOUR, Georges, professeur, directeur de recherche
AIT-KADI, Daoud, professeur, codirecteur de recherche
GHARBI, Ali, professeur, évaluateur externe
RODRIGUES VIEIRA, Darli, professeur, président du jury

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu qui par sa bonté m'a entouré de personnes formidables qui ont, chacune à sa façon, et ce, à différentes étapes de mon cheminement, contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de cette thèse de doctorat.

À mes directeurs de thèse, M. Georges Abdul-Nour et M. Daoud Ait-kadi, j'exprime ma profonde gratitude pour la patience et l'encadrement dont j'ai bénéficié tout au long de mes études doctorales. Je les remercie aussi pour leurs précieux conseils et leur constant encouragement et soutien qu'ils m'ont toujours manifesté tout au long de ces années pour mener à terme ce projet, transformant ainsi les obstacles et les difficultés rencontrés en une expérience enrichissante.

Je suis également très reconnaissant envers M. Amin Chaabane, professeur à l'École supérieure de technologie pour son aide et ses conseils.

Mes remerciements vont également à M. Ali Gharbi, professeur à l'École supérieure de technologie et M. Rodrigues Darli, professeur à l'Université de Québec à Trois-Rivières d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Ce parcours n'aurait pu être le même sans le soutien constant de mon entourage. D'abord, je tiens à remercier mes parents, ma femme et mes enfants pour la patience et les encouragements reçus depuis le début de mes études doctorales. Sans leur soutien lors de ce long cheminement, le risque d'abandon allait être énorme.

Enfin, je ne saurais terminer sans souligner le soutien amical et chaleureux de mes amis de tous les jours qui m'ont soutenu durant ce parcours doctoral. Je m'abstiens de les nommer tellement la liste est longue.

RÉSUMÉ

Typiquement, la chaîne logistique verte réfère à un réseau logistique en boucle fermée, intégrant la logistique inverse et la chaîne logistique classique. Or, dans la pratique, les contraintes associées aux activités de la logistique inverse rendent cette intégration une tâche difficile et mettent en risque la durabilité de tout le réseau.

Afin d'améliorer la durabilité économique de la chaîne logistique verte, cette thèse développe de nouvelles approches d'aide à la conception de réseau logistique en boucle fermée qui permettent l'amélioration du profit total tout en respectant les contraintes potentielles du réseau.

Cette thèse a contribué à l'avancement de la recherche par deux articles de revue avec comité de lecture et trois articles de conférence avec comité de lecture.

Le chapitre 2 présente une revue compréhensive de la littérature concernant la récupération de la valeur dans la chaîne logistique inverse et les modèles mathématiques de conception de la chaîne logistique en boucle fermée.

Le chapitre 3 développe une approche basée sur la programmation non-linéaire en nombres entiers mixtes, supporte la conception d'un réseau logistique intégré de fabrication-remise à neuf dans lequel le détaillant est à la fois distributeur de produits neufs et fournisseur de produits en fin de vie. Cette approche considère la colocalisation des installations en tant que décision stratégique qui offre une grande économie d'échelle.

Puisque la viabilité des réseaux logistiques en boucle fermée dépend fortement de la sélection de meilleures alternatives de traitement de produits en fin de vie, le chapitre 4 met en évidence la criticité de telles décisions et propose une approche basée sur la

programmation linéaire en nombres entiers mixtes pour l'optimisation du réseau logistique en boucle fermée avec plusieurs alternatives de traitement des produits en fin de vie.

Mots clés : conception du réseau logistique, chaîne logistique verte en boucle fermée, logistique inverse, programmation mathématique et durabilité.

ABSTRACT

Typically, green supply chain refers to a closed-loop logistics network, incorporating reverse logistics and regular supply chain. However, in practice, the constraints associated with reverse logistics activities make this integration a difficult task, and put the sustainability of the network at risk.

In order to improve the economic sustainability of the green supply chain, this thesis develops new approaches that aim at helping logistics network design closed loop improve the total profit while respecting the potential constraints of the network. .

This thesis has contributed to the advancement of research with two peer-reviewed articles and three refereed conference proceedings.

Chapter 2 presents a comprehensive literature review regarding the value recovery in the reverse supply chain, as well as mathematical closed-loop supply chain network design models.

Chapter 3 develops an approach based on non-linear programming mixed integers, aiming at designing an integrated manufacturing-remanufacturing logistics network, in which the retailer is both a distributor of new products and a supplier of end-of-life products. This approach considers the co-location of facilities as a strategic decision that offers great economy of scale.

Since the closed-loop logistics network viability depends strongly on the selection of the best end-of-life product recovery alternative, chapter 4 highlights the criticality of such decision, and proposes a linear mixed integer programming-based approach to optimize a closed-loop logistics network with several recovery alternatives.

Keywords: logistics network design, green supply chain closed-loop, reverse logistics, mathematical programming, and sustainability.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Abstract	vii
Table des matières.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des figures	xiv
CHAPITRE 1 – Introduction	1
1.1 Le concept de développement durable	1
1.2 La chaîne logistique et le développement durable	4
1.3 Définitions	9
1.3.1 Chaîne logistique traditionnelle	9
1.3.2 Logistique inverse	11
1.3.3 Chaîne logistique en boucle fermée	12
1.3.4 Chaîne logistique verte.....	12
1.4 Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la chaîne logistique verte	14
1.5 Les processus de gestion de la chaîne logistique verte.....	18
1.5.1 La planification	19
1.5.2 L'approvisionnement vert.....	20
1.5.3 La fabrication verte	21
1.5.4 La distribution verte	22

1.6 Notions de valeur et de performance dans la chaîne logistique verte	24
1.6.1 L'interprétation des résultats.....	26
1.7 Les décisions de planification de la chaîne logistique verte.....	28
1.8 Conception du réseau de la chaîne logistique verte.....	28
1.8.1 Techniques d'optimisation de la structure du réseau logistique	31
1.8.1.1 Optimisation mathématique.....	31
1.8.1.2 Méta-heuristiques.....	32
1.8.1.3 Simulation.....	33
1.9 Problématique et objectifs de recherche.....	36
1.10 Organisation de la thèse.....	37
Chapitre 2 – Revue de la littérature	39
2.1 Revue de la littérature sur la logistique inverse.....	39
2.1.1 Activités de la logistique inverse	39
2.1.1.1 Acquisition.....	39
2.1.1.2 Collecte	41
2.1.1.3 Évaluation/tri	41
2.1.1.4 Disposition	43
2.1.1.5 Redistribution.....	46
2.1.2 Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la logistique inverse	46
2.1.3 Contraintes de la récupération de valeur.....	49
2.1.3.1 Contrainte d'approvisionnement.....	51
2.1.3.2 Contrainte du processus de traitement	57
2.1.3.3 Contrainte de la demande.....	59

2.2 Revue de la littérature sur la conception de la chaîne logistique en boucle fermée.....	59
2.3 Démarche de la revue de littérature.....	61
2.3.1 Modèles déterministes.....	63
2.3.1.1 Modèles déterministes avec un seul objectif	65
2.3.1.2 Modèles déterministes multi-objectifs.....	70
2.3.2 Modèles stochastiques.....	71
2.3.2.1 Modèles stochastiques mono-objectif.....	72
2.3.2.2 Modèles stochastiques multi-objectifs.....	75
2.3.3 Synthèse de la revue de la littérature	76
2.3.4 Contributions de la thèse.....	80
2.3.5 Méthodologie suivie.....	80
Chapitre 3 – Approche basée sur la colocalisation pour la conception d'un réseau logistique de fabrication-remise à neuf.....	83
3.1 Introduction	83
3.2 Synthèse de la revue de littérature.....	83
3.3 Définition du problème.....	85
3.4 Formulation du modèle.....	86
3.5 Résultats	93
3.6 Conclusion.....	95
Chapitre 4 – Approche intégrée pour la configuration d'un réseau logistique en boucle fermée avec plusieurs alternatives de traitement	97
4.1 Introduction	97
4.2 Synthèse de la revue de la littérature.....	98
4.3 Définition du problème.....	99

4.4	Formulation du modèle.....	106
4.5	Résultats	109
4.6	Conclusion.....	110
	Conclusion générale et perspectives de recherche.....	111
	Bibliographie.....	114
	Annexe I.....	134
	Annexe II	152
	Annexe III	171
	Annexe IV	192
	Annexe V	209

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Principales différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la chaîne logistique verte.....	16
Tableau 2.1 – Alternatives de traitement des produits utilisés (Krikke <i>et al.</i> , 1998).....	44
Tableau 2.2 – Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la logistique inverse (adapté de Tibben-Lembke et Rogers, 2002 et Gobbi, 2008).....	47
Tableau 2.3 – Modèles déterministes mono-objectif	68
Tableau 2.4 – Modèles déterministes multi-objectifs	71
Tableau 2.5 – Modèles stochastiques mono-objectif	72
Tableau 2.6 – Modèles stochastiques multi-objectifs	76
Tableau 3.1 – Revue de littérature sur le premier objectif de recherche.....	84
Tableau 4.1 – Revue de littérature sur le deuxième objectif de recherche	98
Tableau 4.2 – Résultats de la solution optimale.....	109

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Les trois dimensions du développement durable (Garetti et Taisch, 2012).....	2
Figure 1.2 – Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur économique (3 ^e groupe de travail, GIEC, 2014).....	4
Figure 1.3 – Représentation de chaîne logistique traditionnelle (Chouinard, 2003)	5
Figure 1.4 – Motivations entreprises pour la mise en œuvre les pratiques vertes (Bearing Point, 2010)	9
Figure 1.5 – Périmètre de la chaîne logistique verte (Observatoire de la Supply Chain, 2008)	14
Figure 1.6 – Les processus de gestion de la chaîne logistique verte (SCC, 2006)	19
Figure 1.7 – Triangle de la fabrication verte (Dornfeld, 2010)	22
Figure 1.8 – Catégories d'impacts du cycle de vie.....	27
Figure 1.9 – Démarche de développement d'un réseau logistique (Martel et Venkatadri, 1999).....	31
Figure 1.10 – Interaction entre le modèle de simulation et l'algorithme d'optimisation (Abo-Hamad et Arisha, 2011)	35
Figure 2.1 – Représentation de logistique inverse (Chouinard, 2003).....	40
Figure 2.2 – Contraintes de récupération de la valeur (Geyer et Jackson, 2004)	51
Figure 2.3 – Perte d'information sur le produit le long du cycle de vie.....	54
Figure 2.4 – Récupération de la valeur résiduelle des produits en fin de vie.....	77
Figure 2.5 – Classification des modèles recensés	78
Figure 2.6 – Les variables de décision spécifiques prises en considération.....	79
Figure 2.7 – Méthodologie suivie.....	81

Figure 3.1 – Représentation de réseau logistique de fabrication/ remise à neuf	85
Figure 3.2 – Influence de la variation du taux de retours sur les coûts totaux.....	94
Figure 3.3 – Influence de la variation de la demande sur les coûts totaux.....	94
Figure 3.4 – Influence de la variation du taux de remise à neuf sur les coûts totaux	95
Figure 4.1 – Représentation de la chaîne logistique en boucle fermée	100
Figure 4.2 – Sélection d'options de traitement d'un produit en fin de vie.....	103
Figure 4.3 – Exemple de structure du produit en fin de vie	103
Figure 4.4 – Représentation du réseau optimal	109

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

1.1 Le concept de développement durable

Le développement spectaculaire des technologies et des techniques de vente a causé grandement la surconsommation des produits industriels, notamment les produits de haute technologie et dont les cycles de vie sont de plus en plus courts. En contrepartie, cette évolution a mené à une consommation grandissante des matières premières et des énergies ainsi qu'à la croissance des quantités de gaz à effet de serre et des déchets dans les sites d'enfouissement.

La croissance économique rapide de pays émergents comme la Chine et l'Inde ainsi que le changement de leurs modes de vie va aggraver le problème. La prise de conscience des problèmes écologiques de la planète a pris une dimension mondiale depuis la conférence des Nations Unies sur l'environnement humain, organisée en 1972 à Stockholm. Les années qui ont suivi ont vu la naissance d'un mouvement écologique international. Longtemps séparées, les questions d'économie et d'écologie sont devenues liées pour définir ce qu'on appelle le « développement durable ».

La reconnaissance mondiale de ce concept peut être liée à la publication du rapport « Notre avenir à tous » (dit rapport Brundtland, présidente de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement) (CMED, 1987).

Dans ce document, le développement durable est défini comme étant « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ». Bien que beaucoup de rapports soient publiés et plusieurs conférences internationales soient organisées, la communauté internationale peine à mettre en pratique les principes du développement durable. En ce sens, le principal résultat du dernier « Sommet de la Terre » sur « l'économie verte » et

le « cadre institutionnel du développement durable », qui s'est tenu en juin 2012 à Rio de Janeiro, est le lancement d'un processus devant conduire à l'établissement d'objectifs de développement durable.

Néanmoins, il est communément admis que le développement durable englobe trois dimensions : économique, environnementale et sociale. Comme indiqué par Garetti et Taisch (2012), lorsque seulement deux dimensions sont considérées, le système est qualifié comme viable (économie + environnement), équitable (économie + social) ou vivable (environnement + social) (voir figure 1.1).

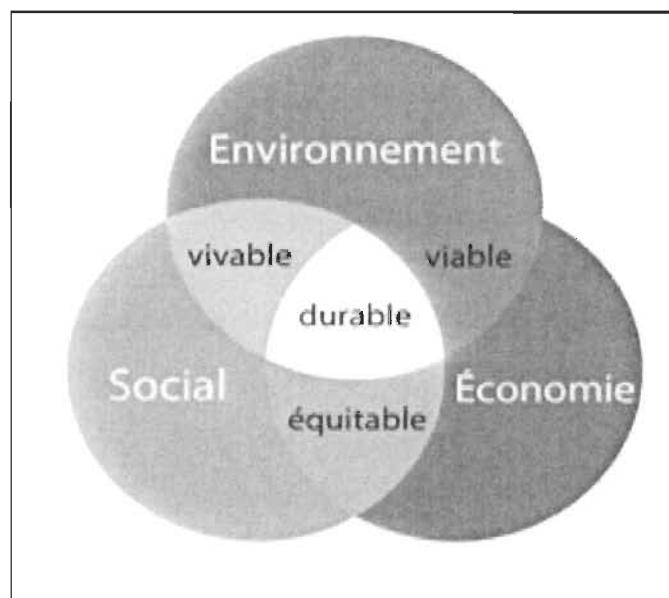


Figure 1.1 – Les trois dimensions du développement durable (Garetti et Taisch, 2012)

Bien qu'il existe diverses perceptions de ce concept, l'approche de triples dimensions semble la plus adoptée pour assurer une performance globale minimale des trois dimensions environnementale, économique et sociale (figure 1.1). Le concept de développement durable a fait l'objet de nombreuses discussions lors des conférences internationales sur l'environnement et le développement organisées sous l'égide des Nations Unies, notamment Rio en 1992, Kyoto en 1997, Johannesburg en 2002 et

Copenhague en 2009. De nombreux textes et déclarations sont issus de ces conférences, tels que le Protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), signé en 1997 et entré en vigueur en 2005. Comme leur nom l'indique, les GES sont responsables de l'effet de serre naturel qui assure une température moyenne de 15°C, condition nécessaire au développement de la vie. Ils retiennent une large part du rayonnement infrarouge renvoyée vers l'espace par la Terre. Six GES sont inventoriés (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC et SF_6) et un facteur de caractérisation est associé à chacun d'entre eux pour calculer le potentiel de réchauffement global (PRG, ou Global Warming Potential – GWP). Le PRG est exprimé en équivalent CO_2 (IPCC, 2013).

La figure 1.2 montre la répartition des GES émis par les différents secteurs de l'économie mondiale. Les émissions indirectes, figurant sur la droite, sont celles qui résultent de la production d'électricité et de la chaleur; les émissions directes par secteur sont indiquées sur la gauche. Le secteur industriel est un grand contributeur à la pollution atmosphérique, il représente 28,6 % du total des émissions de GES dont 18 % sont des émissions directes et 10,6 % sont des émissions indirectes.

Avec l'émergence de développement durable, que ce soit pour des raisons économiques, légales ou stratégiques, les entreprises industrielles sont de plus en plus amenées à mettre en œuvre des actions durables, notamment en lien avec la protection de l'environnement. Par exemple, il est possible de compenser partiellement les émissions de GES en augmentant, sur le territoire local ou dans des pays étrangers, les forêts qui absorbent du dioxyde de carbone provenant de l'atmosphère. D'autres mécanismes comme la taxe carbone ou les quotas d'émission sont appliqués aujourd'hui dans plusieurs pays industrialisés (pays de l'Europe, Canada, Nouvelle-Zélande, etc.).

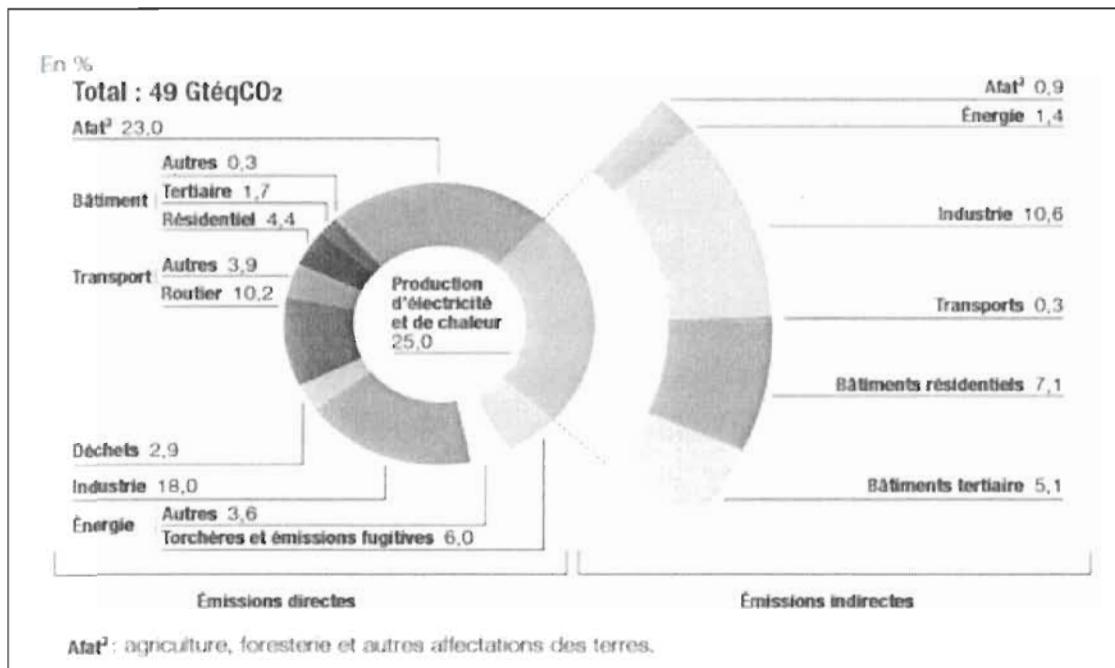


Figure 1.2 – Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur économique (3^e groupe de travail, GIEC, 2014)

La taxe carbone consiste à faire payer les « pollueurs » selon leurs émissions de GES. Dans le cadre des quotas d'émissions, chaque état se voit allouer un quota d'émissions de CO₂ (équivalent CO₂), qu'il répartit ensuite sur ses sites industriels. Chaque site doit alors respecter le seuil d'émission qui lui a été fixé et s'il émet plus, il paie une taxe, s'il émet moins que ce qui était prévu, il pourra vendre sur un « marché carbone » les tonnes de CO₂ qu'il n'a pas émises.

1.2 La chaîne logistique et le développement durable

Depuis son apparition au début des années 1990, le concept de « gestion de la chaîne logistique » s'impose comme un vecteur clé de compétitivité des entreprises. Initialement, ce concept n'était qu'une gestion fonctionnelle de chaque activité de l'entreprise industrielle pour devenir, au début de l'année 1990, une chaîne logistique intégrant un nombre plus grand de partenaires d'affaires en amont ou aval d'une

entreprise (Bechtel et Jayaram, 1997). La chaîne logistique peut être représentée par une séquence d'activités commençant par l'approvisionnement en matières premières et se terminant par la livraison du produit fini au consommateur (figure 1.3).

La gestion de la chaîne logistique poursuit ainsi un objectif d'intégration, non seulement par le partage d'information entre ses partenaires, mais aussi par la révision continue des activités à valeur ajoutée (Christopher, 1998). La mondialisation a forcé les entreprises à faire partie à au moins à une chaîne logistique et, par conséquent, la concurrence est de plus en plus entre des chaînes logistiques qu'entre des entreprises isolées (Gold, Seuring et Beske, 2009).

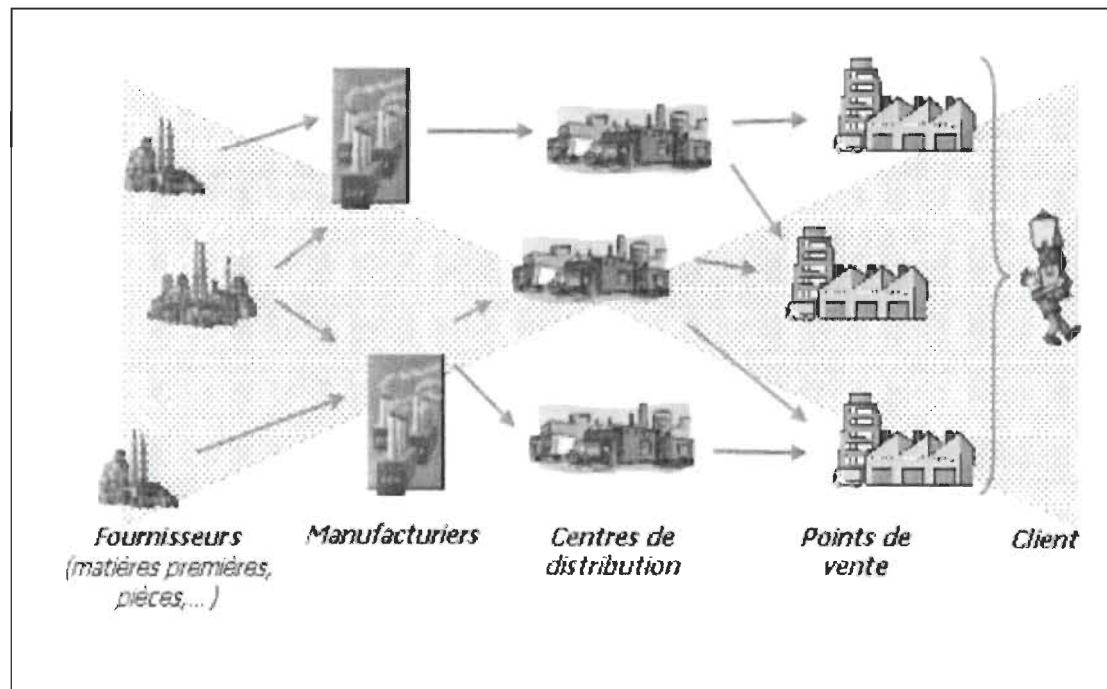


Figure 1.3 – Représentation de chaîne logistique traditionnelle (Chouinard, 2003)

Ainsi, dans un contexte de globalisation des marchés, l'objectif principal de la gestion de la chaîne logistique est la création de valeur, basée sur la prémissse qu'une chaîne logistique intégrée et efficiente contribue à la minimisation des risques financiers et à

l'augmentation des profits (Fawcett, Magnan et McCarter, 2008). Par conséquent, les modèles d'affaires adoptés par les entreprises industrielles impliquent des chaînes logistiques dans lesquelles les matières premières sont transformées en produits finis en utilisant des technologies et des énergies non-renouvelables, puis transportées au consommateur final, sans tenir compte la disposition des produits après utilisation.

Parallèlement du défi économique, le développement durable est considéré comme un deuxième défi majeur pour les entreprises au cours des dernières années (Kleindorfer, Singhal et Van Wassenhove, 2005). L'opérationnalisation du développement durable dans l'entreprise se traduit par la démarche de responsabilité sociale des entreprises (Boukherroub, 2013). La relation entre la gestion de la chaîne logistique et le développement durable est plus abordée d'un point de vue environnemental en utilisant différentes terminologies telles que l'approvisionnement vert, la gestion responsable des produits, la logistique inverse, et la gestion de la chaîne logistique verte (Vachon et Mao, 2008).

Traditionnellement, les réglementations environnementales sont vues comme synonymes de coûts supplémentaires et donc considérées comme des freins à la compétitivité d'une entreprise. L'hypothèse de Porter et Van der Linde (1995) stipule que « si les réglementations environnementales sont strictes mais flexibles et adaptées, les contraintes créées vont favoriser l'innovation et peuvent parfois améliorer la compétitivité d'une entreprise ».

Afin d'appuyer leurs dires, les auteurs ont cité quelques cas où des firmes qui se conformèrent aux législations environnementales virent leurs profits augmenter. Il n'est donc pas étonnant, dans ce contexte, que la durabilité de l'entreprise se soit étendue progressivement aux réseaux logistiques par le biais des pressions exercées par les parties prenantes (clients et actionnaires). Vachon et Mao (2008) constataient une relation significative entre la force de la chaîne d'approvisionnement et l'innovation

environnementale et qui appuie également l'hypothèse de Porter et Van der Linde, (1995).

En effet, aujourd'hui dans un contexte de développement durable et pour plusieurs raisons tels que les avantages économiques que peut offrir la récupération de certains produits utilisés, les législations gouvernementales et la demande croissante des consommateurs pour des produits écologiques, plusieurs entreprises pionnières ont ressenti la nécessité de revoir la stratégie de gestion de leurs chaînes logistiques en vue d'y intégrer les activités de traitement des produits en fin de vie et réduire au maximum les impacts environnementaux.

Le modèle linéaire classique de la chaîne logistique cède donc peu à peu la place à un modèle cyclique au travers duquel les produits récupérés sont réinjectés dans la chaîne logistique traditionnelle pour construire une boucle de valeur. Ainsi, le concept d'économie circulaire semble être la mise en pratique la plus récente du développement durable et est définie, selon l'ADEME (2014) comme « un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie du produit, cherche à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement ».

La gestion de la chaîne logistique verte peut alors être vue comme l'intégration des préoccupations environnementales à la gestion de la chaîne logistique (Sarkis, Zhu et Lai, 2011). Le terme « vert » est devenu de plus en plus abondant, il peut avoir plusieurs significations dépendamment des perceptions de ses utilisateurs, mais qui se réfèrent toutes à l'environnement (Boks et Stevels, 2007).

Le concept « chaîne logistique verte » a été proposé pour la première fois par le consortium de recherche sur la fabrication de l'Université du Michigan en 1996, en vue

d'étudier les impacts environnementaux et l'optimisation des ressources des chaînes logistiques de fabrication (Hanfield, 1996).

Les principales motivations à la mise en œuvre de la chaîne logistique verte peuvent être regroupées en quatre catégories (Zhu et Sarkis, 2004; Walker, Di Sisto et McBain, 2008) : les réglementations, la recherche d'un avantage concurrentiel, la pression des parties prenantes et l'innovation interne de l'entreprise. Le classement de ces motivations par ordre d'importance est difficile et dépend de plusieurs facteurs tels que le pays, le domaine d'activité et la taille des entreprises étudiées.

Au Canada, une étude récente révèle que les entreprises ayant mis en œuvre des pratiques vertes comme la réduction de la consommation d'énergie, des emballages et des déchets ont rapporté une amélioration en termes de réduction de leurs coûts de distribution de fidélisation de leur clientèle et d'opportunités d'accès aux marchés étrangers (Industrie Canada, 2009). Aujourd'hui, les entreprises sont de plus en plus proactives en matière de durabilité environnementale. Ce constat est confirmé par les résultats d'un sondage récent de 582 entreprises européennes. Les résultats montrent clairement dans la figure 1.4 que la réglementation n'est plus considérée comme la motivation la plus importante pour établir des actions durables et donne la place à l'image de marque de l'entreprise et l'impulsion de la direction. Selon Zhu et Sarkis (2006), il y a un impact sur l'environnement à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, de l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination du produit après la consommation. Cet impact peut être minimisé grâce à l'adoption d'une chaîne logistique en boucle fermée, qui est donc considérée comme la manière la plus appropriée pour établir un équilibre entre le profit et la performance environnementale (Solvang et Hakam, 2010; Andiç, Yurt et Baltacioglu, 2012).

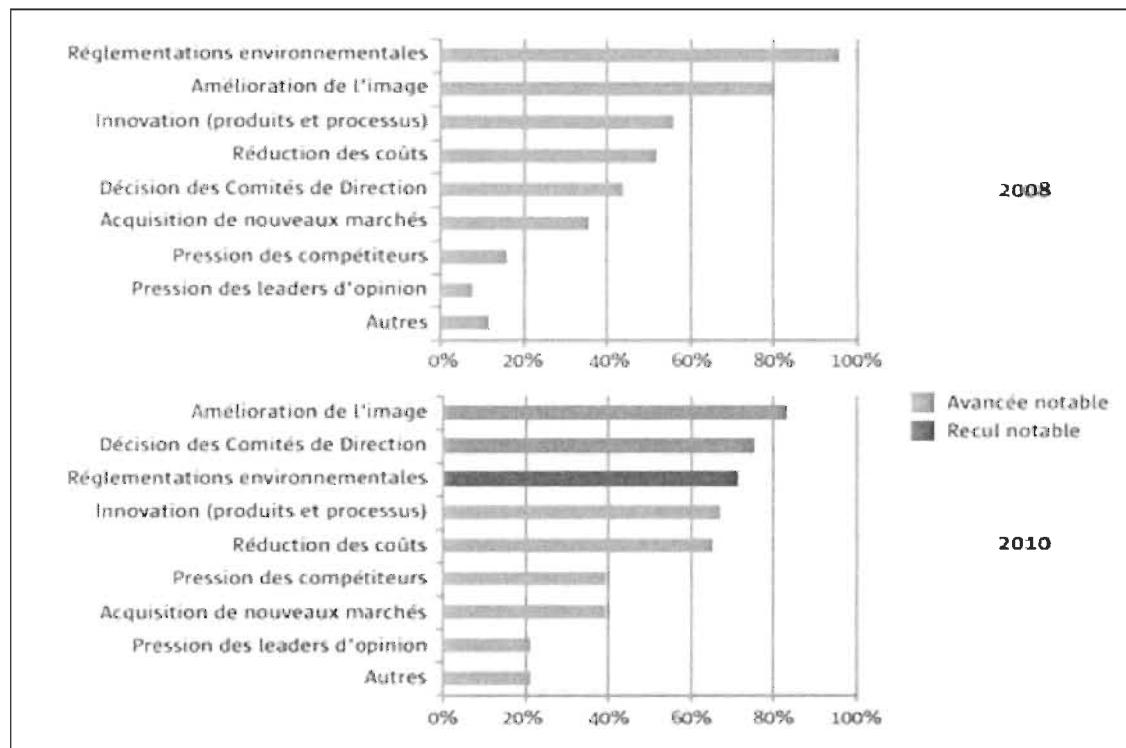


Figure 1.4 – Motivations entreprises pour la mise en œuvre les pratiques vertes (Bearing Point, 2010)

1.3 Définitions

1.3.1 Chaîne logistique traditionnelle

L'idée de la chaîne logistique remonte à Porter (1985), qui a introduit le concept de chaîne de valeur. La littérature comprend un grand nombre de définitions adressant la chaîne logistique long terme. Selon Beamon (1998), la chaîne logistique peut être définie comme étant « une coopération de différentes entreprises qui travaillent ensemble pour produire un produit final à partir des matières premières et les livrer aux détaillants ».

La chaîne logistique peut être définie par « un réseau constitué de différentes unités d'affaire (fournisseurs, sous-traitants, fabricants, distributeurs, détaillants, etc.) visant à

fournir un produit ou un service au client ultime, à partir du fournisseur de fournisseur en mettant en jeu trois types de flux : physiques, informationnels et financiers » (APICS, 2010). Pirard (2005) synthétise les diverses définitions de la chaîne logistique par celle-ci : la chaîne logistique est un réseau d'entités, géographiquement dispersées, impliquées dans la chaîne de création de valeur et de vente de produits, qui collaborent afin d'assurer l'approvisionnement, la production et la distribution tout en maximisant leur profit et ce, contraints de satisfaire les clients finaux. En d'autres termes, une chaîne logistique est composée de plusieurs entreprises en amont (fourniture de matières et composants) et en aval (distribution) et du client final.

La principale mission de la chaîne logistique est de créer de la valeur. Pour ce faire, le cœur de compétences doit être clairement identifié et l'infrastructure du réseau doit être compétitive et exploiter de manière optimale tout en garantissant le meilleur niveau de performance pour l'ensemble de la chaîne logistique.

Ainsi, similairement à la définition de la chaîne logistique, la gestion de la chaîne logistique peut être définie différemment. Par exemple, Mentzer, DeWitt, Keebler, Min, Nix, Smith et Zacharia (2001) la décrit comme étant « la coordination systémique et stratégique des fonctions opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne » (Mentzer *et al.*, 2001). Une autre définition basée sur la valeur définit la gestion de la chaîne logistique par « l'intégration des processus d'affaires clés depuis l'utilisateur final à travers les fournisseurs d'origine qui fournissent des produits, services et informations qui ajoutent de la valeur pour les clients et autres parties prenantes » (Stock et Lambert, 2001). Dans notre travail, nous considérons le fabricant d'origine comme l'entité dominante (Thierry, 2003) qui prend l'ensemble des décisions de la chaîne logistique.

1.3.2 Logistique inverse

La logistique inverse est souvent traitée dans la littérature selon le contexte de recherche et en s'attardant à un type particulier de retour. Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard et Van Wassenhove (2001) distinguent cinq catégories de retours de produits.

- Retours de produits en fin d'utilisation/ou en fin de vie.
- Retours commerciaux.
- Retours de produits sous garantie.
- Rebut et produits dérivés des activités du réseau (chaîne d'approvisionnement et logistique inversée).
- Emballages.

Thierry, Salomon, Van Nunen et Van Wassenhove (1995) abordent la logistique inverse, dans un contexte des retours en fin de vie, sous le vocable « gestion de la récupération de produits », comme étant : « la gestion des produits, des composants et des matériels usés ou éliminés qui tombent sous la responsabilité de la compagnie manufacturière. L'objectif de la gestion de la récupération des produits est de retirer le maximum de valeur économique (et environnementale) raisonnablement possible, tout en réduisant la quantité ultime de déchets ».

Beaulieu (2000) présente la logistique inverse, sous le terme de logistique à rebours, comme étant : « un ensemble d'activités de gestion visant la réintroduction d'actifs secondaires dans des filières à valeur ajoutée ».

Une définition générale couvrant tous les types de retours du cycle de vie d'un produit est donnée par Rogers et Tibben-Lembke (1998), comme étant « le processus de planification, d'implantation et de contrôle de l'efficience, de la rentabilité des matières premières, des en-cours de production, des produits finis et de l'information pertinente

du point d'utilisation jusqu'au point d'origine dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la bonne façon ».

Le terme « logistique inverse » est parfois utilisé pour faire référence à la distribution des retours dans la chaîne logistique inverse (Guide et Van Wassenhove, 2002). Selon le contexte de cette thèse, la définition adoptée est celle de Thierry *et al.* (1995).

1.3.3 Chaîne logistique en boucle fermée

La chaîne logistique en boucle fermée, appelée aussi « chaîne logistique étendue » (Fleischmann et Minner, 2004) est l'intégration des activités de la logistique inverse dans la chaîne logistique traditionnelle (Wells et Seitz, 2005). Guide et Van Wassenhove (2006) définissent la chaîne logistique en boucle fermée comme étant la conception, le contrôle et l'exploitation d'un système pour maximiser la création de valeur au cours du cycle de vie d'un produit avec la récupération dynamique de la valeur dans différents types et volumes de retours au fil du temps.

1.3.4 Chaîne logistique verte

La littérature contient de nombreuses définitions de « la gestion de la chaîne logistique verte ». Ces définitions varient d'un achat vert jusqu'à une chaîne logistique intégrée en boucle fermée. Wu et Dunn (1995) mentionnent que la logistique verte, c'est plus que la logistique inverse car elle cherche à économiser les ressources, à éliminer les déchets et à améliorer la productivité. Hart (1997) indique que la logistique verte doit avoir la plus petite empreinte environnementale.

Beamon (1999) a défini la chaîne logistique verte comme étant l'extension de la chaîne logistique traditionnelle pour y inclure des activités qui cherchent à minimiser les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, tels que

l'écoconception, l'économie des ressources, la réduction des matières dangereuses, la réutilisation et le recyclage des produits.

Selon Hervani, Helms et Sarkis (2005), la chaîne logistique verte comprend l'achat vert, la fabrication écologique, la distribution/marketing verte et la logistique inverse.

Srivastava (2007) définit la gestion de la chaîne logistique verte comme l'intégration de la pensée environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, y compris la conception des produits, l'approvisionnement en matériaux, la sélection des procédés de fabrication, la livraison du produit final aux consommateurs ainsi que la gestion de produit après sa fin de vie utile.

Sarkis *et al.* (2011) la définissent comme étant l'intégration des considérations écologiques dans les pratiques interorganisationnelles de la gestion de la chaîne logistique, y compris la logistique inverse.

Pour Ahy et Searcy (2013), la chaîne logistique verte fait référence à une entreprise focale qui collabore avec ses fournisseurs pour améliorer la performance environnementale. L'application d'une démarche de la chaîne logistique verte peut conduire à des avantages en termes de réduction des coûts, d'efficacité et d'innovation (Kumar, Teichman et Timpernagel, 2012). Cependant, une nouvelle mesure de performance a été développée qui englobe à la fois les considérations environnementales et économiques : l'éco-efficience. Cet indicateur informe sur la considération conjointe de la performance économique et la performance environnementale (Govindan, Sarkis, Jabbour, Zhu et Geng, 2014).

Ainsi, il apparaît de ces définitions que la chaîne logistique verte réfère à un système en boucle fermée intégrant la logistique inverse et la chaîne logistique classique (figure 1.5).

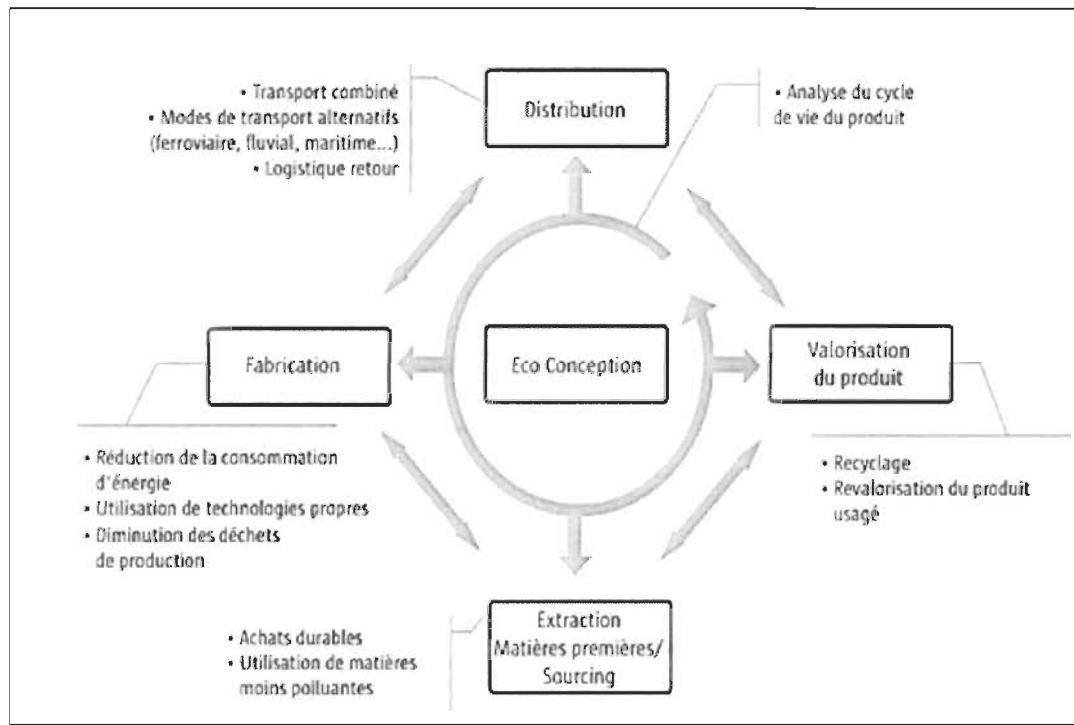


Figure 1.5 – Périmètre de la chaîne logistique verte (Observatoire de la Supply Chain, 2008)

1.4 Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la chaîne logistique verte

Malgré les liens d'interdépendance entre la chaîne logistique classique et la chaîne logistique verte, il existe des différences à plusieurs égards entre les deux chaînes. La chaîne logistique verte implique l'extension de la chaîne logistique régulière pour y intégrer la logistique inverse. Van Hoek (1999) discute les défis de réduction de l'empreinte écologique des chaînes logistiques en améliorant l'impact des pratiques commerciales sur l'environnement. L'auteur conclut que l'étude de la logistique inverse est insuffisante et l'accent devrait être mis davantage sur la compréhension de toute la chaîne logistique intégrant la logistique inverse à la chaîne logistique traditionnelle.

Seuring (2004) compare la chaîne logistique verte et la chaîne logistique traditionnelle en utilisant cinq critères : la base physique, la base conceptuelle, les acteurs, la coopération et l'objectif. L'auteur constate des points de similitude et de différence entre

les deux chaînes. Il explique ce constat par la différence existante entre le principe du cycle de vie et le principe de la chaîne logistique traditionnelle ainsi que la nature de coopération entre les acteurs.

Ho, Shalishali, Tseng et Ang (2009) comparent la chaîne logistique traditionnelle et la chaîne logistique verte en ce qui concerne l'objectif, l'optimisation écologique, la sélection des fournisseurs, le coût et la réactivité/flexibilité. La gestion de la chaîne logistique verte implique un changement de structure physique de la chaîne logistique traditionnelle et l'ajout de nouveaux objectifs environnementaux (Neto, Walter, Bloemhof, Van Nunen et Spengler, 2010) ainsi que des flux de matière et d'information associés aux activités de la logistique inverse. Le tableau 1.1 récapitule les différences entre les deux chaînes dont voici ses aspects.

Objectifs. La chaîne logistique traditionnelle vise des objectifs économiques tels que le coût/profit, la satisfaction de client, la réactivité et la flexibilité (Gopal et Thakkar, 2012). En revanche, la chaîne logistique verte cherche un compromis entre les objectifs économiques classiques et les objectifs environnementaux (Beamon, 1999; Hervani *et al.*, 2005; El Saadany, Jaber et Bonney, 2011).

Structure. La chaîne logistique traditionnelle possède une structure linéaire dont les flux de matière et d'information entre les partenaires d'affaires sont unidirectionnels.

Tableau 1.1 – Principales différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la chaîne logistique verte

Aspects	Chaîne logistique traditionnelle	Chaîne logistique verte
Objectifs	Économiques : coûts, réactivité, flexibilité.	Économiques et environnementaux.
Structure du réseau	Linéaire : allant du fournisseur jusqu'au consommateur.	Boucle fermée : intégrant la logistique inverse à la chaîne logistique traditionnelle.
Considérations environnementales	Actions réactives et limitées à certaines étapes du cycle de vie.	Actions stratégiques et durables couvrant tout le cycle de vie du produit.
Sélection de fournisseurs	Basée sur des critères économiques : le prix, la qualité, et le service; collaboration court terme à moyen terme.	Basée sur des critères économiques et environnementaux; Basée sur un partenariat à long terme.
Conception du produit	Basée sur des critères économiques et opérationnels; Gouvernée par le fabriquant d'origine.	Basée sur des critères économiques et environnementaux; Réalisée en coordination continue avec tous les partenaires.
Collaboration	Basée sur : <ul style="list-style-type: none"> – la collaboration commerciale attentive; – le partage de quelques informations sur les ventes et les stocks. 	Basée sur : <ul style="list-style-type: none"> – la confiance mutuelle et le partenariat à long terme; – le partage de l'information utile y compris la conception du produit et les impacts environnementaux.

La responsabilité du fabricant original envers son produit se termine souvent à la livraison au client final ou juste après la fin de la période de garantie. Par contre, la structure de la chaîne logistique verte est cyclique. Le cycle de vie du produit devient fermé pour y inclure les étapes, utilisation et après fin de vie du produit. Les flux de matières et d'information dans la chaîne logistique intégrant la logistique inverse s'échangent dans les deux sens entre les acteurs. Cela mène à la création d'une boucle de valeur qui intègre toutes les étapes de cycle de vie du produit.

Considérations environnementales. L'importance accordée aux considérations écologiques par la chaîne logistique classique est souvent secondaire par rapport aux facteurs économiques. Alors que pour la chaîne logistique verte, cette importance est équilibrée avec la finalité économique commune des entreprises constituant le réseau logistique.

Collaboration. La nature de collaboration entre les partenaires de la chaîne logistique indique le degré d'intégration des unités d'affaires et le degré de partage de l'information pertinente entre ces dernières. Dans la chaîne traditionnelle, la collaboration porte généralement sur les transactions commerciales et parfois à l'assistance technique. Tandis que dans la chaîne logistique verte, le partage d'information est un facteur clé dans l'amélioration des performances économiques et écologiques de la chaîne logistique (Faisal, 2010).

Conception du produit. La conception du produit permet à l'entreprise de répondre efficacement à la dynamique du marché et d'améliorer sa performance économique. Dans un contexte de chaîne logistique verte, les critères écologiques sont ajoutés au processus de conception.

Sélection des fournisseurs. Dans la chaîne logistique classique, la sélection des fournisseurs est basée principalement sur le prix et sur une collaboration à des valeurs économiques et guidé par un contrat à court terme. Chaque membre de la chaîne s'occupe de son propre impact environnemental direct et il peut collaborer attentivement avec d'autres membres de la chaîne, mais indépendamment de l'impact global de la chaîne logistique. Alors que dans la chaîne logistique verte, la sélection des fournisseurs prend en compte les critères économiques et écologiques et la coopération est forte et nécessite un partenariat à long terme, basé sur la confiance mutuelle entre les partenaires. Ce type de partenariat permet aux partenaires d'échanger les informations et les compétences en matière de conception et de développement du produit, de réduction

des émissions de carbone, des emballages et des déchets. Le plein potentiel d'une chaîne logistique verte ne peut être obtenu qu'avec un partenariat à long terme entre les fournisseurs et leurs fournisseurs, les clients et leurs clients (Vachon et Klassen, 2006).

1.5 Les processus de gestion de la chaîne logistique verte

Dans la chaîne logistique verte, plusieurs processus se combinent et se complètent afin d'assurer la livraison du produit au consommateur final ainsi que son retour après utilisation. Ces processus varient selon les secteurs d'activité de l'entreprise et mettent en relation un maillon avec un autre ou avec plusieurs maillons du réseau.

Stadtler (2002) subdivise la gestion de la chaîne logistique en deux parties : l'intégration du réseau et la coordination des différents flux. L'intégration porte sur le choix des partenaires, l'organisation, la collaboration et le pilotage du réseau. La coordination constitue l'ensemble des processus de planification et de contrôle de la chaîne ainsi que les processus de partage d'information et les technologies utilisées à cet effet. Lambert et Cooper (2000) décrivent les différents processus définissant la gestion d'une chaîne logistique. Les fonctions transversales permettant la gestion des flux et l'intégration des fonctions de base d'une entreprise dans une chaîne logistique sont :

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

Pour illustrer les processus clés d'une chaîne logistique verte, nous prenons comme référence le modèle GreenSCOR (SCC, 2006), illustré par la figure 1.6. Ce modèle présume que toute chaîne logistique peut être subdivisée en cinq processus : la planification, l'approvisionnement, la fabrication, la livraison et la logistique inverse (retourner).

1.5.1 La planification

C'est un processus ayant pour but l'organisation des autres processus de la chaîne logistique. À ce niveau, les décisions stratégiques de configuration du réseau logistique intégré en boucle fermée et d'écoconception des produits sont déterminées.

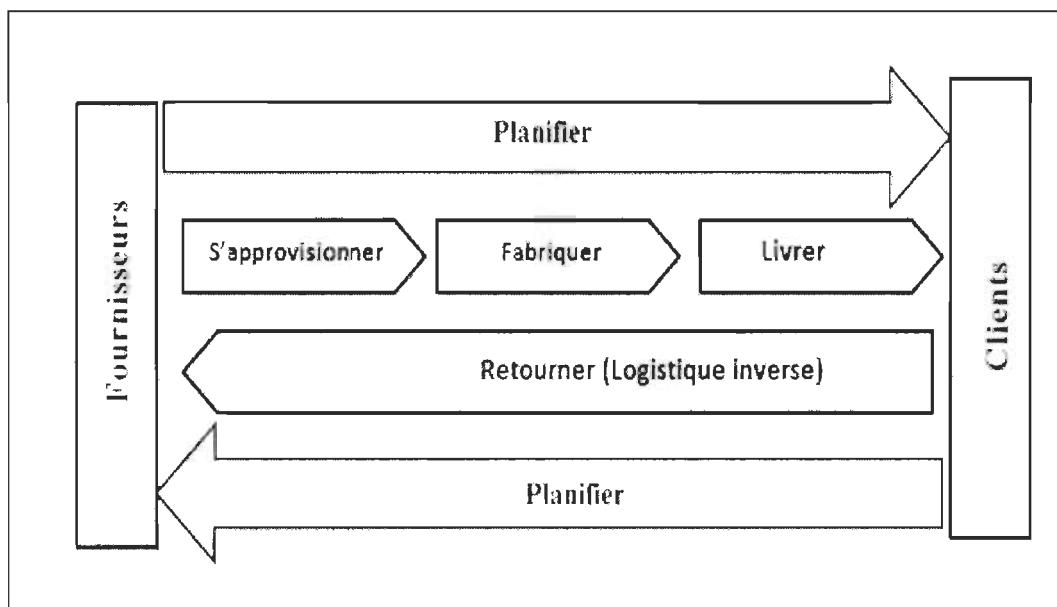


Figure 1.6 – Les processus de gestion de la chaîne logistique verte (SCC, 2006)

Selon Paquette (2005), les principales variables qui influencent la performance environnementale d'un produit ou d'un système sont déterminées pendant la phase de planification de la chaîne logistique.

Parallèlement à la conception du réseau logistique intégré, la conception verte des produits, appelée aussi « écoconception », joue un rôle crucial dans la gestion et le pilotage de la chaîne logistique verte, elle permet la réduction à la source de la majorité des impacts environnementaux tout le long du cycle de vie du produit, y compris le transport, le stockage, l'emballage et la logistique inverse.

Plusieurs objectifs associés au produit peuvent être planifiés à cette étape (Kuo, Huang et Zhang, 2001), tels que la minimisation de l'impact environnemental, la récupération, le désassemblage et le recyclage en fin de vie. Buyukozkan et Cifci (2012) estiment qu'environ 80 % des impacts liés aux produits sur l'environnement peuvent être maîtrisés lors de la conception du produit. Kumar et Putnam (2008) affirment que la conception des produits est essentielle car elle affecte la performance environnementale et la stratégie de récupération qu'une entreprise peut suivre. Ajoutant à cela, Krikke, Bloemhof-Ruwaard et Van Wassenhove (2001) mentionnent que la conception de produits récupérables permet aux entreprises d'améliorer les services offerts et de fidéliser leurs clients.

1.5.2 L'approvisionnement vert

Du fait de sa position en amont au sein de la chaîne logistique, le processus « s'approvisionner » joue un rôle stratégique essentiel; il est en mesure de prévenir, lors de la sélection des fournisseurs et des prestataires, le transfert des risques environnementaux des matières premières et des produits acquis.

Le processus de sélection des fournisseurs doit inclure, en plus des critères économiques et des critères environnementaux tels que l'existence d'un système de gestion de l'environnement certifié ISO 14001, l'absence de substances nocives dans les produits. Il tend également à sélectionner des produits présentant une forte proportion de matières recyclables et de composants réutilisables, la diminution des emballages (Hamner,

2006). Face à une concurrence économique intense, la mise en place d'une telle démarche est difficile et nécessite une révision de la stratégie globale d'achat de l'entreprise et l'établissement d'un partenariat durable avec les fournisseurs.

1.5.3 La fabrication verte

Le processus « fabriquer » englobe les opérations de transformation des matières premières et celles d'assemblage du produit. Pour assurer une fabrication verte, les entreprises devraient améliorer leurs processus de fabrication en agissant sur le triangle constitué de trois éléments clés : la technologie, l'énergie et les matériaux (figure 1.7).

Deif (2011) ajoute que la réduction de l'impact du processus de fabrication sur l'environnement peut être atteinte par le bon choix de technologies en concertation avec la conception du produit.

- L'acquisition des technologies écologiques qui consomment moins de matières et d'énergie et émettent moins de dioxyde de carbone et de déchets;
- La réingénierie des technologies existantes via la substitution des intrants toxiques par ceux non-toxiques, non-recyclables par ceux recyclables, la réutilisation des extrants valorisables et la réduction des extrants indésirables.

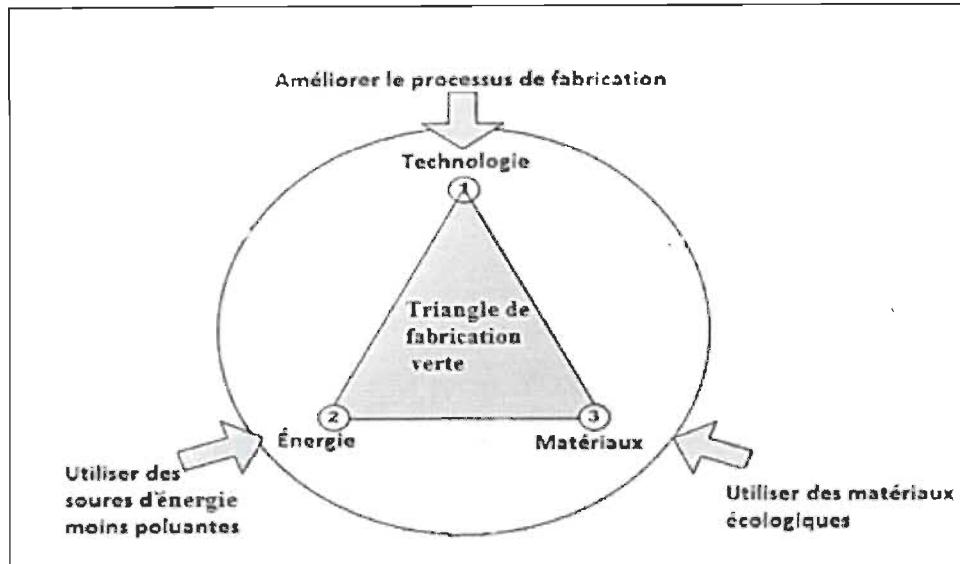


Figure 1.7 – Triangle de la fabrication verte (Dornfeld, 2010)

1.5.4 La distribution verte

Le processus « livrer » inclut deux sous-processus : le stockage et le transport.

- **Le stockage vert.** Les bâtiments logistiques jouent un rôle essentiel dans la gestion des flux en amont et en aval de la chaîne logistique, ils assurent le stockage ainsi que d'autres opérations de finition de la commande (emballage, étiquetage, etc.). La démarche de stockage vert a pour objectif la conception des bâtiments logistiques en respectant des normes de l'écoconstruction (p. ex., norme NF EN 15643-1) qui permettent de réduire l'impact environnemental. Les entrepôts peuvent être bâties en utilisant des matériaux comme le bois et peuvent fonctionner avec des énergies alternatives et renouvelables telles que les énergies solaire et éolienne.
- **Le transport vert.** Le transport assure le mouvement des flux de matières à travers la chaîne logistique. Cependant, ce secteur a un grand impact sur l'environnement : le transport des marchandises représente environ 14 % des émissions totales

europeennes (EEA, 2011). La démarche du transport vert consiste à chercher des solutions alternatives écologiques par :

- l'adoption de solutions moins polluantes telles que le mode fluvial ou maritime, ferroviaire ou le combiné rail-route, assurant ainsi un meilleur rendement écologique, l'optimisation des tournées des véhicules afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone;
 - l'utilisation des véhicules moins polluants (hybrides, électriques, utilisant des biocarburants ou du gaz naturel); et
 - la mutualisation des moyens de transport entre plusieurs chaînes logistiques pour un double objectif : augmenter le taux de remplissage des véhicules et réduire les émissions de CO₂ (Pan *et al.*, 2011). La réduction de l'empreinte carbone de la flotte du transport dépend fortement du modèle de production adopté. Par exemple, les systèmes de production en flux tendus ont démontré leurs avantages économiques mais en contrepartie, ils favorisent l'augmentation des émissions de CO₂.
- **La logistique inverse.** Le processus « retourner » est le dernier processus dans la chaîne logistique verte. Il permet la fermeture de la boucle de valeur via l'extension du cycle de vie du produit pour permettre sa réutilisation.

Le concept « logistique inverse » est un terme plurivalent qui ne se limite pas seulement à la gestion des produits en fin de vie. La logistique inverse vise à récupérer le maximum de valeur économique possible tout en réduisant la quantité ultime de déchets ainsi que les impacts écologiques. Les sous-processus de base de la logistique inverse sont la collecte, l'évaluation et le tri, le traitement, l'élimination et la redistribution (Fleischmann, 2001).

Vu l'impact de la logistique inverse sur la gestion de la chaîne logistique verte, le deuxième chapitre abordera en détails les caractéristiques de ce processus. Les

législations environnementales, notamment en Europe, obligent les producteurs à traiter leurs produits en fin de vie.

1.6 Notions de valeur et de performance dans la chaîne logistique verte

La polysémie du concept de valeur en fait à la fois sa richesse et la difficulté de le définir. Bourguignon (1998) distingue trois acceptations de la valeur : la valeur au sens de mesure (en particulier dans les disciplines scientifiques que sont les mathématiques et la physique), la valeur au sens économique et la valeur au sens philosophique. La création de valeur économique (profit net) est au cœur de l'activité des organisations et au centre de leur vocation, de leur raison d'être et de leur stratégie.

La notion de chaîne de valeur a été introduite par Porter (1985) à l'égard de la chaîne logistique traditionnelle. Porter définit la chaîne de valeur comme un « enchaînement d'activités permettant d'aboutir à un produit valorisable sur le marché ». L'analyse de la chaîne de valeur consiste à décomposer l'entreprise en activités principales et activités de soutien afin de comprendre leur impact sur la création de valeur et sur la différenciation par rapport aux concurrents. Ainsi, la valeur peut être perçue soit comme un profit pour l'entreprise et ses actionnaires, soit comme une satisfaction/fidélisation du client.

Dans le contexte de la chaîne logistique verte, la notion de valeur s'étend à plusieurs dimensions (Krikke, 2010; Schenkel, Krikke, Caniëls et Van der Laan, 2015) : la valeur économique, la valeur environnementale, la valeur informationnelle et la valeur livrée au client. La création de valeur est érigée en exigence de performance.

La performance économique des chaînes logistiques est liée aux aspects économiques, tels que les coûts (ou profit), la flexibilité de la production et de la distribution, la réactivité au marché, la qualité du produit et la fiabilité du service au client. Différents

types de mesures de performance ont été utilisés pour évaluer la chaîne logistique verte. Le plus souvent, ils combinent la performance économique et la performance environnementale afin de trouver le meilleur compromis entre les deux objectifs (Neto, Bloemhof-Ruwaard, Van Nunen et Van Heck, 2008; Chaabane, Ramudhin et Paquet, 2012).

La détermination de la performance environnementale est complexe et moins claire par rapport à la performance économique. Cette complexité vient du fait que plusieurs indicateurs de mesure de la performance environnementale existent. Ahi et Searcy (2015) ont recensé 1 431 indicateurs environnementaux utilisés dans la littérature sur la chaîne logistique verte. Brandenburg, Govindan, Sarkis et Seuring (2014) citent plusieurs méthodes de modélisation de la prise de décision environnementale telles que l'analyse du cycle de vie (ACV), l'analyse hiérarchique des procédés (AHP), la méthode *Data Envelopment Analysis* (DEA) et la simulation. Cependant, l'ACV est la technique la plus couramment utilisée pour intégrer les impacts écologiques dans les modèles d'optimisation. C'est une méthode normalisée qui permet de quantifier les impacts d'un produit depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie.

La norme ISO 14040 : 2006 définit l'ACV comme une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». L'ACV comprend quatre étapes.

- La définition des objectifs et du champ de l'étude.
- L'inventaire du cycle de vie (ICV) : l'inventaire constitue le cœur de l'ACV. Il s'agit de recueillir les données des flux entrants et sortants. Il existe deux catégories de données :
 - les données primaires : ce sont des données recueillies et vérifiées sur site;

- les données secondaires : elles proviennent des bases de données publiques d'inventaires du cycle de vie fournis par l'industrie, par des agences de l'environnement, etc.
- L'évaluation de l'impact du cycle de vie : c'est-à-dire la pondération des résultats d'inventaires en impacts sur l'environnement. L'analyste environnemental dispose d'un tableau de substances consommées ou émises dont les valeurs ont été agrégées pour les émissions de la même substance.

Cette troisième phase est réalisée en deux étapes principales (figure 1.8, adapté de Jolliet *et al.*, 2003).

- La caractérisation orientée problèmes (dite aussi intermédiaire, « *mid-point* »). Elle concerne les impacts de premier ordre, par exemple, l'émission des gaz à effet de serre.
- La caractérisation orientée dommages (*end-point*). Cette étape est complémentaire de la première, elle regroupe les impacts en fonction des résultats, aussi loin que possibles dans la chaîne de cause à effet. Différentes techniques de pondération et hypothèses de simplification sont utilisées pour réaliser cette étape.

1.6.1 L'interprétation des résultats

Elle consiste à combiner les résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact. Le principal apport des ACV est de pouvoir comparer différents scénarii.

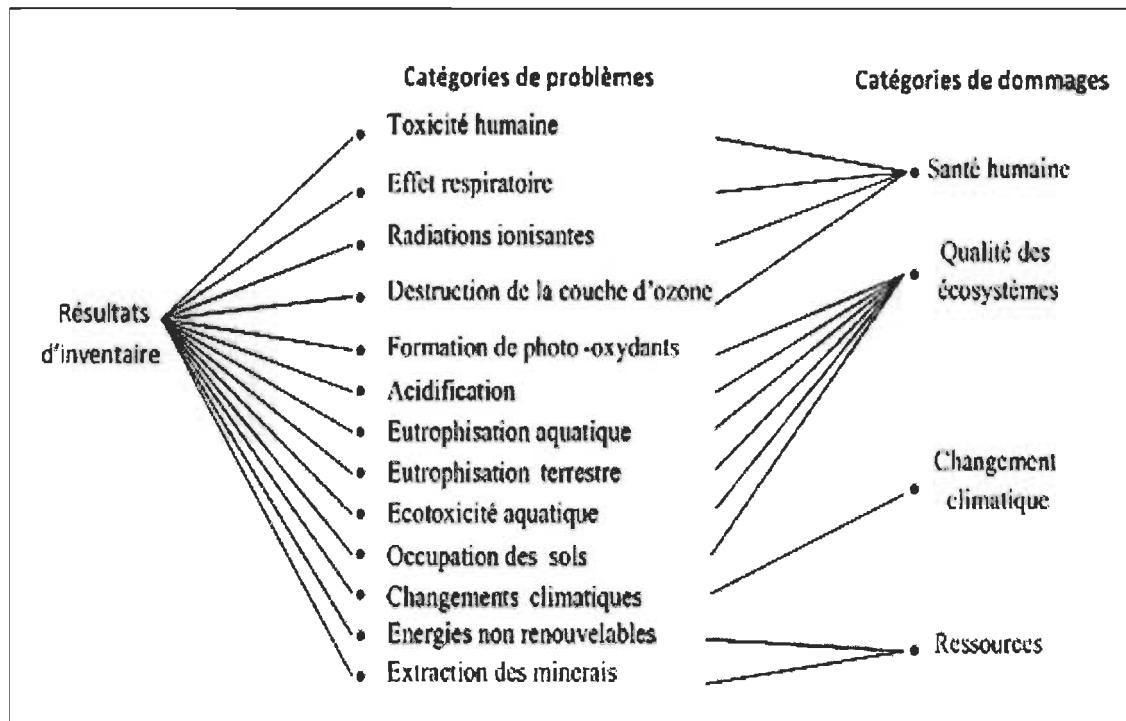


Figure 1.8 – Catégories d’impacts du cycle de vie

Au cours des dernières années, différentes mesures de performance environnementale complète ont été proposées comme the « Eco-indicator 95 », « Eco-indicator 99 » et « Empreintes écologiques ». Cependant, une des principales contraintes de l'ACV est que sa réalisation selon les exigences de l'ISO peut nécessiter beaucoup de temps et de ressources de la part du mandataire. C'est pourquoi beaucoup de recherches sont menées au cours des dernières années pour développer des approches plus simplifiées, afin d'opérationnaliser l'utilisation de l'ACV dans l'industrie.

Dans la dernière version de SCOR, le Supply Chain Council (2008) a introduit le référentiel GreenSCOR mettant en avant des bonnes pratiques responsables (implantation d'un système de management environnemental, identification des matières recyclables, maximisation des chargements des camions, etc.) ainsi qu'un ensemble d'indicateurs environnementaux tels que la quantité de GES émise, le pourcentage de déchets recyclés, la quantité de déchets liquides générés, etc.

1.7 Les décisions de planification de la chaîne logistique verte

La planification de la chaîne logistique est un aspect important de la gestion de la chaîne. On distingue habituellement trois niveaux suivant l'horizon de temps (Vidal et Goetschalckx, 1997) : stratégique, tactique et opérationnel. De même, les décisions de la chaîne logistique verte peuvent être classées en trois niveaux.

- Le niveau stratégique. Les décisions stratégiques impactent la performance de la chaîne logistique à long terme et impliquent des investissements importants. Ces décisions portent sur la conception du réseau logistique intégrant la chaîne logistique inverse à la chaîne logistique traditionnelle, la conception des produits, la sélection de ressources et de technologies, la définition des politiques d'acquisition/collecte, de traitement et de redistribution des retours.
- Le niveau tactique. Les décisions tactiques portent sur l'agencement et la réservation des ressources en prévision des besoins futures d'une organisation (p. ex., établissement du plan maître de production).
- Le niveau opérationnel. Les décisions de ce niveau portent sur les décisions journalières pour répondre aux sollicitations manifestées à une organisation (p. ex., planification de la production et de la distribution).

1.8 Conception du réseau de la chaîne logistique verte

Harrison (2011) définit la conception d'un réseau logistique comme le processus de détermination de l'infrastructure de la chaîne logistique qui sera utilisé pour satisfaire la demande des clients. Selon Martel (2003), un réseau logistique est l'ensemble des ressources et des processus utilisés par une entreprise au sein de sa chaîne logistique.

Le terme réseau est utilisé parce que cet ensemble peut être conceptuellement et mathématiquement représenté par un réseau dont les nœuds consistent en un ensemble d'installations (accueillant des activités d'approvisionnement, de production, de

fabrication, d'assemblage, de distribution, de consolidation ou de vente) ou de partenaires (clients, fournisseurs, etc.), alors que les arcs représentent des mouvements de produits entre les activités ou les installations de l'entreprise et de ses partenaires. Nous utiliserons le terme « conception du réseau logistique » pour désigner l'activité consistant à revoir la configuration d'un réseau logistique et, plus généralement, l'ensemble des décisions à long terme relatives à la configuration de la structure géographique d'un réseau logistique.

Les décisions reliées à la conception du réseau ont un impact majeur sur les profits à long terme de l'entreprise et sur sa position compétitive (Goetschalckx et Fleischmann, 2008). Les décisions reliées à la conception du réseau logistique sont souvent irréversibles et doivent donc être évaluées avec soin (Shapiro, 2007).

L'horizon temporel de planification s'étend généralement entre 3 ans et 10 ans. L'objectif économique est soit de maximiser les bénéfices, soit de minimiser les coûts, tout en respectant la demande des clients, les objectifs du service à la clientèle et les contraintes budgétaires (Goetschalckx et Fleischmann, 2008).

Des études démontrent qu'il y a des effets significatifs de la configuration de la chaîne logistique sur la réduction des coûts et sur l'amélioration du service au client (Chopra et Meindl, 2004; Simchi-Levi, Kaminsky et Simchi-Levi, 2004; Watson, Lewis, Cacioppi et Jayaraman, 2013). Comme l'a souligné Ballou (2001) et Harrison (2004), des décisions de reconception bien conçues peuvent entraîner une réduction des coûts logistiques allant de 5 % à 15 %. En plus de son rôle important dans l'amélioration des performances économiques, la conception du réseau logistique peut contribuer significativement à la réduction des impacts négatifs sur l'environnement (Wu et Dunn, 1995; Aronsson et Brodin, 2006; Youg et Wang, 2011). Ainsi, la structure du réseau logistique constitue la base de tous les autres niveaux de planification (Ivanov, 2010) et, par conséquent, les décisions stratégiques conditionnent les décisions tactiques et

opérationnelles et impactent les performances de la chaîne logistique. Martel et Venkatadri (1999) proposent une démarche cyclique pour la reconception d'un réseau logistique à la suite d'une extension du réseau logistique existant (figure 1.9). Quatre étapes sont considérées dans cette démarche.

La première étape consiste à déterminer le réseau logistique conceptuel en effectuant une analyse stratégique qui prend en considération les objectifs (nouveaux produits, nouveaux marchés, etc.) que l'entreprise vise dans les prochaines années et les conditions du réseau logistique existant.

Ensuite, le but de la seconde étape est de déterminer les alternatives potentielles du réseau intégrant le réseau logistique actuel et tous les projets d'expansion envisageables pour mettre la stratégie de l'entreprise en œuvre. Cette étape est très critique et implique une analyse multicritère approfondie en tenant compte des critères économiques, politiques et d'infrastructure.

La troisième étape consiste à choisir parmi les alternatives potentielles celles qui sont le plus susceptibles de répondre aux objectifs de l'entreprise. Cette étape fait appel à des modèles mathématiques qui aident à la prise de décision finale. La dernière étape consiste à la mise en place du réseau. Ce dernier sera à nouveau modifié lorsque les besoins le justifieront.

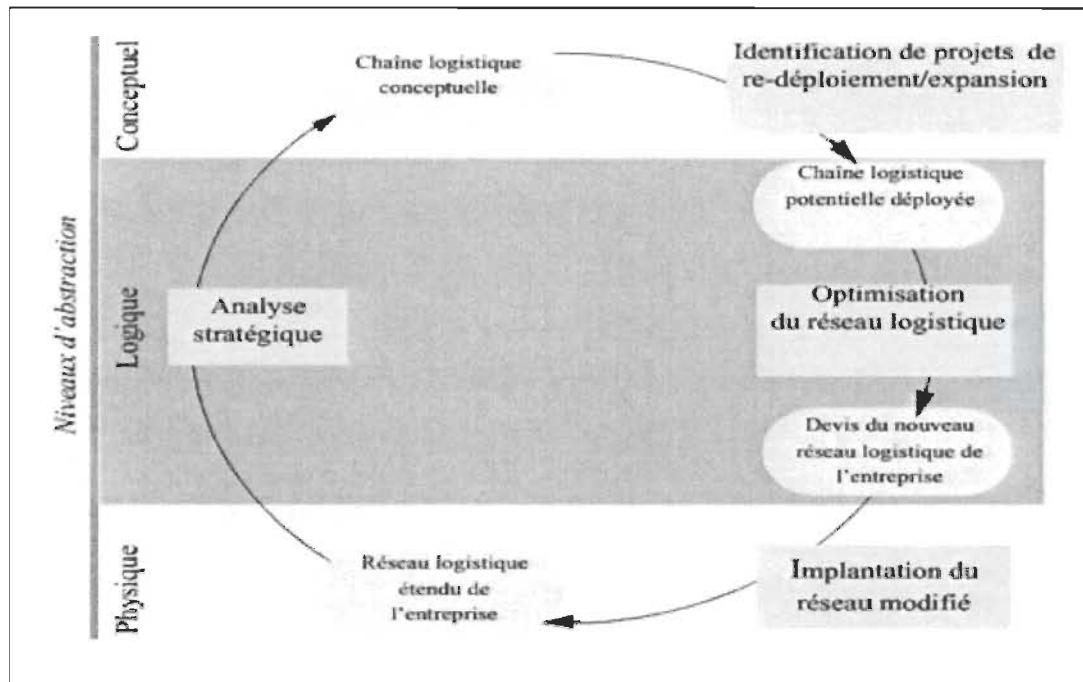


Figure 1.9 – Démarche de développement d'un réseau logistique (Martel et Venkatadri, 1999)

1.8.1 Techniques d'optimisation de la structure du réseau logistique

L'optimisation de la structure du réseau correspond au niveau logique d'abstraction (figure 1.9) de la démarche du réseau logistique. À cette étape, des outils d'aide à la décision sont utilisés pour choisir parmi un ensemble d'alternatives la meilleure configuration du réseau logistique. Il existe trois principales catégories d'approches d'optimisation de la structure d'un réseau logistique (Coyle, Bardi et Langley, 2003) : l'optimisation mathématique, la simulation et les méthodes heuristiques.

1.8.1.1 Optimisation mathématique

Elle comprend un ensemble de techniques de modélisation et d'optimisation, dites exactes, qui permettent de trouver la solution optimale. En effet, les modèles d'optimisation mathématique décrivent les entités du système et leurs relations à l'aide

d'une fonction-objectif et des contraintes, exprimées par des équations mathématiques (Beamon, 1998). Plusieurs états de l'art sur l'optimisation mathématique de la structure de la chaîne logistique en boucle fermée existent dans la littérature (Akçali, Çetinkaya et Üster, 2009, Ilgin et Gupta (2010), El Bounjimi, Abdul-Nour et Aït-Kadi (2013), Govindan *et al.*, 2014).

Dans le cadre de cette thèse, l'optimisation mathématique est utilisée en tant qu'outil efficace d'aide à la configuration du réseau logistique (Shapiro, 2001). Les modèles de programmation mathématique à l'égard du problème de conception du réseau logistique cherchent généralement à déterminer des décisions de localisation des sites, d'allocation des activités à chaque installation ainsi que des décisions relatives aux choix des niveaux de capacité des installations, des technologies et des modes de transports. La localisation-allocation résulte de deux problèmes de prise de décision à différents niveaux : niveau stratégique (décision de localisation) et niveau tactique (décision d'allocation). Dans le cas où la quantité des flux des produits qui circulent à travers chacun des sites est connue, les coûts d'implantation et d'opération d'un site dépendent de l'endroit où il se situe. Ainsi le problème consiste à chercher la meilleure localisation des sites de façon à minimiser une fonction de coût total linéaire (Martel, 2001).

1.8.1.2 Méta-heuristiques

Pour plusieurs raisons, telles que la taille, la complexité, l'incertitude élevée et la nature non linéaire de certains problèmes, le recours aux méthodes exactes pour résoudre ces problèmes est limité, ce qui fait appel aux méta-heuristiques et à modèles de simulation. Les méta-heuristiques, appelées aussi méthodes approchées, sont des algorithmes qui s'appuient sur l'intelligence artificielle. Le grand avantage de ces techniques est la génération rapide de meilleures solutions, pas nécessairement optimales, pour des problèmes difficiles, linéaire ou non linéaire. Même si les méta-heuristiques sont applicables sur n'importe quel type de problème, il convient toujours de bien connaître

les caractéristiques du problème étudié pour pouvoir choisir les bons paramètres de départ ainsi que comment s'échapper des minima locaux. Parmi les méta-heuristiques les plus utilisés dans l'optimisation de la chaîne logistique (Griffis *et al.*, 2012), on trouve les algorithmes basés sur les colonies de fourmis, l'algorithme génétique, le recuit simulé et la recherche tabou.

1.8.1.3 Simulation

Par comparaison avec les modèles analytiques, la simulation offre la possibilité de modéliser toutes les complexités et la dynamique réelles de la chaîne logistique, sans faire recours à des hypothèses simplificatrices. Elle consiste à étudier le comportement et la dynamique d'un système afin de mesurer sa performance (*output*) à différents intrants (*inputs*) en fonction du temps. Les modèles de simulation sont de natures différentes et se distinguent par leur évolution face à la composante temporelle. Dans le domaine de simulation de la chaîne logistique, Kleijnen, Sanchez, Lucas et Cioppa (2005) ont réalisé une excellente synthèse des modèles de simulation des chaînes logistiques et ont identifié quatre types de modèles de simulation : les tableurs, la dynamique des systèmes, les jeux d'entreprises et la simulation à événements discrets. Les modèles de simulation à événements discrets et la dynamique des systèmes sont les plus utilisés pour la simulation de chaînes logistiques (Umeda and Zhang 2006; Tako et Robinson, 2012). Du point de vue informatique, les modèles à événements discrets sont deux types : les modèles orientés objet et les modèles orientés agent.

La simulation est traditionnellement considérée comme un outil d'évaluation de la performance de chaînes logistiques (Harris, 2011) au lieu de la prise de décision ou d'optimisation. Un des chercheurs qui a appliqué la simulation au problème de conception de réseau logistique est Ingalls (1998). Les auteurs ont évalué la configuration d'un réseau logistique de trois échelons en utilisant le logiciel Arena.

Ainsi, pour pouvoir assurer une solution optimale, plusieurs approches d'optimisation des modèles de simulation émergent dans la littérature.

Couplage simulation et optimisation

Carson et Maria (1997) ont défini l'optimisation de la simulation comme « le processus de trouver les meilleures valeurs des variables d'entrée parmi toutes les possibilités sans évaluer explicitement chaque possibilité. La figure 1.10 illustre l'interaction entre les deux approches. Une approche d'optimisation basée sur la simulation comprend généralement un module d'optimisation qui a pour rôle de guider la direction de recherche des solutions et un module de simulation utilisé pour l'évaluation des performances des solutions suggérées par le module d'optimisation.

En tant que problème dynamique complexe, la conception de réseau de la chaîne logistique est caractérisée par un nombre élevé de variables de décision et d'alternatives. Par conséquent, en simulant toutes les possibilités combinatoires possibles est impossible (Abo-Hamad et Arisha, 2011). L'optimisation est donc un outil essentiel pour trouver l'ensemble de valeurs des variables de décision qui conduit à des performances optimales. Par ailleurs, malgré que la simulation soit un outil puissant qui permette de modéliser et d'analyser le comportement opérationnel des chaînes logistiques complexes, il n'est pas capable de garantir la solution optimale. Ainsi, l'intégration des algorithmes d'optimisation aux modèles de simulation constitue un outil hybride puissant en optimisation. Une analyse des avantages et des désavantages de l'utilisation de la simulation par rapport à l'optimisation mathématique pour étudier les chaînes logistiques est présentée dans Ingalls (1998) et Ingalls (2014). L'auteur conclut que la simulation est un excellent outil d'analyse lorsque la configuration optimale de la chaîne logistique est déjà déterminée par un outil d'optimisation mathématique et il recommande d'utiliser des techniques hybrides d'optimisation-simulation.

Dans la littérature, plusieurs techniques d'optimisation de la simulation sont disponibles Ammeri, Hachicha, Chabchoub et Masmoudi (2011). Ces techniques sont regroupées par Abo-Hamad et Arisha (2011) en cinq catégories : les méthodes de programmation mathématique, les méthodes du gradient, les méthodes à base de méta-modèle, les méthodes d'approximation stochastique et les méta-heuristiques. Une excellente synthèse des méthodes d'optimisation basées sur la simulation est donnée par Ding (2004) et récemment par Swain (2013).

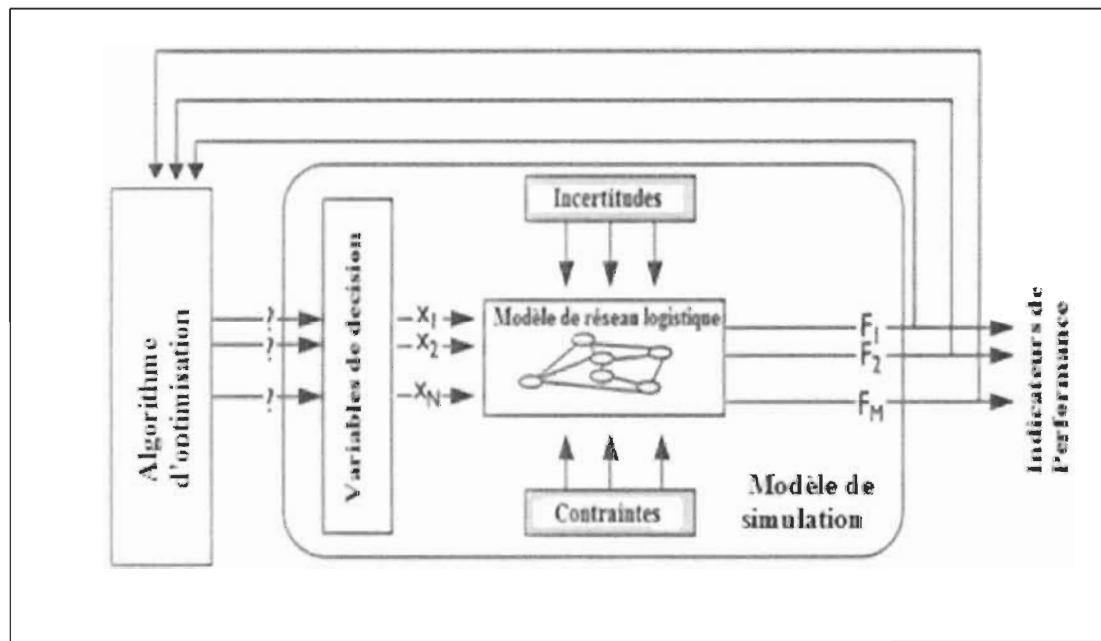


Figure 1.10 – Interaction entre le modèle de simulation et l'algorithme d'optimisation (Abo-Hamad et Arisha, 2011)

Plusieurs approches hybrides optimisation-simulation émergent dans la littérature sur la conception et la planification de la chaîne logistique (Abo-Hamad et Arisha, 2011). Cependant, l'application de telles approches aux problèmes de conception de réseaux logistiques en boucles fermées est encore absente sauf une application récente (Suryabatmaz, Altekin et Sahin, 2014) qui porte sur un réseau de la logistique inverse.

1.9 Problématique et objectifs de recherche

La gestion verte de la chaîne logistique a fait l'objet d'un grand intérêt de la part de chercheurs et d'industriels pendant la dernière décennie en raison des pressions provenant de différentes parties prenantes pour adopter un engagement vis-à-vis le développement durable. Le périmètre de la chaîne logistique verte recouvre tout le cycle de vie du produit, de l'extraction des matières premières à son traitement en fin de vie. Cela implique que les entreprises qui s'y sont engagées doivent désormais revoir leurs stratégies d'affaires de façon à trouver un meilleur compromis entre les objectifs économiques classiques et les objectifs environnementaux.

Pour faire face à ce défi dans un contexte durable, la chaîne logistique régulière doit être étendue pour y intégrer les activités de logistique inverse et former ainsi une boucle de valeur (Chouinard, 2007). Aujourd'hui, à l'exception de certaines entreprises pionnières (p. ex., Xerox, HP, etc.), l'application de cette stratégie durable de gestion de la chaîne logistique est en émergence. La plupart des entreprises actuelles adoptent une stratégie basée sur la fabrication des biens de consommation à courts cycles de vie plutôt que sur la fabrication des biens durables et recyclables (McKinsey & Company, 2013). L'adoption de cette stratégie implique un transfert de la propriété du produit du fabricant vers le consommateur et, par conséquent, une perte de l'information et de contrôle sur le produit directement après sa livraison ou après sa période de garantie. Cette stratégie complique à la fois le retour et la disposition du produit après utilisation et la possibilité de réalisation d'un profit acceptable lors du traitement des produits utilisés (Guide, Teunter et Van Wassenhove, 2003).

Par ailleurs, la conception du réseau logistique est un facteur crucial dans la réussite et la gestion de chaîne logistique. En fait, certains experts affirment que la majorité des coûts et des impacts environnementaux de la chaîne logistique peuvent être réduits lors de la

structure physique du réseau logistique (Watson *et al.*, 2013; Aronsson et Brodin, 2006; Youg et Wang, 2011).

Bien que le domaine de conception de chaînes logistiques en boucle fermée attire de plus en plus l'attention des chercheurs en raison des avantages économiques et environnementaux que peut offrir un tel réseau, la majorité des travaux suppose que l'amélioration de la performance environnementale de la chaîne logistique implique une amélioration directe du gain économique. Or, dans la pratique, cette hypothèse n'est valable que lorsque les contraintes de récupération de la valeur dans la chaîne logistique inverse sont enlevées (Neto *et al.*, 2010).

Ainsi, puisque la mission principale de toute chaîne logistique est de générer le maximum de profit, il est donc évident que la viabilité économique du réseau logistique en boucle fermée se pose comme une question d'envergure.

Objectif principal de la thèse

Afin d'améliorer la durabilité économique de la chaîne logistique verte, l'objectif de cette thèse est de développer des nouvelles approches d'aide à la conception de réseau logistique en boucle fermée qui permettent l'amélioration du profit total, tout en respectant les contraintes potentielles du réseau.

1.10 Organisation de la thèse

Le reste de cette thèse est organisé comme suit : le chapitre 2 présente une revue de la littérature en deux sections. La première section présente les caractéristiques de la chaîne logistique inverse tandis que la deuxième section s'attaque au problème de conception du réseau logistique intégrant la logistique inverse à la chaîne logistique régulière. Le chapitre 3 présente une approche pour la conception de réseau logistique en boucle

fermée en tenant compte de l'acquisition par les détaillants ainsi que les décisions concernant l'intégration des sites de la logistique inverse avec ceux de la chaîne logistique régulière. Le chapitre 4 propose une approche conjointe pour la sélection d'alternatives de récupération et la conception de réseau logistique en boucle fermée. Enfin, les conclusions générales ainsi que des perspectives de recherche de la thèse sont présentées.

CHAPITRE 2 – REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Revue de la littérature sur la logistique inverse

2.1.1 Activités de la logistique inverse

L'objectif d'un programme de la logistique inverse est de redonner une nouvelle vie aux produits usagés. Un système de logistique inverse comprend une série d'activités qui forment un processus continu pour traiter les sous-produits de retour jusqu'à ce qu'ils soient bien récupérés ou éliminés. Les principales activités constituant la logistique inverse sont (Fleischmann *et al.*, 2001; Guide et Van Wassenhove, 2000) : l'acquisition/collecte, l'évaluation/tri, la disposition, l'élimination et la redistribution.

2.1.1.1 Acquisition

L'acquisition est la première étape et la barrière d'entrée dans la logistique inverse (RL). Deux stratégies d'acquisition peuvent être distinguées (Guide et Van Wassenhove, 2000) : la collecte de déchets (*waste stream*) et la collecte axée sur le marché (*market-driven system*). La première stratégie représente une acceptation passive des produits en fin de vie pour répondre aux exigences de la législation. Dans ce cas, le degré d'incertitude associée aux flux est plus élevé et la planification et le contrôle des processus de la logistique inverse sont très compliqués. La deuxième stratégie représente une acquisition proactive basée sur l'établissement des relations avec les consommateurs.

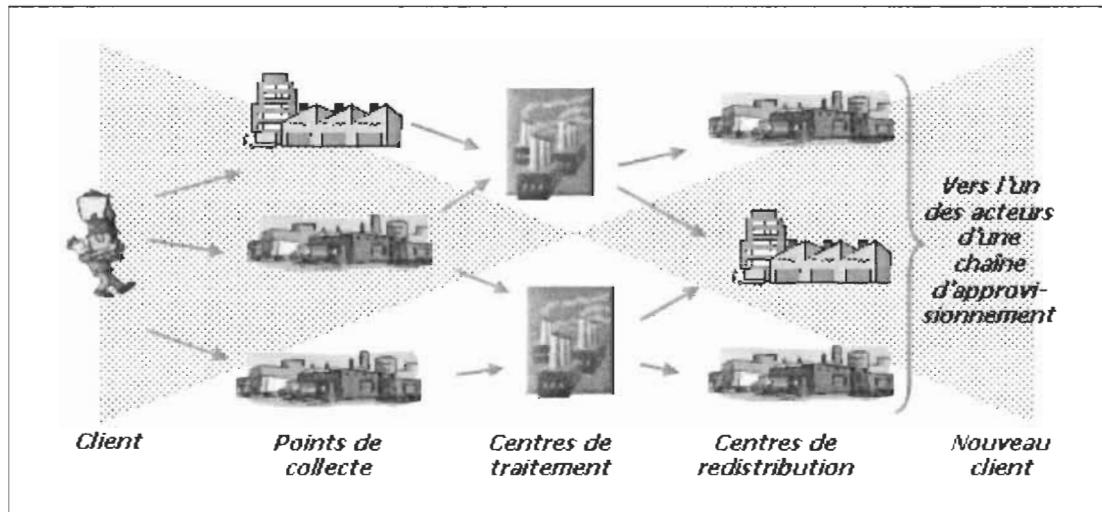


Figure 2.1 – Représentation de logistique inverse (Chouinard, 2003)

Dans l'industrie de récupération et de recyclage, différents types de relation entre les fabricants d'origine et leurs clients permettent de maîtriser l'acquisition des produits utilisés. Dans cette perspective, Östlin, Sundin et Björkman (2008) identifient sept types de relation permettant l'acquisition des produits auprès des consommateurs.

- Location/*leasing*. Le fabricant reste propriétaire du produit, le client achète un service sous forme de contrat de location ou de *leasing*. Thierry *et al.* (1995) soulignent que les retours de location sont plus prédictibles que les autres types grâce à l'information disponible pour l'entreprise.
- Contrat de service. Ce type de relation est similaire à celui de location sauf que le client devient propriétaire du produit. Il se fait à travers la signature, avec le client, d'un contrat de réparation, de maintenance et de remise à neuf.
- Demande directe. Le client envoie le produit à « l'entreprise de remise à neuf » en payant les frais de service. En contrepartie, il reçoit le même produit remis à neuf (p. ex., cartouches d'encre).
- Échange standard. Pratique courante dans l'industrie automobile. Quand le client achète un moteur remis à neuf, il est obligé de retourner l'ancien.

- Crédit à l'achat. Quand le client retourne son produit usagé, il reçoit un crédit à utiliser pour l'achat d'un produit remis à neuf.
- Rachat. Le fabricant rachète le produit auprès de son client selon la qualité estimée du produit.
- Dépôt volontaire. Le client donne volontairement le produit au refabricant. Ce cas est rare lorsque le produit possède encore de la valeur.

À cette étape, une première inspection technique préliminaire de la qualité des retours pourra avoir lieu afin de déterminer le montant à rembourser ou à créditer au client.

2.1.1.2 Collecte

C'est une démarche visant à détourner les produits utilisés et à les diriger vers un centre d'évaluation/tri. Elle comprend des opérations de transport et de stockage. Les méthodes de collecte sont variées. Kumar et Putnam (2008) identifient trois méthodes de collecte pour le fabriquant d'origine : la récupération directe du produit chez le client, la collecte par les détaillants et la collecte par une entreprise prestataire. Encore, le client peut ramener le produit à retourner à un centre de collecte autorisé.

2.1.1.3 Évaluation/tri

Ce processus est très critique car la sélection des options de traitement (disposition) des produits aura un impact direct sur la rentabilité de tout le système de logistique inverse. Puisque les activités de traitement retenues vont déterminer la viabilité et la structure du réseau, il est nécessaire d'accorder plus d'attention à ce processus (Chouinard, 2007). Les produits sont identifiés et leur condition est évaluée afin d'estimer leur valeur résiduelle et la possibilité de leur traitement. C'est toutefois une tâche complexe étant donné que l'état du produit retourné n'est pas connu et nécessite une inspection ainsi que la multitude des facteurs à considérer (Thierry *et al.*, 1995; Ziout, Azab et Atwan, 2014).

En s'inspirant de Krikke, Van Harten et Schuur (1998) et de Thierry *et al.* (1995), Chouinard (2003) recense les différents éléments à prendre en compte lors du choix du mode de traitement.

- 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.
- Les conditions du réseau logistique :
 - quantité de produits retournés;
 - demande pour les produits, les composants ou les matériaux valorisés;
 - niveau des stocks;
 - capacité des sites;
 - les coûts et les bénéfices économiques et environnementaux.

Ainsi, vu la multitude de facteurs à considérer, le choix des options optimales de traitement est souvent une décision difficile et multicritères.

2.1.1.4 Disposition

Une fois les produits inspectés et triés, l'étape suivante consiste à la disposition des retours en deux voies : la réutilisation directe et le traitement.

Comme son nom l'indique, la réutilisation directe concerne les produits retournés en très bon état et qui peuvent être revendus directement aux clients. Cette voie peut nécessiter un réemballage ou une reconfiguration des produits (Chouinard, 2007). La littérature sur la réutilisation traite essentiellement de trois aspects : les emballages, le désassemblage du produit en vue de sa réutilisation et de l'analyse du réseau logistique.

Si la réutilisation directe n'est pas possible, une ou plusieurs alternatives de traitement sont affectées au produit retourné en tenant compte des critères techniques, économiques et environnementaux. Le tableau 2.1 résume les principales alternatives de traitement.

- La réparation. Le but de la réparation est de ramener un produit usagé à son état de marche normale (Thierry *et al.*, 1995). D'une manière générale, les produits réparés sont d'une qualité légèrement inférieure à celle des produits neufs. Comme la réparation implique le remplacement ou la réparation des pièces défectueuses, cette option nécessite un désassemblage et un råassemblage relativement limité.
- Le reconditionnement. Consiste à ramener le produit récupéré à un certain niveau de qualité (Thierry *et al.*, 1995). Selon l'état du produit et de sa complexité, cette alternative est relativement plus longue à cause du degré de désassemblage nécessaire pour remplacer les modules critiques par d'autres, neufs. Le produit est ainsi testé en fonction de la qualité visée. Puisque le reconditionnement nécessite une expertise de de même que la technologie nécessaire pour le réaliser, cette opération est souvent affectée au manufacturier ou encore un tiers-partie.

Tableau 2.1 – Alternatives de traitement des produits utilisés (Krikke *et al.*, 1998)

Option de récupération	Degré de désassemblage	Qualité exigée	Produit résultant
Réparation	Au niveau du produit.	Remettre le produit en état de marche.	Pièces réparées ou remplacées.
Reconditionnement	Au niveau des modules.	Inspecter et remettre à jour les modules.	Modules réparés ou remplacés.
Remise à neuf (remanufacture)	Au niveau des pièces.	Inspecter et mettre à jour les pièces et les modules.	Des pièces et modules usés et neufs au sein du produit neuf.
Cannibalisation	Récupération sélective de pièces.	Dépend de l'utilisation des options de récupération.	Des pièces réutilisées, d'autres mises au rebut ou recyclées.
Recyclage	Au niveau matière.	Dépend de l'utilisation dans la reproduction.	Matières dans des produits neufs.

- La remise à neuf (remanufacture). Elle se distingue du reconditionnement par des opérations de remise en état plus importantes. Le niveau de qualité visé est pareil que celui établis pour le produit neuf (Thierry *et al.*, 1995). Cette alternative consiste à transformer le produit usagé de telle manière qu'il satisfait aux exigences de qualité des produits neufs correspondants sur le marché. Un produit usé est complètement démonté, toutes ses pièces et modules inspectés et remplacés si nécessaire. Pour donner au produit remis à neuf plus de valeur, des opérations de mise à jour de la technologie peuvent avoir lieu. Lund (1996) a étudié l'importance de l'industrie américaine de remise à neuf en indiquant que ce secteur comprend 70 000 entreprises, employant 480 000 salariés (emplois directs) et générant des ventes annuelles avoisinant les 53 milliards de dollars. Selon cet auteur, on peut compter des millions d'employés si on ajoute les emplois indirects générés par cette industrie (distributeurs, détaillants, service, etc.).
- La cannibalisation. Il s'agit d'un désassemblage sélectif de certains composants ou modules du produit usagé. Ainsi, à l'inverse des alternatives précédentes qui se

placent au niveau de la valorisation de tout le produit, la cannibalisation se concentre sur un ensemble prédéfini de composants ou modules qui peuvent à l'occasion être réutilisés dans la fabrication ou comme pièces de rechanges pour les produits sous garantie. De ce fait, la cannibalisation nécessite un désassemblage sélectif du produit et un diagnostic précis des modules potentiellement réutilisables. Le niveau de qualité de ces pièces peut dépendre de leur utilisation ultérieure et du niveau de réinsertion dans la chaîne logistique (Thierry *et al.*, 1995). Fleischman, Van Nunen et Gräve (2003) intègrent le désassemblage comme une source régulière dans la planification d'approvisionnement des pièces de rechange (le cas d'IBM). Ils mentionnent que la réalisation d'un gain dépend des coûts de la logistique inverse et que la gestion de l'information est une clé pour le succès d'un système logistique tenant compte de la réutilisation. Kroon et Vrijens (1995) développent un système logistique inverse pour la réutilisation de matériel d'emballage secondaire. Ils montrent que l'utilisation des contenants réutilisables n'est pas rentable à cause de l'investissement élevé nécessaire.

- Le recyclage. Cette option n'a pas pour but de garder la fonctionnalité première des produits ou des composants, ni même de conserver l'identité du produit. Le but du recyclage est de réutiliser les matières constituant le produit usé. Celui-ci est donc démonté et séparé en diverses catégories de composants selon les matières employées. Puis, selon la qualité de ces matières, celles-ci peuvent être réutilisées dans leur application d'origine ou dans d'autres alternatives. On parle de recyclage par revalorisation des matériaux lorsque les matières sont dirigées vers des procédés de broyage ou de refonte et de recyclage par revalorisation énergétique si les matières peuvent être transformées en énergie, par des processus d'incinération, par exemple.
- L'élimination propre. Cette option n'est désirable que pour les produits qui ne peuvent pas être réutilisés pour des raisons techniques ou de coût. Cela s'applique, par exemple, aux produits rejetés au niveau du tri en raison de la réparation excessive, mais aussi aux produits non demandés par le marché. Cette opération peut inclure le transport, l'enfouissement et l'incinération.

2.1.1.5 Redistribution

Ce dernier processus implique l'expédition des produits et composants traités vers les membres de la chaîne logistique régulière ou vers un marché secondaire. Cela inclut la vente, le transport et le stockage.

Thierry *et al.* (1995) ont discuté des questions stratégiques en matière de gestion de la récupération du produit. Les auteurs ont souligné que pour analyser les questions de la logistique inverse, quatre groupes d'information sont nécessaires : des informations sur les compositions des produits, la valeur et l'incertitude des flux de retour, l'information sur le marché concernant les retraités produits matériels et composants et des informations sur la gestion des déchets et les opérations de récupération du produit réel. Ils ont étudié les activités de récupération du produit d'un producteur de copieur, BMW (voitures) et IBM (ordinateurs) et les fabricants ont illustré les problèmes de production et de gestion des opérations dans leur système de récupération.

2.1.2 Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la logistique inverse

Une chaîne logistique inverse diffère significativement de la chaîne logistique traditionnelle à l'égard de ses opérations, gestion et parties prenantes (de la Fuente, Ros et Cardos, 2008; Fleischmann et Krikke, 2000).

Une des premières différences mentionnées est qu'il est plus difficile de prévoir les retours car ils sont aléatoires. La chaîne logistique inverse est marquée par un grand degré d'incertitude sur la quantité, le temps et la qualité des retours des produits (De Brito, 2004), alors que dans la chaîne traditionnelle, l'approvisionnement est une variable endogène dans la mesure où le temps, la qualité et la quantité des *inputs* sont contrôlés selon les besoins du système. Par contre, les approvisionnements sont des

variables exogènes des systèmes de récupération des produits, difficilement contrôlables (Fleischmann et Krikke, 2000).

En outre, la distribution ne se fait plus d'un point vers plusieurs mais plutôt à l'inverse. Une autre distinction est le manque d'uniformité de la qualité et de l'emballage des retours. Souvent les options de disposition ne sont pas bien définies. Il est encore plus complexe de fixer un prix puisque celui-ci dépend de plusieurs facteurs. Il y a aussi un problème de perception quant à la vitesse requise du traitement. Les coûts de distribution sont plus difficiles à identifier. La gestion des stocks est particulièrement complexe. Ainsi, la logistique inverse est un système réactif. L'élément déclencheur du processus de logistique inverse est un retour vers l'entreprise. Le fait d'avoir de la difficulté à prévoir les retours, à savoir d'où les produits vont revenir ainsi que leur qualité rend le processus plus complexe que la logistique traditionnelle.

Le tableau 2.2 résume les principaux points de différence. Selon Rogers et Tibben-Lembke (2001), la logistique inverse se distingue de la chaîne logistique classique à plusieurs égards. Les auteurs comparent les deux chaînes en termes de plusieurs critères.

Tableau 2.2 – Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la logistique inverse (adapté de Tibben-Lembke et Rogers, 2002 et Gobbi, 2008)

Aspect	Chaîne logistique traditionnelle	Logistique inverse
Prévisions	Relativement simples.	Plus difficiles.
Approvisionnement	Maîtrisable selon la prévision de la demande et les capacités disponibles.	Difficile, influencé par l'utilisateur final.
Demande	Bonne connaissance des marchés et des demandes de clients.	Faible connaissance de marchés et produits, composants récupérés.

Tableau 2.2 – Différences entre la chaîne logistique traditionnelle et la logistique inverse
(adapté de Tibben-Lembke et Rogers, 2002 et Gobbi, 2008) (suite)

Aspect	Chaîne logistique traditionnelle	Logistique inverse
Principales activités	L'approvisionnement, la production et la distribution.	La collecte, l'évaluation/tri, le retraitement, la redistribution, l'élimination finale.
Flux de produits	Quantités importantes de flux allant d'un site à plusieurs clients.	Quantités faibles de flux allant de plusieurs clients à un site.
Qualité des produits	Uniforme.	Non uniforme.
Emballage des produits	Uniforme.	Non uniforme.
Destination/route	Définie.	Indéfinie.
Options de disposition	Définies.	Mal définies.
Détermination des prix	Relativement uniforme.	Dépend de plusieurs facteurs.
Réactivité	Importante.	Non prioritaire.
Coûts de distribution	Visibles.	Moins visible.
Gestion des stocks	Cohérente.	Incohérente.
Cycle de vie du produit	Linéaire et maîtrisable.	Circulaire et difficile à gérer.
Négociation entre les parties	Simple.	Compliquée par des considérations additionnelles.
Méthodes de marketing	Connues.	Compliquées par plusieurs facteurs.
Information sur le cycle de vie du produit	Possible à obtenir.	Difficile à obtenir après livraison au client.
Création de valeur	Visible.	Conditionnelle.

Le cycle de vie du produit est de plus en plus court donc l'entreprise doit considérer ce facteur dans le système de logistique inverse. Pour ce qui touche la négociation avec le client, elle doit tenir compte d'autres considérations. D'un point de vue marketing, Fleischmann, Van Nunen, Gräve et Gapp (2005) constatent que deux activités primaires de la logistique inverse nécessitent une attention particulière, à savoir

l'acquisition/collecte et l'évaluation/tri, qui diffèrent de l'approvisionnement traditionnel. Schaltegger (1997) analyse l'importance de l'identification du produit et ses informations associées à travers son cycle de vie. L'auteur conclut que la viabilité du système de récupération de produits en fin de vie dépend de la coopération et la collaboration des partenaires d'affaires et de leur susceptibilité de fournir les informations requises sur le produit.

2.1.3 Contraintes de la récupération de valeur

Krikke (2010) mentionne que la création de valeur s'effectue dans la chaîne logistique traditionnelle et pendant le processus de la logistique inverse. La valeur contenue dans le produit, y compris les coûts de fabrication, les coûts de matières premières et les coûts d'énergie, est récupérée. Cependant la récupération maximale de la valeur résiduelle des produits en fin de leur vie est un processus complexe et une problématique majeure pour l'intégration adéquate des activités de la logistique inverse dans la chaîne logistique traditionnelle.

Lund (1998) cite deux éléments nécessaires pour la viabilité économique d'un système logistique inverse : la valeur résiduelle des produits retournés et le coût de traitement de ces produits. Ainsi, si le coût total des activités de la logistique inverse dépasse leur profit généré, les entreprises ne verront aucune incitation financière pour mettre en œuvre un système logistique inverse ou d'intégrer la logistique inverse dans la chaîne logistique traditionnelle (Prahinski et Kocabasoglu, 2006).

Thierry *et al.* (1995), en étudiant les décisions stratégiques affectant la logistique inverse, constatent que la viabilité d'un système de récupération dépend de l'information acquise sur les caractéristiques des produits, sur la magnitude et l'incertitude des flux de retour et sur les marchés des produits, composants et matériaux valorisés.

Dans le même contexte stratégique de la logistique inverse, Gobbi (2011) étudie l'impact de la valeur résiduelle d'un produit sur la structure d'une chaîne logistique inverse.

La valeur résiduelle du produit détermine si le produit retourné doit être éliminé, recyclé, réparé, reconditionné ou remis à neuf. Cela dépend des conditions du produit retourné (âge, qualité et intensité d'utilisation), de la disponibilité d'un marché secondaire, du coût de valorisation des retours et du niveau d'obsolescence (temps d'usure, temps de remplacement, cycle technologique, cycle de conception, cycle d'achat). L'auteur conclut que lorsqu'il s'agit d'option de recyclage, le temps n'est pas pertinent, l'objectif principal est la réduction des coûts, le réseau logistique est centralisé et lorsque l'option de reconditionnement est choisie, le temps devient très pertinent, un compromis entre les coûts et le temps est nécessaire et la chaîne présente une structure centralisée.

Dekker, Bloemhof et Mallidis (2012) mentionnent, dans leur revue sur la logistique verte, qu'il peut être difficile de garantir la qualité des produits récupérés ainsi que l'impact écologique des processus de nettoyage et du transport assurant la collecte d'une quantité suffisante des retours. Martin (2006) ajoute que l'intégration de la logistique inverse dans la chaîne logistique traditionnelle est une tâche difficile et qu'elle peut facilement ajouter des coûts supplémentaires qui dépassent le profit généré par l'entreprise.

La logistique inverse vient donc pour former une chaîne logistique en boucle fermée. Ainsi, l'entreprise doit revoir sa stratégie de création de valeur en vue d'assurer l'utilisation répétée du produit et en prenant en considération tous les cycles de vie du produit. Pour ce faire, elle s'intéressera davantage à assurer une acquisition suffisante et contrôlée des produits inutilisés ou en fin de vie via la création des relations basées sur le service (location du produit, *leasing*, etc.) avec les clients finaux (Guide et Van Wassenhove, 2001; Ostlin *et al.*, 2008). D'autre part, elle cible l'amélioration de la

réutilisabilité au niveau de la conception des produits, en terme de conception pour la fiabilité, la maintenabilité, le désassemblage, le recyclage, etc. (Kuo, Huang et Zhang, 2001).

Geyer et Jackson (2004) expliquent la complexité de la récupération de la valeur dans une chaîne logistique en boucle fermée par trois contraintes principales : contrainte d'approvisionnement, de traitement et de la demande (figure 2.2).

2.1.3.1 Contrainte d'approvisionnement

Dans la littérature sur la contrainte d'approvisionnement en produits utilisés, plusieurs travaux expliquent cette contrainte par le manque de contrôle en ce qui concerne la quantité, la qualité et le temps de retour comme étant la principale cause de la contrainte d'acquisition (Thierry *et al.*, 1995; Fleischmann, Bloemhof-Ruwaard, Dekker, Van der Laan, Van Nunen et Van Wassenhove, 1997; Guide, 2000; Östlin, Sundin et Björkman, 2009; Guide et Van Wassenhove, 2009).

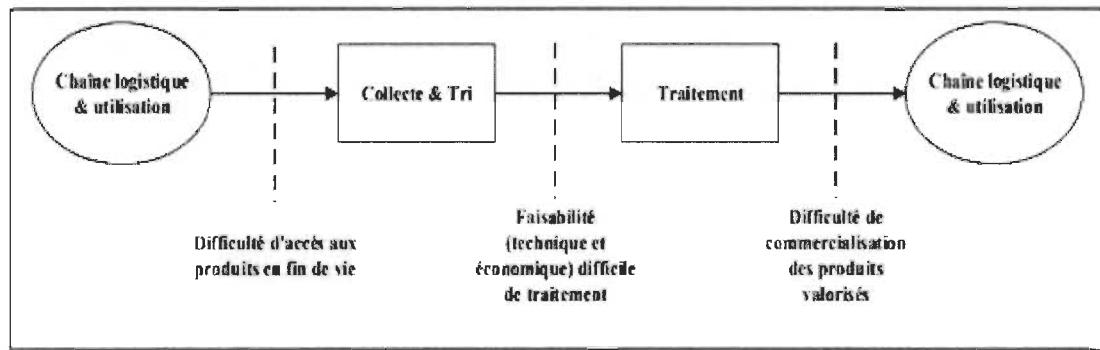


Figure 2.2 – Contraintes de récupération de la valeur (Geyer et Jackson, 2004)

Ce manque de contrôle est causé principalement par le cycle de vie du produit, le taux de changement technologique et de la volonté de l'utilisateur final pour retourner le produit (Lundmark, Sundin et Björkman, 2009). Ce qui se traduit par un retour aléatoire qui doit

être anticipé en adoptant des stratégies qui impliquent les consommateurs dans le processus de retour. Guide (2000) indique que l'incertitude sur le temps pourrait être positivement corrélée avec l'incertitude sur la quantité et non avec l'incertitude sur la qualité.

Incertitude sur le temps. En dehors des produits en fin de contrat de location et de *leasing*, il est difficile de prévoir le temps de récupération des produits en fin de vie. Selon Chouinard (2003), la réutilisation des composants récupérés dépendra, entre autres, du stade du cycle de vie dans lequel se trouvera le produit, de l'innovation technologique qu'il présentera et du niveau de désuétude et de dégradation qu'il affichera. Cette variabilité du temps de retour des produits en fin de vie peut avoir un impact considérable sur la planification de la production. Il est difficile d'établir le plan de production en se basant sur une source d'approvisionnement aléatoire (Guide, 2000). En outre, des délais très longs pour acquérir les produits en fin de vie peuvent affecter la valeur résiduelle récupérable sur ces produits. D'après Guide et Van Wassenhove (2006), les retours de produits représentent une source potentielle de récupération des actifs or, seulement une petite fraction de cette valeur est extraite par les fabricants. Par contre, la grande partie de cette valeur est perdue à cause des délais de récupération très longs. Aussitôt que possible les produits sont récupérés, meilleures seront généralement leurs chances d'être réutilisés ou vendus avec succès.

Incertitude sur la quantité. Les incertitudes en regard de la quantité proviennent du fait qu'il est difficile d'évaluer, non seulement le volume de produits retournés, mais également à déterminer la bonne proportion qui sera envoyée vers l'alternative appropriée de traitement. La quantité de produits récupérés a un impact important sur les coûts et les bénéfices engendrés. En fait, un faible taux de retour ne justifiera pas l'investissement en ressources ainsi que la viabilité économique du système de la logistique inverse (Chouinard, 2003). Pour pouvoir maximiser les profits de l'entreprise,

un équilibrage est nécessaire de l'offre (le retour) de produits à la demande pour éviter des coûts intitulés de stockage (Guide et Van Wassenhove, 2000).

Le mode d'acquisition des retours affecte la récupération de valeur dans la logistique inverse. Par exemple, la collecte passive des produits en fin de vie pour se conformer aux exigences de la législation donne lieu à des incertitudes élevées sur la quantité et la qualité des produits retournés et, par conséquent, à une performance incertaine du processus de récupération. Par contre, le recours à une acquisition proactive basée sur l'établissement des relations durables avec les consommateurs et l'utilisation des incitatifs financiers réduit les incertitudes et améliore significativement la performance du système. À titre d'exemple, la mise en place des options d'acquisition des produits auprès des clients (contrats de location, des primes d'acquisition, etc.) permet de maîtriser le temps et la quantité des retours. De plus, la communication des prévisions du marché au service de production permet de mieux prévoir la quantité demandée (Elkorch et Millet, 2011).

Incertitude sur la qualité. La qualité des produits est en fait un facteur important quant à l'orientation du produit envisagée lors de l'étape de tri, puisqu'elle a une influence sur la sélection des options de valorisation. Cependant, ce paramètre est un élément incertain et non maîtrisable par les industriels. Selon une étude de Flapper et De Ron (1996), les entreprises de remise à neuf affirment avoir des difficultés pour la récupération des produits d'une qualité satisfaisante. De plus, il est souvent difficile de prévoir ou d'évaluer la valeur récupérable sur un produit car les produits ne sont pas tous conçus pour être réutilisés et que l'intensité et le mode d'utilisation varie d'un client à l'autre. Ainsi, la qualité des modules récupérés est une combinaison de plusieurs critères tels que la fiabilité, l'obsolescence physique (à cause d'usure importante), l'obsolescence de valeur (à cause de l'évolution de la technologie), l'impact environnemental, etc.

Faute de données d'évaluation de la qualité de ces modules, il est difficile d'évaluer de façon exacte la qualité globale du produit récupéré. Effectivement, lorsque les produits sont en fin de vie, les informations sur leur caractéristiques (constituants, désassemblage, fiabilité, recyclabilité, matières dangereuses) sont souvent incomplètes, ce qui rend la planification de leur traitement avant inspection et désassemblage impossible. De plus, ces informations ne sont pas forcément partagées entre tous les acteurs impliqués dans la fabrication du produit.

Le besoin en gestion de l'information dans la logistique inverse, en particulier l'information relative au produit, est identifié dans la littérature comme l'un des obstacles majeurs à la récupération de valeur des produits en fin de vie (Parlikad, McFarlane, Fleisch et Gross, 2003; Tibben-Lembke et Rogers, 2002; Krikke, Bloemhof-Ruwaard et Van Wassenhove, 2003; Kokkinaki, Zuidwijk, Van Nunen et Dekker, 2004; Van Nunen et Zuidwijk, 2004).

L'exploitation des technologies de l'information donne un grand appui à la planification de la logistique inverse (Jayaraman, Ross et Agarwal, 2008). La figure 2.3 illustre comment l'information associée au produit se perd progressivement le long du cycle de vie de produit.

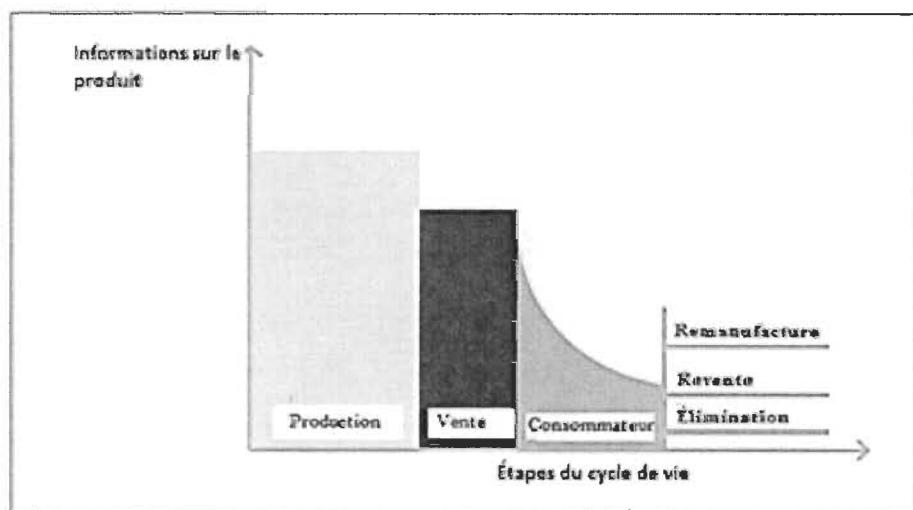


Figure 2.3 – Perte d'information sur le produit le long du cycle de vie

Thierry *et al.* (1995) ont identifié quatre catégories d'information nécessaire à une gestion efficace de la récupération : les informations sur la composition du produit, sa valeur et l'incertitude des flux de retour. L'information sur le marché concernant les produits, les composants et les matériaux traités, l'information sur la gestion des déchets et les opérations de récupération en cours. Guide *et al.* (2003) étudient l'effet de la variabilité de la qualité des téléphones cellulaires utilisés sur le temps de traitement en remise à neuf en utilisant des politiques d'acquisition des produits auprès des entreprises tierces parties. Les produits sont triés selon leur niveau de qualité; ainsi les produits de chaque classe nécessitent le même coût de traitement.

Étant donné l'incertitude sur les caractéristiques des produits retournés et les approches actuelles de conception des produits, la prévision du traitement envisagé demeure une tâche difficile. En plus, les activités mêmes de désassemblage peuvent endommager les constituants d'un produit, notamment en raison de sa configuration ou encore de l'absence de procédures formalisées (Chouinard, 2003). Ainsi, l'étape d'évaluation et de tri demeure incontournable pour orienter les produits collectés vers des alternatives de traitement qui répondent mieux aux conditions du réseau logistique. L'affectation des produits récupérés aux alternatives de traitement approprié (réutilisation, réparation, reconditionnement, réassemblage, cannibalisation, recyclage ou élimination propre) a un impact direct sur la forme du réseau logistique et sur sa performance économique et environnementale.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour identifier les stratégies de récupération et de traitement et d'évaluer leur impact sur les coûts et les avantages d'une organisation. Krikke *et al.* (1998) utilisent un modèle de programmation dynamique pour déterminer la stratégie de récupération et d'élimination pour un type de produit basée sur la maximisation du bénéfice net et sous les contraintes de faisabilité technique, commerciale et écologique. Parlikad et McFarlane (2007) illustrent les informations requises pour évaluer ces critères de faisabilité. Cependant, quand il s'agit de choisir la

meilleure option, le décideur se trouve devant une grande variété de produits, des conditions incertaines après usage et, par conséquent, des niveaux élevés d'incertitude. Ils concluent que la réutilisabilité d'un produit ou de ses composants nécessite des informations sur son identité ainsi que son état actuel, idéalement capturés et récupérés de façon automatisée. Teunter (2006) généralise le modèle de Krikke *et al.* (1998) en tenant compte plusieurs processus de désassemblage et le désassemblage partiel.

Wadhwa, Madaan et Chan (2009) proposent une approche de prise de décision multicritères basée sur la logique floue pour la sélection d'alternatives de traitement des produits récupérés. Les critères utilisés sont le coût/temps, l'impact écologique, le facteur marché, la qualité du produit et l'impact législatif. Une évaluation qualitative des sous-critères est effectuée par des experts (évaluateurs ou spécialistes de tri), les cotes obtenues sont converties en nombres flous trapézoïdales et triangulaires pour permettre la classification numérique finale des options de traitement envisagées.

Iakovou, Moussiopoulos, Xanthopoulos, Achillas, Michailidis, Chatzipanagioti et Kikis (2009) proposent un outil d'aide à la décision appelé « matrice multicritères » qui aide au choix d'alternatives de traitement approprié des produits en fin de vie. Les critères utilisés sont la valeur économique résiduelle, l'impact environnemental, le poids, la quantité et l'aisance de démontage de chaque composant. L'approche développée permet la réutilisation et le recyclage de la majorité des composants, sauf ceux qui ont une faible valeur résiduelle sont envoyés à l'enfouissement.

Xanthopoulos et Iakovou (2009) présentent une approche de planification tactique, basée sur la programmation linéaire multi-objective d'un système de récupération des produits en fin de vie, qui permet simultanément la sélection des sous-ensembles et des composants les plus pertinents à désassembler en utilisant des critères économiques et écologiques et l'optimisation des processus de traitement. Diallo (2006) étudie un cas pratique de récupération des fauteuils roulants inutilisés. Dans un premier temps, des

critères de sélection des options de récupération sont identifiés en se basant sur l'expérience sur le terrain des intervenants de la chaîne logistique inverse, puis pondérés. Ensuite, l'auteur développe un arbre de décision basé sur les critères et les alternatives de traitement retenues. La prise de décision est faite en utilisant l'arbre de décision et les résultats de la trichotomie de Moscarola et Roy comme méthode d'analyse multicritère de tri. Un deuxième modèle de programmation mathématique est proposé pour aider à la prise de décision dans le cas de disponibilité des données fiables.

Certaines recherches étudient simultanément la sélection de l'option de traitement des produits en fin de vie et la conception des produits. Rose et Ishii (1999) proposent un outil pour l'aide au choix des stratégies appropriées des produits en fin de vie au niveau de la phase préliminaire de conception des produits. Kumar, Pauly et Budin (2006) présentent une approche d'aide à la sélection de la meilleure option de fin de vie. L'approche étudie le flux de valeur le long de trois phases de cycle de vie du produit : la fabrication (création de valeur), l'utilisation (consommation de valeur) et la récupération (récupération de valeur). L'étude révèle aussi l'impact des attributs de produit à la conception et l'historique d'utilisation du produit sur le flux de valeur à travers son cycle de vie. Zuidwijk et Krikke (2008) comparent deux politiques de récupération comme réponse à la directive européenne sur les équipements électriques et électroniques (DEEE) : l'écoconception des produits versus des nouvelles technologies de récupération. Ils concluent que la première stratégie est la meilleure mais son effet est retardé et que la directive DEEE actuelle doit davantage récompenser les entreprises sur l'écoconception au lieu de se limiter à la prévention de déchets.

2.1.3.2 Contrainte du processus de traitement

L'incertitude sur le temps, la quantité et la qualité des produits retournés rendent également le processus de traitement moins prévisible qu'un processus de fabrication ordinaire (Guide et Van Wassenhove, 2002). Après avoir orienté les produits retournés

vers leurs alternatives de traitement appropriées lors de l'étape d'inspection et tri, ces derniers sont désassemblés à un niveau donné selon les options de traitement envisagés. Le coût et l'effort de traitement dépend de la qualité des constituants de produits retournés et la facilité de désassemblage. Cela implique des séquences de traitement non standards en comparaison avec le système traditionnel de manufacture. La variabilité des séquences de traitement de deux produits retournés de même lot peut être différente, ce qui complique la planification et le contrôle de production et d'inventaire.

L'absence des exigences de désassemblage et de remise à neuf lors de la conception des produits rend le processus de récupération très laborieux et stochastique. Par exemple, le processus de remise à neuf est en général trois à cinq fois plus laborieux que la fabrication d'un même produit (Steinhilper, 1998). Cela s'explique par deux raisons. La première raison est que les activités de désassemblage, nettoyage, inspection et tri sont des activités qui ne sont pas présentes dans le secteur manufacturier. Deuxièmement, la taille des lots est beaucoup plus petite et le degré d'automatisation est plus faible par rapport au manufacture (Lundmark *et al.*, 2009).

Sundin (2004) et Kumar et Putnam (2008) affirment que l'intégration des exigences de l'environnement, de désassemblage et de traitement des produits en fin de vie lors de la conception de produits réduit les coûts, le temps de traitement ainsi que les impacts environnementaux. Un autre aspect relatif au traitement est la mise à jour technologique des produits remises à neuf.

Umeda, Daimon et Kondoh (2007) classent les raisons d'obsolescence des produits utilisés en deux catégories. La première est due à une « obsolescence physique » du produit (baisse de performance, rayures, etc.). La deuxième est due à une « obsolescence de valeur » qui représente l'obsolescence des fonctionnalités du produit. Par exemple, de nombreux ordinateurs et téléphones portables sont rejettés à cause de l'obsolescence de leur valeur fonctionnelle ou à cause de l'effet de mode.

Sundin (2004) souligne que la mise à jour technologique peut prolonger la vie fonctionnelle des produits à condition qu'elle continue à satisfaire les attentes des clients. Il est à signaler que la mise à jour est applicable dans le cas des produits qui ont une durée de vie relativement longue, qui les rendent, un jour, obsolètes à cause du changement technologique (Elkorch et Millet, 2011).

2.1.3.3 Contrainte de la demande

La difficulté de prédire la demande des produits et composants valorisés après leur fin de vie est causée par plusieurs facteurs tels que :

- le taux de développement technologique. La demande pour un produit pourrait chuter brutalement en raison du développement technologique du produit;
- la prévision détaillée est difficile à effectuer en raison des incertitudes sur le temps et la quantité de produits retournés (Östlin *et al.*, 2009);
- l'acceptation des produits remis à neuf dans le marché dépend beaucoup de la différence perçue entre ces produits et les produits réguliers.

En conclusion, la création de la valeur dans la logistique inverse dépend principalement de la capacité à réduire les incertitudes et de se diriger vers une structuration similaire à celle de la chaîne régulière. Plusieurs problèmes liés à la récupération sont causés par une mauvaise conception du produit. Ainsi, la logistique inverse doit être conçue en harmonie avec le produit et la chaîne régulière.

2.2 Revue de la littérature sur la conception de la chaîne logistique en boucle fermée

Afin de créer une boucle fermée efficace, les entreprises doivent tout d'abord comprendre les contraintes que peut rencontrer la réalisation d'un système en boucle

fermée ainsi que la façon dont l'information sera communiquée entre les deux flux (Demirel et Gökçen, 2008). Krikke *et al.* (2001) concluent que l'intégration de la logistique inverse à la chaîne logistique classique sous forme de boucle fermée est considérée comme la structure la plus appropriée permettant l'intégration des principes du développement durable dans une entreprise. Les auteurs proposent plusieurs principes pour la conception de la chaîne logistique en boucle fermée. Afin d'atteindre un niveau élevé d'efficacité de la logistique inverse, l'ensemble d'activités de l'entreprise doit être piloté de façon intégrée (Landrieu, 2001).

Chouinard, d'Amours et Aït-Kadi (2005) mentionnent qu'un meilleur contrôle des coûts, en plus du gain économique et environnemental, est possible si les activités de la logistique inverse peuvent être intégrées et coordonnées au sein de la chaîne logistique classique et qu'un système d'information est mis en place. Selon Daugherty, Richey, Genchev et Chen (2005), pour maintenir un avantage concurrentiel, l'organisation devrait considérer la gestion de la logistique inverse comme un ensemble d'activités à valeur ajoutée.

L'intégration de la logistique inverse à la chaîne logistique classique nécessite des décisions stratégiques qui consistent à déterminer la forme de la boucle de valeur créée par la fusion des deux chaînes. Ces décisions sont souvent liées à la conception des produits, à l'organisation des processus et à la gestion des flux de matières et d'information dans le réseau (Chouinard, Aït-Kadi, Van Wassenhove et d'Amours, 2009). Il s'agit donc d'intégrer les activités primaires de la logistique inverse (collecte et acquisition, évaluation et tri, traitement et redistribution) à celles de la chaîne logistique classique (développement du produit, logistique interne, production, logistique externe, commercialisation et vente, et service après-vente) (Chouinard, 2003). Krikke, Le Blanc et Van de Velde (2004) indiquent trois actions clés pour la gestion optimale de la chaîne logistique en boucle fermée, la cohérence entre la finalité des retours et la forme du

réseau logistique, la réutilisation modulaire des produits et l'obtention d'informations fiables sur la réutilisation.

Rubio, Chamorro et Miranda (2008) concluent, dans leur revue de littérature sur la logistique inverse, que la recherche sur la logistique inverse devrait insister davantage sur l'analyse des aspects stratégiques. Srivastava (2008) a présenté un modèle multi-produit en deux étapes qui maximise le profit total d'un réseau logistique inverse. Dans la première étape, les localisations des installations sont déterminées en tenant compte de critères stratégiques et des contraintes clients et, dans la deuxième étape, les décisions de disposition et d'expansion des capacités sont prises. Pochampally, Gupta et Govindan (2009) expliquent que les questions stratégiques rencontrées par les planificateurs des chaînes logistiques inverses ou en boucle fermée sont la sélection des produits utilisés, l'évaluation des centres de collecte, l'évaluation des installations de traitement, l'optimisation du transport, l'évaluation des stratégies de marketing, l'évaluation des installations de production, l'évaluation de l'avenir de produits utilisés, la sélection de nouveaux produits, la sélection des marchés secondaires, la synchronisation des processus et la mesure de performance de la chaîne logistique inverse.

Barker et Zabinsky (2008) concluent qu'il y a deux principaux défis vis-à-vis la planification stratégique d'une chaîne logistique inverse : comment intégrer les activités de récupération à la chaîne logistique classique et comment gérer l'incertitude relative à la logistique inverse?

2.3 Démarche de la revue de littérature

La démarche de la revue de littérature se résume en trois étapes.

Définition de l'objectif et du champ de la revue. L'objectif de cette section est de recenser les articles publiés traitant le problème de conception/reconception du réseau de

la chaîne logistique verte intégrant la logistique inverse et la chaîne logistique traditionnelle en vue d'étudier les principales caractéristiques des modèles proposés et de déceler les opportunités de recherche disponibles. Concernant le champ d'étude, la revue couvre les articles publiés dans les journaux scientifiques entre 2001 et mars 2015. Les modèles qui traitent séparément la chaîne logistique traditionnelle ou la logistique inverse ne sont pas considérés dans cette revue.

Collecte et tri des données (articles). Cette revue de la littérature couvre les articles parus dans des journaux de logistique et de management des opérations. Nous avons consulté les bases de données suivantes : ScienceDirect, Scopus et SpringerLink, Google Scholar. Les mots clés utilisés sont : « *closed-loop supply chain strategic planning* », « *closed-loop supply chain network design* », « *green supply chain network design* », « *integrated forward/reverse supply chain network design* » et « *reverse logistics network design* ».

Classification et analyse des données. Au niveau de cette étape, les articles recensés sont classés, dans un premier temps, en quatre catégories : déterministes mono-objectif, déterministes multi-objectifs, stochastiques mono-objectif, et stochastiques multi-objectifs. Ensuite, les articles de chaque catégorie sont classés selon les critères suivants :

- mono/multi-produits : un seul ou plusieurs produits peuvent être considérés;
- mono/multi-périodes : l'optimisation peut se faire sur une période de temps pour laquelle les données sont agrégées sur une seule période ou sur plusieurs périodes de temps;
- décision stratégique de localisation (ou d'ouverture) des sites;
- décision stratégique de colocalisation des sites afin de réduire les investissements en exploitant les ressources de la chaîne régulière tels que les usines avec les centres de refabrication, les centres de distribution avec les centres de collecte;

- décisions stratégique d'affectation;
- décisions sur la quantité transportée;
- décisions sur les niveaux du stock;
- décision de choix du mode de transport;
- décision de choix de type de technologie;
- décision sur le choix de niveau de capacité;
- autres décisions.

Les résultats de cette classification sont présentés dans les tableaux 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6. Une brève description des articles recensés ainsi que la synthèse globale de la littérature sur la conception de chaîne logistique en boucle fermée verte sont présentés dans la section suivante.

2.3.1 Modèles déterministes

Les modèles déterministes constituent la base de toute méthode de programmation mathématique. Ils s'appuient sur des paramètres supposés connus et fixés à priori.

Paquet (2007) propose une démarche en sept étapes pour le développement de modèles d'optimisation mathématique.

L'étape 1. Elle consiste à l'écriture de la formulation mathématique. Cette étape constitue la base de la méthodologie. La transformation du cadre conceptuel du système étudié, y compris les hypothèses de simplification en programme mathématique, implique la définition des ensembles et leurs indices, les paramètres, les variables de décisions, la fonction objectif et les contraintes.

- Les ensembles sont identifiés par des lettres majuscules et définissent les principaux constituants du réseau logistique tels que les unités d'affaires (fournisseurs, usines,

centres de distribution, etc.), les produits (produits semi-finis, produits finis, matières premières), les technologies, les niveaux de capacité, les modes de transport.

- Les indices sont identifiés par des lettres minuscules et représentent les éléments individuels d'un ensemble. Un même indice peut être utilisé pour décrire les éléments de plusieurs ensembles.
- Les paramètres correspondent aux facteurs prédéfinis précisant le problème tels que les coûts et les capacités.
- Les variables de décision correspondent aux éléments de la formulation mathématique exprimant la solution. Deux types de variables de décision sont utilisés : des variables binaires, qui correspondent à la localisation, l'affectation ou la sélection des ressources; des variables entières, qui correspondent aux quantités des flux dans le réseau. Typiquement, la reconception prend la forme de l'ouverture de nouvelles installations (p. ex., pour se rapprocher de nouveaux marchés) et la fermeture d'installations existantes (p. ex., pour consolider les opérations).
- La fonction-objectif cherche les meilleures valeurs des variables de décision qui permettent l'atteinte des objectifs fixés (minimisation des coûts et/ou des temps, ou maximisation des profits). Elle est exprimée par la sommation des multiplications entre les variables de décision et paramètres en fonction des indices et des ensembles correspondants.
- Les contraintes expriment les limites et les restrictions sur les variables de décision du problème.

L'étape 2. Développer la base de données en utilisant les notations de l'étape 1.

L'étape 3. Générer, à partir de la base de données, le cas de base requis pour le développement et la validation du modèle. Les données ainsi obtenues sont réorganisées sur un fichier Excel.

L'étape 4. Convertir la formulation mathématique en utilisant le code du générateur de modèle. Plusieurs générateurs commerciaux existent, par exemple GAMS, LINGO, ILOG CPLEX.

L'étape 5. Réalisation des expérimentations en utilisant des scénarios et des données en main. Les étapes 6 et 7 s'attaquent à l'amélioration du temps de résolution du modèle.

2.3.1.1 Modèles déterministes avec un seul objectif

Le tableau 2.3 récapitule les différentes propriétés de modèles déterministes dont le principal objectif est la configuration des réseaux logistiques intégrant la logistique inverse. Fleischmann *et al.* (2001) présentent un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) statique pour la conception d'une chaîne logistique intégrant la logistique inverse servant plusieurs produits et incluant trois échelons, les sites de fabrication, les sites hybrides fabrication/remise à neuf et enfin, les sites de distribution, de collecte et zones. Beamon et Fernandes (2004) présentent un modèle MILP dynamique qui détermine les décisions de localisation/allocation d'une chaîne logistique avec des sites ayant des capacités limitées : les sites hybrides fabrication/remise à neuf, les sites de distribution et de collecte et les clients.

Salema, Póvoa et Novais (2006) développent un modèle MILP statique pour la conception d'une chaîne logistique de plusieurs produits et capacités des sites limitées. Le réseau logistique modélisé est composé de trois échelons : les sites hybrides de fabrication/remise à neuf, les centres de distribution et de collecte et les zones des clients.

Ko et Evans (2007) développent un modèle dynamique de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes (MINLP) pour la conception d'une chaîne logistique intégrée

servant plusieurs produits. Trois échelons sont considérés : les sites de fabrication, les centres de distribution/collecte et les sites des clients.

Lu et Bostel (2007) présentent un modèle MILP statique supportant la conception d'une chaîne logistique intégrée, avec livraison directe (pas de centre de distribution) d'un seul type de produit aux clients. La chaîne est formée de trois échelons : les sites de fabrication et de remise à neuf, les sites de collecte et les clients.

Lee et Dong (2008) développent un modèle MILP statique pour la conception d'une chaîne de production-remise à neuf des ordinateurs en fin de leur contrat de bail. Le produit récupéré est considéré comme identique au produit original. Trois échelons : un fabricant original, des centres hybrides de distribution/collecte avec capacités limitées et des clients.

Demirel et Gökçen (2008) ont formulé un modèle MILP multi-produits pour la configuration d'un réseau composé de sites de fabrication et de distribution et de sites de collecte et de désassemblage. Leur modèle détermine les quantités des flux et les localisations des unités de collecte, de désassemblage et de distribution en vue de minimiser les coûts totaux.

Kannan, Sasikumar et Devika (2010) ont développé un modèle MIP multi-produits et multi-périodes pour la conception d'une chaîne logistique en boucle fermée (CLBF) pour le recyclage des batteries. Le modèle intègre les décisions stratégiques avec les décisions opérationnelles liées à l'approvisionnement, la production, la distribution et la disposition des batteries en fin de vie.

Wang et Hsu (2010) présentent un modèle MILP statique pour la conception d'une chaîne intégrée en boucle fermée servant un seul produit. Quatre échelons sont

considérés : les fournisseurs, les sites de fabrication, les centres hybrides de distribution/collecte, les sites de désassemblage et les clients.

Salema, Barbosa-Povoa et Novais (2010) ont proposé un MILP multi-périodes et de multi-produits pour la conception et la planification de CLBF.

Amin et Zhang (2012) proposent un modèle MILP basé sur le cycle de vie pour la conception de CLBF constitué de sites de fabrication, collecte, réparation, désassemblage, recyclage et d'élimination. Le modèle considère trois types de retours (retours commerciaux, produits en fin de vie et produits en fin d'utilisation) et détermine les quantités de flux dans le réseau tout en maximisant le profit.

Paksoy, Bektas et Özceylan (2011) ont proposé un modèle MILP multi-produits qui détermine les flux de matières dans une CLBF avec un objectif composé qui minimise la somme des coûts de transport et d'achat des produits, les coûts d'émissions de CO₂ moins la quantité de produits recyclés expédiés à la chaîne de distribution. Leur modèle néglige les coûts et les émissions des installations ainsi que les coûts associés à la logistique inverse.

John et Sridharan (2013) ont utilisé la formulation MILP statistique, un seul produit pour analyser les effets des taux des flux de la logistique inverse sur le coût total du réseau en boucle fermée.

Soleimani, Seyyed-Esfahani et Shirazi (2013) ont développé un modèle MILP multi-échelons, multi-produits et multi-périodes, pour un réseau composé de fournisseurs, fabricants, entrepôts, distributeurs, détaillants et centres hybrides démontage/collecte, redistributeurs et centres d'élimination. Le modèle détermine la structure optimale qui maximise le profit total net.

Özceylan et Paksoy (2013a) ont développé un modèle de MIP mono-produit et multi-périodes pour concevoir un réseau constitué de fournisseurs de matières premières, des usines, des détaillants, des clients, des centres de collecte, des centres de démontage, des centres de rénovation et d'élimination.

Diabat, Abdallah, Al-Refaie, Svetinovic et Govindan (2013) ont développé un modèle MIP multi-produits pour déterminer la structure d'une CLSC. Le modèle a comme objectif la minimisation des coûts opérationnels et des coûts d'achat des crédits dans le marché du carbone. Leurs résultats montrent que la réduction des émissions de carbone au niveau de la remise à neuf est directement affectée par la sélection des fournisseurs et le coût unitaire d'achat des crédits de carbone.

Tableau 2.3 – Modèles déterministes mono-objectif

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision									
			Multi-produits	Multi-périodes	Localisation	Affectation	Colocalisation	Quantités des flux	Niveau du stock	Mode du transport	Extension de capacité	Sélection de technologie
Fleschmann <i>et al.</i> (2001)	MIP	Min. coûts		•	•			•				
Beamon et Fernandes (2004)	MIP	Min. coûts	•	•	•			•				
Salema <i>et al.</i> (2006)	MIP	Min. coûts	•	•	•			•				
Lu et Bostel (2007)	MIP	Min. coûts		•	•			•				
Ko et Evans (2007)	MINP	Min. coûts	•	•	•	•	•	•				
Lee et Dong (2008)	MIP	Min. coûts		•	•			•				
Demirel et Gökçen (2008)	MIP	Min. coûts	•	•	•			•				
Wang et Hsu (2010)	MIP	Min. coûts		•	•			•				
Salema <i>et al.</i> (2010)	MIP	Min. coûts	•	•	•	•		•				
Kannan <i>et al.</i> (2010)	MIP	Min. coûts	•	•				•	•			
Amin et Zhang (2012)	MIP	Max. profit	•		•			•				

Tableau 2-3 – Modèles déterministes mono-objectif (suite)

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision								
			Multi-produits	Multi-périodes	Localisation	Multi-produits	Multi-périodes	Localisation	Multi-produits	Multi-périodes	Localisation
Paksoy <i>et al.</i> (2011)	MIP	Min. [(coûts + coûts de CO_2) – (profit du recyclage)]	•	•	•	•	•	•			
Özkır et Basligil (2012)	MIP	Max. profit	•	•	•	•	•	•			
Soleimani <i>et al.</i> (2013)	MIP	Max. profit	•	•	•	•	•	•			
Keyvanshokoh <i>et al.</i> (2013)	MIP	Min. coûts	•	•	•	•	•	•	•	•	PA
John et Sridharan (2013)	MIP	Min. coûts				•	•				
Diabat <i>et al.</i> (2013)	MIP	Min. (coûts + crédits de CO_2)	•		•	•	•	•			
Özceylan et Paksoy (2013a)	MIP	Min. coûts		•	•	•	•	•			
Özceylan, Paksoy et Bektas (2014)	MNIP	Min. coûts	•		•	•	•	•			TCD
Faccio, Persona, Sgarbossa et Zanin (2014)	MIP	Min. coûts	•		•	•	•	•	•		

TCD : temps du cycle de désassemblage; PA : prix d'acquisition.

Cependant, leur formulation ignore les coûts associés à la logistique inverse. Özceylan, Paksoy et Bektas (2014) ont présenté un modèle de programmation mixte non linéaire (MNIP) pour l'optimisation d'une CLBF, impliquant des clients, des centres de collecte/désassemblage et des usines. En plus des décisions stratégiques de localisation/allocation, le modèle équilibre le nombre de postes de désassemblage afin de minimiser les coûts totaux du réseau. Faccio *et al.* (2014) ont étudié l'effet de l'intégration des activités de la logistique inverse sur la chaîne traditionnelle. Leur étude

commence par développer un modèle MILP qui minimise les coûts totaux d'une chaîne intégrée et ensuite par une analyse paramétrique.

2.3.1.2 Modèles déterministes multi-objectifs

L'objectif de ces modèles est multiple, le tableau 2.4 récapitule les différentes propriétés de chaque modèle. Krikke *et al.* (2003) proposent un modèle MILP multi-objectifs qui aide simultanément à la détermination de la structure du produit et la configuration du réseau d'une chaîne logistique intégrée en boucle fermée avec quatre échelons : les fournisseurs, les sites hybrides de fabrication/remise à neuf et les sites de recyclage, les sites de distribution et les sites d'inspection, réparation et désassemblage et les clients. Le modèle minimise les coûts, l'énergie et les déchets résiduels. La conclusion la plus importante de cet article est que l'optimalité du système dépend du taux et de la qualité des retours. En fait, dans cette étude de cas, les impacts de ces deux facteurs dépassent ceux de la conception des produits et de la structure du réseau logistique.

Pishvaee, Farahani et Dullaert (2010) développent un modèle MILP multi-objectifs et statique pour la configuration d'une chaîne logistique de production d'un seul produit. Trois échelons sont distingués : les sites hybrides de fabrication/remise à neuf, les sites d'enfouissement, les sites de distribution, les sites hybrides de distribution/collecte, et les sites des clients. Le modèle permet aussi l'augmentation de capacités des sites.

Salema *et al.* (2010) présentent un modèle MILP dynamique qui détermine simultanément les décisions stratégiques de configuration des sites et les décisions de planification du stock, production et distribution dans une chaîne logistique de production/récupération de plusieurs produits. Les auteurs adoptent la théorie des graphes en modélisant les sites par des nœuds et les flux par des arcs.

Chaabane *et al.* (2012) proposent un modèle MILP dynamique et multi-objectifs, basé sur l'approche d'analyse du cycle de vie en vue de la conception et la planification d'une chaîne logistique intégrant le recyclage. Plusieurs produits et quatre échelons sont considérés : les fournisseurs, les sites de production et les sites de recyclage, les sites de distribution et les sites des clients. Le modèle permet le choix de la technologie de production et du mode de transport. Il établit aussi le lien avec le système d'échange d'émissions sous différentes limites d'émission de carbone prédefinies et impose des contraintes pour le recyclage des produits en fin de vie.

Tableau 2.4 – Modèles déterministes multi-objectifs

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision							
			Multi-produits	Multi-périodes	Localisation des sites	Affectation des flux	Colocalisation	Quantités des flux	Niveau du stock	Sélection de capacité
Krikke <i>et al.</i> (2003)	MIP	Min. coûts Min. énergie Min. déchets			•	•		•		
Pishvaee <i>et al.</i> (2010)	MIP	Min. coûts Max. réactivité			•	•	•	•		
Neto <i>et al.</i> (2008)	MILP	Min. coûts Min. impact environnemental			•	•		•		
Chaabane <i>et al.</i> (2012)	MILP	Min. coûts Min. CO ₂	•	•	•	•		•	•	•
Ghayebloo, Tarokh, Venkatadri et Diallo (2015)	MILP	Max. profit Max. fiabilité + recyclabilité			•	•		•	•	

2.3.2 Modèles stochastiques

Les modèles stochastiques se distinguent par leur aptitude à tenir compte de la nature aléatoire des paramètres mis en jeu dans la formulation du problème.

2.3.2.1 Modèles stochastiques mono-objectif

Le tableau 2.5 résume les principales caractéristiques des modèles stochastiques ayant un seul objectif. Pour illustrer le degré d'incertitude lié à la variabilité de la demande et de la quantité des retours, les auteurs ont utilisé plusieurs scénarios. Salema, Barbosa-Povoa et Novais (2007) présentent un modèle de programmation linéaire stochastique (SMIP) pour la conception d'une chaîne logistique intégrée dans une boucle fermée.

Chouinard, d'Amours et Aït-Kadi (2008) développent un modèle SMIP pour la conception d'une chaîne logistique de distribution/récupération des fauteuils roulants, intégrée en quatre échelons : les fournisseurs, les sites de stockage et les sites de traitement des produits utilisés, les sites hybrides de distribution/collecte et les sites de clients.

Tableau 2.5 – Modèles stochastiques mono-objectif

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision									
			Multi-produits	Multi-périodes	Localisation des sites	Affectation des flux	Colocalisation	Quantités des flux	Niveau du stock	Sélection de capacité	Mode du transport	Sélection de technologie
Salema <i>et al.</i> (2007)	SMIP	Min. coûts	•		•	•		•				
Listes (2007)	SMIP	Min. coûts		•	•			•				
Chouinard <i>et al.</i> (2008)	SMIP	Min. coûts	•		•	•		•				
Pishvaee, Jolai et Razmi (2009)	SMIP	Min. coûts			•	•		•				
Lee et Dong (2009)	SMNIP	Min. coûts	•	•	•	•		•				
El-Sayed <i>et al.</i> (2010)	SMIP	Max. profit	•		•	•		•	•			
Pishvaee, Rabbani et Torabi (2011)	RMIP	Min. coûts	•		•	•		•				
Zeballos <i>et al.</i> (2012)	SMIP	Max. profit	•	•	•	•		•				
De Rosa, Gebhard, Hartmann et Wollenweber (2013)	RMIP	Min. coûts		•	•	•		•		•		

Tableau 2-5 – Modèles stochastiques mono-objectif (suite)

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision							
			Multi-produits	Multi-périodes	Localisation des sites	Affectation des flux	Colocalisation	Quantités des flux	Niveau du stock	Sélection de capacité
Özceylan et Paksoy (2013b)	FMIP	Min. coûts	•	•	•			•		
Jindal et Sangwan (2014)	FMIP	Max. profit	•		•	•		•		
Khatami, Mahootchi et Farahani (2015)	SMIP	Min. coûts	•	•	•			•	•	•

Le modèle étudie les impacts des incertitudes liées à la demande et la quantité et la qualité des retours. Lee et Dong (2009) présentent un modèle SMIP dynamique. Leur modèle considère plusieurs produits pour la conception d'une chaîne logistique intégrant la logistique inverse en trois échelons : les sites hybrides de fabrication/récupération, les sites de distribution, les sites de collecte et les sites hybrides de distribution/collecte et les sites des clients.

El-Sayed *et al.* (2010) présentent un modèle SMIP pour concevoir une chaîne logistique intégrée en trois échelons : les fournisseurs, les sites hybrides de fabrication/remise à neuf, les sites de distribution, redistribution, désassemblage et d'élimination finale et les clients. L'objectif de leur modèle est de maximiser le profit total de la chaîne d'approvisionnement.

Zeballos *et al.* (2012) développent un modèle SMIP pour inclure l'incertitude liée à la quantité et la qualité des retours. Leur modèle est une extension du modèle de Salema *et al.* (2010).

Ramezani, Bashiri et Tavakkoli-Moghaddam (2013) développent un modèle SMIP pour la conception d'une chaîne logistique intégrée en quatre échelons : les fournisseurs, les sites hybrides de fabrication/remise à neuf, les sites de distribution, les sites de collecte,

les sites hybrides de distribution/collecte et les sites d'enfouissement et les sites des clients. L'objectif de leur modèle est triple : la maximisation du profit total, la maximisation du niveau de service des deux chaînes avant et inverse et la minimisation des défauts des matières premières acquises (maximisation de la qualité des matériaux achetés).

Khatami *et al.* (2015) ont formulé un modèle SMIP, multi-produits, multi-périodes pour la conception d'un réseau logistique intégrant les usines, les centres de distribution, les détaillants et les centres de collecte, les centres de remise en neuf et les centres d'élimination. Leur modèle tient compte des décisions concernant l'expansion de la capacité des centres de remise à neuf et le niveau des stocks ainsi que l'incertitude sur la demande et la quantité de retours.

Pishvaee *et al.* (2009) présentent un modèle stochastique pour la conception d'une chaîne logistique composée de trois échelons : les sites de fabrication et de récupération, les sites hybrides de distribution/collecte et les sites d'élimination et les sites des clients. Pishvaee *et al.* (2011) proposent une autre alternative basée sur l'approche d'optimisation robuste (l'effet du pire cas). Leur modèle comprend trois échelons : les sites de récupération des produits utilisés, les sites de collecte/inspection, les sites de distribution des produits valorisés, les sites d'élimination, les sites des clients pour les produits récupérés et les sites d'acquisition des produits inutilisés.

De Rosa *et al.* (2013) ont développé un modèle de programmation mixte en nombres entiers robustes (RMIP) pour étudier le problème de localisation des sites de fabrication, distribution et de collecte des retours, y compris l'allocation de la production, l'incertitude concernant la demande et les retours, la localisation et l'ajustement flexible de capacité. Ils ont conclu que leur approche soutient l'évaluation de la flexibilité du réseau logistique indépendamment du sens des flux sous incertitude.

Özceylan et Paksoy (2013b) ont étendu leur modèle déterministe (Ozceylan et Paksoy, 2012) à un modèle de programmation mixte en nombres entiers et floue (FMIP) qui tient en compte l'incertitude sur la capacité, les objectifs, les contraintes de la demande et le taux de retour.

2.3.2.2 Modèles stochastiques multi-objectifs

En plus des paramètres incertains, ces modèles s'attardent à plus d'un objectif. Le tableau 2.6 résume les principales caractéristiques de ces modèles.

Amin et Zhang (2013) développent un modèle stochastique multi-objectifs pour configurer un réseau de CLBF simple.

Ramezani *et al.* (2013) présentent un modèle stochastique et triple objectifs (profit, qualité et réactivité) pour la configuration du réseau de CLBF, composé de trois échelons au niveau de la chaîne régulière (fournisseurs, usines et centres de distribution) et de deux échelons de la chaîne inverse (centres de collecte et centres d'élimination).

Özkir et Basligil (2013) proposent un modèle d'optimisation floue pour formuler le problème de conception de CLBF avec diverses options de récupération. Le modèle proposé cherche à maximiser le profit et à satisfaire de la clientèle.

Tableau 2.6 – Modèles stochastiques multi-objectifs

Article	Type de modèle	Objectif	Variables de décision									
			Multi-produits	Multi périodes	Localisation des sites	Affectation des flux	Colocalisation	Quantités des flux	Niveau du stock	Sélection de capacité	Mode du transport	Sélection de technologie
Ramezani <i>et al.</i> , 2013	SMIP	Max. profit Max. service Min. défauts matière première	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Amin et Zhang (2013)	SMIP	Min. coûts Max. produits et technologies vertes	•	•	•	•		•				
Özkir et Basligil, 2013	FMIP	Max. satisfaction en prix Max. satisfaction en demande Max. profit total	•	•	•	•	•	•				

2.3.3 Synthèse de la revue de la littérature

Ce chapitre a dressé un panorama sur deux volets : la logistique inverse et les modèles mathématiques de conception des chaînes logistiques en boucle fermée.

La revue de la littérature sur le premier volet révèle que la logistique inverse est un système complexe qui diffère grandement de la chaîne logistique classique. Ainsi, la récupération de la valeur résiduelle des produits en fin de vie implique l'enlèvement de trois interdépendantes contraintes, à savoir :

- l'acquisition d'une quantité suffisante de produits en fin de vie avec une bonne qualité et au bon moment possible;
- la sélection des options optimales de traitement dépend de différents critères économiques, techniques et environnementaux;

- assurer des débouchés internes ou des marchés externes pour les produits récupérés et leurs constituants.

La figure 2.4 illustre que seulement la considération simultanée de ces trois contraintes permet la récupération optimale de la valeur résiduelle des produits en fin d'utilisation.

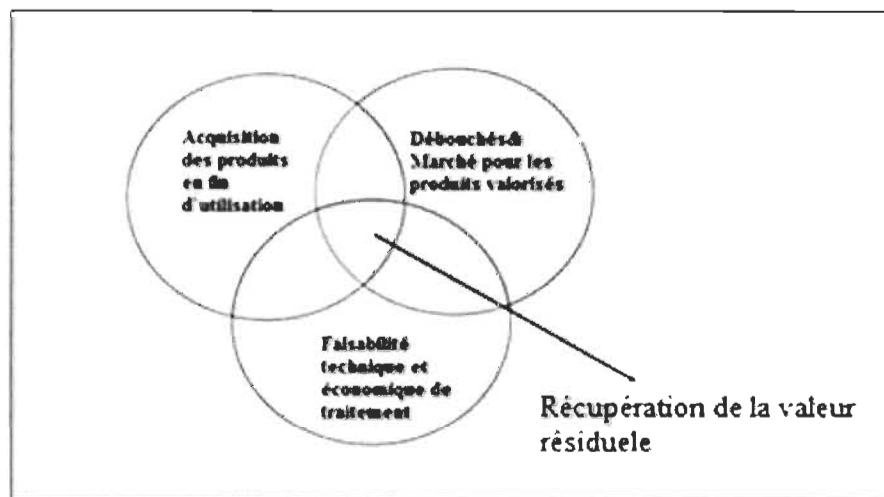


Figure 2.4 – Récupération de la valeur résiduelle des produits en fin de vie

En guise de conclusion, il paraît clair, à la revue de ce volet, que l'intégration des activités de la logistique inverse des produits en fin de vie n'est pas une tâche facile mais qu'elle nécessite la prise de décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles pour chacun des processus d'acquisition, de traitement et de redistribution.

La sélection des options de traitement optimales des produits récupérés est une optimisation multicritères. Ces options auront alors une influence importante sur la structure et la profitabilité du réseau, intégrant la logistique inverse à la chaîne logistique régulière. Il s'agit alors d'analyser la situation de l'entreprise focale et ses partenaires d'affaires afin de pouvoir prendre des décisions stratégiques et tactiques permettant d'atteindre au mieux les performances économiques et environnementales escomptées.

La revue de la littérature sur le deuxième volet indique qu'un intérêt grandissant est porté à la conception des réseaux logistiques intégrés en boucle fermée (figure 2.4) et les principales conclusions sont comme suit.

- Les modèles déterministes mono-objectif et les modèles stochastiques mono-objectif représentent près de 80 % de la totalité des modèles proposés dans la littérature.
- Les modèles multi-objectifs sont encore rares par rapport aux modèles mono-objectifs; ils représentent près de 20 % de la totalité des modèles recensés.

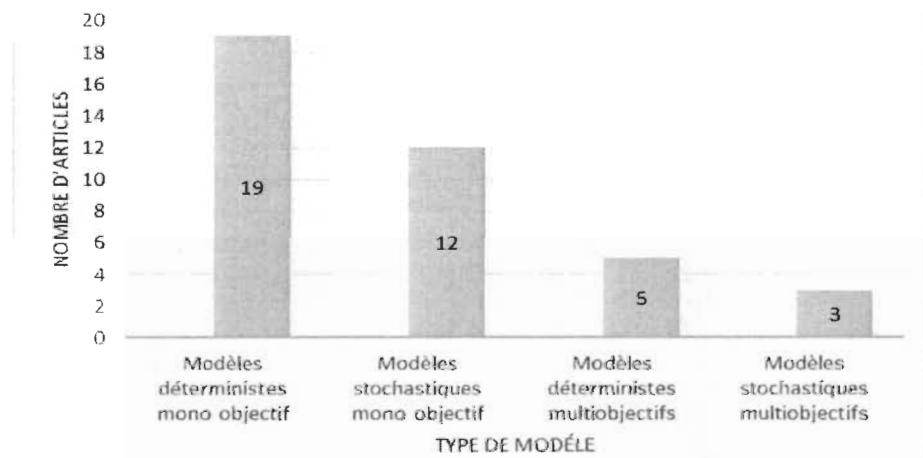


Figure 2.5 – Classification des modèles recensés

En dehors des variables de décision classiques, peu de variables de décision spécifiques sont considérées dans les modèles revues (figure 2.5). Ces décisions sont :

- la considération des décisions d'acquisition proactive afin d'assurer une quantité économique des retours et de contrôler relativement leur qualité est abordée par un seul article (Keyvanshokoo et al., 2013);
- la modélisation de la disposition des retours comme variable de décision est absente dans la littérature. Cela peut être expliqué par la complexité de cette décision et qui

est due principalement à la difficulté des prévisions de la quantité, de la qualité et du temps de retour.

- les décisions stratégiques relatives à la sélection des technologies de fabrication et à la sélection des modes de transport ne sont considérées que par le travail de Chaabane *et al.* (2012).
- la colocalisation des sites de la logistique inverse et ceux de la chaîne logistique classique est partiellement abordée. À l'exception de Ko et Evans (2007) et Pishavée *et al.*, 2010 et Keyvanshokooh *et al.* (2013) qui ont modélisé la colocalisation des centres distribution et de collecte, aucun article n'étudie en plus de la sélection des sites hybrides de distribution/collection, la sélection des sites hybrides.

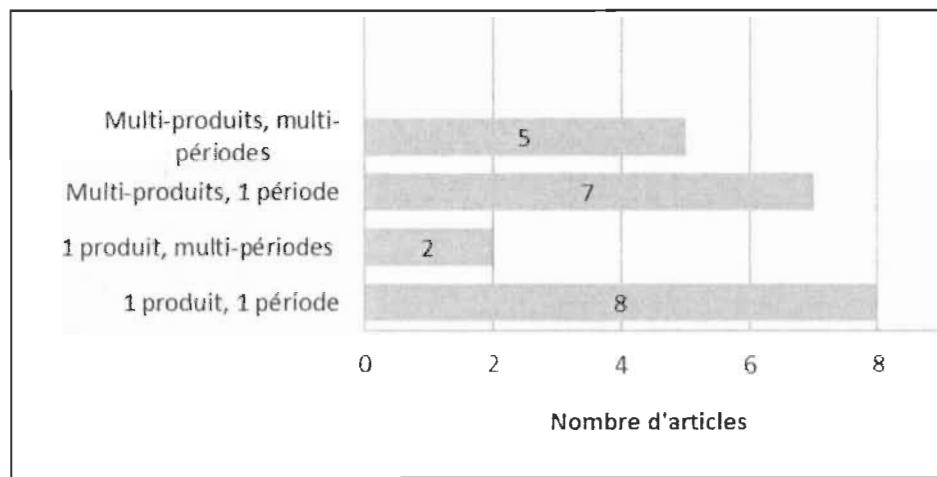


Figure 2.6 – Les variables de décision spécifiques prises en considération

En conclusion de ce chapitre, l'acquisition, le traitement et la redistribution des produits valorisés sont considérés comme les trois contraintes majeures associées à la mise en place d'une chaîne logistique inverse économiquement viable. D'autre part, malgré l'apparition de nombreux modèles mathématiques pour la conception des réseaux de chaînes logistiques en boucle fermée dites « vertes », les décisions stratégiques spécifiques (colocalisation des sites écoconception de produits, choix de technologies de fabrication et choix de modes de transport) sont peu abordés.

2.3.4 Contributions de la thèse

À l'issue de l'analyse de la littérature et afin de combler certaines lacunes dans ce domaine de recherche, deux contributions sont proposées pour répondre à l'objectif principal de cette thèse.

Contribution 1. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la configuration du réseau logistique en boucle fermée qui s'appuie sur la colocalisation en tant que décision stratégique qui permet la réduction des coûts fixes du réseau.

Contribution 2. Proposition d'une approche intégrant les décisions stratégiques de conception du réseau logistique en boucle fermée et les décisions tactiques de récupération de la valeur des produits retournés en fin de vie tout en évitant la complexité qui peut survenir lors de la modélisation.

2.3.5 Méthodologie suivie

La méthodologie globale suivie pour réaliser les contributions introduites précédemment est illustrée par la figure 2.7.

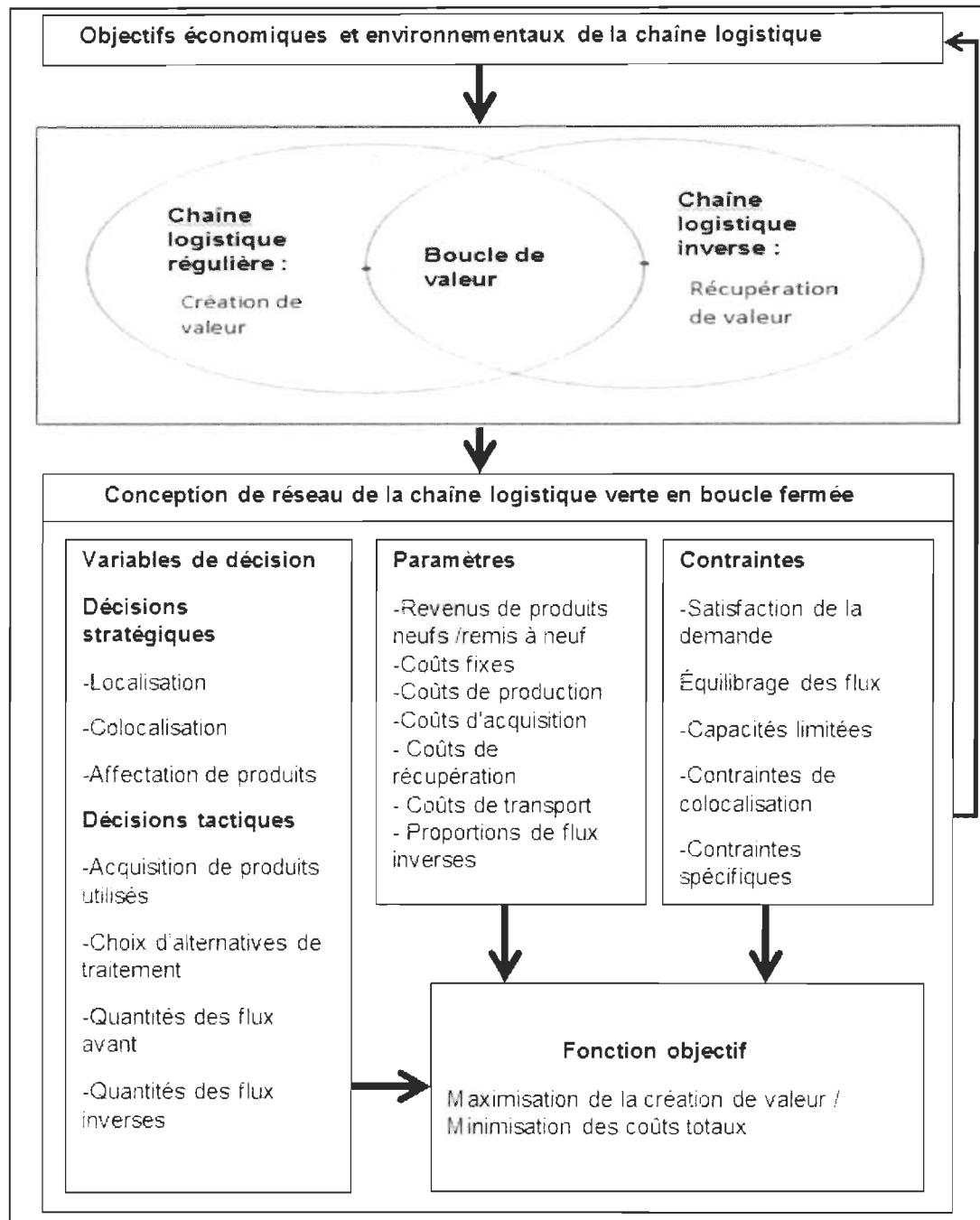


Figure 2.7 – Méthodologie suivie

La programmation mathématique a été choisie comme approche très répandue pour la modélisation des problèmes stratégiques dans lesquels un nombre important de variables de décision entrent en jeu.

Dans la présente méthodologie, le processus décisionnel de conception de réseau de la chaîne logistique verte débute par la définition des objectifs stratégiques ainsi que la forme que peut prendre le réseau logistique à la suite de l'intégration des activités de la logistique inverse avec celles de la chaîne logistique classique. Ensuite vient l'étape de l'optimisation mathématique de la structure du réseau logistique. Après évaluation des performances obtenues, des actions d'amélioration sont ainsi déclenchées jusqu'à l'atteinte des objectifs voulus.

La première contribution consiste à exploiter l'avantage de partage des ressources dans un réseau logistique de fabrication/remise à neuf. En plus, afin de maîtriser la gestion des retours, la collecte des produits en fin de vie est effectuée par les détaillants qui sont les mieux adéquats vu leur position dans la chaîne logistique (Savaskan, Bhattacharya et Van Wassenhove, 2004). La programmation mathématique est utilisée en se basant sur le travail de Pishvaaee *et al.*, (2010), mais avec deux extensions : i) l'adoption d'une stratégie proactive d'acquisition des produits en fin de vie en établissant un accord avec les détaillants, et ii) la prise de décision sur la colocalisation des sites appartenant aux deux premiers échelons du réseau logistique (sites hybrides de fabrication/remise à neuf et de distribution/collecte). La formulation du problème abordé permet de contourner la complexité associée aux termes non linéaires de la fonction objective.

La deuxième contribution porte sur la modélisation des décisions de disposition des retours lors de la conception de réseau logistique en boucle fermée. Dans un premier temps, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes est proposé pour la configuration d'un réseau logistique avec diverses alternatives de traitement. Le cadre conceptuel de ce modèle est proche du travail de Özkip et Basligil (2012) mais avec deux points de différence : i) l'acquisition proactive des produits en fin de vie, et ii) la considération des centres hybrides de fabrication/remise à neuf. Enfin, la disposition des produits en fin de vie est intégrée comme variable de décision dans le problème de configuration de la chaîne logistique en boucle fermée.

CHAPITRE 3 – APPROCHE BASÉE SUR LA COLOCALISATION POUR LA CONCEPTION D'UN RÉSEAU LOGISTIQUE DE FABRICATION-REMISE À NEUF

3.1 Introduction

La conception du réseau logistique intégrant la logistique inverse est une question cruciale en raison de son impact sur les performances économiques et environnementales. En plus des décisions classiques de localisation/allocation des installations, des décisions supplémentaires doivent être adressées pour assurer la viabilité économique du réseau logistique.

La première question se rapporte à la coordination et au partage des ressources existantes entre les activités avant et arrière (Wang et Hsu, 2010). Par exemple, les installations de traitement hybrides présentent des économies de coûts et la réduction de la pollution comme suite au partage des moyens de transport et des infrastructures.

Le second problème est lié aux décisions concernant l'acquisition anticipée qui permet un meilleur contrôle de la quantité, du temps et relativement la qualité des produits en fin de vie (Guide *et al.*, 2003). Une autre question est de choisir le meilleur canal de collecte (Savaskan *et al.*, 2004) : la collecte par le fabricant, par un prestataire ou par le détaillant.

3.2 Synthèse de la revue de littérature

La revue de littérature sur la conception des réseaux en boucle fermée indique que les travaux existants ont accordé très peu d'intérêt à la viabilité économique de la chaîne logistique en boucle fermée. Ainsi, les modèles proposés dans la littérature considèrent la logistique inverse comme un ensemble de coûts à minimiser. Les auteurs s'attaquent

directement à la programmation mathématique pour examiner la configuration du réseau sans s'attarder aux spécificités de la logistique inverse des produits en fin de leur cycle de vie. Le tableau 2.7 résume les caractéristiques travaux les plus pertinents à l'objectif de ce chapitre. La colocalisation des sites de la logistique inverse et ceux de la chaîne logistique classique est partiellement abordée. À l'exception de Ko et Evans (2007), Pishvaaee *et al.* (2010) et Keyvanshokoh *et al.* (2013), qui ont modélisé la colocalisation des centres distribution et de collecte, aucun article n'étudie en plus de la sélection des sites hybrides de distribution/collection, la sélection des sites hybrides de fabrication/remise à neuf.

Tableau 3.1 – Revue de littérature sur le premier objectif de recherche

Articles	Définition du problème				Approche de modélisation	Objectifs	Variables de décision						
	Multi-produits	Multi-périodes	Restriction sur les capacités	Multi-échelons			MILP	MINLP	Coûts	Profit	Localisation	Colocalisation	Quantités de flux
Ko et Evans (2007)	•	•	•			•	•		•	•	•	•*	•
Pishvaaee <i>et al.</i> (2010)		•	•				•		•	•	•*	•	
Amin and Zhang (2012)	•		•	•				•	•	•		•	
Keyvanshokoh <i>et al.</i> (2013)	•	•	•	•	•	•		•	•	•		•	
John and Sridharan (2013)		•	•		•		•					•	
Chen, Chan et Chung (2015)			•		•				•	•		•	
Ce chapitre	•		•	•	•	•			•	•	•	•	

* Colocalisation partielle des sites de distribution et des sites de collecte.

Ainsi, ce chapitre propose un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes qui tient compte des aspects cités précédemment. Le reste du chapitre est organisé comme suit : la section 3.3 présente une description du problème étudié, la section 3.4 introduit le modèle mathématique, la section 3.5 présente les résultats et la section 3.6 est dédiée à la conclusion.

3.3 Définition du problème

Le problème étudié dans le présent chapitre est un réseau logistique intégrant la logistique inverse de remise à neuf à la chaîne logistique régulière. La représentation de la structure du réseau est illustrée par la figure 3.1. Les produits fabriqués dans les usines sont envoyés aux centres de distribution qui servent la demande des détaillants.

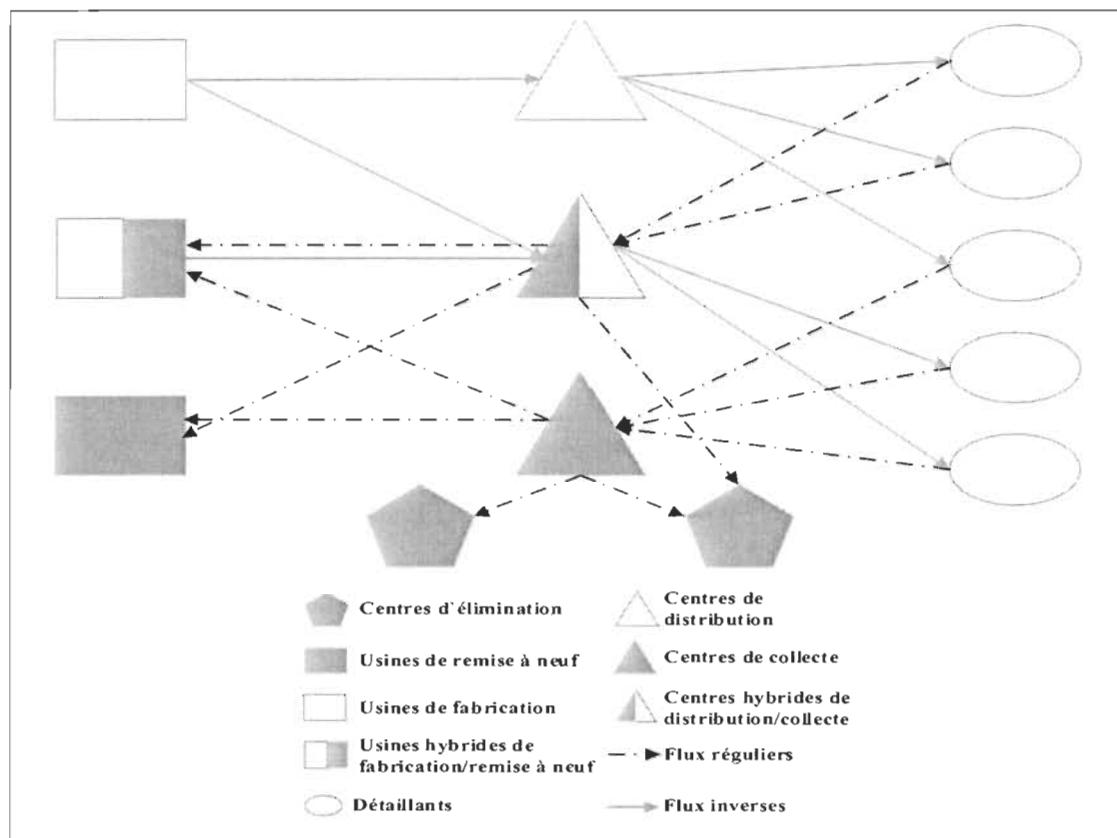


Figure 3.1 – Représentation de réseau logistique de fabrication/ remise à neuf

Pour assurer la profitabilité de la remise à neuf, une quantité suffisante de retours est assurée par une stratégie d'acquisition établie avec les détaillants. Les produits retournés aux centres de collecte sont inspectés et triés en deux groupes : les produits à remettre à neuf et les produits non récupérables. Le premier groupe sera envoyé à la remise à neuf des plantes tandis que le second groupe sera envoyé aux centres d'élimination

appropriés. Dans ce problème, nous considérons l'utilisation des installations hybrides comme décision à prendre.

Les hypothèses suivantes considérées dans la formulation du modèle sont :

- le modèle est multi-échelons et multi-produits;
- les produits remis à neuf sont considérés similaires aux nouveaux produits et ils sont vendus au même prix et dans le même marché;
- afin d'assurer une quantité suffisante de retours, une incitation financière est versée au détaillant pour chaque produit utilisé recueilli;
- les demandes de tous les détaillants sont déterministes et devraient être satisfaites;
- la quantité de retours de chaque détaillant est une fraction de sa précédente demande en produits neufs;
- sauf les fournisseurs et les centres d'élimination, toutes les autres installations ont des capacités limitées;
- les localisations potentiels, les capacités des installations et tous les paramètres sont prédéterminés.

3.4 Formulation du modèle

Notations

Ensembles et indices

- | | |
|---|--|
| I | Ensemble des sites potentiels pour la localisation des usines de fabrication,
$i \in I$. |
| L | Ensemble des sites potentiels pour la localisation des centres de remise à neuf, $l \in L$. |
| E | Ensemble des sites potentiels pour la localisation des usines hybrides de fabrication et de remise à neuf, $e \in E$, $E \subset I$, $E \subset L$. |
| J | Ensemble des sites potentiels pour la localisation des centres de distribution,
$j \in J$. |

K	Ensemble des sites potentiels pour la localisation des centres de collecte, $k \in K$.
F	Ensemble des sites potentiels pour la localisation des centres hybrides de distribution/collecte, $f \in F$, $F \subset J$, $F \subset K$.
N	Ensemble des zones fixes de détaillants, $n \in N$.
M	Ensemble sites fixes des centres d'élimination, $m \in M$.
P	Ensemble de produits, $p \in P$.

Paramètres

D_{np}	Demande du détaillant n pour le produit p .
α_p	Taux de retour du produit p .
β_p	Taux de remise à neuf du produit p .
FmP_i	Coût fixe pour l'ouverture d'une usine de fabrication au site i .
FrP_l	Coût fixe pour l'ouverture d'une usine de remise à neuf au site l .
FD_j	Coût fixe pour l'ouverture d'un centre de distribution au site j .
FC_k	Coût fixe pour l'ouverture d'un centre de collecte au site k .
GP_e	Économie de coût fixe associée à l'ouverture d'usine hybride de fabrication/de remise à neuf au site e .
GD_f	Économie de coût fixe associée à l'ouverture d'un centre hybride de distribution /collecte au site f .
$CAPM_{ip}$	Capacité de l'usine de fabrication i pour le produit p .
$CAPR_{lp}$	Capacité de l'usine de remise à neuf l pour le produit p .
$CAPD_{jp}$	Capacité de centre de distribution j pour le produit p .
$CAPC_{kp}$	Capacité du centre de collecte k pour le produit p .
CAq_{pn}	Prix unitaire d'acquisition du produit p du détaillant n .
CP_{pi}	Coût unitaire de fabrication du produit p dans l'usine i .
$CREm_{pl}$	Coût unitaire de remise à neuf du produit p dans l'usine l .

$T_{IJ_{p j}}$	Coût unitaire de transport du produit p de l'usine de fabrication i au centre de distribution j .
$TL_{J_{plj}}$	Coût unitaire de transport du produit p de l'usine de remise à neuf l au centre de distribution j .
$T_{JN_{p n}}$	Coût unitaire de transport du produit p du centre de distribution j au détaillant n .
$T_{NK_{pnk}}$	Coût unitaire de transport du produit p du détaillant n au centre collecte k .
$TK_{L_{pkl}}$	Coût unitaire de transport du produit p du centre de collecte k à l'usine de remise à neuf.
TKM_{pkm}	Coût unitaire de transport du produit p du centre de collecte k au centre d'élimination m .

Variables de décision

A_i	Variable binaire égale à 1 si une usine de fabrication est ouvert au site i , 0 sinon.
B_l	Variable binaire égale à 1 si une usine de remise à neuf est ouvert à site l , 0 sinon.
C_j	Variable binaire égale à 1 si un centre de distribution est ouvert au site j , 0 sinon.
D_k	Variable binaire égale à 1 si un centre de collecte est ouvert au site k , 0 sinon.
$X_{IJ_{p j}}$	Quantité de produit p expédiée de l'usine de fabrication i au centre de distribution j .
$XL_{J_{plj}}$	Quantité de produit p expédiée de l'usine de remise à neuf l au centre de distribution.
$X_{JN_{p n}}$	Quantité de produit p expédiée du centre de distribution j au détaillant n .
$X_{NK_{pnk}}$	Quantité de produit p expédiée du détaillant n au centre de collecte k .
$X_{KL_{pkl}}$	Quantité de produit p expédiée du centre de collecte k à l'usine de remise à neuf.
$X_{KM_{pkm}}$	Quantité de produit p expédiée du centre de collecte k au centre d'élimination m .

Fonction Objectif = minimisation des coûts fixes d'ouverture + coûts de transport – économies de la colocation des installations + coûts de production + coûts de remise à neuf + coûts d'acquisition de produits utilisés + coûts d'inspection d'élimination + coûts d'élimination.

Avant de présenter à la formulation mathématique, la description verbale du modèle est comme suit :

- contraintes de satisfaction de la demande;
- contraintes d'équilibrage des flux;
- contraintes des capacités;
- contraintes de colocalisation;
- contraintes de non-négativité et des variables binaires.

Les notations suivantes sont utilisées dans la formulation du modèle.

À partir des hypothèses, des indices, des paramètres et des variables de décision ci-dessus, le problème peut être formulé, comme un programme non linéaire en nombres entiers mixtes (MINLP).

La fonction objectif qui minimise les coûts totaux (1) est :

$$\begin{aligned}
 & \sum_t CP_t A_t + \sum_l FrR_l B_l + \sum_i FD_i C_i + \sum_k FC_k D_k - \sum_s GP_s A_s B_s - \sum_f GD_f C_f D_f - \\
 & \sum_p \sum_i \sum_j CM_{pij} XIJ_{pij} + \sum_p \sum_l \sum_j CR_{plj} XLJ_{plj} - \\
 & \sum_p \sum_i \sum_j TCIJ_{pij} XIJ_{pij} + \sum_p \sum_l \sum_j TLJ_{plj} XLJ_{plj} + \sum_p \sum_n TJN_{pin} XJN_{pin}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_p \sum_n \sum_k TNK_{pnk} XNK_{pnk} + \sum_p \sum_k \sum_l TKL_{pkl} XKL_{pkl} + \sum_p \sum_k \sum_l TKM_{pkm} XKM_{pkm} - \\
& \sum_p \sum_n \sum_k CA_{pn} XNK_{pnk} + \sum_p \sum_n \sum_k CIns_{pn} XNK_{pnk}
\end{aligned}$$

Sujet aux contraintes :

$$\sum_j XJN_{pjn} = D_{np} \quad \forall n, p \quad (2)$$

$$\sum_k XNK_{pnk} = \alpha_p D_{np} \quad \forall n, p \quad (3)$$

$$\sum_i XIJ_{pij} + \sum_l XLJ_{plj} = \sum_k XJN_{pjn} \quad \forall j, p \quad (4)$$

$$\sum_l XKL_{pkl} + \sum_m XKM_{pkm} = \sum_n XNK_{pnk} \quad \forall k, p \quad (5)$$

$$\sum_i XKL_{pkl} = \beta_p \sum_n XNK_{pnk} \quad \forall k, p \quad (6)$$

$$\sum_m XKM_{pkm} = (1 - \beta_p) \sum_n XNK_{pnk} \quad \forall k, p \quad (7)$$

$$\sum_i XIJ_{pij} \leq A_i CAPM_{ip} \quad \forall i, p \quad (8)$$

$$\sum_l XLJ_{plj} \leq B_l CAPR_{lp} \quad \forall l, p \quad (9)$$

$$\sum_l XKL_{pki} \leq B_l CAPR_{lp} \quad \forall l, p \quad (10)$$

$$\sum_i XIJ_{pij} + \sum_l XLJ_{plj} \leq D_j CAPDis_{jp} \quad \forall j, p \quad (11)$$

$$\sum_n XNK_{pnk} \leq C_k CAPCol_{kp} \quad \forall k, p \quad (12)$$

$$\sum_m XKM_{pkm} + \sum_l XKL_{pkl} \leq C_k CAPCol_{kp} \quad \forall j, p \quad (13)$$

$$A_i, B_l, C_j, D_k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, l, k, p \quad (14)$$

$$X_{IJ_{plj}}, X_{LJ_{pli}}, X_{JK_{pjk}}, X_{NK_{pnk}}, X_{KL_{pkl}}, X_{KM_{pkm}} \geq 0 \quad \forall i, j, l, k, n, p \quad (15)$$

La fonction objectif (1) minimise les coûts totaux de la chaîne logistique en boucle fermée, y compris les coûts fixes d'ouverture, les économies de coûts liées à l'intégration des installations au même endroit, les coûts de fabrication, les coûts de remise à neuf, les frais de transport, les coûts d'acquisition des produits utilisés par les détaillants, les frais d'inspection et les coûts d'élimination. La contrainte (2) veille à ce que la demande de chaque détaillant soit satisfaite. La contrainte (3) stipule que les produits retournés à partir de chaque détaillant doit être inférieure ou égale à une fraction préfixée de la demande des détaillants. Les contraintes (4), (5), (6) et (7) assurent l'équilibre des flux. La contrainte (8) assure la limitation de la capacité de fabrication de l'usine. Les contraintes (9) et (10) assurent le respect de la capacité de l'usine de remise à neuf. La contrainte (11) stipule que la quantité de produits utilisés expédiée du détaillant de centre/d'inspection de collecte doit être égale ou inférieure à sa capacité. Les contraintes (12) et (13) indiquent le respect du centre de collecte/inspection. Les contraintes (14) et (15) appliquent les exigences de non-négativité et des variables binaires.

Linéarisation du modèle MINLP

La multiplication de deux variables binaires dans la fonction objective implique deux termes non linéaires : $\sum_e GP_e A_e B_e$ et $\sum_f GD_f C_f D_f$.

Pour éviter cette complexité, le modèle sera linéarisé par le remplacement de la multiplication de deux variables binaires par une seule variable binaire. Ainsi, la reformulation de la fonction objective est la suivante :

$$Y_e = A_e B_e, \quad Y_e \in \{0,1\}, \quad \forall e \in E$$

$$Z_f = C_f D_f, \quad Z_f \in \{0,1\}, \quad \forall f \in F$$

Min. coûts totaux =

$$\begin{aligned} & \sum_i CP_i A_i + \sum_l FrR_l B_l + \sum_j FD_j C_j + \sum_k FC_k D_k - \sum_e GP_e Y_e - \sum_t GD_t Z_t + \\ & \sum_p \sum_i \sum_l CM_{pi} XII_{pli} + \sum_p \sum_i \sum_l CR_{pli} XLJ_{pli} + \sum_p \sum_i \sum_l TCII_{pli} XII_{pli} \\ & + \sum_p \sum_i \sum_l TLJ_{pli} XLJ_{pli} + \sum_p \sum_i \sum_n TJN_{pin} XJN_{pin} + \sum_p \sum_n \sum_k TNK_{pnk} XNK_{pnk} + \\ & \sum_p \sum_k \sum_l TKL_{pkl} XKL_{pkl} + \sum_p \sum_k \sum_l TKM_{pkm} XKM_{pkm} \\ & + \sum_p \sum_n \sum_k CA_{pn} XNK_{pnk} + \sum_p \sum_n \sum_k CIns_{pn} XNK_{pnk} \end{aligned}$$

Quand une usine de fabrication et une usine de remise à neuf sont situées au même endroit : ($Y_e = A_e B_e = 1$),

cela implique que les deux usines de fabrication et des installations de remise à neuf devraient être ouvertes à cet endroit : $A_e = 1$ et $B_e = 1$

Avec le même raisonnement pour la colocation d'un centre de distribution et d'un centre de collecte/d'inspection. Pour assurer cette condition, les contraintes suivantes doivent être ajoutées au modèle :

$$A_s + B_s \geq 2Y_s \quad \forall s \in E \quad (16)$$

$$C_f + D_f \geq 2Z_f \quad \forall f \in F \quad (17)$$

La contrainte (16) assure que si une installation hybride est ouverte dans une zone e , les deux centres de distribution et de collecte doivent être ouverts à cette zone en même temps. Idem pour les usines de fabrication et de remise à neuf dans la contrainte (17).

3.5 Résultats

Afin d'illustrer la faisabilité du modèle proposé, un réseau logistique simple composé de trois usines potentielles de fabrication, deux usines potentielles de remise à neuf, trois centres de distribution, trois centres de collecte et quatre détaillants. Les autres paramètres sont générés suivant des distributions uniformes (annexe V). Le problème est résolu par LINGO 11.0, sur un ordinateur avec 3.2 GHz et 8 Go de RAM.

La solution optimale du réseau est la suivante :

- une usine de fabrication/de remise à neuf hybride situé dans le site 2;
- une usine de fabrication située au site 3;
- un centre de distribution au site 1 et un centre de distribution dans le site 2;
- un centre de collecte dans le site 1;
- un centre hybride de distribution/de collecte dans le site 2.

La solution optimale du problème considéré permet une économie de 48 000 \$ à la suite de la co-localisation d'une usine de fabrication avec une usine de remise à neuf et d'un centre de distribution avec un centre de collecte.

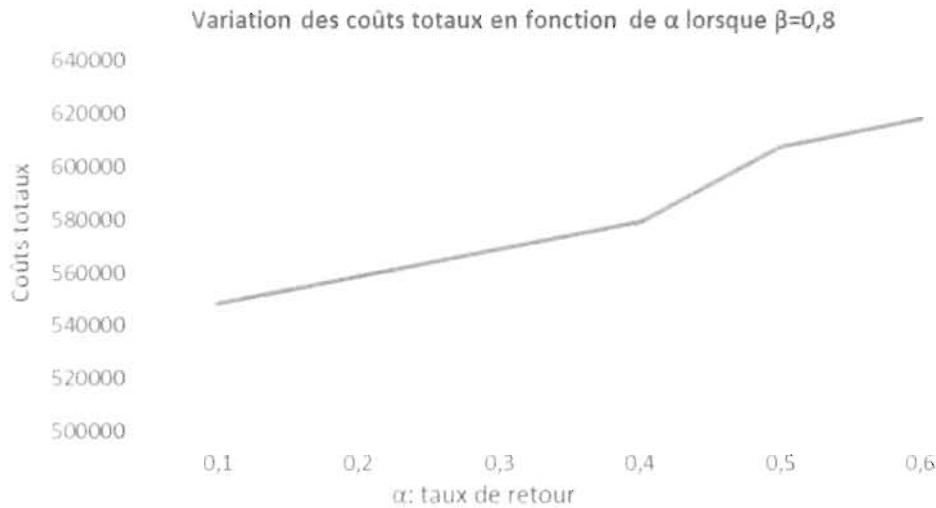


Figure 3.2 – Influence de la variation du taux de retours sur les coûts totaux

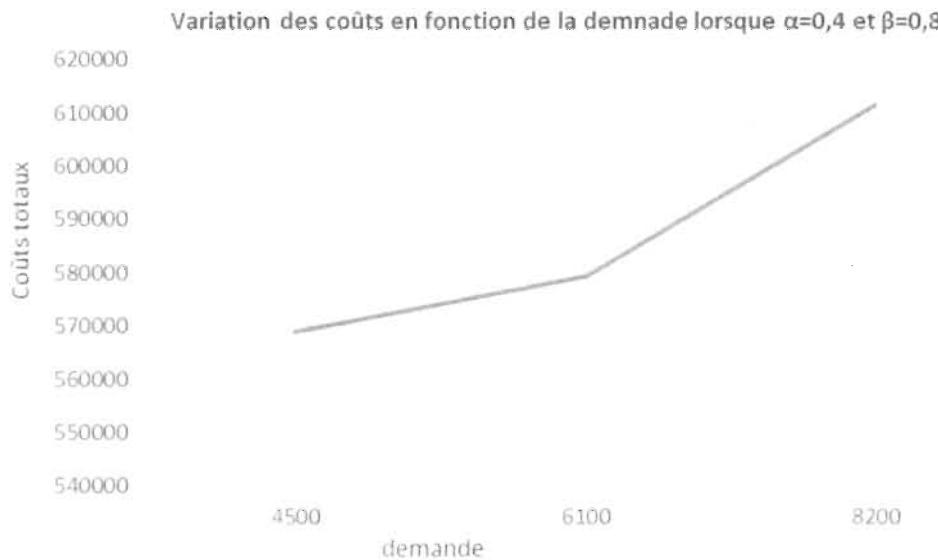


Figure 3.3 – Influence de la variation de la demande sur les coûts totaux

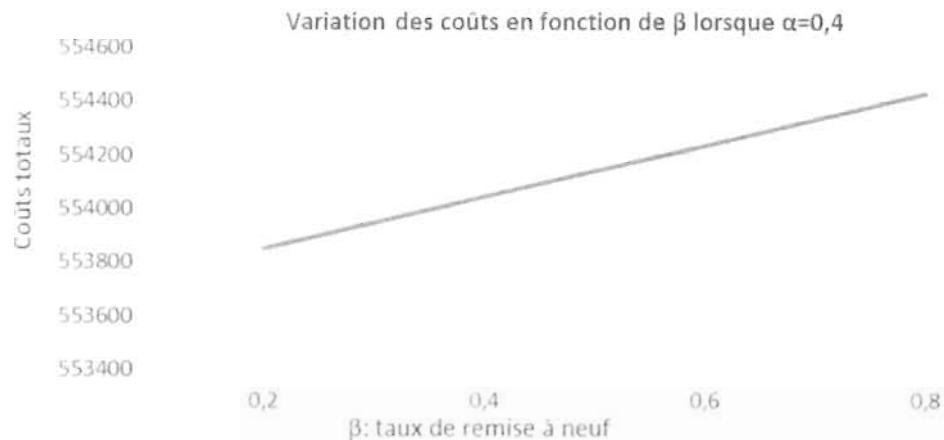


Figure 3.4 – Influence de la variation du taux de remise à neuf sur les coûts totaux

Comme illustré dans les figures 3.2 et 3.3, il est à remarquer qu'une augmentation de la demande ou de la proportion de produits retournés mènent à une augmentation du coût total du réseau logistique en boucle fermée. En outre, le coût total est plus sensible à la demande par rapport au taux de retours. Pour un taux fixe de retour des produits utilisés, les coûts totaux augmentent avec l'augmentation du taux de remise à neuf. Cette augmentation est logique vu que l'augmentation du nombre de produits remis à neuf. Cependant, vu les différents facteurs mis en jeu dans le processus de remise à neuf, il est très difficile d'expliquer l'ampleur de cette augmentation. La littérature met en évidence qu'en plus du degré de désassemblage, la qualité des composants des produits usagés a aussi un effet significatif sur les coûts de remise à neuf et sur le profit de la chaîne logistique en boucle fermée (Özkir et Başligil, 2012).

3.6 Conclusion

Dans cet article, le problème de colocalisation dans un réseau logistique de fabrication-remise à neuf en boucle fermée est modélisé par une approche de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes. Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée est un outil d'aide à la décision pour la conception de réseaux logistiques de remise à neuf qui permet d'exploiter l'économie d'échelle offerte par le partage des

infrastructures déjà existantes. La valeur ajoutée de cette approche est de considérer la décision de colocalisation au niveau de deux échelons du réseau au lieu de se limiter à la considération de centres hybrides de distribution/collecte (Ko et Evans, 2007; Pishvaee *et al.*, 2010).

Le gain généré par la décision de colocalisation dépend largement de la capacité des installations et de la quantité de produits retournés Ainsi, l'approche exploite les avantages économiques que peut offrir le détaillant vu son positionnement et sa relation directe avec les clients pour assurer la collecte de quantité suffisante de produits en fin de vie.

CHAPITRE 4 – APPROCHE INTÉGRÉE POUR LA CONFIGURATION D'UN RÉSEAU LOGISTIQUE EN BOUCLE FERMÉE AVEC PLUSIEURS ALTERNATIVES DE TRAITEMENT

4.1 Introduction

Au niveau de la chaîne logistique régulière, le processus de création de la valeur commence par l'approvisionnement en matières premières et composants, puis la fabrication et l'assemblage des produits finis et enfin, la distribution jusqu'aux clients finaux. Après un certain temps d'utilisation, chaque produit utilisé enferme une valeur résiduelle qui peut être exprimée par les bénéfices économiques et environnementaux générés par les options de récupération envisagées. Cependant, le choix des options optimales parmi un ensemble d'alternatives (réutilisation directe, réparation, remise à neuf, désassemblage sélectif des composants, recyclage d'une partie ou de tout le produit, etc.) est une décision multicritères dont les informations sur la quantité, la qualité et le temps de retour sont incertaines ou incomplètes.

Lors de la conception du réseau logistique en boucle fermée, l'identification des options de traitement envisagées est très importante puisqu'elle permet de savoir les boucles de valeur que va contenir le réseau logistique et, par conséquent, ses niveaux de performances économiques et écologiques. La majorité des modèles existants mettent l'accent sur la configuration du réseau intégré en boucle fermée et considèrent la logistique inverse comme un système de traitement des déchets dans lequel il n'y a aucun contrôle sur le retour approvisionnement. Ce chapitre explore le problème de conception d'un réseau logistique intégrant plusieurs alternatives de traitement des retours en fin de vie.

4.2 Synthèse de la revue de la littérature

En lien avec l'objectif de ce chapitre, la revue de la littérature présentée au chapitre 2 révèle que la plupart des modèles proposés sont axés uniquement sur les décisions de localisation/allocation et sur la minimisation des coûts comme objectif principal et ne remettent pas en cause la profitabilité des opérations de récupération pour le fabricant d'équipement d'origine et ses partenaires d'affaires. Le tableau 4.1 récapitule les caractéristiques des principaux modèles connexes.

Tableau 4.1 – Revue de littérature sur le deuxième objectif de recherche

Articles	Définition du problème					Approche de modélisation		Objectifs		Variables de décision			
	Multi-produits	Multi-périodes	Limitation des capacités	Multi-échelons	Acquisition proactive	Multi options de récupération	MILP	MINLP	Coûts	Profit	Autre	Localisation	Quantités de flux
Pishvacec <i>et al.</i> (2010)			•	•					•		•	•	•
Amin and Zhang (2012)	•		•	•						•		•	•
Özkir et Başligil (2012)	•	•	•	•	•	•				•		•	•
Keyvanshokoh <i>et al.</i> (2013)	•	•	•	•	•	•			•			•	•
John and Sridharan (2013)			•	•			•		•				•
Ce chapitre	•	•	•	•	•	•				•		•	•

À l'exception de Keyvanshokoh *et al.* (2013) qui ont étudié l'effet de l'acquisition anticipée des produits utilisés sur la récupération de valeur résiduelle et Özkir et Başligil (2012) qui ont abordé relativement le processus de récupération de valeur, il n'existe aucun travail dans la littérature qui traite explicitement le problème de récupération de valeur dans le contexte de conception de réseaux logistiques en boucle fermée.

Dans ce contexte, ce chapitre étudie le problème de disposition des produits utilisés dans le cadre d'un réseau logistique vert en boucle fermée. Ainsi, un modèle mathématique est proposé. En outre, contrairement à la pratique courante dans la littérature qui stipule que les retours par les clients sont considérés comme volontaires et estimés comme un pourcentage des demandes antérieures des produits neufs, une stratégie anticipée d'acquisition des retours est effectuée par les détaillants. En plus, dans un premier temps, une description du processus de disposition est fournie comme un ensemble de décisions prises séparément de décisions de conception du réseau logistique. Après un modèle de programmation en nombres entiers mixtes non linéaires dont les décisions de disposition sont prises conjointement avec les décisions de configuration du réseau logistique. Ce modèle est présenté à l'annexe II.

4.3 Définition du problème

Le problème étudié dans ce chapitre consiste à la configuration d'un réseau logistique en boucle fermée, comprenant des usines hybrides de fabrication/remise à neuf, des centres de distribution, les détaillants (zones des demandes de clients), des centres de collecte/désassemblage et des centres de recyclage. Deux types de demande sont considérés : la demande pour les produits neufs et la demande pour les produits remis à neuf. La principale différence entre les deux est que les nouveaux produits ont des prix plus élevés avec une garantie longue tandis que ceux remis à neuf ont des prix relativement plus bas avec une garantie limitée.

La figure 4.1 illustre une représentation générale du réseau logistique. Les centres de distribution sont responsables de satisfaire les demandes des détaillants. Les nouveaux produits sont fabriqués dans les usines en utilisant les réutilisables fournis par les centres de collecte/désassemblage. En l'absence de composants réutilisables, les usines peuvent se procurer ces composants chez des fournisseurs externes. Les produits récupérables

sont remis à neuf dans les mêmes usines de fabrication puis envoyés aux centres de distribution pour desservir la demande de produits remis à neuf.

Nous supposons qu'une quantité satisfaisante de retours se produit dans une zone. Les produits acquis de détaillants sont envoyés aux centres de collecte/désassemblage. Dans ces centres, les produits sont collectés et inspectés. La sélection d'alternatives appropriées parmi celles disponibles est effectuée au moyen de différents critères (qualité des composants, demande et bénéfice/coût de chaque alternative).

La figure 4.2 explique comment les alternatives de récupération sont choisies par le centre de collecte/désassemblage.

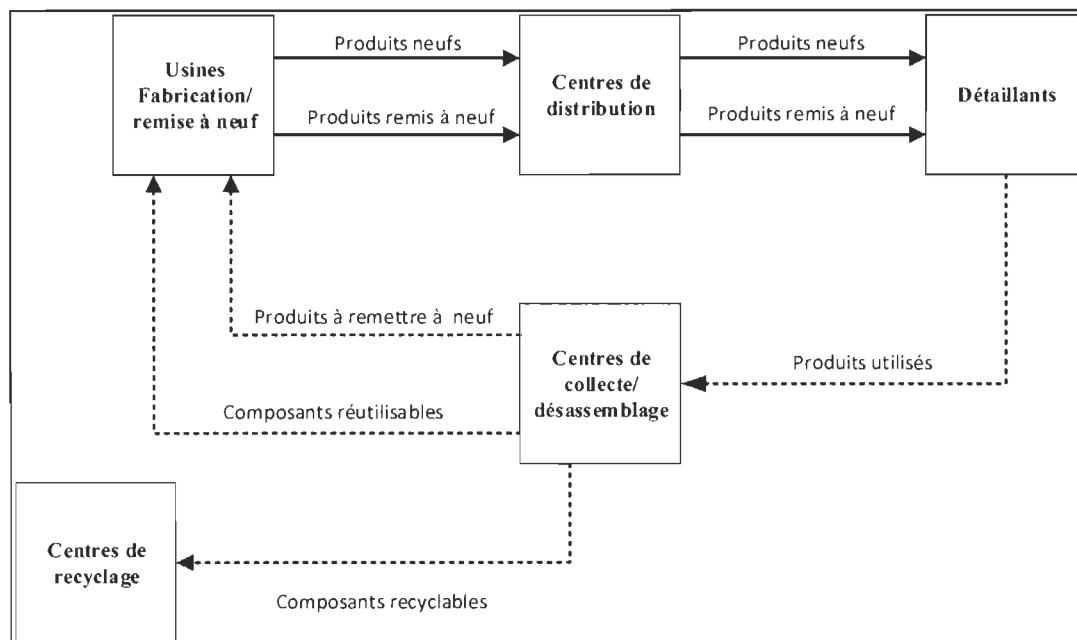


Figure 4.1 – Représentation de la chaîne logistique en boucle fermée

Le choix de l'option optimale de traitement d'un produit utilisé par le client durant une longue période est une décision difficile et multicritères. Les facteurs intrinsèques contrignant le processus de récupération sont le manque des informations sur la structure et la composition du produit (figure 4.3), la qualité des constituants avant que

le produit ne soit désassemblé et la demande du marché des produits après le traitement. L'annexe III présente une approche de modélisation des décisions de choix des alternatives de traitement.

La figure 4.2 explique le processus de récupération d'un produit utilisé. La première alternative est la remise à neuf du produit. Cette alternative est plus appropriée pour des produits moins utilisés et qui nécessitent moins de traitement. Ainsi, la sélection de cette option implique que le revenu généré par le produit après sa remise à neuf dépasse son coût total de traitement.

La prise de cette décision dépend de différents facteurs, tels que la qualité des composants du produit retourné, le coût total de traitement (désemballage, assemblage, pièces de rechange, etc.), la demande du marché et le niveau maximal du stock. Si le produit ne peut pas être remis à neuf, il est donc désassemblé et la qualité de chacun de ses composants est évaluée. Les composants possédant des qualités qui dépassent le niveau minimal de qualité pour la réutilisation et que leur revenu dépasse leur coût de traitement sont affectés à la deuxième alternative de récupération des composants réutilisables par les usines fabrication.

Dans le cas contraire, le reste des composants dont la qualité ne dépasse pas la qualité minimale de réutilisation sont affectés à la troisième alternative de récupération des matériaux au sein des centres de recyclage. Dans le modèle proposé, les produits retournés après collecte et inspection se divisent en deux lots : produits récupérables et produits non récupérables.

Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont prises en compte dans la formulation du modèle :

- le modèle est multi-échelons et multi-produits;
- les localisations potentielles des usines, des centres de distribution/collecte et les centres d'inspection/de disposition sont connus;
- toutes les demandes de détaillant sont déterministes et devraient être satisfaites;
- les taux de retour, remise à neuf et taux de désassemblage sont connus en tant que pourcentage de la quantité de produits utilisés par le détaillant;
- il n'y a pas de limitation sur la capacité des flux de matière à travers le réseau;
- sauf les fournisseurs et les centres de recyclage, toutes les autres installations ont des capacités limitées;
- toutes les valeurs de capacités et coûts sont supposés être connues à l'avance.

Les notations suivantes sont utilisées dans la formulation du modèle.

Indices

I Ensemble d'usines hybrides de fabrication/remise à neuf, $i \in I$.

J Ensemble de centres de distribution, $j \in J$.

K Zones fixes des détaillants, $k \in K$.

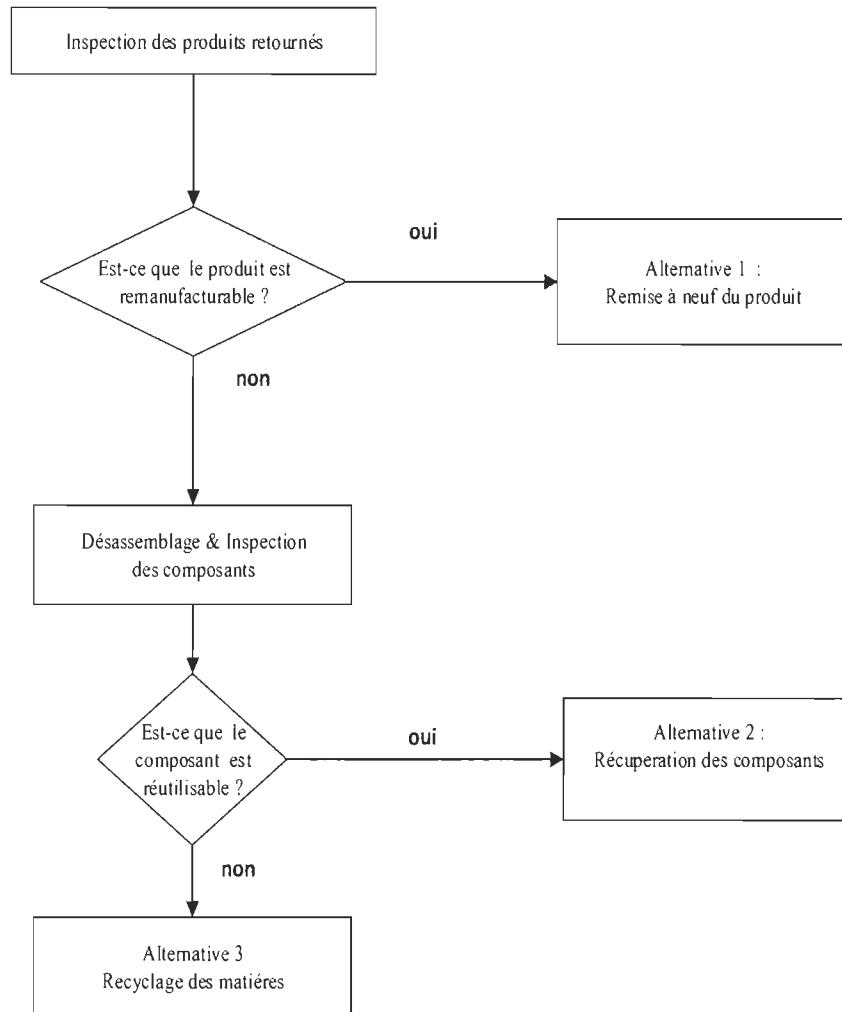


Figure 4.2 – Sélection d’options de traitement d’un produit en fin de vie

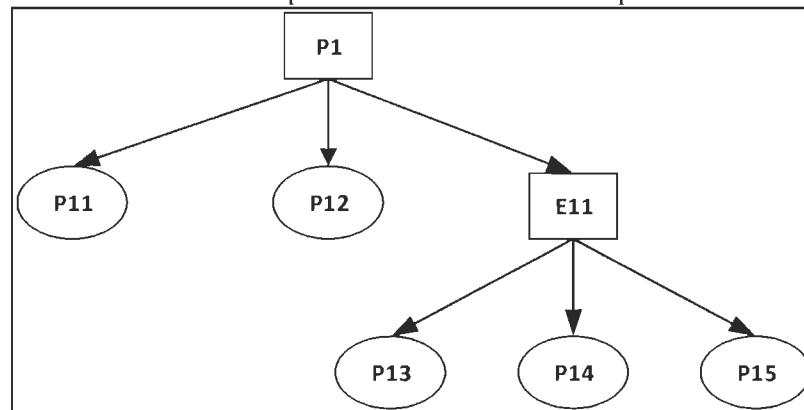


Figure 4.3 – Exemple de structure du produit en fin de vie

L Ensemble de centres de collecte/inspection, $l \in L$.

E Ensemble de centres de recyclage, $e \in E$.

P Ensemble de produits, $p \in P$.

M Ensemble de composants, $m \in M$.

Paramètres

D_{pk}^{ma} Demande d'un détaillant pour un produit neuf p .

D_{pk}^{rem} Demande d'un détaillant pour un produit remis à neuf p .

N_{mp} Nombre de composants m dans un produit p .

pr_p^{ma} Coût unitaire de vente du produit neuf p .

pr_p^{rem} Coût unitaire de vente remis à neuf p .

g_m^{ret} Gain unitaire du composant réutilisable m .

F_{I_i} Coût fixe pour l'ouverture d'une usine hybride de fabrication/Remise à neuf au site i .

F_{J_j} Coût fixe pour l'ouverture d'un centre de distribution au site j .

F_{L_l} Coût fixe pour l'ouverture d'un centre de collecte au site l

cp_{pi}^{ma} Coût unitaire de fabrication du produit neuf p par l'usine i .

cp_{pi}^{rem} Coût unitaire de remise à neuf du produit p dans l'usine i .

$c_{in_{pl}}^{rep}$ Coût unitaire d'inspection du produit p dans le centre l .

cd_{pl}^{res} Coût unitaire de désassemblage du produit p dans le centre l .

ca_p^k Coût unitaire d'acquisition du produit utilisé p du détaillant k .

tc_{pij}^{ma} Coût unitaire de transport du produit neuf p de l'usine au centre de distribution j .

tc_{pjk}^{ma}	Coût unitaire de transport du produit neuf p du centre de distribution j au détaillant k .
tc_{pij}^{rem}	Coût unitaire de transport du produit remis à neuf p de l'usine i au centre de distribution j .
tc_{pjk}^{rem}	Coût unitaire de transport du produit remis à neuf p de l'usine i au centre de distribution j .
tc_{pkl}^{resv}	Coût unitaire de transport du produit utilisé p du détaillant k au centre de collecte/désassemblage l .
tc_{pli}^{resv}	Coût unitaire de transport du produit utilisé p du centre de collecte/désassemblage l à l'usine i .
tc_{mli}^{resv}	Coût unitaire de transport du composant m du centre de collecte/désassemblage l à l'usine i .
tc_{mle}^{resv}	Coût unitaire de transport du composant m du centre de collecte/désassemblage l au centre de recyclage e .
$CapI_{pi}^{ma}$	Capacité de l'usine i pour la fabrication du produit p .
$CapI_{pi}^{rem}$	Capacité de l'usine i pour la remise à neuf du produit p .
$CapJ_{pj}$	Capacité du centre de distribution j pour le produit p .
$CapL_p$	Capacité du centre de collecte/désassemblage pour le produit p .
r	Taux de retour du produit p .
α_{rem}	Fraction de produits à remettre à neuf.
β_{rec}	Fraction des composants à recycler.

Variables de décision

A_i	Variable binaire égale à 1 si une usine est ouverte au site i , 0 sinon.
B_j	Variable binaire égale à 1 si un centre de distribution est ouvert au site j , 0 sinon.
C_l	Variable binaire égale à 1 si un centre de collecte/désassemblage est ouvert au site l , 0 sinon.
X_{pij}^{ma}	Quantité du produit neuf p transportée de l'usine i au centre de distribution j .
X_{pij}^{rem}	Quantité du produit remis à neuf p transportée de l'usine i au centre de distribution j .

X_{pjk}^{new}	Quantité du produit neuf p transportée de centre de distribution j au détaillant k .
X_{pjk}^{rem}	Quantité du produit remis à neuf p transportée de centre de distribution j au détaillant.
X_{pkl}^{resv}	Quantité du produit utilisé p transportée de détaillant k au centre de collecte/désassemblage l .
X_{pli}^{rev}	Quantité du produit à remettre à neuf p transportée de centre de collecte/désassemblage l à l'usine i .
Q_{pli}^{resv}	Quantité du composant m transportée de centre de collecte/désassemblage l à l'usine i .
Q_{pel}^{resv}	Quantité du composant m transportée de centre de collecte/désassemblage l au centre de recyclage e .

4.4 Formulation du modèle

Ici, nous présentons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes pour déterminer la localisation des usines, des centres de distribution et des centres de collecte/désassemblage tout en maximisant le profit de l'ensemble du réseau logistique.

Fonction objective :

Maximisation profit total = revenus totaux (RT) – coûts totaux (CT) (1)

- RT = revenu des produits neufs (RN) + revenu des produits remis à neuf (RR) + revenu des composants réutilisables (RP)
- CT = coûts fixes (CF) + coûts de traitement (CP) + coûts d'acquisition de produits utilisés (CA) + coûts de transport (CT)

$$RT = \sum_{\sigma} \sum_j \sum_k p r_{\sigma}^{new} X_{\sigma j k}^{new} + \sum_{\sigma} \sum_j \sum_k p r_{\sigma}^{rem} X_{\sigma j k}^{rem} + \sum_m \sum_l \sum_e g_m^{resv} X_{m l e}^{resv} - \sum_m \sum_i \sum_d p r_m^{resv} X_{m i d}^{resv}$$

$$CF = \sum_j F I_i A_i + \sum_j F J_j B_j + \sum_l F L_l C_l$$

$$\text{CP} = \sum_{\sigma} \sum_i \sum_j c p_{\sigma}^{ma} X_{\sigma i j}^{ma} + \sum_{\sigma} \sum_i \sum_j c p_{\sigma}^{rem} X_{\sigma i j}^{rem} + \sum_{\sigma} \sum_k \sum_l c m_{\sigma l}^{rel} X_{\sigma k l}^{rel} + \\ \sum_{\sigma} \sum_k \sum_l c d i_{\sigma l}^{rel} \beta_{d i r} X_{\sigma k l}^{rel}$$

$$\text{CA} = \sum_p \sum_k \sum_l c a_p^k X_{p k l}^{resv}$$

$$\sum_p \sum_i \sum_j t c_{pij}^{ma} X_{pij}^{ma} + \sum_p \sum_j \sum_k t c_{pj k}^{ma} X_{pij}^{ma} +$$

$$\text{CT} = \sum_p \sum_i \sum_j t c_{pij}^{rem} X_{pij}^{rem} + \sum_p \sum_j \sum_k t c_{pj k}^{rem} X_{pj k}^{rem} + \sum_p \sum_k \sum_l t c_{p k l}^{resv} X_{p k l}^{resv} +$$

$$\sum_p \sum_l \sum_i t c_{pli}^{resv} X_{pli}^{resv} + \sum_m \sum_l \sum_i t c_{mli}^{resv} Q_{mli}^{resv} + \sum_m \sum_e t c_{mle}^{resv} Q_{mle}^{resv}$$

Contraintes

$$\sum_j X_{pjk}^{ma} = D_{pk}^{ma} \quad \forall k, p \quad (2)$$

$$\sum_j X_{pjk}^{rem} = D_{pk}^{rem} \quad \forall k, p \quad (3)$$

$$\sum_k X_{pkl}^{resv} = r D_{pk}^{ma} \quad \forall n, p \quad (4)$$

$$\sum_j X_{pj k}^{ma} \leq CapI_{pi}^{ma} A_i \quad \forall i, p \quad (5)$$

$$\sum_j X_{pj k}^{rem} \leq CapI_{pi}^{rem} A_i \quad \forall i, p \quad (6)$$

$$\sum_l X_{pli}^{resv} \leq CapI_{pi}^{resv} A_i \quad \forall l, p \quad (7)$$

$$\sum_i X_{pij}^{ma} + \sum_i X_{pij}^{rem} \leq CapJ_{pj} B_j \quad \forall j, p \quad (8)$$

$$\sum_k X_{pkl}^{resv} \leq CapL_{pl} C_l \quad \forall l, p \quad (9)$$

$$\sum_i X_{pij}^{ma} = \sum_k X_{pj k}^{ma} \quad \forall j, p \quad (10)$$

$$\sum_i X_{pij}^{resm} = \sum_k X_{pjk}^{resm} \quad \forall j, p \text{ (11)}$$

$$\sum_l X_{pli}^{resv} = \sum_j X_{pij}^{resm} \quad \forall i, p \text{ (12)}$$

$$\sum_i X_{pli}^{resv} = \alpha_{resm} \sum_k X_{pkj}^{resv} \quad \forall l, p \text{ (13)}$$

$$\sum_s X_{mls}^{resv} + \sum_t X_{mtl}^{resv} = (1 - \alpha_{resm}) \sum_m N_{mp} \sum_k X_{pkj}^{resv} \quad \forall l, m \text{ (14)}$$

$$\sum_s X_{mls}^{resv} = \beta_{disa} \sum_k X_{pkj}^{resv} \sum_m N_{mp} \quad \forall m, l \text{ (15)}$$

$$A_i, B_j, C_l \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, l, k, p \text{ (16)}$$

$$XIJ_{pij}, XLJ_{ptj}, XJK_{pjk}, XNK_{pnk}, XKL_{pk}, XKM_{pkm} \geq 0 \quad \forall i, j, l, k, n, p \text{ (17)}$$

La fonction objectif (1) maximise le profit total de la chaîne logistique en boucle fermée. Les contraintes (2) et (3) assurent que les demandes de chaque détaillant pour un produit neuf et un produit remis à neuf soient satisfaites. Les contraintes (5), (6) et (7) limitent les capacités de fabrication et de remise à neuf de chaque usine hybride. Les contraintes (8) et (9) restreignent respectivement les capacités des centres de distribution et de collecte. Les contraintes (10), (11) et (12) assurent l'équilibre des flux au centre de distribution et au centre de collecte. Les contraintes (13), (14) et (15) déterminent respectivement la quantité des retours à remettre à neuf et les quantités de composants à désassembler et à recycler. Les contraintes (16) et (17) appliquent les exigences de négativité binaires et non des variables de décision.

4.5 Résultats

Le but de cette section est d'illustrer l'application de notre modèle mathématique : des exemples numériques sont utilisés. Ainsi, un réseau logistique composé de trois usines potentielles de fabrication/remise à neuf, trois centres de distribution, trois centres de collecte et quatre détaillants. D'autres paramètres sont générés suivant des distributions uniformes définis dans l'annexe VI. Le problème est résolu par LINGO 11.0, sur un ordinateur avec 3.2 GHz et 8 Go de RAM. La solution optimale est un réseau composé de trois usines hybrides localisées aux sites potentiels 1, 2 et 3, de deux centres de distribution localisés aux sites potentiels 1 et 2, d'un centre de collecte localisé au site potentiel 1 et de quatre détaillants potentiels fixes et un centre de recyclage. Le tableau 4.2 et la figure 4.4 présente les résultats du réseau optimal.

Tableau 4.2 – Résultats de la solution optimale

Profit total	Revenu des produits neufs	Revenu des produits remis à neuf	Total des coûts fixes	Total des coûts variables
770 939,2 \$	1 220 000 \$	292 800 \$	200 000 \$	494 820 \$

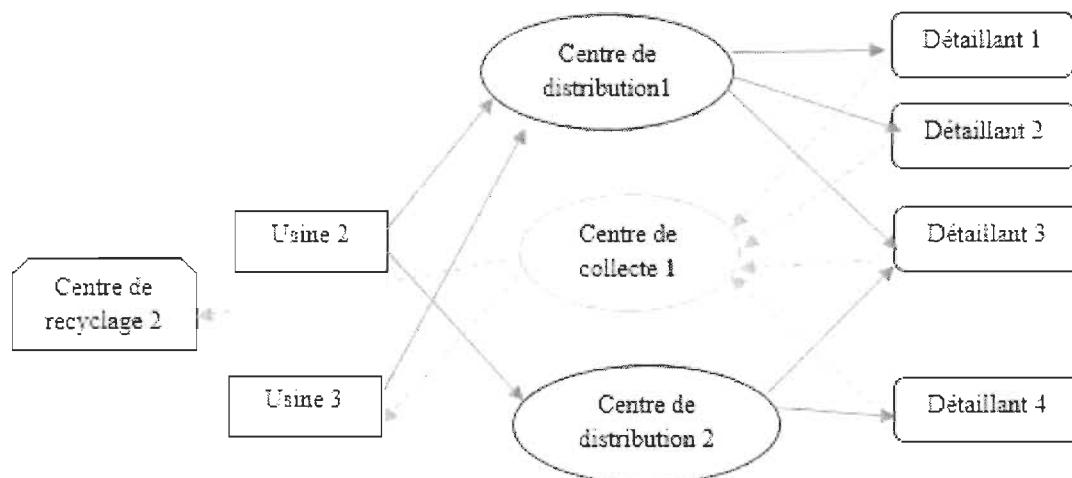


Figure 4.4 – Représentation du réseau optimal

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes est développé pour la conception d'une chaîne logistique avec plusieurs alternatives de récupération. Le problème étudié consiste à déterminer la localisation des installations ainsi que les quantités de flux échangées. La principale contribution de ce chapitre est la considération du processus de sélection lors de la conception du réseau en boucle fermée exploitant les avantages que peut fournir le détaillant pour l'acquisition des produits en fin d'utilisation.

Les résultats obtenus confirment les conclusions de Beamon et Fernandes (2004) et Özkip et Başligil (2012) concernant la sensibilité et l'impact du taux de retour sur la profitabilité du système de remise à neuf. En plus, une approche de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes a été utilisée pour la modélisation des décisions de choix des alternatives de traitement (voir annexe III). Le modèle proposé peut être étendu pour investigation sous plusieurs situations telles que la considération des caractéristiques multi-périodes et multi-alternatives de traitement. Une autre extension est l'optimisation multi-objective qui analyse les compromis entre les impacts environnementaux et le profit total.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

En raison de l'interaction de plusieurs critères, la conception de chaînes logistiques vertes est un problème complexe. Afin qu'elle soit économiquement et écologiquement rentable, la chaîne logistique verte devra être abordée dès la conception des produits et du réseau logistique. Par une meilleure collaboration entre les divers partenaires et un suivi plus étroit des produits et des processus, de meilleures performances économiques et environnementales seront alors possibles en ayant accès à la bonne information.

En s'intéressant à durabilité de la chaîne logistique verte en boucle fermée, l'objectif sera alors d'utiliser au mieux les ressources disponibles, que ce soit les infrastructures, les équipements, les moyens de transport, les systèmes d'information et les produits en fin de vie. Évidemment, lorsque les activités de la chaîne logistique et celles de la logistique inverse coexistent au sein d'une même installation, elles peuvent offrir des économies d'échelle importantes. Cependant, la récupération de valeur des produits en fin de vie est un processus complexe et incertain. Par conséquent, la durabilité économique de la chaîne logistique en boucle fermée est grandement affectée par les décisions stratégiques et tactiques de gestion de la logistique inverse.

Dans ce contexte, cette thèse porte sur le problème de la durabilité économique de la chaîne logistique verte en boucle fermée. Nous avons présenté nos travaux de recherche tout au long de la thèse, organisés autour de quatre chapitres. Dans le chapitre 1, les concepts, la problématique et l'objectif principal sont présentés et, dans le chapitre 2, une revue systématique de la littérature est présentée en deux volets : le premier volet traite de la logistique inverse et le seconde couvre les modèles mathématiques de conception des chaînes logistiques vertes. À l'issue de ce chapitre, les objectifs de recherche ainsi que la méthodologie suivie sont précisés. Les chapitres 3 et 4 s'attardent successivement à l'étude de l'effet des décisions de co-localisation et des choix d'alternatives de traitement sur la durabilité de la chaîne logistique en boucle fermée.

Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit.

- Revue compréhensive de la littérature sur les problèmes de logistique inverse et de conception des chaînes logistiques vertes et en boucle fermée. L'accent est mis sur les contraintes et les décisions critiques de création de valeur dans la chaîne logistique verte ainsi que les décisions les plus communément utilisées dans la conception du réseau logistique.
- Étude de la viabilité économique de réseaux logistiques verts en boucle fermée, des modèles mathématiques sont formulés pour mettre en évidence l'effet de certaines décisions stratégiques et tactiques sur la profitabilité du réseau. La formulation spéciale du premier modèle permet de contourner la complexité associée aux termes non linéaires de la fonction objective. Dans le deuxième modèle, la formulation mathématique a été complémentée par l'illustration de la complexité du processus de disposition des retours et par une formulation non linéaire du problème (annexe II).

Perspectives de recherche

Dans le chapitre 3, le modèle proposé suppose que la remise à neuf se fait par le fabricant d'origine. Or, dans la réalité ce n'est pas toujours le cas car le produit est souvent assemblé à partir de modules et composants provenant de différents fournisseurs et, par conséquent, la collaboration entre les membres de la chaîne est nécessaire pour faciliter la remise à neuf en fin de vie et éviter les conflits d'intérêts des fabricants et des fournisseurs.

Une application de modèle sur un réseau logistique d'entreprise de remise à neuf des ordinateurs dans la province de Québec est prévue pour valider le modèle sur le terrain.

Dans le chapitre 4, les flux inversés sont supposés être des proportions de la quantité des produits retournés. Cette hypothèse n'est pas toujours valide. Nous envisageons donc

étendre le modèle proposé en vue de prendre en considération ces décisions avant la conception du réseau logistique. Le problème sera donc modélisé par une approche en deux étapes dont la première détermine les alternatives optimales de traitement en s'appuyant sur la distribution de la qualité des retours, tandis que la deuxième optimise la configuration du réseau logistique.

Une autre alternative d'extension du modèle proposé au chapitre 4 est d'exploiter le grand avantage que peut offrir le couplage de la simulation à évènements discrets et la programmation mathématique pour résoudre de tels problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- Abo-Hamad, W., & Arisha, A. (2011). Simulation-optimisation methods in supply chain applications: A review. *Irish Journal of Management*, 30(2), 95.
- ADEME (2014). ADEME & Vous. 76, juin.
- Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52(1), 329-341.
- Ahi, P., & Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 86, 360-377.
- Akçali, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231-248.
- Amin, S.H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6782-6791.
- Amin, S.H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.
- Ammeri, A., Hachicha, W., Chabchoub, H., & Masmoudi, F. (2011). A comprehensive literature review of mono-objective simulation optimization methods. *Advances in Production Engineering & Management*, 6(4), 291-302.
- 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.
- APICS (2010). *APICS Dictionary* (13e éd.). Supply Chain Council.
- Aronsson, H., & Brodin, M.H. (2006). The environmental impact of changing logistics structures. *The International Journal of Logistics Management*, 17(3), 394-415.

- Ballou, R.H. (2001). Unresolved issues in supply chain network design. *Information Systems Frontiers*, 3(4), 417-426.
- Barker, T.J., & Zabinsky, Z.B. (2008). Reverse logistics network design: A conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), 250-260.
- Beamon, B.M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294.
- Beamon, B.M. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4), 332-342.
- Beamon, B.M., & Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning & Control*, 15(3), 270-281.
- Bearing Point (2010). Green Supply Chain: From awareness to Action. *4th Supply Chain Monitor*.
- Beaulieu, M. (2000). Définir et maîtriser la complexité des réseaux de logistique à rebours. *Actes des III^{es} Rencontres internationales de la recherche en logistique, Trois-Rivières* (20 p.). 9 au 11 mai, Trois-Rivières.
- Bechtel, C., & Jayaram, J. (1997). Supply chain management: A strategic perspective. *International Journal of Logistics Management*, 8(1), 15-34.
- Boks, C., & Stevels, A. (2007). Essential perspectives for design for environment. Experiences from the electronics industry. *International Journal of Production Research*, 45(18-19), 4021-4039.
- Boukherroub, T. (2013). *Intégration des objectifs du développement durable dans la gestion stratégique et tactique de la chaîne logistique*. Thèse de doctorat. Institut national des Sciences appliquées de Lyon, France.
- Bourguignon, A. (1998). *L'évaluation de la performance : un instrument de gestion éclaté*. Cergy-Pontoise : Groupe ESSEC.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312.

- Buyukozkan, G., & Cifci, G. (2012). Evaluation of green supply chain management practices a fuzzy ANP approach. *Production Planning and Control*, 23(6), 405-418.
- Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation* (pp. 118-126). IEEE Computer Society, décembre.
- 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.
- Chen, Y.T., Chan, F.T.S., & Chung, S.H. (2015). An integrated closed-loop supply chain model with location allocation problem and product recycling decisions. *International Journal of Production Research*, 53(10), 3120-3140.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2004). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*. Englewood Cliffs : Prentice Hall.
- Chouinard, M. (2003). *Système organisationnel et architecture d'un support d'information pour l'intégration des activités de logistique inversée au sein d'un centre de réadaptation*. Laval : Université Laval.
- Chouinard, M. (2007). *Modélisation et conception de boucles d'approvisionnement : contexte multi-produits, multi-états et multi-alternatives de traitement*. Thèse de doctorat. Faculté des études supérieures, Université Laval, Québec, Canada.
- Chouinard, M., Ait-Kadi, D., Van Wassenhove, L.N., & d'Amours, S. (2009). Conceptual framework for the design and management of value loops-application to a wheelchair allocation context. *Production Planning and Control*, 20(8), 703-723.
- Chouinard, M., d'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2005). Integration of reverse logistics activities within a supply chain information system. *Computers in Industry*, 56(1), 105-124.
- Chouinard, M., d'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 657-677.

- Christopher, M.G. (1998). *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Costs and Improving Services*. Londres : Pitman Publishing.
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement – CMED (1987). Notre avenir à tous. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement.
- Coyle, J.J., Bardi, E.J., & Langley, C.J. (2003). *The Management of Business Logistics* (7e éd.). Ohio, South-Western Coll. Pub.
- Daugherty, P.J., Richey, R.G., Genchev, S.E., & Chen, H. (2005). Reverse logistics: superior performance through focused resource commitments to information technology. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(2), 77-92.
- De Brito, M. (2004). *Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management?* (No. ERIM PhD Series; EPS-2004-035-LIS). Erasmus Research Institute of Management (ERIM).
- Deif, A.M. (2011). A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1553-1559.
- De la Fuente, M.V., Ros, L., & Cardos, M. (2008). Integrating forward and reverse supply chains: Application to a metal-mechanic company. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 782-792.
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671-679.
- Demirel, N.Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11-12), 1197-1206.
- De Rosa, V., Gebhard, M., Hartmann, E., & Wollenweber, J. (2013). Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 145, 184-198.

- Diabat, A., Abdallah, T., Al-Refaie, A., Svetinovic, D., & Govindan, K. (2013). Strategic closed-loop facility location problem with carbon market trading. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 60(2), 398-408.
- Diallo, C. (2006). *Développement d'un modèle d'identification et de gestion des pièces de rechange*. Thèse de doctorat. Faculté des études supérieures, Université Laval, Québec, Canada.
- Ding, H. (2004). *Une approche d'optimisation basée sur la simulation pour la conception des chaînes logistiques : applications dans les industries automobile et textile*. Thèse de doctorat. Université de Metz, France.
- EEA (2011). EEA Greenhouse Gas Data (2008). Tiré de <http://www.eea.europa.eu/>.
- El Bounjimi, M., Abdul-Nour, G., & Ait kadi, D. (2013). Contribution à la conception des chaines logistiques vertes. Congrès international de génie industriel, La Rochelle, France.
- El Korchi, A., & Millet, D. (2011). Designing a sustainable reverse logistics channel: The 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*, 19, 588-597.
- El Saadany, A.M.A., Jaber, M.Y., & Bonney, M. (2011). Environmental performance measures for supply chains. *Management Research Review*, 34(11), 1202-1221.
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward reverse logistics network design under risk. *Computers and Industrial Engineering* 58, 719(3), 423-431.
- Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., & Zanin, G. (2014). Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 359-373.
- Faisal, M.N. (2010). Sustainable supply chains: A study of interaction among the enablers. *Business Process Management Journal*, 16(3), 508-529.
- Fawcett, S.E., Magnan, G.M., & McCarter, M.W. (2008). Benefits, barriers, and bridges to effective supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(1), 35-48.

- Flapper, S.D.P., & De Ron, A.J. (éd.) (1996). *Proceedings of the First International Working Seminar on Reuse*. Eindhoven, the Netherlands.
- Fleischmann, M. (2001). *Quantitative models for reverse logistics*. Berlin : Springer-Verlag, 181 p.
- 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.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J.A.E.E., & Van Wassenhove, L.N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.
- Fleischmann, M., & Krikke, H.R. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653.
- Fleischmann, M., & Minner, S. (2004). Inventory management in closed loop supply chains. In H. Dyckhoff, R. Lackes & J. Reese (éd.), *Supply Chain Management and Reverse Logistics* (pp. 115-138). Berlin: Springer-Verlag.
- Fleischmann, M., Van Nunen, J., & Gräve, B. (2003). Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM. *Interfaces*, 33, 44-56.
- Fleischmann, M., Van Nunen, J., Gräve, B., & Gapp, R. (2005). Reverse logistics – capturing value in the extended supply chain. In C. An & H. Fromm (éd.), *Supply Chain Management on Demand. Strategies and Technologies, Applications* (pp. 167-186). Berlin: Springer-Verlag.
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. *Production Planning & Control*, 23, 83-104.
- Geyer, R., & Jackson, T. (2004). Supply loops and their constraints: The industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review*, 46(2), 55-73.
- 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.

- Gobbi, C. (2008). *The Reverse Supply Chain: Configuration, Integration and Profitability*. Thèse de doctorat. Technical University of Denmark.
- Gobbi, C. (2011). Designing the reverse supply chain: The impact of the product residual value. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(8), 768-796.
- Goetschalckx, M., & Fleischmann, B. (2008). Strategic network design. In H. Stadtler & C. Kilger (éd.), *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies* (4e éd., pp. 117-132). Berlin: Springer-Verlag.
- Gold, S., Seuring, S., & Beske, P. (2009). Sustainable supply chain management and inter-organisational resources: A literature review. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(4), 230-245.
- Gopal, P.R.C., & Thakkar, J. (2012). A review on supply chain performance measures and metrics: 2000-2011. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61(5), 518-547.
- 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.
- Griffis, S.E., Bell, J.E., & Closs, D.J. (2012). Metaheuristics in logistics and supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 33(2), 90-106.
- Guide, V.D.R. Jr (2000). Production planning and control for remanufacturing: Industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18(4), 467-483.
- Guide, V.D.R. Jr, Teunter, R.H., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 303-316.
- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2000). *Closed-Loop Supply Chains*. Working papers, INSEAD R-D.
- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2001). Managing product returns for remanufacturing. *Production and Operations Management*, 10(2), 142-155.

- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2002). Closed-loop supply chains. In A. Klose, M. Grazia Speranza, L.N. Van Wassenhove (éd.), *Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management* (pp. 47-60). Berlin: Springer.
- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2006). Closed-loop supply chains: An introduction to the feature issue (part 1). *Production and Operations Management*, 15(3), 345-350.
- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2009). OR FORUM – The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18.
- Hamner, B. (2006). Effects of green purchasing strategies on supplier behaviour. In J. Sarkis (éd.), *Greening the Supply Chain* (pp. 25-37). Londres : Springer.
- Handfield, B. (1996). Green supply chain: Best practices from the furniture industry. *Proceedings of the Annual Meeting of the Decision Science Institute* (N° 3, pp. 1295-1297). États-Unis.
- Harris, I. (2011). *Multi-Objective Optimisation for Environmentally Friendly Logistics Network*. Thèse de doctorat. Cardiff University, Royaume-Uni.
- Harrison, T.P. (2004). Principles for the strategic design of supply chains. In T.P. Harrison, H.L. Lee & J.J. Neale (éd.), *The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge* (pp. 3-12). États-Unis, Springer.
- Hart, S.L. (1997). Beyond greening: Strategies for a sustainable world. *Harvard Business Review*, 75(1), 66-77.
- Hervani, A.A., Helms, M.M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An international Journal*, 12(4), 330-353.
- Ho, J.C., Shalishali, M.K., Tseng, T., & Ang, D.S. (2009). Opportunities in green supply chain management. *The Coastal Business Journal*, 8(1), 18-31.
- Iakovou, E., Moussiopoulos, N., Xanthopoulos, A., Achillas, C., Michailidis, N., Chatzipanagioti, M., & Kikis, V. (2009). A methodological framework for end-of-life management of electronic products. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(6), 329-339.

- Ilgin, M.A., & Gupta, S.M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-591.
- Industrie Canada (2009). *Green Supply Chain Management Logistics & Transportation Services – A Canadian Perspective*. Industrie Canada, tiré de <http://www.ic.gc.ca>.
- Ingalls, R.G. (1998). CSCAT: The COMPAQ supply chain analysis tool. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*.
- Ingalls, R.G. (2014). Introduction to supply chain simulation. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference* (pp. 36-50). IEEE Press, décembre.
- Ivanov, D. (2010). An adaptive framework for aligning (re) planning decisions on supply chain strategy, design, tactics, and operations. *International Journal of Production Research*, 48(13), 3999-4017.
- Jindal, A., & Sangwan, K.S. (2014). Closed loop supply chain network design and optimisation using fuzzy mixed integer linear programming model. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4156-4173.
- Jayaraman, V., Ross, A.D., & Agarwal, A. (2008). Role of information technology and collaboration in reverse logistics supply chains. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 11(6), 409-425.
- John, S.T., & Sridharan, R. (2013). Modelling and analysis of network design for a closed-loop supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 14(3), 329-352.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324-330.
- Kannan, G., Sasikumar, P., & Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 655-670.
- Keyvanshokooh, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S.M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A dynamic pricing approach for returned products in integrated

- forward/reverse logistics network design. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10182-10202.
- Khatami, M., Mahootchi, M., & Farahani, R.Z. (2015). Benders' decomposition for concurrent redesign of forward and closed-loop supply chain network with demand and return uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 1-21.
- Kleijnen, J.P., Sanchez, S.M., Lucas, T.W., & Cioppa, T.M. (2005). State-of-the-art review: A user's guide to the brave new world of designing simulation experiments. *INFORMS Journal on Computing*, 17(3), 263-289.
- Kleindorfer, P.R., Singhal, K., & Van Wassenhove, L.N. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operations Management*, 14(4), 482-492.
- Ko, H.J., & Evans, G.W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.
- Kokkinaki, A., Zuidwijk, R., Van Nunen, J., & Dekker, R. (2004). Information and communication technology enabling reverse logistics. In R. Dekker *et al.* (éd.), *Reverse Logistics. Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains* (pp. 381-405). Berlin: Springer-Verlag.
- Krikke, H. (2010). Opportunistic versus life-cycle-oriented decision making in multi-loop recovery: An eco-eco study on disposed vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(8), 757-768.
- Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L.N. (2001). *Design of Closed Loop Supply Chains: A Production and Return Network for Refrigerators*. Rotterdam, The Netherlands : Erasmus Research Institute of Management (ERIM).
- Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719.
- Krikke, H., Le Blanc, I., & Van de Velde, S. (2004). Product modularity and the design of closed-loop supply chains. *California Management Review*, 46(2), 23-39.

- Krikke, H.R., 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.
- Kroon, L., & Vrijens, G. (1995). Returnable containers: An example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2), 56-68.
- Kumar, S., Pauly, S., & Budin, E. (2006). Impact of radio frequency identification technology on manufacturing and logistics: Challenges and issues. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 10(1), 57-70.
- Kumar, S., & Putnam, V. (2008). Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 305-315.
- Kumar, S., Teichman, S., & Timpernagel, T. (2012). A green supply chain is a requirement for profitability. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1278-1296.
- Kuo, T.-C., Huang, S.H., & Zhang, H.-C. (2001). Design for manufacture and design for 'X': Concepts, applications and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41, 241-260.
- Lambert, D.M., & Cooper, M.C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65-83.
- Landrieu, A. (2001). *Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie. Tournées de véhicules avec contraintes*. Thèse de doctorat. Institut national Polytechnique de Grenoble – INPG, France.
- Lee, D.H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 455-474.
- Lee, D.H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61-71.

- Listeş, O. (2007). A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers & Operations Research*, 34(2), 417-442.
- Lu, Z., & Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299-323.
- Lund, R.T. (1996). *The Remanufacturing Industry: Hidden Giant*. Final report of Argonne National Laboratory study. Boston, Boston University.
- Lund, R. (1998). Remanufacturing: An American resource. *Proceedings of the Fifth International Congress Environmentally Conscious Design and Manufacturing* (Vol. 16). Juin.
- Lundmark, P., Sundin, E., & Björkman, M. (2009). Industrial challenges within the remanufacturing system. *Proceedings of the 3rd Swedish Production Symposium 2009* (pp. 132-138). Göteborg.
- Martel, A. (2001). Un modèle général pour l'optimisation de réseaux logistiques. In *4^e Congrès international de génie industriel*, juin.
- Martel, A. (2003). *La logistique d'entreprise* (Manuel de formation). Université Laval.
- Martel, A., & Venkatadri, U. (1999). Optimizing supply network structures under economies of scale. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management* (pp. 56-65). Glasgow, Royaume-Uni.
- Martin, R. (2006). Integrated reverse logistics: New ways to streamline operations, drive profits, and delight customers. *Reverse Logistics Magazine*, Spring/Summer, 26- 29.
- McKinsey & Company (2013). *Towards the Circular Economy Opportunities for the Consumer Goods Sector*. McKinsey & Company, tiré de <http://www.mckinsey.com>.
- Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., & Zacharia, Z.G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.

- Neto, J.Q.F., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Nunen, J.A.E.E., & Van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 195-208.
- Neto, J.Q.F., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J.A.E.E., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: The WEEE case. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4463-4481.
- Östlin, J., Sundin, E., & Björkman, M. (2008). Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 336-348.
- Östlin, J., Sundin, E., & Björkman, M. (2009). Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 17(11), 999-1009.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2012). A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research*, 51(3), 718-734.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013a). A mixed integer-programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research*, 51(3), 718-734.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013b). Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 51(20), 5985-6001.
- Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektas, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61, 142-164.
- Özkir, V., & Başligil, H. (2012). Modelling product-recovery processes in closed-loop supply-chain network design. *International Journal of Production Research*, 50(8), 2218-2233.
- Özkir, V., & Başligil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114-125.

- Paksoy, T., Bektas, T., & Özceylan, E. (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 532-546.
- Paksoy, T., & Özceylan, E. (2012). Supply chain optimisation with U-type assembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5085-5105.
- Pan, S., Ballot, E., & Fontane, F. (2011). Enjeux environnemental et économique de la mutualisation logistique pour les PME : le cas de l'alimentaire dans l'Ouest de la France. *Revue française de gestion industrielle*, 30, 79-100.
- Paquet, M. (2007). *Optimisation de l'ingénierie de réseaux manufacturiers*. Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Québec, Canada.
- Paquette, J.R. (2005). *The Supply Chain Response to Environmental Pressures*. Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology.
- Parlikad, A.K., & McFarlane, D. (2007). RFID-based product information in end-of-life decision making. *Control Engineering Practice*, 15(11), 1348-1363.
- Parlikad, A.K., McFarlane, D.C., Fleisch, E., & Gross, S. (2003). *The Role of Product Identity in End-of-Life Decision Making*. Auto-ID Centre White Paper, tiré de : <http://www.autoidlabs.org/uploads/media/CAM-AUTOIDWH017.pdf>.
- Pirard, F. (2005). Une démarche hybride d'aide à la décision pour la reconfiguration et la planification stratégique des réseaux logistiques des entreprises multi-sites. Thèse de doctorat. Facultés universitaires catholiques de Mons, Belgique.
- Pishvaee, M.S., Farahani, R.Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
- Pishvaee, M.S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
- Pishvaee, M.S., Rabbani, M., & Torabi, S.A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.

- Pochampally, K.K., Gupta, S.M., & Govindan, K. (2009). Metrics for performance measurement of a reverse/closed-loop supply chain. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1(1), 8-32.
- Porter, M.E. (1985). Technology and competitive advantage. *Journal of Business Strategy*, 5(3), 60-78.
- Porter, M.E., Van der Linde, C. (1995). Green and competitive: Ending the stalemate, *Harvard Business Review*, 73(5), 120-133.
- Prahinski, C., & Kocabasoglu, C. (2006). Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34(6), 519-532.
- 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), 328-344.
- Rogers, D.S., & Tibben-Lembke, R.S. (1998). *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reverse Logistics Executive Council.
- Rogers, D.S., & Tibben-Lembke, R. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129-148.
- Rose, C.M., & Ishii, K. (1999). Product end-of-life strategy categorization design tool. *Journal of Electronics Manufacturing*, 9(01), 41-51.
- Rubio, S., Chamorro, A., & Miranda, F.J. (2008). Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005). *International Journal of Production Research*, 46(4), 1099-1120.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336-349.
- Salema, M.I., Póvoa, A.P.B., & Novais, A.Q. (2006). A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), 615-629.

- 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.
- Savaskan, R.C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L.N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239-252.
- Schaltegger, S. (1997). Economics of life cycle assessment: Inefficiency of the present approach. *Business Strategy and the Environment*, 6(1), 1-8.
- Schenkel, M., Krikke, H., Caniëls, M.C., & Van der Laan, E. (2015). Creating integral value for stakeholders in closed loop supply chains. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 21(3), 153-154.
- Seuring, S. (2004). Industrial ecology, life cycles, supply chains: Differences and interrelations. *Business Strategy and the Environment*, 13(5), 306-319.
- Shapiro, J.F. (2001). Modeling and IT perspectives on supply chain integration. *Information Systems Frontiers*, 3(4), 455-464.
- Shapiro, J.F. (2007). *Modeling the Supply Chain*. Thomson, Belmont.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (éd.) (2004). *Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional*. McGraw-Hill Professional, 300 p.
- Soleimani, H., Seyyed-Esfahani, M., & Shirazi, M.A. (2013). Designing and planning a multi-echelon multi-period multi-product closed-loop supply chain utilizing genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1-4), 917-931.
- Solvang, W.D., & Hakam, M.H. (2010). Sustainable logistics networks in sparsely populated areas. *Journal of Service Science and Management*, 3(1), 72.
- Srivastava, S.K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Srivastava, S.K. (2008). Value recovery network design for product returns. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(4), 311-331.

- Stadtler, H. (2002). Basics of supply chain management. In H. Stadtler & C. Kilger (éd.), *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies* (pp. 7-28). Berlin: Springer-Verlag.
- Steinhilper, R. (1998). *Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Stock, J.R., & Lambert D.M. (2001) *Strategic Logistic Management* (4 éd). New York : McGraw-Hill.
- Supply Chain Council – SCC (2006). *SCOR Model Overview. Version 8.0*. Supply Chain Council Inc.
- Supply Chain Council – SCC (2008). *Supply Chain Operations Reference Model. Version 9.0*. Supply Chain Council.
- Swain, J.J. (2013). Discrete event simulation software tools: A better reality. *OR/MS Today*, 40(5), 48-59.
- Sundin, E. (2004). *Product and Process Design for Successful Remanufacturing*. Thèse de doctorat. Linkoping University, Suède.
- Suryabatmaz, A.C., Altekin, F.T., & Sahin, G. (2014). Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. *Computers and Industrial Engineering*, 70, 74-89.
- Tako, A.A., & Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 52(4), 802-815.
- Teunter, R.H. (2006). Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6), 533-537.
- Thierry, C. (2003). *Gestion de chaînes logistiques : modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme*. Habilitation à diriger des recherches. Université Toulouse II Le Mirail, France.
- Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L.N. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2), 114-135.

- Tibben-Lembke, R.S., & Rogers, D.S. (2002). Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 271-282.
- Umeda, Y., Daimon, K., & Kondoh, S. (2007). Life cycle option selection based on the difference of value and physical lifetimes for lifecycle design. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design* (ICED'07). Paris, France.
- Umeda, S., & Zhang, F., (2006). Supply chain simulation: Generic models and application examples. *Production Planning and Control*, 17, 155-166.
- Vachon, S., & Klassen, R.D. (2006). Green project partnership in the supply chain: The case of the package printing industry. *Journal of Cleaner Production*, 14(6), 661-671.
- Vachon, S., & Mao, Z. (2008). Linking supply chain strength to sustainable development: A country-level analysis. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1552-1560.
- Van Hoek, R.I. (1999). From reversed logistics to green supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 4(3), 129-135.
- Van Nunen, J.A., & Zuidwijk, R.A. (2004). E-enabled closed-loop supply chains. *California Management Review*, 46(2), 40-54.
- Vidal, C.J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1-18.
- Wadhwa, S., Madaan, J., & Chan, F.T.S. (2009). Flexible decision modeling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), 460-469.
- Walker, H., Di Sisto, L., & McBain, D. (2008). Drivers and barriers to environmental supply chain management practices: Lessons from the public and private sectors. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 14(1), 69-85.
- Wang, H.F., & Hsu, H.W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research*, 37(2), 376-389.

- Watson, M., Lewis, S., Cacioppi, P., & Jayaraman, J (2013). *Supply Chain Network Design: Applying Optimization and Analytics to the Global Supply Chain*. Pearson Education.
- Wells, P., & Seitz, M. (2005). Business models and closed-loop supply chains: A typology. *Supply Chain Management: An International Journal*, 10(4), 249-251.
- Wu, H.J., & Dunn, S.C. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2), 20-38.
- Xanthopoulos, A., & Iakovou, E. (2009). On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste Management*, 29(5), 1702-1711.
- Youg, F., & Wang, B. (2011). Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed centralized processing networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50, 10102-10127.
- Zeballos, L.J., Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2012). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 47, 237-247.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2006). An inter-sectoral comparison of green supply chain management in China: Drivers and practices. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 472-486.
- 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.
- Zuidwijk, R., & Krikke, H. (2008). Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes? *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1206-1222.

ANNEXE I

GREEN CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN: A LITERATURE REVIEW

Cet article s'intitule « Green closed-loop supply chain network design: A literature review ». J'ai œuvré comme auteur principal au développement et à la rédaction de l'article. L'article a été accepté et publié par *l'International Journal of Operations and Logistics Management*, 2014, 3(4), 275-286.

GREEN CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN: A LITERATURE REVIEW

Mbarek. El Bounjimi^{1*}, Georges Abdul-Nour², and Daoud Ait-Kadi³

1. Ph.D. student, Industrial engineering department, University of Quebec in Trois-Rivières, Canada.
2. Professor, Industrial engineering department, University of Quebec in Trois-Rivières, Canada.
3. Professor, Mechanical engineering department, Engineering Faculty, Laval University, Canada.

Abstract: Green supply chain is an emerging concept, which aims at reconciling economic and environmental objectives of the supply chain. The aim of this paper is to explore the literature regarding green supply chain in order to clarify the different concepts, the points of synergy and difference between the traditional supply chain and green supply chain, a review of the relevant mathematical models for green closed-loop supply chain network design, and eventually we propose some research avenues.

Keywords: Green Supply Chain; Closed loop supply chain; Environmental impact; Network design; Review.

INTRODUCTION

Nowadays industrial organizations are operating in a business environment characterized by higher global market competition, shorter product life cycle, and also by growing awareness about natural resources scarcity and environmental problems. Constantly increasing customer requirements for green products, legislation pressure and possible economic advantages are among the main reasons for companies to integrate used-product recovery activities into their regular supply chain (Ilgin and Gupta, 2010).

In addition, supply chain activities are important sources of greenhouse gas emissions. They represent roughly 30.8 % of the total amount of equivalent-carbon emitted by economic sectors (Paksoy *et al.*, 2012). Consequently, the green supply chain management is emerging as a new proactive approach to integrate environmental concerns in the supply chain management, throughout all product lifecycle. It aims the reduction and valorization of waste, optimizing the consumption of energy and material resources, and end-of-life cycle management (Beamon, 1999).

The growing number of research on green supply chain is a sign that managers and researchers begin to realize the importance of integrating the environmental concerns into strategic and operational decisions of supply chain (Zhu *et al.*, 2005). Despite this progress, there are few models of green supply chain implementation. The latest applying is in different products, processes and industries. For instance, EPA (2000) provides a guide of practices integration of "green" approach and "lean" approach in the supply chain.

The guide summarizes the best practices of leading companies in the United States, to simultaneously reduce costs and environmental impacts. Later on, LMI (2003) develops GreenSCOR model, which modifies the SCOR 5.0 model to include the best green practices and environmental performance indicators. The major advantage of GreenSCOR model is the systematic integration of environmental impacts without compromising the basic principles of the SCOR model, which is recognized as a practical and flexible analytical tool.

The green supply chain design is a critical dimension of the management of green supply chain. It has a significant long-term impact on environmental, competitive and economic performance of the focal firm and its business partners. Go back to literature; it is known that the design problem of the traditional supply chain is a difficult task, especially when it comes to seek an optimal configuration of the supply chain. This is due to several reasons, the long term required data are uncertain, objectives to be considered are multiple and conflicting and many of them are not quantifiable (Goetschalcks and Fleischmann, 2008). This article is an extension of our work (Elbounjimi *et al.*, 2013), it answers the following questions: what is a green supply chain? How is it compared to the traditional supply chain? What are the reasons for green supply chain evolution? What are the key network design patterns and what are the directions for future research?

1 DEFININING GREEN SUPPLY CHAIN

The "green supply chain" term was suggested for the first time by the manufacturing research consortium of Michigan University in 1996 in order to study the environmental impacts and resource optimization of manufacturing supply chain (Hanfield, 1996). In the literature, the definition of green supply chain varies according to each researcher perception; it varies from green purchasing to integrated supply chain. Beamon, (1999) has defined it as the extension of the traditional supply chain in order to include activities that aim at minimizing the environmental impacts of a product throughout its life cycle, such as eco-design, resource saving, reduction of hazardous materials and the reuse and recycling of products.

According to Gilbert (2001), the green supply chain is the integration process of environmental concerns in purchasing decisions and in long-term relationships with suppliers. Hervani *et al.*, (2005) have defined it as the sum of the green procurement, the green manufacturing, the green distribution/ marketing and reverse logistics. Davies and Hochman (2007) define it as a focused effort across the organization. It is more than implementing green practices, but rather a coherent and comprehensive approach to

improving the environmental performance of all levels of management and the floor. Srivastava (2007) defined the green supply chain management as the integration of environmental thinking in the supply chain management, including product design, materials supply, and selection of manufacturing processes, finished product delivery to consumers as well as the management of product end of life after its useful life. According to Walker *et al.* (2008), it is a concept that covers all stages of the product life cycle, from raw materials extraction through the design, production and distribution stages, product use by consumers and their treatment at the end of their life cycle. Sarkis *et al.* (2011) define it as the integration of environmental concerns in the inter-organizational practices of the supply chain management, including reverse logistics.

2 DEFFERENCES BETWEEN TRADITIONAL SUPPLY CHAIN AND GREEN SUPPLY CHAIN

Despite interdependencies between traditional and green supply chains, many differences exist between the two concepts. Seuring, (2004) compares the green supply chain and traditional supply chain, using five criteria, the physical basis, the conceptual basis, actors, the cooperation and the target. The author found out similarities and differences between the two concepts. He explained this by the existing difference between the life-cycle principle and the traditional supply chain principle, as well as the cooperation nature between actors. Ho *et al.* (2009) compare traditional and green supply chains in terms of objective, ecological optimization, supplier selection, cost, and responsiveness/flexibility. We summarize the main differences between the two chains.

Objectives: the traditional supply chain seeks economic objectives, such as cost/profit, customer satisfaction, responsiveness and flexibility (Gopal and Thakkar, 2012). In contrast, the green supply chain seeks a compromise between traditional economic and environmental goals (Beamon, 1999; Hervani *et al.*, 2005; El Saadany *et al.*, 2011).

Structure: the traditional supply chain has a linear structure which material and information flow between business partners are unidirectional. The original manufacturer responsibility often ends with the delivery of the product to the final user

or just after the end of the warranty period. Contrariwise, the structure of the green supply chain is cyclic. The product life cycle becomes closed to include the steps, use and after end of product life. The materials and information flow in the supply chain, integrating reverse logistics are exchanged in both directions between actors. This sets up a value-loop, which integrates all stages of the product life cycle. Data sharing: sharing of relevant information between the partners in the supply chain is generally related to commercial transactions and sometimes-technical assistance. While in the green supply chain, data sharing is a key parameter in improving the economic and environmental performance of the supply chain (Faisal, 2010).

Supplier selection: In the classical supply chain, supplier selection is based primarily on price and limited access to economic values and guided by a short-term partnership. Each member of the chain is responsible for its own direct environmental impact and can work closely with other chain members, but regardless of the overall impact of the supply chain. In green supply chain, supplier selection takes into consideration the economic and ecological criteria. The cooperation is strong and requires a long-term partnership based on mutual trust between partners. Partnership allows supply chain partners to exchange information and expertise about design and product development, reducing carbon emissions, packaging and wastes, and therefore exploiting the green chain maximum potential (Vachon and Klassen, 2006).

Responsiveness and flexibility: Due to the purpose of the green supply chain, the performances of responsiveness and flexibility are constrained by the reduction of carbon emissions and therefore these two characteristics are lower compared to traditional supply chain.

3 MOTIVATIONS TO GREEN SUPPLY CHAIN

Previously, companies assumed that incorporating green practices into their business strategy cost money, but now they realize that the negligence of the negative environmental impacts will come up with high cost in the future (Van der Zee, 2008). Nowadays, sustainability requires that supply chains become extended to include reverse

logistics and look at the whole product life cycle in order to optimize the product, from the perspective of cost and cost of environmental impacts (Linton *et al.*, 2007). Walton *et al.* (1998) add that environmental concerns have become an integral part of the strategic planning of organizations, because of regulations increasingly strict and environmental responsibility requirements. The integration of green practices in the supply chain leads to improving the competitiveness and economic and operational performance of the company (Rao and Holt, 2005).

In Canada, a recent study shows that manufacturers who have adopted green logistics practices noticed an improvement of their environmental and economic performances (Industry Canada, 2009). Green supply chain drivers can be grouped into five categories: regulations, markets, suppliers, customers and company internal factors (Zhu and Sarkis, 2004; Walker and al., 2008).

The classification of these pressures based on their importance is difficult; it depends on several factors such as the country, the industrial sector and size of the surveyed companies. For example, (Zhu and al., 2008) conducted an investigation about pressures on Chinese companies from the four following industries: automobile, power, chemistry/petro-chemistry and electric/electronics. The authors found out differences between industries in terms of motivations and practices. Zhu *et al.*, (2005) compare motivations to green supply chain by a number of companies in China and the United States. They found a significant difference between the two countries.

Holt and Ghobadian (2009) conducted an empirical study about motivations for green manufacturing supply chain in England. Their results show that the greatest pressure to improve the practices of green supply chain are legislation and organisation internal factors, followed by, competitive factors, and pressure from customers and social factors. Thun and Müller (2010) do a survey about the main motivations for the adoption of green supply chain in the automotive industry in Germany and found out that customers and competitors are the most important pressures. While internal motivations play only a secondary role.

4 MAIN GREEN SUPPLY CHAIN DESIGN MODELS

General speaking, the design decisions of a traditional supply chain include determining the number, location, mission and capacity of sites, allocation of products, customers and suppliers to sites, and selection of transportation modes and manufacturing technologies (Klibi *et al.*, 2010). The design of the green supply chain include design decisions of the supply chain integrating closed-loop reverse logistics, decisions regarding the reduction of carbon emissions, capacity utilization, energy and materials resources and regulatory factors concerns (Paksoy *et al.*, 2012). Closed-loop supply chain is the basis of green supply chain network design. It aims to determine the best network structure and configuration by simultaneously following the business-strategy objectives and considering the network conditions, such as the availability of markets for new and processed products, the availability of technology, the quality of the returned products, capacity levels. For example, the rate of return of goods at the end of their useful life is an essential parameter for the choice of the integration level of reverse logistics activities. For example, when the return rate is high, the difference in terms of cost is low between sequential and integrated approach (Fleischmann *et al.*, 2001). Recent literature reviews reported the characteristics of design models for a reverse logistics and closed-loop supply chain (Chanintrakul *et al.*, 2009; Akçali *et al.*, 2009; Aras *et al.*, 2010; Sheriff *et al.*, 2012). We have noticed a significant increase in models dealing with the reverse logistics chain and closed-loop supply chain network design. Most of these models have purely economic objectives such as cost minimization and profit maximization. In line with the purpose of this article, we present in this section, the main design models of green closed-loop supply chain that balances economic and environmental objectives. Table 1 and table 2 summarize the main closed-loop supply chain models (see the annex).

According to Neto *et al.* (2010), efficient green supply chain management requires a change in structure and objectives of supply chain, therefore in this section, we present in detail only the main models for designing green closed-loop supply chains chain, that maximize both economic and environmental performances.

Krikke *et al.* (2003) were the first to introduce a model that integrates product design and design of integrated closed-loop supply chain. The authors present their model as a linear program in mixed integer numbers with an objective function that combines both costs and environmental impacts (energy and residual waste). The model is applied to a fridge manufacturing case. Three possible fridge designs and different configurations of a closed-loop supply chain are analyzed.

Neto *et al.* (2008) introduced a static model of linear programming in mixed integer numbers for the design of integrated closed-loop supply chain. The model allows trade-offs assessment between cost reduction and reducing the total environmental impact of the life cycle, under the regulatory constraints. The model is applied to European supply chain of pulp and paper manufacturing. An integrated forward/ reverse supply chain network design should consider two types of interrelated factors: conditions of the logistics network (capacity level, stock level, the quantities of demand and return, and the selection of returns treatment options (Riopel *et al.*, 2011). Chaabane *et al.* (2012) propose a linear program in mixed integer numbers for the design of a green supply chain. The model is multi-period, multi-product and bi-objectives. It is formulated based on the principles of the life cycle analysis. It aims trade-offs assessment between cost minimization and minimization of the amount of carbon emissions of an integrated closed-loop recycling supply chain. In addition to conventional decisions of location/allocation, the model allows the selection of production technology and the transportation mode, and it has also establishes the link with the exchange system of carbon emissions under different emission limits. After applying the model on the aluminum production/recycling, the authors conclude that the implementation of effective management strategies of carbon credits readily help decision-makers achieving their sustainability goals.

Paksoy *et al.* (2012) propose a model based on indecisive linear programming for optimization of an integrated closed-loop supply chain. The model is multi-objective; it aims to reconcile four objectives: minimizing transport costs in the traditional supply chain, minimizing transport costs in reverse logistics; minimizing the total transport

emissions throughout the integrated chain; and encouraging customers to use recyclable materials. The model takes into account the impact of uncertainties in capacity and customer demand. In addition, the authors compare and comment on the performance of three weighting approaches of model objectives.

Amin and Zhang (2012) propose a stochastic model based on linear mixed integer programming. The model is bi-objectives; it minimizes the total cost of the integrated supply chain and maximizes use level of recyclable materials and clean technologies. Two types of uncertainty are modeled; demand uncertainty and uncertainty of return rate of goods at the end of their use. The model is subsequently applied on a literature example that deals with the case of copiers manufacturing supply chain.

Abbreviations used in Table 1 and Table 2.

MILP linear program in mixed integer numbers; SMILP: stochastic MILP; FMILP: Fuzzy MILP; M: Multiple; MRec: recyclable materials; CTech: Clean Technology; ECO2: CO2 emissions; RM: Raw materials; QRM: Raw material quality; LCA: Life cycle analysis; Min: Minimization; Max: Maximization; D: Demand; QR: Quantity of return; QlR: Quality of return.

Table 1: Deterministic models for green supply chain network design

Paper	Model	Objectives	Number of levels	Number of periods	Number of products
Fleschmann et al (2001)	MIP	Min Costs	M	1	1
Krikke et al.(2003)	MIP	Min Costs Min Energy Min Wastes	M	1	1
Beamon and Fernandes (2004)	MIP	Min Costs	M	M	1
Salema et al.(2006)	MIP	Min Costs	M	1	M
Lu et Bostel (2007)	MIP	Min Costs	M	1	1
Ko et Evans (2007)	MINP	Min Costs	M	M	M
Lee and Dong(2008)	MIP	Min Costs	M	1	1
Wang et al. (2010)	MIP	Min Costs	M	1	1
Salema et al. (2010)	MIP	Min Costs	M	M	M
Pishvaee et al (2010)	MIP	Min Costs Max Responsiveness	M	1	1
Neto et al. (2008)	MILP	Min Costs Min LCA impact	M	1	1
Chaabane et al (2012)	MILP	Min Costs Min ECO2	M	M	M

Table 2: Stochastic models for green supply chain network design

Paper	Model	Objectives	Number of levels	Number of periods	Number of products	Uncertain parameter
Salema et al (2007)	SMIP	Min Costs	M	1	M	D,QR
Chouinard et al (2008)	SMIP	Min Costs	M	1	M	D, QR, QIR
Pishvaee et al (2009)	SMIP	Min Costs	M	1	1	D,QR, QIR,
Lee et Dong (2009)	SMNIP	Min Costs	M	M	M	D,QR
El-Sayed et al(2010)	SMIP	Max Profit	M	M	M	D,QR
Pishvaee et al (2011b)	RMIP	Min Costs	M	1	M	D, QR
Zeballos et al(2012)	SMIP	Max Profit	M	M	M	D,QR, QIR
Ramezani et al (2012)	SMIP	Max Profit Max service Min QMP	M	1	M	D,QR
Amin and Zhang (2012)	SMILP	Min costs Max MRec + CTech	M	1	M	
Paksoy et al(2012)	FMILP	Min costs Min ECO2	M	1	1	

5 CONCLUSION AND RESEARCH AVENUES

In this article, we clarified the confusion that comes up with the concept of green supply chain and its relationship with the traditional supply chain. Many factors stimulate companies to implement green supply chain practices. We have also noticed that the number of design models of green supply chain is still quite low. The existing closed-

loop supply chain models consider some realistic assumptions such as the multi-level dimension, planning dynamic horizon, products diversity, the impact of the uncertainty associated with demand, return rate and quality. According to Wilkerson (2005), the main objective of any green supply chain is reducing environmental impacts while gaining more profit. In this review we conclude that most of studied models are single-objective and their objectives are costs-driven and are not profit-driven. Therefore, many research opportunities arise, such as:

- Need of more multi-objective and profit- driven mathematical models that balance economic, environmental and resource consumption goals.
- Some realistic assumptions should be considered: several products, several planning periods, infrastructure and transportation sharing between reverse logistics and traditional supply chain activities.
- Impact of carbon emissions regulations on the closed-loop supply chain performances.
- In contrast to stochastic modeling, how to proactively reduce the uncertainty associated with the quantity and quality of returns in a closed-loop supply chain context.

6 REFERENCES

- Akçali, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231-248.
- Amin, S.H., & Zhang, G. (2012). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*.
- Aras, N, Boyacı, T, & Verter, V. (2010). Designing the reverse logistics network. In M. Ferguson, G. Souza (Eds.), *Closed Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*, CRC Press, pp. 67-98.

- Beamon, B.M. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management, 12*(4), 332-342.
- Beamon, B.M., & Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control, 15*(3), 270-281.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., & Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Performance and Supply Chain Modeling, 1*, 61-81.
- Chouinard, M., D'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics, 113*(2), 657-677.
- Davies, J., & Hochman, S. (2007). The greening of the supply chain. *Supply Chain Management Review, 11*(5), 13-4.
- Elbounjimi, M., Abdul-Nour, G., & Ait kadi, D. (2013). Contribution à la conception des chaines logistiques vertes. Congrès international de génie industriel, La Rochelle, France.
- El Saadany, A.M.A., Jaber, M.Y., & Bonney, M. (2011). Environmental performance measures for supply chains. *Management Research Review, 34*(11), 1202-1221.
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward reverse logistics network design under risk. *Computers and Industrial Engineering 58, 719*(3), 423-431.
- EPA – United States Environmental Protection Agency (2000). The Lean and Green Supply Chain: A practical guide for materials managers and supply chain managers to reduce costs and improve environmental performance. Washington, D.C.
- Faisal, M.N. (2010). Sustainable supply chains: A study of interaction among the enablers. *Business Process Management Journal, 16*(3), 508-529.
- 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.

- Frota Neto, J.Q., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Nunen, J.A.E.E., & Van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 195-208.
- Frota Neto, J.Q., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J.A.E.E., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: The WEEE case. *International Journal of Production Research*, 48(15), 4463-4481.
- Gilbert, S. (2001). Greening supply chain: enhancing competitiveness through green productivity. Tapei, Taiwan.
- Goetschalcks, M., & Fleischmann, B. (2008). Strategic network design. *Supply Chain Management and Advanced Planning*, 117-132.
- Gopal, P.R.C, & Thakkar, J (2012). A review on supply chain performance measures and metrics: 2000-2011. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61(5), 518-547.
- Handfield, R.B. (1996). Green Supply Chain: Best Practices From the Furniture Industry. Proceedings Annual Meeting of the Decision Science Institute. USA. No.3., l295-l297.
- Hervani, A.A., Helms, M.M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An International Journal*, 12(4), 330-53.
- Ho, J.C., Shalishali, M.K, Tseng, T, & Ang, D.S. (2009). Opportunities in Green Supply Chain Management. *The Coastal Business Journal*, 8(1).
- Holt, D., & Ghobadian, A. (2009). An empirical study of green supply chain management practices amongst UK manufacturers. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(7), 933-56.
- Ilgin, M.A., & Gupta, S.M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), 563-591.
- Industrie Canada (2009). Green Supply Chain Management Logistics & Transportation Services – A Canadian perspective. <http://www.ic.gc.ca>.

- Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293.
- Ko, H.J., & Evans, G.W. (2007). A genetic-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers and Operations Research*, 34(2), 346-366.
- Krikke, H.R., Bloemhof-Ruwaard, J.M., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719.
- Krikke, H.R., 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), 111-139.
- Lee, D.H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E*, 44(3), 455-474.
- Lee, D.H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E*, 45(1), 61-71.
- Linton, J.D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*, 25.
- LMI (2003). GREENSCOR: Developing a green supply chain analytical, Report LG1 01T4. Logistics Management Institute.
- Lu, Z., & Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers and Operations Research*, 34(2), 299-323.
- Paksoy, T., Pehlivan, N.Y., & Özceylan, E. (2012). Fuzzy multi-objective optimization of a green supply chain network with risk management that includes environmental hazards. *Human and Ecological Risk Assessment*, 18(5), 1120-1151.

- Pishvaee, M.S., Farahani, R.Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective 769 integrated forward/reverse logistics network design. *Computers and Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
- Rao, P., & Holt, D. (2005). Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management*, 25(9), 898-916.
- Riopel, D., Chouinard, M., Marcotte, S., & Ait kadi, D. (2011). Ingénierie et gestion de la logistique inverse. Hermes-Science, Lavoisier.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336-349.
- Salema, M.I., Povoa, A.P.B., & Novais, A.Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077.
- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130, 1-15.
- Seuring, S., & Muller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.
- Sheriff, K.M.M., Gunasekaran, A., & Nachiappan, S. (2012). Strategic perspective. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(2), 171-194.
- Srivastava, K.S. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Thun, J.H., & Müller, A. (2010). An empirical analysis of green supply chain management in the German automotive industry. *Business Strategy and the Environment*, 19, 119-132.

- Vachon, S., & Klassen, R.D. (2006). Extending green practices across the supply chain: The impact of upstream and downstream integration. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(7), 795-821.
- Van der Zee, B. (2008). *Green Business*, 1st edition. London: Dorling Kindersley.
- Walker, H., Di Sisto, L., & McBain, D. (2008). Drivers and barriers to environmental supply chain management practices: Lessons from the public and private sectors. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 14(1), 69-85.
- Walton, S.V., Handfield, R.B., & Melnyk, S.T. (1998). The green supply chain: Integrating suppliers into environmental management process. *International Journal of Purchasing & Materials Management*, spring, 2-11.
- Wang, H.F., & Hsu, H.W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers and Operations Research*, 37(2), 376-389.
- Wilkerson, T. (2005). *Can One Green Deliver Another?* Harvard Business School Publishing Corporation.
- Zeballos, L.J., Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2012). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 47, 237-247.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Geng, Y. (2005). Green supply chain management in China: pressures, practices and performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(5), 449-468.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. (2008). Green supply chain management implications for "closing the loop". *Transportation Research Part E*, 44(1), 1-18.

ANNEXE II

A COLLOCATION-BASED APPROACH FOR DESIGNING REMANUFACTURING
CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK

Cet article s'intitule « A collocation-based approach for designing remanufacturing closed-loop supply chain network ». J'ai œuvré comme auteur principal au développement et à la rédaction de l'article. L'article a été accepté et publié à l'*International Journal of Supply and Operations Management*, 3(2), 2015.

A COLLOCATION-BASED APPROACH FOR DESIGNING REMANUFACTURING CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN NETWORK

Mbarek El Bounjimi¹, Georges Abdul-Nour¹ and Daoud Ait-kadi²

1. Department of Industrial Engineering-University of Québec in Trois-Rivières, Canada.
2. Department of mechanical Engineering, Laval University, Canada.

Abstract: Closed-loop supply chain network design is a critical issue due to its impact on both economic and environmental performances of the supply chain. In this paper, we address the problem of designing a multi-echelon, multi-product and capacitated closed-loop supply chain network. First, the problem is modelled by a mixed-integer non-linear programming formulation that aims to maximize the total closed-loop supply chain profit. The model is linearized and solved by LINGO. Computational results and sensitivity analysis are conducted to show the performance of the proposed model. The main contribution of the proposed model is addressing two economic viability issues of closed-loop supply chain. The first issue is the collection of sufficient quantity of end-of-life products which are assured by retailers against an acquisition price. The second issue is exploring the benefits of colocation of forward facilities and reverse facilities.

Keywords: Closed-loop supply chain; Collocation decision; Network design; Remanufacturing.

1 INTRODUCTION

Traditionally, supply chains have been managed as linear systems, in which efficient approaches are often used to reduce costs and time of the network activities, starting from raw material suppliers to manufacturers and through distributors and retailers to end customer, but without considering end-of-life products management in the corporate strategy and in the product design. Under various drivers, such as the economic opportunities, environmental legislations and growing customer concerns, closed-loop supply chains have proactively been initiated by some leading companies such as General Motors, Kodak and Xerox, etc., and have attracted more researchers to this field. The logistics network design integrating reverse logistics is a crucial issue because of its impact on economic and environmental performance. In addition to traditional location/allocation decisions, additional decisions must be made to ensure the economic viability of the logistics network. The first question relates to the coordination and sharing of existing resources between activities in and out (Wang and Hsu, 2010). For example, hybrid treatment plants have cost savings and the reduction of pollution as a result of the sharing of means of transport and infrastructure. The second problem is related to decisions regarding the anticipated acquisition which allows better control of the amount, time and quality of end-of-life products (Guide *et al.*, 2003). Another question is to choose the best collection channel collection (Savaskan *et al.*, 2004). This paper deals with these issues using a mixed integer programming formulation. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 presents the related literature review. Section 3 presents a description of the problem section 4 introduces the mathematical model. Section 5 presents the results and Section 6 is dedicated to the conclusion.

2 RELATED LITERATURE REVIEW

During the last decade, many models were developed for reverse logistics and closed-loop supply chain network design. Most of these models have been developed based on the facility location theory. For extensive reviews, see El Bounjimi *et al.* (2014). The existing models are ranging from single product, single period deterministic mixed-

integer linear programming models (Fleischmann *et al.*, 2001) to multiple product, multiple period stochastic mixed-integer nonlinear programming models (Lee, and Dong, 2009). Table 1 summarize the characteristics of the main papers related to the literature review. Fleischmann *et al.* (2001) were among the first who model an integrated forward/reverse supply chain network design. They studied the economic impact of integrating reverse flows in the forward supply chain and concluded that depending on the problem context, an integrated design of forward and reverse supply chain can provide significant cost benefit against a sequential design. Beamon and Fernandes (2004) present a multi-period and capacitated MILP model to determine a closed-loop supply chain (CLSC) with hybrid manufacturing/remanufacturing. Salema *et al.* (2007) extend the model of Fleischmann *et al.* (2001) to include multi-product, capacity limitation and uncertainty aspects. Also, Ko and Evans (2007) developed a mixed integer nonlinear programming formulation to design an integrated forward/reverse logistics network driving by a third-party logistics provider and they present a MINLP model for the simultaneous design of the forward and return network. Demirel and Gökçen (2008) developed a multi-product MILP model to design a network composed of manufacturing, distribution sites, collection and disassembly sites. They concluded that companies should provide appropriate incentives for customers and retailers to increase the amount of return. Wang and Hsu (2010) presented a MILP model for designing a CLSC network for a single product. Amin and Zhang (2012) proposed a MILP model based on lifecycle for a network consisting of manufacturing facilities, collection, repair, disassembly, recycling and disposal. The model considers three types of returns (commercial returns, end-of-life products and end-of-use products). Pishvaee *et al.* (2010) developed a MILP model to configure a CLSC in which sites have limited capacity and selection of hybrid sites distribution/collection is a decision variable. Due to high uncertainty in reverse logistics supply side, establishing efficient acquisition strategies with the end-user leads to minimize uncertainty in quantity, timing, and relatively in quality of used-products, and therefore helps to good planning of capacities and operations (Guide and al., 2003). Acquisition strategies can

be divided in two groups: financial incentives given to end-user to return its products before the end-of-life, and organizational incentives, referring to leasing or rental of product for a period. Another aspect related to collection issue is to determine who collect the used products from their end-users. Savaskan *et al.* (2004) found that retailer is better positioned to collect return than OEM and third party. The cost-saving from integrating forward and reverse facilities is studied in numerous papers, for instance Pishvaee *et al.* (2010) developed a bi-objective MINLP based approach to minimize the total cost, and maximize the responsiveness of an integrated forward/reverse logistics network. Lee, and Dong, 2009 developed an MILP model for integrated logistics network design for end-of-lease computer products. They consider a simple network with a single production center and a given number of hybrid distribution/collection facilities to be opened. Keyvanshokooh *et al.* (2013) developed a multi-period, multi-product MILP for designing a CLSC network. Their model determines among others, decisions related to hybrid distribution/collection centers locations. In order to structure relevant literature review of this work and also to show the main contributions of this paper, we have classified the most previous papers according to five general characteristics: problem definition, modelling, objectives, decision variables (see Table 1). The characteristics of our paper is presented in the last row of this table.

In summary, the majority of existing models have focused on segregate location of forward and reverse facilities and considered the reverse logistics as a waste-driven system, in which there is no control on return supply. Thus, the proposed model aims to design a multi-product, multi-hybrid facilities CLSC network. In addition, unlike the common practice in the literature, we address colocation of all facilities (manufacturing/remanufacturing and distribution/collection) as well as collection is carried out by retailers who have direct and frequent contacts with consumers.

3 PROBLEM DEFINITION

The closed-loop supply chain discussed in this paper is a multi-product and multi-stage closed-loop supply chain. The general structure of the proposed closed-loop supply

chain is illustrated in Figure 1. In the forward flow, products are delivered to a number of retailers from manufacturing and remanufacturing plants via distribution centers to meet the given demand of each retailer. It should be noted that remanufactured products are considered as the new ones and they are sold at the same price.

The returned products after been collected and inspected are sorted into two groups: products to be remanufactured and not-recoverable products. The first group will be sent to remanufacturing plants while the second group will be sent to disposal centers. It should be noted that after the recovery process, the recovered products are entered to forward flow as new ones. In this problem, instead of locating forward facilities and reverse facilities separately, this model takes the hybrid facilities into account wherein both forward and reverse facilities are established at the same locations.

Since hybrid processing facility can be used or not depending on the trade-off of fixed opening costs and variable costs. That is, in this problem, hybrid facility location is a decision variable.

The following assumptions are considered in the model formulation:

1. The model is multi-echelon and multi-product;
2. To ensure enough quantity of return, financial incentive is paid to retailer for every used product collected;
3. All retailers' demands are deterministic and should be satisfied;
4. Quantity of return from each retailer is a fraction of its previous demand;
5. Return is known as a percentage of used products acquired by retailer;
6. Excepting suppliers and disposal centres, all other facilities are capacitated;
7. Potential locations, capacities of all facilities, and all cost parameters are predetermined.

Table 1. The reviewed articles characteristic

Article	Problem definition				Modelling approach		Objectives			Decision variables				
	Multi-product	Multi-period	Limited Capacity	Multi-stages	Proactive Acquisition	MILP	MINLP	Costs	Profit	Others	Location/Allocation	Hybrid facilities	Transportation amount	Capacity selection
Fleischmann, <i>et al.</i> (2001)			•		•			•			•		•	
Beamon and Fernandes (2004)		•	•		•			•			•		•	
Salema <i>et al.</i> (2007)	•		•	•		•		•			•		•	
Ko and Evans (2007)	•	•	•	•				•	•		•	•	•	
Lee and Dong (2009)				•		•		•			•		•	
Demirel and Gökçen (2008)	•		•	•		•		•			•		•	
Wang and Hsu (2010)			•	•				•			•		•	
Pishvaee <i>et al.</i> (2010)			•	•	•			•		•	•	•	•	•
Amin and Zhang (2012)	•		•	•					•		•		•	
Keyvanshokooh <i>et al.</i> (2013)	•	•	•	•	•	•		•			•		•	
Our article	•		•	•	•	•			•		•	•	•	

4 MODEL FORMULATION

Before introducing the mathematical formulation, we first provide a verbal description of the model as follows:

Objective Function = Minimization of Fixed opening costs + Transportation costs - Savings from colocation of facilities + Production costs + Remanufacturing costs + Acquisition costs of used products + Inspection costs + Disposal costs.

Subject to:

- Satisfying all forward and reverse demands;
- Flows balancing between network nodes;

- Capacity constraints;
- Logical constraints related to facilities location;
- Non-negativity and binary constraints.

The following notations are used in the formulation of the model:

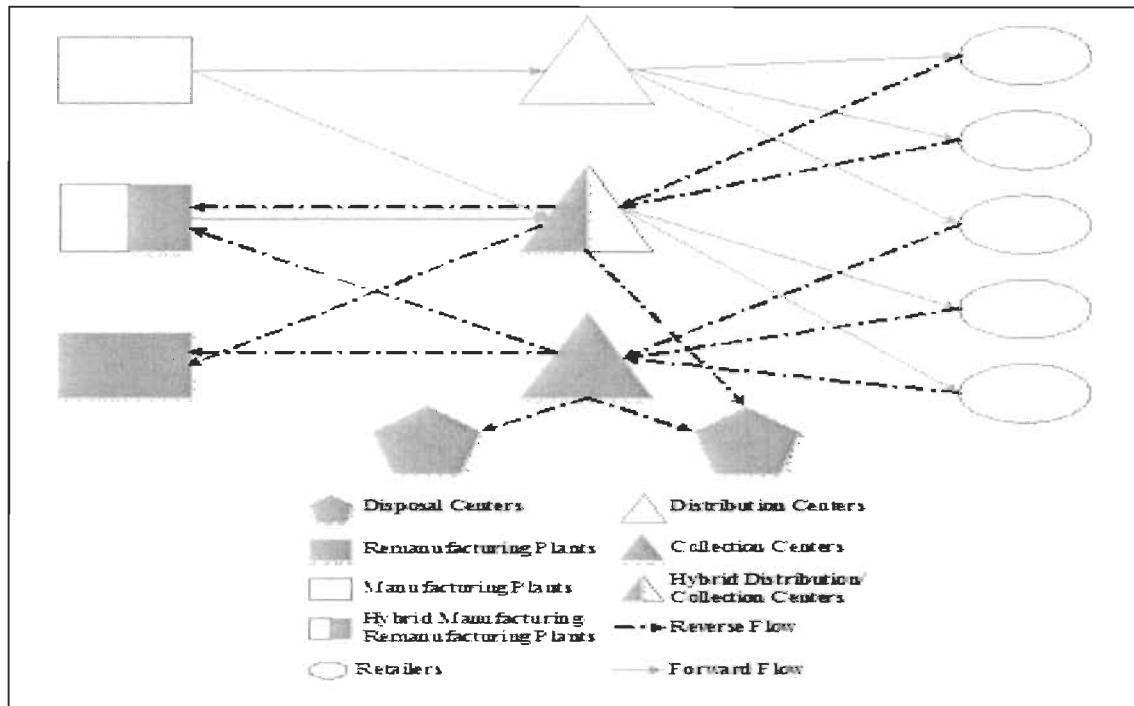


Figure 1. The closed-loop remanufacturing supply chain network

Notations

Sets and Index

I : Set of potential locations for manufacturing plants, $i \in I$;

L : Set of potential locations for remanufacturing plants, $l \in L$;

E : Set of potential colocations for manufacturing plants and remanufacturing plants
 $e \in E, E \subset I, E \subset L; J : \text{Set of potential locations for distribution centers, } j \in J$;

K : Set of potential locations for collection centers, $k \in K$;

F : Set of potential locations for hybrid distribution/collection centers, $f \in F, F \subset J, F \subset K$;

N : Set of fixed locations of retailers, $n \in N$;

M : Set of fixed locations of final disposal centers, $m \in M$;

P : Set of products, $p \in P$;

Parameters

D_{np} : Demand of retailer n for product p ;

α_p : Rate of return of product p ;

β_p : Rate of return of product p from retailer n ;

FmP_i : Fixed cost for opening a manufacturing plant at location i ;

FrR_l : Fixed cost for opening a remanufacturing plant at location l ;

FD_j : Fixed cost for opening a distribution center at location j ;

FC_k : Fixed cost for opening a collection center at location k ;

GP_e : Fixed saving cost associated with opening hybrid manufacturing/remanufacturing plant at location e ;

GD_f : Fixed saving cost associated with opening a hybrid distribution/collection center at location f ;

$CAPM_{ip}$: Capacity of manufacturing plant i for product p ;

$CAPR_{lp}$: Capacity of remanufacturing plant l for product p ;

$CAPD_{jp}$: Capacity of distribution center j for product p ;

$CAPC_{kp}$: Capacity of collection center k for product p ;

C_{Apn} : Unit acquisition price for product p from retailer n;

CP_p : Unit manufacturing cost of product p;

CR_{Rem_p} : Unit remanufacturing cost of product p;

TI_{pij} : Unit transportation cost for product p shipped from manufacturing plant i to distribution center j;

TL_{plj} : Unit transportation cost for product p shipped from remanufacturing plant l to distribution center j;

TJ_{pjn} : Unit transportation cost for product p shipped from distribution center j to retailer n;

$TN_{p nk}$: Unit transportation cost for product p shipped from retailer n to collection center k;

TK_{plk} : Unit transportation cost for product p shipped from collection center k to remanufacturing plant l;

TKM_{pkl} : Unit transportation cost for product p shipped from collection center k to disposal center m;

Decision variables

A_i : Binary variable equals to 1 if a manufacturing plant is opened at location i, 0 otherwise;

B_l : Binary variable equals to 1 if a remanufacturing plant is opened at location l, 0 otherwise;

C_j : Binary variable equals to 1 if a distribution center is opened at location j, 0 otherwise;

D_k : Binary variable equals to 1 if a collection/inspection center is opened at location k, 0 otherwise;

$Y_e = A_e * B_e$: Colocation binary variable equals to 1 if a manufacturing plant and a remanufacturing plant are both opened at location $e \in E$ ($E \subset I, E \subset L$), 0 otherwise;

$Z_f = C_f * D_f$: Colocation binary variable equals to 1 if a distribution center and a collection/inspection center are both opened at location $f \in F$ ($F \subset J, F \subset K$), 0 otherwise;

X_{ij}^{plj} : Quantity of product p shipped from manufacturing plant i to distribution centre j;

X_{lj}^{plj} : Quantity of product p shipped from remanufacturing plant l to distribution centre j;

X_{jn}^{pnj} : Quantity of product p shipped from distribution centre j to retailer n;

X_{nk}^{pnk} : Quantity of product p shipped from retailer n to collection center k;

X_{kl}^{plk} : Quantity of product p shipped from collection centre k to remanufacturing plant l;

X_{km}^{plm} : Quantity of product p shipped from collection center k to disposal center m.

According to the above assumptions, indices, parameters and variables decision, the problem can be formulated, as a mixed integer non-linear programming (MINLP) model:

$$\text{Min. Total costs} = \sum_i F_m P_i A_i + \sum_j Fr P_j B_j + \sum_l FD_l C_l + \sum_k FC_k D_k - \sum_e GP_e A_e B_e$$

$$- \sum_f GD_f C_f D_f + \sum_p \sum_i \sum_l CM_{pi} X_{ij}^{plj} + \sum_p \sum_l \sum_j CR_{pj} X_{lj}^{plj} + \sum_p \sum_i \sum_l TC_{pi} X_{il}^{pli} +$$

$$\begin{aligned}
& \sum_p \sum_l \sum_j T L_{plj} X I_{plj} + \sum_p \sum_l \sum_n T J N_{pln} X J N_{pln} + \sum_p \sum_n \sum_k T N K_{pnk} X N K_{pnk} + \\
& \sum_p \sum_k \sum_l T K L_{plk} X K L_{plk} + \sum_p \sum_k \sum_l T K M_{plm} X K M_{plm} + \sum_p \sum_n \sum_k C A_{pn} X N K_{pnk} + \\
& \sum_p \sum_n \sum_k C I n s_{pn} X N K_{pnk}
\end{aligned} \tag{1}$$

Subject to:

$$\sum_j X J N_{pln} \leq D_{np} \quad \forall n, p \tag{2}$$

$$\sum_k X N K_{pnk} \leq \alpha_p D_{np} \quad \forall n, p \tag{3}$$

$$\sum_i X I J_{plj} + \sum_l X L J_{plj} = \sum_n X J N_{pln} \quad \forall j, p \tag{4}$$

$$\sum_l X K L_{plk} + \sum_m X K M_{plm} = \sum_n X N K_{pnk} \quad \forall k, p \tag{5}$$

$$\sum_m X K M_{plm} \leq \beta_p \sum_n X N K_{pnk} \quad \forall k, p \tag{6}$$

$$\sum_i X I J_{plj} \leq A_i C A P M_{ip} \quad \forall i, p \tag{8}$$

$$\sum_i X L J_{plj} \leq B_l C A P R_{lp} \quad \forall l, p \tag{7}$$

$$\sum_i X K L_{plk} \leq B_l C A P R_{lp} \quad \forall l, p \tag{8}$$

$$\sum_i X I J_{plj} + \sum_l X L J_{plj} \leq D_j C A P D i s_{jp} \quad \forall j, p \tag{9}$$

$$\sum_n X N K_{pnk} \leq C_k C A P C o l_{kp} \quad \forall k, p \tag{10}$$

$$\sum_m X K M_{plm} + \sum_i X K L_{plk} \leq C_k C A P C o l_{kp} \quad \forall j, p \tag{11}$$

$$A_i, B_j, C_k, D_l \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, l \quad (12)$$

$$X_{ijkl}, X_{ljk}, X_{jkl}, X_{nkm}, X_{kln}, X_{mkn} \geq 0 \quad i, j, l, k, n, p \quad (15)$$

The objective function (1) minimizes the total costs including fixed opening costs, the costs savings associated with integrating facilities at the same locations, manufacturing costs, remanufacturing costs, transportation costs, acquisition costs of used products from retailers, inspection costs, and disposal costs. Constraint (2) ensures that the demand of each customer is satisfied. Constraint (3) states that returned products from each retailer should be equal or smaller than a prefixed fraction of retailer demand. Constraints (4) and (5) assure the flow balance at distribution centre and collection/inspection centre. Constraints (6) and (7) ensure that the amount of products sent to disposal centre should be equal or smaller to prefixed ratio of the return amount and the rest of this amount will be send to remanufacturing plant. Constraint (8) ensures the respect of manufacturing plant capacity. Constraints (9) and (10) ensure the respect of remanufacturing plant capacity. Constraint (11) states that the amount of used products shipped from retailer to collection/inspection centre should be equal or smaller than its capacity. Constraint (12) and (13) state the respect of collection/inspection center. Constraints (14) and (15) enforce the binary and non-negativity requirements of the decision variables.

Linearization of the MINLP model:

The multiplication of two binary variables in the objective function involves two non-linear terms: $\sum_e GP_e A_e B_e$ and $\sum_f GD_f C_f D_f$. To overcome this complexity, the model is

linearized by replacing the multiplication of two binary variables by one binary variable. Thus, the reformulation of the objective function is as follows:

$$Y_e = A_e B_e, \quad Y_e \in \{0, 1\}, \forall e \in E$$

$$Z_f = C_f D_f, \quad Z_f \in \{0, 1\}, \forall f \in F$$

$$MIN = \sum_i CP_i A_i + \sum_l FrP_l B_l + \sum_j FD_j C_j + \sum_k FC_k D_k - \sum_s GP_s Y_s - \sum_t GD_t Z_f$$

$$+ \sum_p \sum_i \sum_l CM_{pl} Xl_{plj} + \sum_p \sum_i \sum_l CR_{pl} XL_{plj} + \sum_p \sum_i \sum_l TCII_{plj} Xl_{plj} + \sum_p \sum_i \sum_l TLJ_{plj} XL_{plj}$$

$$+ \sum_p \sum_j \sum_n TN_{pjn} XjN_{pjn} + \sum_p \sum_n \sum_k TNK_{pnk} XNK_{pnk} + \sum_p \sum_k \sum_l TKL_{plk} XKL_{plk}$$

$$+ \sum_p \sum_k \sum_l TKM_{plk} XKM_{plk} + \sum_p \sum_n \sum_k CA_{pn} XNK_{pnk} + \sum_p \sum_n \sum_k CIns_{pn} XNK_{pnk}$$

When a manufacturing plant and a remanufacturing plant are collocated at the same place ($Y_e = A_e B_e = 1$), this involves that both manufacturing plant and remanufacturing

plant should be opened in this location ($A_e = 1$ and $B_e = 1$). Also when a distribution center and a collection/inspection centre are collocated at the same place ($Z_f = C_f D_f = 1$), this involves that the both centres should be opened in this location ($C_f = 1$ and $D_f = 1$).

To assure these conditions the following logical constraints

should be added to the model:

$$A_e + B_e \geq 2Y_e \quad \forall e \in E \quad (16)$$

$$C_f + D_f \geq 2Z_f \quad \forall f \in F \quad (17)$$

Constraint (16) verifies if a hybrid facility is opened at location e , then both manufacturing and remanufacturing plants should be opened in this location concurrently. Same for distribution and collection centers in constraint (17).

5 COMPUTATIONAL RESULTS

In order to illustrate the usefulness of the proposed model, a small-sized problem is considered which comprises 3 potential manufacturing plants, 2 potential remanufacturing plants, 3 distribution centers, 3 collection centers, 4 retailers. Other parameters are generated randomly using uniform distributions specified in Table 2.

Table 2. The values of the parameters used in the test problem

Parameters	Range
D_{ip}	Uniform distribution (500, 2500)
α_p	Uniform distribution (0.3, 0.6)
β_p	Uniform distribution (0.3, 0.9)
FmP_i	Uniform distribution (70000, 90000)
FrP_j	Uniform distribution (50000, 70000)
FD_j	Uniform distribution (15000, 30000)
FC_k	Uniform distribution (15000, 30000)
GP_e	Uniform distribution (60000, 90000)
GD_j	Uniform distribution (12000, 18000)
$CAPM_{ip}$	Uniform distribution (2000, 4000)
$CAPR_{ip}$	Uniform distribution (1000, 2000)
$CAPD_{jp}$	Uniform distribution (2000, 5000)
$CAPC_{kp}$	Uniform distribution (2000, 5000)
CAq_{pn}	Uniform distribution (10, 30)
CP_p	Uniform distribution (60, 100)
$CRem_p$	Uniform distribution (40, 70)
$TU_{pij}, TL_{pij}, TN_{pij}, TNK_{pij}, TKL_{pij}, TKM_{pij}$	Uniform distribution (1,4)

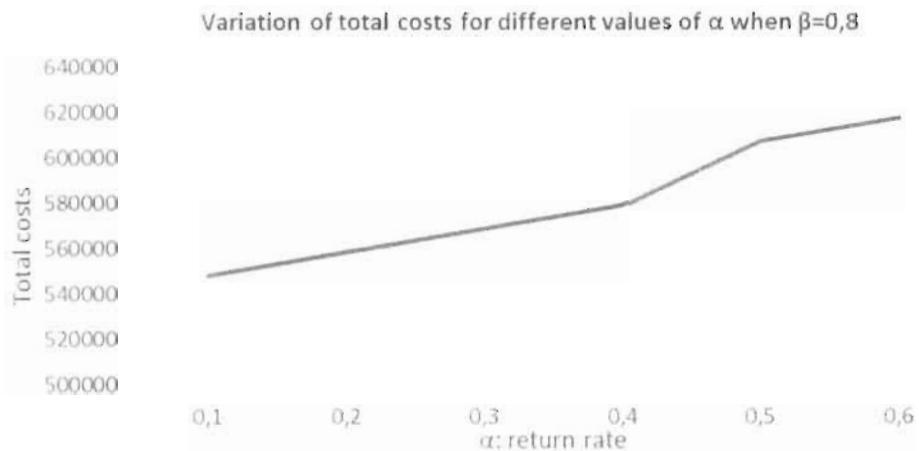


Figure 2. The impact of return rate variation on total costs

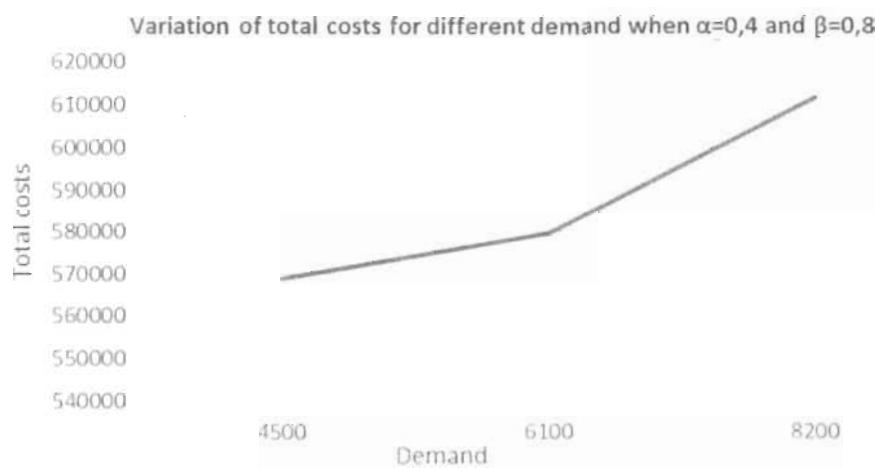


Figure 3. The impact of demand variation on total costs

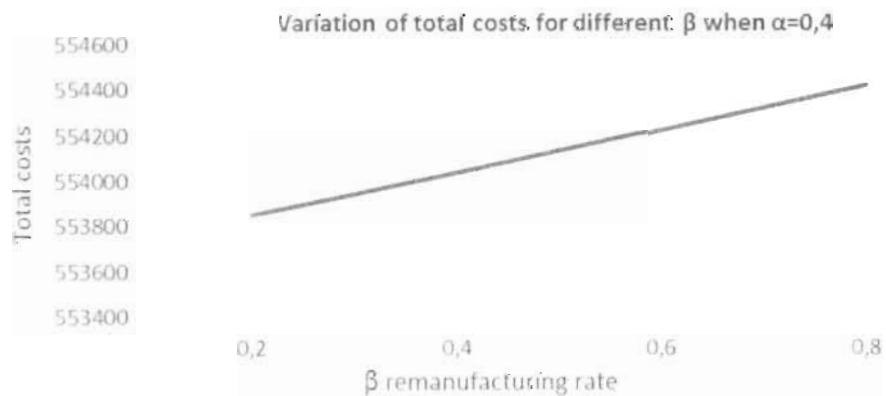


Figure 4. The impact of remanufacturing rate variation on total costs

The problem is solved by LINGO 11.0, on a computer with 3.2 GHZ and 8 GB RAM. In the optimal CLSC network design, there is one hybrid manufacturing/remanufacturing plant located in location 2, one manufacturing plant located in location 3, one distribution center in location 1 and another one in location 2, one collection center in location 1 and one hybrid distribution/collection center in location 2. The optimal solution provides a cost saving of \$48.000 from colocation of facilities.

As illustrated in Fig 2 and Fig 3, it is noticeable that the increase in demand and return ratio increases the total costs of network. In addition, the total cost is more sensitive to demand compared to return ratio. Moreover, for a fixed return rate, the total costs increase with the increase of remanufacturing rate (Figure 4). This result can be explained by the quality of returned products. The results point out that hybrid facilities generate cost saving. Also, increasing the level of return quantity is an essential strategy to increase the closed-loop supply chain profit.

6 CONCLUSION

In this paper, the problem of collocation of remanufacturing closed-loop supply chain is modelled by a mixed non integer programming approach and linearized and solved by LINGO software. Computational results show that this MILP model can provide an efficient opportunity for managers to make proper decisions in designing remanufacturing closed-loop supply chain network among various facilities with various locations. The results of this work confirm the finding of Ko and Evans (2007) and Pishvaee *et al.* (2010) concerning the collocation of distribution/collection facilities.

The value added of this work is twofold: the consideration of collocation decisions at two levels of the logistics network (manufacturing/remanufacturing as well as distribution/collection facilities) and the modelling of the retailer as collector of the end-of life products in order reduce costs and ensure the acquisition of sufficient quantity of returns which is a condition of the remanufacturing economic viability. The collocation decision depends widely on the capacity of the installation as well as the quantity of returned products.

For future research, the model can be expanded to include other value recovery alternatives involved in the reverse logistics network design problem. In addition, addressing the multi-objective optimization which explicitly analyse the trade-offs among cost and environmental impacts.

REFERENCES

- Amin, S.H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6782-6791.
- Beamon, B.M., & Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning & Control*, 15(3), 270-281.
- Demirel, N.Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11-12), 1197-1206.
- Elbounjimi, M., Abdul-Nour, G., & Ait-Kadi, D. (2014). Green Closed-loop Supply Chain Network Design: A Literature Review. *International Journal of Operations and Logistics Management*, 3(4), 275-286.
- 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.
- Guide, V.D.R. Jr, Teunter, R.H., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 303-316.
- Keyvanshokoooh, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S.M., & Tavakkoli Moghaddam, R.A. (2013). Dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10182-10202.
- Ko, H.J., & Evans, G.W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.

- Lee, D.H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61-71.
- Pishvaee, M.S., Farahani, R.Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers and Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., & Novais, A.Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077.
- Savaskan, R.C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L.N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing, *Management Science*, 50(2), 239-252.
- Wang, H.F., & Hsu, H.W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & operations research*, 37(2), 376-389.

ANNEXE III

MODELLING PRODUCT RECOVERY DECISON IN A CLOSED-LOOP SUPPLY
CHAIN NETWORK DESIGN

Cet article s'intitule « **Modelling product recovery decision in a closed-loop supply chain network design** ». J'ai œuvré comme auteur principal au développement et à la rédaction de l'article. Cet article a été présenté à la conférence CIE44 & IMSS'14, 14-16 en octobre 2014, Istanbul, Turquie.

MODELING PRODUCT RECOVERY DECISION IN A CLOSED-LOOP SUPPLYCHAIN NETWORK DESIGN

M. El Bounjimi¹, G. Abdul-Nour¹, and D. Ait-kadi²

1. The University of Québec, Trois-Rivières, Canada.
2. Laval University, Canada.

Abstract: Closed-loop supply chain has attracted growing attention in recent years due to various drivers, such as economic and marketing opportunities that may offer the end-of-life products recovery, and increasing environmental legislations aiming to mitigate landfill overloading problem. Because of its significant long-term impacts on economic as well as environmental and competitive performances, closed-loop supply chain network design is a critical issue. However, besides location-allocation decisions, practical aspects regarding reverse logistics complexity must be addressed in the designing of the network. In this paper we introduce a mixed integer non-linear programming approach to support decision-makers in designing their closed-loop supply chains, in which an incentive is offered to retailers in order to collect sufficient amount of returns with acceptable quality. The model seeks to maximize simultaneously value creation in the forward chain and value recovery in reverse chain, and it explicitly includes recovery feasibility as decision-variables.

Keywords: Closed-loop supply chain; Network design, Recovery decision, Return quantity, Return quality.

INTRODUCTION

Traditionally, supply chains have been managed as linear systems, in which efficient approaches are often used to reduce costs and time of the network activities, starting from raw material suppliers to manufacturers and through distributors and retailers to end customer, but without considering end-of-life products management in the corporate strategy and in the product design. Under various drivers, such as the economic opportunities, environmental legislations and growing customer concerns, circular (closed-loop) supply chains have proactively been initiated by some leading companies (General Motors, Kodak and Xerox, etc.), and have attracted more researchers to this field. Although interdependences between classical and closed-loop supply chains, there exist fundamental differences in many aspects between the two chains, such as objectives and values, cooperation level between supply chain partners, and product recovery management (Krikke *et al.*, 2001). Product recovery is a part of reverse logistics which aim to reclaim value from products at the end of their useful life. Currently, most of firms promote yet consumption by designing increasingly short-life-cycle products and adopting final sales-based strategies rather than service-based strategies. Therefore, the original equipment manufacturer (OEM) often loses property and information of its product just after sale (Parlikad *et al.*, 2003), therefore the decision-making about reverse logistics process is a difficult issue. Lambert *et al.* (2011), have categorized reverse logistics decisions into strategic, tactical, and operational decisions. Because of its long-term effect on the overall supply chain performances, supply chain network design is a set of strategic decisions, which seek to determine the supply chain geographical configuration and its related allocation decisions. However, besides facility location decisions, additional issues must be addressed in the designing of closed-loop supply chains networks problems, such as decisions regarding sharing of resources and infrastructures between reverse logistics activities and original supply chains activities, as well as compliance with legislations. Another important issue, less addressed in the literature, is how to deal with conflicts between the original product manufacturer and its business partners in line with recovery

of used-products, and the previous published papers in line with closed-loop network design problems lack in the explicit consideration of such barriers. This paper introduces a multi-product mixed-integer non-linear model to study the impact of the explicit consideration of used-product acquisition incentive and its recovery feasibility on the profitability and configuration of a closed-loop supply chain network. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 discusses relevant literature. Section 3 introduces the model formulation and section 4 displays the main conclusions and future research directions.

1 LITERATURE REVIEW

The low information on product after its end-of-use can lead to high uncertainty in return supply and therefore to control difficulty of reverse logistics process. According to Guide *et al.* (2009), uncertainty in the quantity, quality and timing of returns as well as in demand of remanufactured products are the main challenging issues in closed-loop supply chain management. In practice, supply chain design is a complex problem, due to the various conflicting objectives as well as the qualitative and quantitative criteria to be considered while seeking the optimal network configuration (Goetschalcks and Fleischmann, 2008). Such problem become more challenging in the case of closed-loop supply chain network, due to several issues, such as how to collect recoverable products, where to collect them, how to reprocess them, where to reprocess them (Pochampally *et al.*, 2009). Barker and Zabinsky (2011) pointed out that collection, inspection and processing are the three fundamental stages of flow in reverse logistics, and then proposed a multi-criteria decision-making model for reverse logistics design using analytical hierarchy process (AHP). The optimal network configuration is selected among of the eight available network alternatives by using two principal criteria: costs saving from (recovery option, testing, transported scrap, use of original facility) and business relations (proprietary knowledge, and customer interactions). Another decision framework is proposed by El Korchi and Millet (2011) to support decision-maker in determining the best reverse channel structure among the eighteen predefined network

configurations using economic, environmental and social criteria. In line with the goal of this paper, we focused our review only on deterministic mathematical optimization models for closed-loop supply chain design, specifically, we focus on papers that deal with uncertainty in quantity and quality by actively acquiring used products. There is abundant literature on mathematical modeling of reverse logistics and closed-loop supply chains networks design. For extensive reviews, see Akçali *et al.* (2009), Aras *et al.* (2010) and Sheriff *et al.* (2012). The proposed models are ranging from single product, single period deterministic mixed-integer linear programming models (Fleischmann *et al.*, 2001) to multiple product, multiple period stochastic mixed-integer nonlinear programming models (Lee and Dong, 2009). Guide and Wassenhove (2001) identified two recovery systems: market-driven system and waste stream-driven system. Accordingly, a CLSC can be economically and environmentally efficient if the original equipment manufacturer (OEM) and its partners adopt a market-driven recovery system instead of a cost driven system. Moreover, it was well established in the literature, that collection and disposition of used products are the main issues in CLSC planning (Souza, 2013). Establishing efficient acquisition strategies with the end-user leads to minimize uncertainty in quantity, timing, and relatively in quality of returned products, and therefore make a good planning of capacities and operations (Guide and Wassenhove, 2001). These strategies can be divided in two groups (Flapper, 2003): financial incentives given to end-user to return its products before the end of life, and organizational incentives, referring to leasing or rental of product for a period. Aras and Aksen (2008) developed a mixed-integer nonlinear programming approach to study the effect of the used products holders ‘willingness, expressed by the incentive provided to the holder according to its product quality and the travelled distance to collection center on the profit generated by the firm. Another aspect related to collection issue is to determine who collect the used products from their end-users. Wojanowsk *et al.* (2007) studied the impact of the deposit refund on the sales rate and return rate in a reverse logistics system, in which retailer is the collector of used-products. In the same direction, Savaskan *et al.* (2004), found that retailer is better positioned to collect return

than OEM and third party. By using this finding, Das and Chowdhury (2011) developed a MILP approach to maximize the CLSC profit by determining the locations of components suppliers, modules recovery sub-contractors and distribution centers, optimal product design and the mixture of three products qualities (new products, products manufactured using a mixture of new and products with only recovered modules). Their model includes few realistic assumptions, and it considers modules recovery as the only recovery option and ignores variability of returned product conditions. Another stream of related research considers the second activity in reverse logistics, inspection and disposition. Once the acquired products are collected, this activity begins to identify the quality of product and its components, and then assign them to one of the reprocessing options if necessary. The selection of the appropriate options is a complex problem in reverse logistics, due to interaction of technical, economical, ecological, and legislative factors, see Hazen (2011) and Ziout *et al.* (2014) for more details. In an economical perspective, the selection of recovery option requires knowing the right quantity and quality of used products, the demand or network need for this product or its components, and if the reverse logistics (collection, inspection, disassembly and reprocessing) costs are small compared to revenues. At strategic level, the recovery decision depends heavily on the network design, product design, as well as on quantity and quality of returned products (Krikke *et al.*, 2003). Moreover, compared to quantity uncertainty and timing uncertainty, the quality uncertainty of used product has a deeper impact on recovery decisions in CLSC.

Çorbacıoğlu and Van der Laan (2013). Fleischmann *et al.* (2001) studied the impact of integrating reverse flows in the forward supply chain, but in a purely economic perspective. The authors developed a mixed integer linear programming (MILP), in which path-based flow variables and balance constraints are used in comparing the cost saving in both sequential and integrated reverse/forward supply chain designs. They concluded that an integrated design of forward and reverse supply chain provides a significant cost benefit against a sequential. Srivastava (2008) proposed a multi-period, multi-product network model for the simultaneous design and planning of supply chains

with reverse flows. Studying product design issues concurrently with logistics network design was tried by Krikke *et al.* (2003). The authors pointed out that recovery options and rate of return are the most impacting factors than product design and location-allocation decisions. In addition, they stated that best trade-offs between the three objectives (cost, energy use, and solid waste) could be obtained by adopting modular design in the refrigerator manufacturing. The co-location of the forward and reverse facilities can reduce costs and environmental impacts by sharing resources. The cost-saving of integrated forward and reverse facilities is studied in numerous papers, for instance Pishvaee *et al.* (2010) developed a bi-objective MINLP based approach to minimize the total cost, and maximize the responsiveness of an integrated forward/reverse logistics network. Ko and Evans (2007) presented a multiproduct distribution network design problem of 3PLs with reverse logistics operations. They focused on integrating forward and reverse channels in a network including distribution facilities such as warehouses, collection centers and hybrid warehouse-collection centers. Özkir and Başligil (2012) formulated a multi-product and multi-period MILP which aim to determine facilities location while maximizing the all closed-loop supply chain profit. Recovery decisions among of three options (product-recovery, component-recovery, and material-recovery) are assumed known in advance, and not included in the model. The authors found a significant effect of product quality on the supply chain profitability. Determining the acquisition price of used products according to their quality level in closed-loop supply chain network design is addressed recently by Keyvanshokooh *et al.* (2013), the authors developed a multi-period, multi-product MILP for designing a CLSC network ,they determine decisions related to hybrid production/recovery centers, distribution centers, collection centers and hybrid distribution/collection centers locations, allocation of customers to facilities, capacity of facilities, inventory of products at distribution centers, the quantity of flows between network facilities, the percentage of potential products from customers, but the recovery options used are limited to product level and the recovery costs are not sensitive to the conditions of returned products. Özceylan *et al.* (2014) introduced a nonlinear mixed

integer programming (MNILP) formulation that jointly optimizes the strategic (amounts of flows) and tactical (disassembly line balancing) decisions of a closed-loop supply chain (CLSC). Srivastava (2008) presented a multi-product, multi-echelon two-steps hierarchical model to maximize reverse logistics profits. In the first step, the location of the facilities are determined by considering strategic and customer constraints criteria and in the second step, disposition and capacity expansion decisions are made.

In summary, the literature review reveals:

- An increasing interest to closed-loop supply chains networks design problem;
- Most of the proposed models focused only on location decision under cost minimization as the main objective and do not question the profitability of the used-product recovery operations for the original equipment manufacturer and also its business partners;
- to the best of our knowledge, the only paper that models disposition decisions in a reverse logistics network design problem is Srivastava (2008), but such decisions are not taken concurrently with location decisions and in a closed-loop context;

3 MODEL DESCRIPTION AND FORMULATION

3.1 Conceptual framework

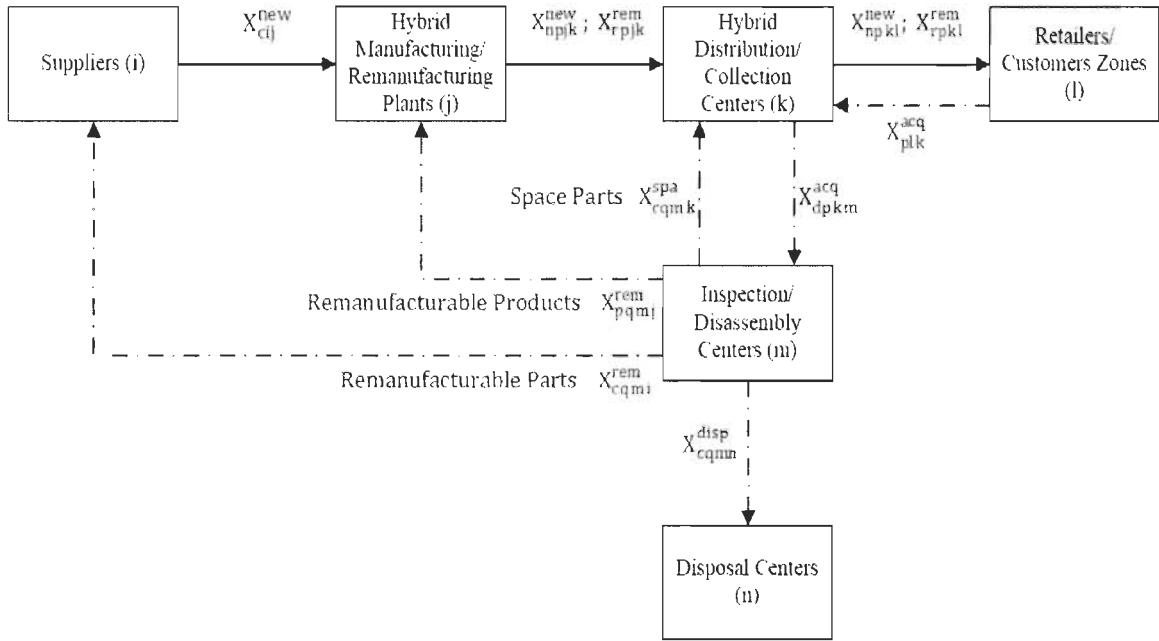


Figure 1: Conceptual framework for the CLSC network

We assume that the original equipment manufacturer (OEM) has brought changes to its supply chain policy in order to motivate their business partners to establish a more cooperation links in order to consider the integration of the end-of-use products recovery into the forward supply chain as a strategic opportunity to make more profits and also to comply with the worldwide environmental regulations. The network is a multi-stage closed-loop supply chain as shown in figure 1. In the forward chain, different suppliers provide parts to OEM plants, named hybrid manufacturing/remanufacturing (HMR) plants. The new products are then shipped to retailers and customer zones through hybrid distribution/collection (HDC) centers to meet their demands. In the reverse supply chain, an acquisition strategy to ensure sufficient amount of used product with acceptable quality is established with retailers. In order to estimate the purchasing price of used product, a preliminary assessment procedure offered by the OEM and performed by trained personnel in the retailer center, in which prices are offered to retailer according to two distinct quality levels (according to the age and condition of each used

product) namely, medium and good. Acquired products are then transported to HDC centers where they are consolidated, and next transported to Inspection/disposition (ID) center where there are inspected and sorted. The choice of optimal recovery options (product remanufacturing, parts cannibalization, and parts disposal) is explicitly included in the model as decision variables and depends on the quality level of all product and parts. Returns with good quality are shipped to HMR plants where they are remanufactured and returns with medium quality are disassembled. Disassembled parts are divided to two groups: spare parts with good quality level and re-manufacturable parts with medium quality level, and finally non-recoverable parts with poor quality level.

The following assumptions are considered in the model formulation:

1. The model is multi echelon and multi-product.
2. The potential locations of plants, distribution/collection centers, and Inspection/disposition centers are known.
3. All retailer' demands are deterministic and should be satisfied.
4. Return is known as a percentage of used products acquired by retailer based on the quality level.
5. There is no limitation on the capacity of the material flows through the network.
6. Excepting suppliers and disposal centers, all other facilities are capacitated.
7. The quality of returned products from customer zones is different.
8. All cost values and capacities are known.

3.1 Model formulation

Sets and indices

P: Set of all products in the supply chain, $NP \cup RP \cup DP \in P$;

NP: Set of new products, $np=1, 2 \dots NP$;

RP: Set of remanufactured products, $rp=1, 2 \dots RP$;

DP: Set of used-products, $dp=1, 2 \dots DP$;

- C: Set of parts in the product p, $c = 1, 2 \dots C$;
- Q: Set of quality levels in the returned products, $q=1, 2\dots Q$;
- I: Set of fixed locations of suppliers, $i = 1, 2\dots I$;
- J: Set of potential locations for hybrid manufacturing/remanufacturing (HMR) plants, $j = 1, 2\dots J$;
- K: Set of potential locations for hybrid distribution/collection (HDC) centers, $k=1, 2\dots K$;
- L: Set of fixed locations of retailers/customer zones, $l = 1, 2 \dots L$;
- M: Set of potential locations for inspection/disposition centers, $m = 1, 2 \dots M$;
- N: Set of fixed locations for landfill centres, $e = 1, 2 \dots E$.

Parameters:

$\alpha_{q_{up}}$: The maximum percentage of used products up returned with quality level

q to be not exceed;

β_{q_c} : The maximum mass percentage of non – recoverable parts c with quality level

q that will be sent to the disposal centers;

F_j : Fixed cost for opening a HMR plant j;

F_k : Fixed cost for opening a HDC center k;

F_m : Fixed cost for opening inspection/disposition center m;

sp_p^{new} : Unit sales price of a new product p;

$G_{c_qk}^{spa}$: Gain from spare parts recovery;

e_{pj}^{man} : Unit manufacturing cost of new product p in HMR plant j;

e_{ci}^{pur} : Unit purchasing price of a new component c from supplier i;

e_{pik}^{tr} : Unit transportation cost of new product p from HMR plant j to HDC center k;

e_{pkl}^{tr} : Unit transportation cost of new product p from HDC center k to retailer l;

N_{cp} : Total number of components c in a product p;

D_l^{np} : Demand of retailer l for new product np;

D_l^{rp} : Demand of retailer l for remanufactured product rp;

D_k^{sp} : Demand of HDC center k for spare parts c;

sp_p^{rem} : Unit sales price of a remanufactured product p;

e_{pqj}^{rem} : Unit remanufacturing cost of used product p with quality level q in plant j;

e_{pmj}^{tr} : Unit transportation cost of remanufacturable product p from inspection &

disposition center m to plant j;

e_{pjk}^{tr} : Unit transportation cost of remanufactured product from HMR plant j to HDC center k;

e_{pq}^{acq} : Unit acquisition price of a used product p with quality level q from retailer l;

e_{pm}^{ins} : Unit inspection cost of a used product p in an inspection-disposition center m;

e_{pqj}^{rem} : Unit remanufacturing cost of a used product p with quality level q in a HMR plant j;

Cap_k^{HDC} : Maximum total capacity of HDC center k;

Cap_m^{ID} : Maximum capacity of ID center m;

Cap_{np}^{HMR} : Maximum capacity of HMR plant j for manufacturing new product p;

Cap_{rp}^{HMR} : Maximum capacity of HMR plant j for remanufacturing product p.

Decision variables

X_{cip}^{new} : Quantity of purchased component c, transported from supplier i to HMR plant j;

X_{npjk}^{new} : Quantity of new product p, transported from HMR plant j to HDC center k;

X_{npkl}^{new} : Quantity of new product p, transported from HDC center k to retailer;

X_{rpkj}^{rem} : Quantity of remanufactured product p, transported from HDC center j to retailer k;

X_{dpqmj}^{rem} : quantity of used product with quality level q to be remanufactured, transported

from inspection – disposition center m to HMR plant j;

X_{dpqm}^{disas} : quantity of used product p with quality q to be disassembled in inspection and

disasemb center m;

X_{rpjk}^{rem} : Quantity of remanufactured product p, transported from plant j to distribution center;

X_{rpk}^{rem} : Quantity of new product p, transported from distribution center j to retailer k;

X_{dpik}^{acq} : Quantity of used product p procured and transported from retailer k to collection center j;

X_{cqmi}^{rem} : Quantity of used part c to be remanufactured, transported from inspection center m to supplier i;

X_{cqmn}^{dis} : Quantity of used parts to be disposed of, transported from inspection center m to disposal center n;

X_{cqmk}^{spa} : quantity of spare parts c with quality level q, transported from ID center m to HDC center k;

Y_j : Binary variable equal to 1 if HMR plant j is opened ,0 otherwise;

Y_k : Binary variable equal to 1 if a HDC center k is opened ,0 otherwise;

Y_m : Binary variable equal to 1 if an inspection&disposition center m is opened,

0 otherwise;

Z_{rem} : Binary variable equal to 1 if product remanufacturing is choseen,0 otherwise;

Z_{disa} : Binary variable equal to 1 if product disassembly is choseen,0 otherwise.

Objective function:

Maximizing *New product profit* (1) + Product remanufacturing profit (2) + Disassembling profit (3)

$$\begin{aligned} \text{New product profit} = & \sum_p \sum_k \sum_l sp_{pk}^{new} X_{pk}^{new} - (\sum_j F_j Y_j + \sum_k F_k Y_k - \\ & \sum_i \sum_j \sum_c pp_{ci}^{new} X_{cij}^{new} - \sum_p \sum_j \sum_k e_{pj}^{man} X_{pj}^{new} + \sum_p \sum_j \sum_k e_{jk}^{tr} d_{jk} X_{pj}^{new} - \\ & \sum_p \sum_k \sum_l e_{kl}^{tr} d_{kl} X_{pk}^{new}) \end{aligned}$$

(1) Product remanufacturing profit =

$$\begin{aligned} & \sum_p \sum_k \sum_l sp_{pk}^{rem} X_{pk}^{rem} - (\sum_m F_m Y_m + \sum_p \sum_m \sum_j e_{pqj}^{acq} X_{pqm}^{rem} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_m e_{cp}^{ins} N_{cp} X_{pqm}^{rem} + \sum_p \sum_m \sum_j e_{pqj}^{rem} X_{pqm}^{rem} + \sum_p \sum_m \sum_j e_{pmj}^{tr} d_{mj} X_{pqm}^{rem} - \\ & \sum_p \sum_j \sum_k e_{pj}^{tr} d_{jk} X_{pj}^{rem} + \sum_p \sum_k \sum_l e_{pk}^{tr} d_{kl} X_{pk}^{rem} + \sum_p \sum_l \sum_k e_{pkl}^{tr} d_{lk} X_{pk}^{rem} + \\ & \sum_p \sum_k \sum_m e_{pqkm}^{tr} d_{km} X_{pqkm}^{rem}) Z_{rem} \end{aligned}$$

(2) Disassembling profit =

$$\begin{aligned} & \sum_c \sum_m \sum_k (G_{cqk}^{spa} X_{cqmk}^{spa}) + \sum_c \sum_m \sum_i (sp_{cq}^{rem} X_{cqmi}^{rem}) - (\sum_m F_m Y_m + \sum_p \sum_m e_{pq}^{acq} X_{pqm}^{dis} - \\ & \sum_c \sum_p \sum_m e_{cp}^{ins} N_{cp} X_{pqm}^{dis} + \sum_c \sum_m \sum_i e_{cmi}^{tr} d_{mi} X_{cqmi}^{rem} + \sum_c \sum_m \sum_k e_{cmk}^{tr} d_{km} X_{cqmi}^{spa} - \\ & \sum_c \sum_m \sum_n e_{cqmn}^{dis} X_{cqmn}^{dis}) Z_{dis} \end{aligned}$$

Constraints

Capacity constraints

- Total quantities of new products np transported from each HMR plant to all HDC centers do not exceed HMR capacity for new product.

$$\sum_k X_{npk}^{new} \leq Y_j \ Cap_{np}^{HMR} \quad \forall j, \forall np \quad (4)$$

- Total quantities of remanufactured products rp transported from each HMR plant to all HDC centers do not exceed HMR capacity for remanufactured product

$$\sum_k X_{rpkl}^{rem} \leq Y_j \ Cap_{rp}^{HMR} \quad \forall j, \forall rp \quad (5)$$

- Total quantities of new, remanufactured products and returned products p entering to each HDC center should not exceed its capacity.

$$\sum_j X_{npkl}^{new} + \sum_j X_{rpkl}^{rem} + \sum_l X_{dpik}^{acq} \leq Y_k \ Cap_k^{HDC} \quad \forall k, \forall np, \forall rp, \forall dp \quad (6)$$

- Total quantity of used products dp with quality level q, entering to each ID center should not exceed its capacity.

$$\sum_k X_{dpqkm}^{acq} \leq Y_m \ Cap_m^{ID} \quad \forall m, \forall dp \quad (7)$$

Flow balancing constraints

- Total quantity of new products transported from any HDC center to fulfill demand of a retailer does not exceed the retailer's demand.

$$\sum_k X_{pk}^{new} \leq D_l^{np} \quad \forall l \quad (8)$$

- Total quantity of remanufactured products transported from any HDC center to fulfill demand of a retailer does not exceed the retailer's demand.

$$\sum_k X_{pk}^{rem} \leq D_l^{rp} \quad \forall l \quad (9)$$

- Total quantity of spare parts c with quality level q transported from all ID centers m to each HDC center k does not exceed its demand.

$$\sum_m X_{cqmk}^{spa} \leq D_k^{cq} \quad \forall k \quad (10)$$

- Total quantity of returned products dp with quality level q from each retailer to all HDC centers should be less or equal to a maximum percentage of the total quantity of new product np delivered to each retailer.

$$\sum_k X_{dpik}^{acq} \leq a_{qdp} \sum_k X_{npkl}^{new} \quad \forall l, \forall q \quad (11)$$

$$\sum_j X_{npjk}^{new} = \sum_l X_{npkl}^{new} \quad \forall k, \forall np \quad (12)$$

The total quantity of new products np transported from all HMR plants to each HDC center should be equal to the total quantity transported from the latter to all retailers.

$$\sum_j X_{rpjk}^{new} = \sum_l X_{rpkl}^{new} \quad \forall k, \forall rp \quad (13)$$

- The total quantity of remanufactured products rp transported from all HMR plants j to each HDC center k should be equal to the total quantity transported from the latter to all retailers l. $\sum_j X_{rpjk}^{new} = \sum_l X_{rpkl}^{new} \quad \forall k, \forall rp \quad (13)$

- The total quantity of used products dp with quality level q, transported from all retailers l to each HDC center k should be equal to the total quantity transported from the latter to all ID centers m.

$$\sum_l X_{dpqlk}^{acq} = \sum_m X_{dpkm}^{acq} \quad \forall k, \forall dp, \forall q \quad (14)$$

- Total quantity of non-recoverable parts c with quality level q, transported from ID centers to all disposal centers should be less or equal to the total quantity of returned products from all HDC centers, multiplied by the maximum mass percentage of non-recoverable parts.

$$\sum_m X_{cmk}^{dis} = \beta_{qc} \sum_k X_{dpkm}^{acq} \quad \forall k, \forall dp, \forall q$$

Non-negativity and binary constraints:

$$X_{cij}^{new}, X_{npjk}^{new}, X_{rpkl}^{rem}, X_{dpqmj}^{rem}, X_{dpqm}^{dis}, X_{rpjk}^{rem}, X_{rpkl}^{rem}, X_{dpik}^{acq}, X_{cqmc}^{rem}, X_{cqmn}^{dis}, X_{cqmk}^{res} \geq 0 \quad (15)$$

$$Y_j, Y_k, Y_m, Z_{rem}, Z_{dis} \in \{0,1\} \quad (16)$$

3 CONCLUSION

This paper has addressed the design of a closed-loop supply chain network integrating the strategic and tactical decisions. To the best of our knowledge, this is the first study that integrates explicitly the used-products recovery decisions in the strategic design decisions of closed-loop supply chain network. Moreover, the conceptual framework mitigates the conflicts between the original equipment manufacturer and partners, and it uses a proactive acquisition of used products to reduce uncertainty of reverse logistics flows.

REFERENCES

- Akçali, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231-248.
- Aras, N., & Aksen, D. (2008). Locating collection centers for distance-and incentive dependent returns. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 316-333.
- Aras, N., Boyaci, T., & Verter, V. (2010). *Designing the reverse logistics network M*.
- Barker, T., & Zabinsky, Z. (2011). A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. *Omega*, 39(5), 558-573.
- Çorbacıoğlu, U., & Van der Laan, E.A. (2013). A Quality Framework in Closed Loop Supply Chains: Opportunities for Value Creation. In *Quality Management in Reverse Logistics* (pp. 21-37). London: Springer.
- Das, K., & Chowdhury, A.H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 209-221.
- El Korchi, A., & Millet, D. (2011). Designing a sustainable reverse logistics channel: The 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*, 19, 588-597.
- Ferguson, G., & Souza, G.C. (Eds.) (2010). *Closed Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*. CRC Press, 67-98.

- Flapper, S.D.P. (2003). Recovery Strategies. In V.D.R. Guide Jr, & L.N. Van Wassenhove (éd.), *Business Aspects of Closed-Loop Supply Chains: Exploring the Issues*. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, 71-92.
- 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.
- Goetschalcks, M., & Fleischmann, B. (2008). Strategic Network Design. In H. Stadtler & C. Kilger (éd.), *Supply Chain Management and Advanced Planning*. p. 117-132.
- Guide, V.D.R., & Van Wassenhove, L.N. (2001). Managing product returns for remanufacturing. *Production and Operations Management*, 10(2), 142-155.
- Guide, V.D.R. Jr, & Van Wassenhove, L.N. (2009). OR FORUM- The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18.
- Hazen, B.T. (2011). Strategic reverse logistics disposition decision: From theory to practice. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 10(3), 275-292.
- Keyvanshokooh, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S.M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10182-10202.
- Ko, H.J., & Evans, G.W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.
- Krikke, H., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719.
- Krikke, H.R., Pappis, C.P., Tsoulfas, G.T., & Bloemhof-Ruwaard, J.M. (2001). Design principles for closed loop supply chains. ERIM Report Series Reference No. ERS-2001-62-LIS.

- Lambert, S., Riopel, D., & Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61, 561-581.
- Lee, D.H, & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61-71.
- Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61, 142-164.
- Özkir, V., & Başligil, H. (2012). Modelling product-recovery processes in closed-loop supply-chain network design. *International Journal of Production Research*, 50(8), 2218-2233.
- Parlikad, A.K., Farlane, D.M., Fleisch, E., & Gross, S. (2003). The Role of Product Identity in End-of-Life Decision Making. White Paper, CAM-AutoID-WH017, Auto-ID Center.
- Pishvaee, M.S., Farahani, R.Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100-1112.
- Pochampally, K.K., Gupta, S.M., & Govindan, K. (2009). Metrics for performance measurement for a reverse/closed-loop supply chain. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1(1), 8-32.
- Savaskan, R.C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L.N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239-252.
- Sheriff, K.M., Gunasekaran, A., & Nachiappan, S. (2012). Reverse logistics networkdesign: A review on strategic perspective. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(2), 171-194.
- Souza, G.C. (2013). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research*. *Decision Sciences*, 44(1), 7-38.

- Srivastava, S.K. (2008). Value recovery network design for product returns. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(4), 311-331.
- Wojanowski, R., Verter, V., & Boyaci, T. (2007). Retail-collection network design under deposit-refund. *Computers & Operations Research*, 34(2), 324-345.
- 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.

ANNEXE IV

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

Cet article s'intitule « **Contribution à la conception de la chaîne logistique verte** ». J'ai œuvré comme auteur principal au développement et à la rédaction de l'article. Cet article a été présenté au 10^e Congrès international de génie industriel, La Rochelle, France (2013).

CONTRIBUTION À LA CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

Mbarek El Bounjimi¹, Georges Abdul-Nour¹ et Daoud Ait-kadi²

1. Université de Québec à Trois Rivières Canada.
2. Université Laval.

Résumé : La chaîne logistique verte est un concept émergent, qui vise la conciliation des objectifs économiques et environnementaux de la chaîne logistique. L'objectif de cet article est d'explorer la littérature concernant la chaîne logistique verte afin de clarifier les différentes perceptions et les raisons d'évolution de ce nouveau concept, de comparer les chaînes logistiques traditionnelle et verte, de présenter les principaux modèles de conception des chaînes logistiques vertes et de proposer des perspectives de recherche.

Mots clés : Conception, Chaîne logistique verte, chaîne logistique intégrée en boucle fermée, Émissions du carbone.

1 INTRODUCTION

Les activités de la chaîne logistique sont des sources importantes des émissions de gaz à effet de serre. Elles représentent près de 30.8 % de la quantité totale en équivalent-carbone émise par les secteurs économiques [Paksoy *et al.*, 2012]. En conséquence, la gestion de la chaîne logistique verte émerge comme une nouvelle approche proactive d'intégration des considérations environnementales dans la gestion de la chaîne logistique, à travers tout le cycle de vie du produit. Elle vise la réduction et la valorisation des déchets, l'optimisation de la consommation des ressources d'énergie et de matière, et la gestion des produits en fin de leur cycle de vie [Beamon, 1999]. Nous assistons donc à un virage vers la durabilité, une conciliation des objectifs économiques et environnementaux de la chaîne logistique à travers tout le cycle de vie du produit. Le nombre grandissant des travaux de recherche sur la chaîne logistique verte est un signe que les gestionnaires et les chercheurs commencent à saisir l'importance d'intégration des considérations environnementales dans les décisions stratégiques et opérationnelles de la chaîne logistique [Zhu *et al.*, 2005]. Malgré cette évolution, il existe peu de modèles d'implantation des pratiques de la chaîne logistique verte. Ces derniers étant applicables à différents produits, processus et industries. Par exemple, [EPA, 2000] propose un guide d'intégration des pratiques de l'approche « verte » et l'approche « lean » dans la chaîne logistique. Le guide synthétise les meilleures pratiques des principales entreprises aux États-Unis, en vue de réduire simultanément les coûts et les impacts environnementaux. Un peu plus tard [LMI, 2003] développe le modèle GreenSCOR, qui modifie le modèle SCOR 5.0 pour y inclure les meilleures pratiques vertes et les indicateurs de performance environnementale. L'avantage majeur de ce modèle GreenSCOR réside dans l'intégration systématique des impacts écologiques sans compromettre les principes de base du modèle SCOR, qui est reconnu comme un outil analytique pratique et flexible. La conception de la chaîne logistique verte est une dimension critique de la gestion de la chaîne logistique verte, elle a un impact significatif à long terme sur les performances économiques et concurrentielles ainsi qu'environnementales de l'entreprise focale et de ses partenaires d'affaires. Dans la

littérature, le problème de conception de la chaîne logistique traditionnelle est reconnu comme difficile, surtout lorsqu'il s'agit de chercher une configuration optimale de la chaîne logistique. Cela revient à plusieurs raisons, les données requises pour le long terme sont incertaines, les objectifs à considérer sont multiples et conflictuels et plusieurs d'entre eux sont non quantifiables [Goetschalcks et Fleischmann, 2008]. Le présent article répond aux questions suivantes : Qu'est-ce qu'une chaîne logistique verte? Comment elle se situe par rapport à la chaîne logistique traditionnelle? Quelles sont les raisons d'évolution de la chaîne logistique verte? Quels sont les principaux modèles de conception et les pistes de recherches futures?

2 DEFINITION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

Le terme « chaîne logistique verte » a été proposé pour la première fois par le consortium de recherche sur la fabrication de l'université du Michigan en 1996, en vue d'étudier les impacts environnementaux et l'optimisation des ressources des chaînes logistiques de fabrication [Hanfield, 1996]. Dans la littérature, la définition de la chaîne logistique verte varie selon la perception de chaque chercheur, elle varie d'un achat vert à une chaîne logistique intégrée.

[Beamon, 1999] a défini la chaîne logistique verte comme étant l'extension de la chaîne logistique traditionnelle pour y inclure des activités qui visent à minimiser les impacts environnementaux d'un produit tout le long de son cycle de vie, telles que l'éco-conception, l'économie des ressources, la réduction des matières dangereuses, la réutilisation et le recyclage des produits. Selon [Gilbert 2001], la chaîne logistique verte est le processus d'intégration des considérations environnementales dans les décisions d'achat et dans les relations à long terme avec les fournisseurs. [Hervani *et al.*, 2005] l'a définie comme la somme de l'achat vert, la fabrication verte, la distribution / marketing verte et la logistique inverse. [Davies et Hochman, 2007] l'ont définie comme un effort concerté dans toute l'entreprise, elle est non seulement de mettre en place des pratiques vertes, mais plutôt une approche cohérente et globale d'amélioration de la performance environnementale de tous les niveaux de la gestion et de le plancher.

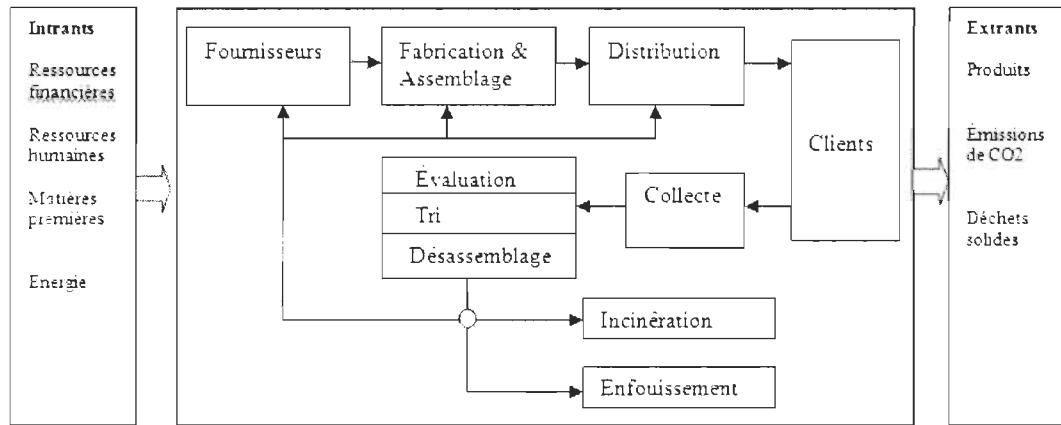


Figure 1. Chaîne logistique verte

[Srivastava 2007] définit (ou bien a défini) la gestion de la chaîne logistique verte comme l'intégration de la pensée environnementale dans la gestion de la chaîne logistique, y compris la conception des produits, l'approvisionnement en matériaux, la sélection des procédés de fabrication, la livraison du produit final aux consommateurs ainsi que la gestion de fin de vie du produit après sa vie utile. Selon [Walker *et al.*, 2008], il s'agit d'un concept qui couvre toutes les phases du cycle de vie d'un produit, depuis l'extraction des matières premières en passant par la conception, la production et les phases de distribution, à l'utilisation du produit par les consommateurs et leur traitement à la fin de leur cycle de vie. [Sarkis *et al.*, 2011] la définissent comme étant l'intégration des considérations écologiques dans les pratiques inter-organisationnelles de la gestion de la chaîne logistique, y compris la logistique inverse.

3 CHAINE LOGISTIQUE TRADITIONNELLE VERSUS LA CHAINE LOGISTIQUE VERTE

Malgré les liens d'interdépendance entre les chaînes logistique classique et verte, il existe des différences en plusieurs égards entre les deux chaînes. [Seuring, 2004] compare la chaîne logistique verte et la chaîne logistique traditionnelle, en utilisant cinq critères, la base physique, la base conceptuelle, les acteurs, la coopération et l'objectif. L'auteur constate des points de similitude et de différence entre les deux chaînes. Il

explique ce constat par la différence existante entre le principe du cycle de vie et le principe de la chaîne logistique traditionnelle, ainsi que la nature de coopération entre les acteurs. [Ho *et al.*, 2009] comparent les chaînes logistiques traditionnelle et verte en termes d'objectif, optimisation écologique, sélection des fournisseurs, coût, et réactivité/flexibilité. La gestion de la chaîne logistique verte implique, un traditionnelle [Neto *et al.*, 2010] et l'ajout de nouveaux flux de matière et d'information associés aux activités de la logistique inverse et de coopération entre les partenaires d'affaires. Nous voyons important d'enrichir les critères de comparaison des chaînes logistiques traditionnelle et verte, proposés par [Ho *et al.*, 2009]. Le tableau 1 récapitule les différences entre les deux chaînes. Voici un aperçu de ces différences :

Objectifs : la chaîne logistique traditionnelle vise des objectifs économiques, tels que le coût/profit, la satisfaction de client, la réactivité et la flexibilité [Gopal et Thakkar, 2012]. En revanche, la chaîne logistique verte cherche un compromis entre les objectifs économiques classiques, et les objectifs environnementaux [Beamon, 1999; Hervani *et al.*, 2005; El Saadany *et al.*, 2011].

Structure : la chaîne logistique traditionnelle possède une structure linéaire dont les flux de matière et d'information entre les partenaires d'affaires sont unidirectionnels. La responsabilité du fabricant original envers son produit se termine souvent à la livraison au client final ou juste après la fin de la période de garantie. Par contre la structure de La chaîne logistique verte est cyclique. Le cycle de vie du produit devient fermé pour y inclure les étapes, utilisation et après fin de vie du produit. Les flux de matières et d'information dans la chaîne logistique intégrant la logistique inverse, s'échangent dans les deux sens entre les acteurs. Cela mène à la formation d'une boucle de valeur, qui intègre toutes les étapes de cycle de vie du produit.

Partage d'information : le partage de l'information pertinente entre les partenaires de la chaîne logistique est généralement lié aux transactions commerciales et parfois à l'assistance technique. Tandis que dans la chaîne logistique verte, le partage

d'information est un paramètre clé dans l'amélioration des performances économiques et écologiques de la chaîne logistique [Faisal, 2010].

Sélection des fournisseurs : dans la chaîne logistique classique, la sélection des fournisseurs est basée principalement sur le prix et sur un partenariat limité à des valeurs économiques et guidé par un contrat à court terme. Chaque membre de la chaîne s'occupe de son propre impact environnemental direct et il peut collaborer attentivement avec d'autres membres de la chaîne, mais indépendamment de l'impact global de la chaîne logistique. Alors que dans la chaîne logistique verte, la sélection des fournisseurs prend en compte les critères économiques et écologiques. La coopération est forte et nécessite un partenariat à long terme, basée sur la confiance mutuelle entre les partenaires. Ce type de partenariat permet aux partenaires d'échanger les informations et les compétences en matière de conception et de développement du produit, de réduction des émissions de carbone, des emballages et des déchets. Le plein potentiel d'une chaîne logistique verte ne peut être obtenu qu'avec une étroite coopération entre les fournisseurs et leurs fournisseurs, les clients et leurs clients [Vachon et Klassen, 2006].

Réactivité et flexibilité : En raison de la finalité de la chaîne logistique verte, les performances de réactivité et de flexibilité sont contraintes par la réduction des émissions de carbone et par conséquent ces deux caractéristiques sont moins élevées par rapport à la chaîne logistique classique.

4 RAISONS D'ADOPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

Auparavant, les entreprises supposent que l'incorporation des pratiques vertes dans leur stratégie commerciale coûte cher, mais maintenant elles réalisent que la négligence des impacts négatifs sur l'environnement leurs coûtera cher dans l'avenir [Van der Zee, 2008].

Tableau 1. Différences entre les chaînes logistiques traditionnelle et verte

Caractéristiques	Chaîne logistique classique	Chaîne logistique verte
Objectives et valeurs	Économiques	Économiques et écologiques
Structure	Linéaire	Boucle fermée
Critères de sélection des fournisseurs	Prix; Partenariat à court terme avec les fournisseurs.	Prix et impact écologique; Partenariat intime et à long terme avec les fournisseurs
Partage d'information	Faible	Élevé
Réactivité et flexibilité	élevés	Basses

Aujourd'hui la durabilité exige que les chaînes logistiques deviennent étendues pour y inclure la logistique inverse et considérer l'ensemble du cycle de vie du produit pour pouvoir optimiser le produit, d'un point de vue coût de revient et coût des impacts environnementaux [Linton *et al.*, 2007]. [Walton *et al.*, 1998] ajoutent que les considérations environnementales sont devenues une partie intégrante de la planification stratégique des organisations, en raison des réglementations de plus en plus strictes et des exigences de la responsabilité environnementale. L'intégration des pratiques vertes dans les processus de la chaîne logistique conduit à l'amélioration de la compétitivité et des performances économique et opérationnelle de l'entreprise [Rao et Holt, 2005]. Au Canada, une étude récente révèle que les fabricants ayant adopté les pratiques de logistique verte rapportent une amélioration de leurs performances environnementale, économique et concurrentielle. À savoir la réduction de la consommation d'énergie, des émissions de carbone, des emballages et des déchets; la réduction de leurs coûts de distribution ainsi qu'une amélioration de la fidélisation de leur clientèle; et plus d'opportunités d'accès aux marchés étrangers [Industrie Canada, 2009]. Ainsi, les pressions exercées par les parties prenantes, les partenaires d'affaires et les marchés mènent les entreprises à intégrer les pratiques vertes dans la gestion de leurs chaînes logistiques. Ainsi, les pressions exercées par les parties prenantes, les partenaires

d'affaires et les marchés mènent les entreprises à intégrer les pratiques vertes dans la gestion de leurs chaînes logistiques. Les pressions d'implantation de la chaîne logistique verte, par les entreprises peuvent être regroupées en cinq catégories : les règlementations, le marché, les fournisseurs, les clients et les facteurs internes de l'entreprise [Zhu et Sarkis, 2004; Walker *et al.*, 2008]. Le classement de ces pressions par ordre d'importance est difficile, il dépend de plusieurs facteurs, tels que le pays, le domaine industriel et la taille des entreprises étudiées. Par exemple, [Zhu *et al.*, 2008] effectuent une enquête sur les pressions exercées sur des entreprises chinoises appartenant aux quatre secteurs industriels suivants : l'industrie d'automobile, la production d'électricité, l'industrie de chimie/pétrochimie et l'industrie électrique/électronique. Les auteurs constatent des différences entre les industries en termes de motivations et de pratiques. [Zhu *et al.*, 2005] comparent les motivations pour l'implantation de la chaîne logistique verte par un ensemble d'entreprises en Chine et aux États-Unis. Ils trouvent une différence significative entre les deux pays. [Holt et Ghobadian, 2009] effectuent une étude empirique concernant les motivations à la chaîne logistique de fabrication verte en Angleterre. Leurs résultats montrent que les plus grandes pressions pour améliorer les pratiques de la chaîne logistique verte sont la législation et les facteurs internes de l'organisation, suivis par, les facteurs compétitifs, les pressions exercées par les clients et les facteurs sociétaux. [Thun et Müller, 2010] effectuent une enquête sur les principales motivations à l'adoption de la chaîne logistique verte dans l'industrie d'automobile en Allemagne et trouvent que les clients et les concurrents sont les pressions les plus importantes. Tandis que les motivations internes ne jouent qu'un rôle secondaire.

5 PRINCIPAUX MODÈLES DE CONCEPTION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE VERTE

En général les décisions de conception d'une chaîne logistique classique comprennent la détermination du nombre, localisation, mission et capacité des sites, l'allocation des produits, des clients et des fournisseurs aux sites, et la sélection des modes de transport

et des technologies de fabrication [Klibi *et al.*, 2010]. La conception de la chaîne logistique verte vise à la fois des décisions de conception de la chaîne logistique intégrant la logistique inverse, en boucle fermée, des décisions concernant la réduction des émissions de carbone, l'utilisation des capacités, des ressources d'énergie et de matières et la considération des facteurs réglementaires [Paksoy *et al.*, 2012]. Le problème de conception de la chaîne logistique intégrée en boucle fermée constitue la base de conception de la chaîne logistique verte. Il vise la détermination de la structure du réseau logistique en prenant en considération deux types de facteurs interdépendants : les conditions du réseau logistique (niveau de capacité, niveau de stock, les quantités de demande et de retour), et la sélection des options de traitement des retours [Riopel *et al.*, 2011]. La détermination des options de traitement approprié aux produits retournés en fin de leur utilisation, dépend des faisabilités, économique, technique et environnementale [Krikke *et al.*, 1998], telles que la disponibilité des marchés pour les produits traités, la disponibilité des moyens technologiques, la qualité des produits retournés, le niveau de stock et le niveau de capacité. Le taux de retour des produits en fin de leur vie utile est un paramètre essentiel pour le choix de degré d'intégration des activités de la logistique inverse. Par exemple pour un taux de retour très élevé, la différence en terme du coût est faible entre l'approche séquentielle et l'approche intégrée [Fleischmann *et al.*, 2001]. Des revues récentes, rapportent les caractéristiques des modèles de conception de la chaîne logistique intégrant la logistique inverse [Chanintrakul *et al.*, 2009; Akçali *et al.*, 2009; Aras *et al.*, 2010; Sheriff *et al.*, 2012]. Nous constatons une augmentation importante des modèles traitant la conception de la chaîne logistique inverse et la chaîne logistique intégrant la logistique inverse en boucle fermée. La majorité des modèles de conception de la chaîne logistique intégrée en boucle fermée visent des objectifs purement économiques, tels que la minimisation des coûts et la maximisation du profit. En lien avec l'objectif de cet article, nous présentons, dans cette section, les principaux modèles de conception de la chaîne logistique verte intégrée en boucle intégrant la logistique inverse et qui concilient les objectifs économiques et environnementaux. Le tableau 2 résume les principaux modèles revus.

[Krikke *et al.*, 2003] sont les premiers qui présentent un modèle qui intègre la conception du produit et la conception de la chaîne logistique intégrée en boucle fermée. Les auteurs formulent leur modèle sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers mixtes, avec une fonction objective qui combine à la fois les coûts et les impacts environnementaux (énergie et déchets résiduels). Le modèle est appliqué sur un cas de fabrication d'un réfrigérateur. Trois conceptions possibles d'un réfrigérateur et différentes configurations d'une chaîne logistique en boucle fermée sont analysées.

[Neto *et al.*, 2008] présentent un modèle statique de programmation linéaire en nombres entiers mixtes pour la conception de la chaîne logistique intégrée en boucle fermée. Le modèle permet l'évaluation des compromis entre la réduction des coûts et la réduction de l'impact écologique total de cycle de vie, sous les contraintes réglementaires. Le modèle est appliqué sur une chaîne logistique européenne de fabrication de pâte et papier. Leurs résultats montrent que la législation impérative favorise le recyclage et peut réduire l'efficience économique et écologique du secteur. [Chaabane *et al.*, 2012] proposent un programme linéaire en nombres entiers mixtes pour la conception d'une chaîne logistique verte. Le modèle est multi-périodes, multi-produits et bi-objectifs. Il est formulé en se basant sur les principes de l'analyse de cycle de vie. Il vise l'évaluation des compromis entre la minimisation des coûts et la minimisation de la quantité des émissions de carbone d'une chaîne logistique intégrant le recyclage, en boucle fermée. Le modèle permet en plus des décisions classiques de localisation/ allocation, la sélection de la technologie de production et du mode de transport et il établit aussi le lien avec le système d'échange d'émissions de carbone sous différentes limites d'émission. Après l'application du modèle sur une chaîne de production/recyclage d'aluminium, les auteurs concluent que la mise en place des stratégies efficaces de gestion des crédits de carbone aidera aisément les décideurs à atteindre leurs objectifs de durabilité. [Paksoy *et al.*, 2012] proposent un modèle basé sur la programmation linéaire floue pour l'optimisation d'une chaîne logistique intégrée en boucle fermée. Le modèle est multi-objectifs, il vise la conciliation entre quatre objectifs, la minimisation des coûts de transport dans la chaîne logistique classique, la minimisation des coûts de transport dans

la logistique inverse, la minimisation de la quantité totale des émissions de transport dans toute la chaîne intégrée, et l'encouragement des clients à utiliser des matériaux recyclables par la minimisation de la différence entre le coût d'achat de matières premières et le profit généré par l'utilisation des matières recyclables. Le modèle prend en considération l'impact des incertitudes liées aux capacités et à la demande des clients. En outre, les auteurs comparent et commentent les performances de trois approches de pondération des objectifs de modèle. [Amin et Zhang, 2012] proposent un modèle stochastique basé sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes. Le modèle est bi-objectifs, il minimise le coût total de la chaîne logistique intégrée et maximise l'utilisation des matériaux recyclables et des technologies propres. Deux types d'incertitude sont modélisés, l'incertitude liée à la demande et l'incertitude liée au taux de retour des produits en fin de leur utilisation. Le modèle est ensuite appliqué sur un exemple de la littérature qui traite le cas d'une chaîne logistique de fabrication des photocopieuses.

-l'impact de l'incertitude associée à la quantité et à la qualité des retours sur les performances de la chaîne logistique verte.

Abréviations utilisées dans le tableau 2 :

MILP : Programme linéaire en nombres entiers mixtes; SMILP : MILP stochastique; FMILP : MILP floue; P : Plusieurs; MRec : matériaux recyclables; EProp : Énergies propres; Transp : Transport; ECO2 : Émissions de CO2; MP : Matières premières; ACV : analyse de cycle de vie; Min : Minimisation; Nb : Nombre.

Tableau 2. Principaux modèles pour la conception de la chaîne logistique verte

Article	Modèle	Objectifs	Nb. échelons	Nb. périodes	Nb. produits	Contraintes réglementaires	Application
Krikke et al (2003)	MILP	Min coûts Min énergie Min déchets	P	1	1		Remise à neuf de réfrigérateur
Neto et al. (2008)	MILP	Min coûts Min impact ACV	P	1	1	X	Recyclage du papier
Chaabane et al (2012)	MILP	Min coûts Min Q.CO2	P	P	P	X	Recyclage d'aluminium
Amin et Zhang (2012)	SMILP	Min coûts Max MRec+EPro	P	1	P		Remise à neuf de photocopieuse
Paksoy et al(2012)	FMILP	Min coûts TPLA Min coûts TPLR Min Q.CO2 Min coûts de MP	P	1	1		

6 CONCLUSIONS & PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Dans cet article, nous avons clarifié la confusion entourant la perception du concept « chaîne logistique verte » ainsi que son lien avec la chaîne logistique classique. Différents facteurs poussent les entreprises à l'implantation des pratiques de la chaîne logistique verte. Ces facteurs peuvent être regroupés en cinq catégories : les réglementaires, les concurrents, les fournisseurs, les clients et les facteurs internes. Nous constatons que le nombre des modèles de conception de la chaîne logistique verte est encore assez faible. Les modèles existants tiennent compte de quelques hypothèses réalistes telles que la dimension multi-échelons, horizon dynamique de planification, la diversité des produits, l'impact de l'incertitude associée à la demande, le taux de retour des produits en fin de leur vie et les capacités. En outre, ces modèles n'intègrent pas des hypothèses réalistes concernant le problème d'intégration de la logistique inverse à la chaîne logistique classique. Ainsi, plusieurs opportunités de recherche se présentent :

- Besoin de plus de modèles mathématiques multi-objectifs, qui concilient des objectifs économiques, écologiques et de consommation des ressources;

- La prise en considération des hypothèses réalistes : plusieurs produits, plusieurs périodes de planification, le partage des infrastructures et des moyens de transport entre les activités de la logistique inverse et la chaîne logistique traditionnelle;
- L'impact de la réglementation des émissions de carbone sur les performances économiques et environnementales de la chaîne logistique intégrée.

7 RÉFÉRENCES

- Aras, N., Boyacı, T., & Verter, V. (2010). Designing the reverse logistics network. In M. Ferguson, & G. Souza (éd.), *Closed Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*, CRC Press, 67-98.
- Akçali, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231-248.
- Amin, S.H., & Zhang, G. (2012). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*.
- Beamon, B.M. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4), 332-42.
- 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.
- Chanintrakul, P., Mondragon, A.E.C., Lalwani, C., & Wong, C.Y. (2009). Reverse logistics network design: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modeling*, 1, 61-81.
- Davies, J., & Hochman, S. (2007). The greening of the supply chain. *Supply Chain Management Review*, 11(5), 13-4.
- El Saadany, A.M.A., Jaber, M.Y., & Bonney, M. (2011). Environmental performance measures for supply chains. *Management Research Review*, 34(11), 1202-1221.

- EPA – United States Environmental Protection Agency (2000). *The Lean and Green Supply Chain. A practical guide for materials managers and supply chain managers to reduce costs and improve environmental performance.* Washington, D.C.
- Faisal, M.N. (2010). Sustainable supply chains: A study of interaction among the enablers. *Business Process Management Journal, 16*(3), 508-529.
- 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.
- Frota Neto, J.Q., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Nunen, J.A.E.E., & Van Heck, E. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics, 111*(2), 195-208.
- Frota Neto, J.Q., Walther, G., Bloemhof, J., Van Nunen, J.A.E.E., & Spengler, T. (2010). From closed-loop to sustainable supply chains: The WEEE case. *International Journal of Production Research, 48*(15), 4463-4481.
- Gilbert, S. (2001). *Greening supply chain: Enhancing competitiveness through green productivity.* Tapei, Taiwan, p. 1-6.
- Goetschalcks, M., & Fleischmann, B. (2008). Strategic network design. In H. Stadtler & C. Kilger (éd.), *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Berlin: Springer-Verlag, 117-132.
- Gopal, P.R.C., & Thakkar, J. (2012). A review on supply chain performance measures and metrics: 2000-2011. *International Journal of Productivity and Performance Management, 61*(5), 518-547.
- Handfield, R.B. (1996). Green Supply Chain: Best Practices From the Furniture Industry. Proceedings of the Annual Meeting of the Decision Science Institute. USA. No.3., l295-l297.
- Hervani, A.A., Helms, M.M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An International Journal, 12*(4), 330-353.
- Ho, J.C., Shalishali, M.K., Tseng, T., & Ang, D.S. (2009). Opportunities in Green Supply Chain Management. *The Coastal Business Journal, 8*(1), 18-31.

- Holt, D., & Ghobadian, A. (2009). An empirical study of green supply chain management practices amongst UK manufacturers. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(7), 933-956.
- Industrie Canada (2009). Green Supply Chain Management Logistics & Transportation Services. A Canadian perspective. Industrie Canada, <http://www.ic.gc.ca>.
- Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283-293.
- Krikke, H.R., Bloemhof-Ruwaard, J.M., & Van Wassenhove, L.N. (2003). Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*, 41(16), 3689-3719.
- Krikke, H.R., 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), 111-139.
- Linton, J.D., Klassen, R., & Jayaraman, V. (2007). Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*, 25, 1075-1082.
- Logistics Management Institute – LMI (2003). GREENSCOR: Developing a green supply chain analytical. Report LG1 01T4. Logistics Management Institute.
- Paksoy, T., Pehlivan, N.Y., & Özceylan, E. (2012). Fuzzy multi-objective optimization of a green supply chain network with risk management that includes environmental hazards. *Human and Ecological Risk Assessment*, 18(5), 1120-1151.
- Rao, P., & Holt, D. (2005). Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? *International Journal of Operations & Production Management*, 25(9), 898-916.
- Riopel, D., Chouinard, M., Marcotte, S., & Ait kadi, D. (2011). Ingénierie et gestion de la logistique inverse. Hermes-Science, Lavoisier.
- Seuring, S., & Muller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.

- Sarkis, J., Zhu, Q., & Lai, K. (2011). An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 1-15.
- Sheriff, K.M.M., Gunasekaran, A., & Nachiappan, S. (2012). Strategic perspective. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(2), 171-194.
- Srivastava, K.S. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Thun, J.H., & Müller, A. (2010). An empirical analysis of green supply chain management in the German automotive industry. *Business Strategy and the Environment*, 19, 119-132.
- Vachon, S., & Klassen, R.D. (2006). Extending green practices across the supply chain: The impact of upstream and downstream integration. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(7), 795-821.
- Van der Zee, B. (2008). *Green Business*, 1^{ère} édition. Londres : Dorling Kindersley.
- Walker, H., Di Sisto, L., & McBain, D. (2008). Drivers and barriers to environmental supply chain management practices: Lessons from the public and private sectors. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 14(1), 69-85.
- Walton, S.V., Handfield, R.B., & Melnyk, S.T. (1998). The green supply chain: Integrating suppliers into environmental management process. *International Journal of Purchasing & Materials Management*, Spring, 2-11.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Geng, Y. (2005). Green supply chain management in China: Pressures, practices and performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(5), 449-468.
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. (2008). Green supply chain management implications for "closing the loop". *Transportation Research Part E*, 44(1), 1-18.

ANNEXE V

VALEURS DE PARAMÈTRES UTILISÉS DANS LES CHAPITRE 3 ET 4

Valeurs de paramètres utilisés dans le chapitre 3

Paramètres	Valeurs
D_{ip}	Distribution uniforme (500,2500)
β_p	Distribution uniforme (0.3,0.6)
β_k	Distribution uniforme (0.3,0.9)
FmP_t	Distribution uniforme (70000,90000)
FrP_t	Distribution uniforme (50000,70000)
FD_i	Distribution uniforme (15000,30000)
FC_k	Distribution uniforme (15000,30000)
GP_g	Distribution uniforme (60000,90000)
GD_j	Distribution uniforme (12000,18000)
$CAPM_{ip}$	Distribution uniforme (2000,4000)
$CAPR_{ip}$	Distribution uniforme (1000,2000)
$CAPD_{ip}$	Distribution uniforme (2000,5000)
$CAPC_{kp}$	Distribution uniforme (2000,5000)
CAq_{pn}	Distribution uniforme (10,30)
CP_d	Distribution uniforme (60,100)

Valeurs de paramètres utilisés dans le chapitre 4

Paramètres	Valeurs
D_{pk}^{ma}	Uniforme(1500,2000)
D_{pk}^{rem}	Uniforme(200,1000)
$F\mathbf{I}_i$	Uniforme(150000,200000)
$F\mathbf{J}_j$	Uniforme(50000,80000)
$F\mathbf{L}_l$	Uniforme(50000,60000)
$cp_{pi}^{ma}, cp_{ni}^{rem},$	Uniforme(30,70)
$cinn_{pt}^{rev}, cd_{pt}^{rev},$	Uniforme(5,12)
cap_p^k	Uniforme(10,20)
$tc_{pij}^{ma}, tc_{pj}^{ma}, tc_{pij}^{rem}, tc_{pj}^{rem}, tc_{pkl}^{rev},$ $, , , , ,$ tc_{pli}^{rev}	Uniforme(1,3)
$tc_{mli}^{rev}, tc_{mle}^{rev}$	Uniforme(1,5)
$CapI_{pi}^{ma}$	Uniforme(10000,30000)
$CapI_{pi}^{rem}$	Uniforme(5000,15000)
$CapJ_{pj}$	Uniforme(50000,60000)
$CapL_{pl}$	Uniforme(30000,50000)