

MARC CHOUINARD

**MODÉLISATION ET CONCEPTION DE BOUCLES  
D'APPROVISIONNEMENT : CONTEXTE MULTI-  
PRODUIT, MULTI-ÉTAT ET MULTI-ALTERNATIVE  
DE TRAITEMENT**

**Application à un service dans le domaine de la santé**

Thèse présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de doctorat en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2007



## Résumé

Cette thèse propose une méthodologie générique de conception de réseaux logistiques intégrant la logistique inversée à une chaîne régulière d'approvisionnement. Le type de réseaux abordé prévoit la récupération des produits inutilisés des utilisateurs finaux, leur traitement et leur redistribution vers de nouveaux utilisateurs. Suivant leur état, les produits récupérés peuvent être réparés, désassemblés pour la récupération de pièces de rechange ou ultimement être disposés. Les produits réutilisables obtenus suite au traitement sont désignés comme des produits valorisés. Ils représentent une source économique d'approvisionnement, mais dont le standard de qualité est inférieur à ceux offerts à l'état neuf. L'objectif de la méthodologie est de supporter les décisions de localisation et de définition de la mission des unités d'affaires au sein d'un réseau logistique. Elles se prennent à l'égard de la portion de logistique inversée du réseau, particulièrement à l'égard des centres de récupération et de traitement ainsi que des entrepôts de produits valorisés, tout en considérant le fonctionnement courant de la chaîne d'approvisionnement. Elles abordent également l'orientation stratégique des produits vers les alternatives de traitement suivant les possibilités de récupération de produits et la condition du réseau, soit en accord avec les volumes de demande et de récupération, les capacités des sites et les coûts d'opération du réseau. Le réseau est abordé sous un environnement stochastique à l'égard des volumes de demande, de récupération et de traitement, suivant l'état des produits récupérés. Des approches de modélisation sont proposées pour définir les paramètres clés du modèle de programmation mathématique devant servir à la conception d'un tel réseau. Une heuristique basée sur la méthode d'approximation de la moyenne d'échantillonnages (« *Sample Average Approximation - SAA* »), impliquant les techniques d'échantillonnage de Monte Carlo, est proposée pour résoudre le modèle stochastique. La méthodologie est appliquée au contexte d'attribution, de maintenance, de récupération, de traitement et de redistribution des fauteuils roulants dans la province de Québec, au Canada, régi et administré par la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ).

## Abstract

This thesis proposes a generic methodology for designing logistics networks integrating reverse logistics into a current supply chain. Such networks involve the recovery of unused products from the end-users, and their processing and redistribution toward new users. According to their state, recovered products may be repaired, disassembled for the recovery of parts and disposed. Reusable products resulting from processing are indicated as valorised products. They represent an economical supply source, which meets a lower quality standard compared to new products. The methodology aims at supporting decisions on location and definition of mission of business units. They relate to the reverse logistics portion of a network, particularly as regards recovery and processing centres as well as warehouses for valorised products, while considering the current operating context of a supply chain. Decisions also tackle the strategic proportion of products to be directed toward processing alternatives according to the product recovery possibilities and network conditions, which relate to the recovery and demand volumes with respect to the capacity constraints and operating costs. The network is evaluated in a stochastic environment with regard to the demand, recovery and processing volumes, according to recovered product states. Modeling approaches are proposed to define key parameters for the related mathematical programming model. A heuristics based on the Sample Average Approximation (SAA) method, involving the Monte Carlo sampling methods, is proposed to solve the stochastic model. The methodology is validated with the wheelchair allocation, maintenance, recovery, processing and redistribution context in the Province of Quebec, Canada, governed and managed by the Quebec Health Insurance Board (*Régie de l'assurance maladie du Québec - RAMQ*).

## Avant-Propos

Cette thèse a été réalisée sous la co-direction de Mme Sophie D'Amours et de M Daoud Aït-Kadi, tous deux professeurs au département de génie mécanique à l'Université Laval. Elle a été rédigée suivant le principe d'insertion d'articles. Les travaux de recherche ont été effectués en grande partie au Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT). Une partie des travaux a été réalisée à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, dans le Laboratoire de gestion et procédés de production (LGPP) dirigé par M Rémy Glardon, professeur à l'institut de production et robotique. Cette partie a été réalisée en collaboration avec M Luca Canetta, doctorant au LGPP.

La thèse est composée de trois articles co-rédigés avec Mme Sophie D'Amours et M Daoud Aït-Kadi. Pour chacun des articles, j'ai agi à titre de chercheur principal. J'ai développé les méthodes et les outils utilisés pour la réalisation des travaux. Mme Sophie D'Amours et M Daoud Aït-Kadi ont révisé les articles jusqu'à l'obtention de la version finale.

La collaboration avec M Luca Canetta a permis l'application d'une méthode de clustérisation au regroupement des utilisateurs finaux en zones géographiques distinctes, désignées comme zone d'utilisateurs. Les résultats de ces travaux sont consignés dans le deuxième article de la thèse. MM Rémy Glardon et Luca Canetta ont participé au processus de révision de ce deuxième article.

Le premier article de la thèse intitulé « *Design of reverse logistics networks for multi-products, multi-states, and multi-processing alternatives* », co-rédigé avec Mme Sophie D'Amours et M Daoud Aït-Kadi, a été accepté en avril 2006 pour publication dans le livre « *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies* ». Le livre est publié depuis mars 2007. La version présentée dans la thèse diffère de très peu de la version finale acceptée. La terminologie, les figures et le modèle mathématique a été révisée pour assurer la cohérence tout au long de la thèse.

Le deuxième article de la thèse intitulé « *Modeling networks sites, ressources, products and end-users for designing supply loops - Application to healthcare systems* », co-rédigé avec Mme Sophie D'Amours et MM Daoud Aït-Kadi, Rémy Glardon et Luca Canetta, a été soumis au journal « *Computers in*

*Industry* ». La version présentée dans la thèse est identique à la version corrigée retournée aux éditeurs de l'édition spéciale.

Le troisième article de la thèse intitulé « *A stochastic programming approach for designing supply loops* », co-rédigé avec Mme Sophie D'Amours et M Daoud Aït-Kadi a été accepté pour une édition spéciale du journal « *International Journal of Production Economics* ». La version présentée dans la thèse est identique à la version corrigée retournée au journal.

*À la mémoire de ma grand-mère*

## Remerciements

Cette thèse a été rendue possible grâce au support constant de mes directeurs de recherche, soit de Mme Sophie D'Amours et de M Daoud Aït-Kadi. Leurs recommandations et leurs commentaires judicieux tout au long de mes études supérieures m'ont permis d'explorer des avenues des plus intéressantes soulevant des perspectives de recherche prometteuses. Les ressources mises à ma disposition, tant financières qu'humaines, ont grandement contribuées à l'avancement et à la diffusion de ces travaux. Des collaborations riches avec des personnes tout aussi passionnées et passionnantes que mes directeurs de recherche ont pu ainsi être initiées. C'est donc avec une très grande reconnaissance envers Mme Sophie D'Amours et Daoud Aït-Kadi que je complète ces travaux de doctorat.

Les travaux présentés dans cette thèse sont le résultat d'une collaboration fructueuse entre les divers membres de l'équipe de recherche du projet de valorisation des aides à la mobilité. Ce projet est réalisé en partenariat avec l'Institut de réadaptation en déficience physique de Québec (IRD PQ) et la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ). Il implique les chercheurs Daoud Aït-Kadi, Sophie D'Amours et Angel Ruiz du Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), de l'Université Laval, Mme Chantal Guérette et MM François Routhier et Christian Vancraenenbroeck de l'IRD PQ et MM Pierre Cantin et Marcel Côté de la RAMQ. Cinq étudiants gradués ont participé au projet à ce jour, soit Mme Caroline Cloutier et MM Claver Diallo, Hugo Dionne, Mohamed Anouar Jamali et Xavier Zwingmann.

Je tiens à remercier MM Jean-François Audy, Claver Diallo, Pascal Forget, Mustapha Ouhimou et Xavier Zwingmann, étudiants gradués au CIRRELT, pour leur amitié et leur aide dans la réalisation des travaux présentés dans cette thèse.

Je tiens également à souligner l'accueil exceptionnel des chercheurs, des étudiants-chercheurs et du personnel administratif du Laboratoire de gestion et procédés de production (LGPP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse. Je tiens à remercier spécialement M Rémy Glardon d'avoir permis la réalisation d'une partie de mes travaux de thèse au LGPP, en collaboration avec M Luca Canetta. Je remercie également mes amis et collègues helvètes, MM Cédric André, Grégoire Pépiot, Luca Canetta et Souleïman Naciri,



pour l'ambiance stimulante au laboratoire. Je conserverais un souvenir mémorable de mon séjour en Suisse.

Je suis également très reconnaissant envers MM Moritz Fleischmann, Daniel Guide et Luk Van Wassenhove de m'avoir intégré au sein de la communauté scientifique internationale œuvrant dans le domaine de la logistique inversée. Un séminaire a été réalisé à l'Université Erasmus de Rotterdam sous invitation de M Fleischmann. J'ai également eu le grand privilège de recevoir une invitation au quatrième atelier international sur les boucles d'approvisionnement (« *4th Workshop on closed-loop supply chain* »), organisé par MM Guide et Van Wassenhove. Ces participations m'ont permis d'avoir des échanges très riches avec plusieurs sommités dans le domaine. Des collaborations intéressantes sont attendues suite à ces échanges.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à ma copine Marie-Ève Rochette, à ma famille et mes amis pour leur support et leurs encouragements.

Je remercie sincèrement MM. Alain Martel, Angel Ruiz et Rémy Glardon d'avoir accepté de faire partie de mon comité de thèse. Leurs commentaires enrichissants ont contribué à la qualité de cette thèse.

Pour terminer, je tiens à remercier les Fonds québécois sur la nature et les technologies (FQRNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le support financier accordé au cours de mes études supérieures.

# Table des matières

RÉSUMÉ .....	I
ABSTRACT.....	II
AVANT-PROPOS.....	III
REMERCIEMENTS .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES .....	XIII
INTRODUCTION.....	1
<b>1 REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>9</b>
1.1 BOUCLE DE VALEUR .....	9
1.2 NIVEAUX DÉCISIONNELS RELIÉS AUX ACTIVITÉS PRIMAIRES ET DE SOUTIENT.....	11
1.3 DÉCISIONS STRATÉGIQUES.....	12
1.3.1 <i>Marchés cibles</i> .....	12
1.3.2 <i>Réseaux</i> .....	12
1.3.3 <i>Produits</i> .....	14
1.3.4 <i>Processus</i> .....	15
1.4 DÉCISIONS STRATÉGIQUES, TACTIQUES ET OPÉRATIONNELLES SPÉCIFIQUES AUX ACTIVITÉS PRIMAIRES.....	16
1.4.1 <i>Service après-vente</i> .....	16
1.4.2 <i>Récupération</i> .....	17
1.4.3 <i>Traitement</i> .....	19
1.4.4 <i>Redistribution</i> .....	21
1.4.5 <i>Flux de matériels et stocks</i> .....	22
1.4.5.1 Transports.....	22
1.4.5.2 Stocks.....	24
1.4.5.3 Volumes de demande et de récupération.....	25
1.5 NOTIONS DE CONCEPTION DE RÉSEAUX LOGISTIQUES .....	29
1.5.1 <i>Modèle de programmation mathématique</i> .....	29
1.5.1.1 Décisions de localisation.....	29
1.5.1.2 Décisions d'allocation.....	30
1.5.2 <i>Formulation du modèle</i> .....	30
1.5.2.1 Modélisation des flux.....	30
1.5.2.2 Modélisation des produits et des processus de transformation de forme.....	32
1.5.2.3 Modélisation des coûts ou des profits.....	33
1.5.2.4 Modélisation des périodes d'horizon.....	36
1.5.2.5 Modélisation de la demande.....	36
1.5.2.6 Modélisation des facteurs aléatoires.....	37
1.5.3 <i>Résolution du modèle</i> .....	39
1.6 CONCLUSION .....	41
<b>2 MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE BOUCLE D'APPROVISIONNEMENT.....</b>	<b>42</b>
2.1 RÉSUMÉ.....	42
<b>DESIGN OF REVERSE LOGISTICS NETWORKS FOR MULTI-PRODUCT, MULTI-STATE, AND MULTI-PROCESSING ALTERNATIVES .....</b>	<b>43</b>

2.2	INTRODUCTION .....	43
2.3	RELATED REVERSE LOGISTICS DESIGN MODELS .....	45
2.3.1	<i>Location and determination of demand and return volumes</i> .....	45
2.3.2	<i>Product families and bill of materials</i> .....	46
2.3.3	<i>Processing conditions and product states</i> .....	46
2.4	LOGISTICS NETWORK REENGINEERING PROCESS .....	49
2.4.1	<i>Studied context</i> .....	50
2.4.2	<i>Location and determination of demand and recovery volumes</i> .....	51
2.4.3	<i>Product families</i> .....	55
2.4.4	<i>Bill of materials</i> .....	56
2.4.5	<i>Processing conditions and product states</i> .....	57
2.4.6	<i>Location-Allocation model</i> .....	59
2.4.6.1	Potential logistics network .....	60
2.4.6.2	Potential flows .....	61
2.4.6.3	Product flows directed to processing alternatives .....	62
2.5	CONCLUSION AND FUTURE WORK .....	66
2.6	GUIDELINES TO PRACTITIONERS .....	67
2.7	ACKNOWLEDGEMENTS .....	68
2.8	REFERENCES .....	68
2.9	APPENDIX .....	70
2.9.1	<i>Notation</i> .....	70
2.9.1.1	Subscripts .....	70
2.9.1.2	Upperscripts .....	70
2.9.2	<i>Data</i> .....	71
2.9.3	<i>Decision variables</i> .....	72
2.9.4	<i>Mathematical programming model</i> .....	73
2.9.4.1	Objective function: .....	73
2.9.4.2	Subject to: .....	73
<b>3</b>	<b>MODÉLISATION DES SITES, DES PRODUITS ET DES UTILISATEURS FINAUX POUR LA CONCEPTION D'UNE BOUCLE D'APPROVISIONNEMENT</b> .....	<b>76</b>
3.1	RÉSUMÉ .....	76
	<b>MODELLING NETWORK SITES, RESOURCES, PRODUCTS AND END-USERS FOR DESIGNING SUPPLY LOOPS - APPLICATION TO HEALTHCARE SYSTEMS -</b> .....	<b>77</b>
3.2	INTRODUCTION .....	78
3.3	STUDIED CASE .....	79
3.3.1	<i>Network</i> .....	79
3.3.2	<i>Products</i> .....	79
3.3.3	<i>End-users</i> .....	79
3.3.4	<i>Current local operating context</i> .....	80
3.3.5	<i>Logistics network redesign</i> .....	81
3.4	MODELLING APPROACHES FOR SUPPLY LOOPS .....	82
3.4.1	<i>Network</i> .....	82
3.4.1.1	Potential sites and resources .....	82
3.4.1.2	Achievable capacities, cost drivers and service level targets .....	84
3.4.2	<i>Products</i> .....	86
3.4.2.1	Product families .....	87
3.4.2.2	Bill of materials .....	89
3.4.2.3	Product states and processing alternatives .....	91
3.4.3	<i>End-users</i> .....	94
3.4.3.1	User zones location .....	95
3.4.3.2	Characterisation of product flows and user zones .....	97
3.4.3.3	Forecast of the demand and recovery volumes .....	103
3.4.4	<i>Randomness in product flows</i> .....	106
3.5	CONCLUSION .....	111
3.6	ACKNOWLEDGEMENTS .....	112
3.7	REFERENCES .....	112

3.8	APPENDIX .....	115
<b>4</b>	<b>UNE APPROCHE DE PROGRAMMATION STOCHASTIQUE POUR LA CONCEPTION DE BOUCLES D'APPROVISIONNEMENT SOUS UN ENVIRONNEMENT INCERTAIN .....</b>	<b>117</b>
4.1	RÉSUMÉ .....	117
	<b>A STOCHASTIC PROGRAMMING APPROACH FOR DESIGNING SUPPLY LOOPS.....</b>	<b>118</b>
4.2	INTRODUCTION .....	119
4.3	METHODOLOGY .....	121
4.3.1	<i>Potential network</i> .....	122
4.3.2	<i>Potential network capacities, cost drivers and service level targets</i> .....	123
4.3.3	<i>Product families and bills of materials</i> .....	124
4.3.4	<i>Product states and processing alternatives</i> .....	125
4.3.5	<i>User zone locations</i> .....	128
4.3.6	<i>Characterization of product flows and user zones</i> .....	129
4.3.7	<i>Forecasts of the demand and recovery volumes</i> .....	129
4.3.8	<i>Stochastic programming model</i> .....	130
4.4	SAMPLE AVERAGE APPROXIMATION .....	137
4.4.1	<i>Algorithmic strategy</i> .....	137
4.4.2	<i>Heuristics based on the sample average approximation method</i> .....	139
4.5	COMPUTATIONAL RESULTS .....	140
4.5.1	<i>Studied case</i> .....	140
4.5.2	<i>Implementation of the solving method</i> .....	142
4.5.3	<i>Computation performance and quality of the stochastic solutions</i> .....	144
4.6	CONCLUSION .....	148
4.7	ACKNOWLEDGEMENTS .....	149
4.8	REFERENCES .....	149
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>152</b>
	CONTRIBUTIONS .....	152
	PERSPECTIVES DE RECHERCHE .....	153
	<i>Modélisation des paramètres clés</i> .....	153
	Localisation et détermination des volumes de demande et de récupération .....	153
	Familles et nomenclature de produits .....	156
	Conditions de traitement et états des produits .....	157
	Approche de résolution .....	160
	<i>Perspectives pour la conception et le pilotage de la boucle d'approvisionnement en fauteuil roulants dans la province de Québec</i> .....	161
	CONCLUSION GÉNÉRALE .....	163
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>165</b>
	<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>172</b>
<b>A1</b>	<b>PROJET DE VALORISATION DES AIDES À LA MOBILITÉ .....</b>	<b>172</b>
A1.1	CAS D'ÉTUDE .....	172
A1.1.1	<i>Fonctionnement et parties impliquées – Contexte Québécois</i> .....	172
A1.1.2	<i>Avantages et difficultés reliés à la récupération, au traitement et à la réattribution</i> .....	174
A1.1.3	<i>Réingénierie du réseau de valorisation</i> .....	175

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles à l'égard de la conception et du pilotage d'une boucle d'approvisionnement.....	27
<b>Table 2</b> : Main characteristics of related reverse logistics design models.....	47
<b>Table 3</b> : Issues in modelling supply loops.....	83
<b>Table 4</b> : The correlation coefficient $[R_{XY}]$ between: a) user age and demand volumes, for acquisition and replacement, according or not to user gender; b) user age and recovery volumes, according to the product state at time of allocation; c) product age and recovery volumes, according to the recovery motivation; d) product age and recovery volumes, according to the product state at time of allocation; e) product age and processing volumes.....	98
<b>Table 5</b> : User zone characteristics measured by a) proportions of end-users and b) population having wheelchairs for a specific service centre.....	102
<b>Table 6</b> : Normally distributed demand and recovery volumes.....	107
<b>Table 7</b> : Average and standard deviation $[\mu, \sigma]$ for proportions [%] defining states of product volumes with use of Gamma and Weibull distribution functions.....	108
<b>Table 8</b> : Average (2000-2003) annual demand and mean absolute error in a context of acquisition for a current service centre and its related user zones using the first forecast strategy: a) use of time period as independent variable.....	110
<b>Table 9</b> : Average (2000-2003) annual demand and mean absolute error in a context of acquisition for a current service centre and its related user zones using the second forecast strategy: a) volume with time as independent variable; b) volume with the size of the associated population ( $p_i$ ) as independent variable; c) rate with time as independent variable (rate is converted in volume).....	110
<b>Table 10</b> : Average (2000-2003) annual recovery and mean absolute error in a context of collection for a current service centre and its related user zones using the second forecast strategy: a) volume with time as independent variable.....	110
<b>Table 11</b> : Percentage of total demand satisfied through new and valorised finished products for each ten year end-user age bracket.....	115
<b>Table 12</b> : Percentage of the total demand per a ten year end-user age brackets.....	115
<b>Table 13</b> : Proportion of recovered finished product directed toward processing alternatives according to product age.....	116
<b>Table 14</b> : Proportion of total recovered finished product according to product age.....	116
<b>Table 15</b> : Potential network characteristics.....	141
<b>Table 16</b> : Normally distributed demand and recovery volumes.....	143
<b>Table 17</b> : Average and standard deviation for proportions [%] defining states of products with use of Gamma and Weibull distribution functions.....	143
<b>Table 18</b> : Characteristics of the operating context.....	143
<b>Table 19</b> : Case instances ( $j=1, \dots, M$ ) elaborated according to the considered random factors and operating context.....	144
<b>Table 21</b> : Number of variables and constraints for solving the problem with the heuristics or the SAA method.....	145
<b>Table 22</b> : Designs obtained with the stochastic approach, for $N=100$ , $N'=400$ and $M=16$ .....	145

<b><u>Table 23: Solutions obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately.</u></b> .....	145
<b><u>Table 24: Proportions of demand volumes fulfilled with valorised products and proportions of recovered product volumes directed to processing alternatives for the identified solutions.</u></b> .....	146
<b><u>Table 25: Percentage of variation of the parameters for the solutions obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately (<math>N=100</math>).</u></b> .....	146
<b><u>Table 26: Costs statistics (million \$) of the identified solutions according to different samples of size <math>N</math> and <math>N'=400</math> for <math>j=5, \dots, 8</math>.</u></b> .....	148
<b><u>Tableau 27 : Contexte de fonctionnement du réseau d'attribution de fauteuils roulants dans la province de Québec.</u></b> .....	176

## Liste des figures

<a href="#"><u>Figure 1 : Chaîne d’approvisionnement.</u></a>	2
<a href="#"><u>Figure 2 : Réseau de logistique inversée.</u></a>	4
<a href="#"><u>Figure 3 : Boucle d’approvisionnement fermée et ouverte.</u></a>	5
<a href="#"><u>Figure 4 : Boucle de valeur.</u></a>	11
<a href="#"><u>Figure 5 : Modélisation des flux de matériel au sein d’un réseau logistique.</u></a>	31
<a href="#"><u>Figure 6 : Nomenclature de produits et graphe d’activités.</u></a>	33
<a href="#"><u>Figure 7 : Relation entre le flux annuel et le niveau moyen des stocks dans l’entrepôt en fonction du niveau de service.</u></a>	35
<a href="#"><u>Figure 8: Potential network sites and flows.</u></a>	51
<a href="#"><u>Figure 9: Possible scenarios for the modeling of user zones.</u></a>	54
<a href="#"><u>Figure 10: Partial bill of materials for modeling supply loops.</u></a>	58
<a href="#"><u>Figure 11: Proportions of products recovered in each state following disassembling given by the probability distribution functions.</u></a>	59
<a href="#"><u>Figure 12: Summarized relation between product flows and model constraints.</u></a>	60
<a href="#"><u>Figure 14: Strategic decision for product flows transferred to processing centres and directed toward processing alternatives.</u></a>	65
<a href="#"><u>Figure 15: Potential network sites and flows.</u></a>	81
<a href="#"><u>Figure 16: Methodology for designing supply loops.</u></a>	82
<a href="#"><u>Figure 17: Cost structure through product lifecycle (Alting, 1993)</u></a>	87
<a href="#"><u>Figure 18: Bills of materials and product families resulting from an ABC classification.</u></a>	90
<a href="#"><u>Figure 19: Exploded view of most manual wheelchair generic parts.</u></a>	91
<a href="#"><u>Figure 20: An example of product flow directed toward processing alternatives.</u></a>	93
<a href="#"><u>Figure 21: a) New and valorised products in circulation; b) User zones locations.</u></a>	96
<a href="#"><u>Figure 22: Percentage of total demand satisfied through valorised finished products for each ten year end-user age bracket: a) Acquisition; b) Replacement.</u></a>	99
<a href="#"><u>Figure 23: Percentage of the total demand per a ten year end-user age brackets: a) Acquisition; b) Replacement.</u></a>	100
<a href="#"><u>Figure 24: Proportion of recovered finished product directed toward processing alternatives according to product age: a) Repair; b) Disposal.</u></a>	100
<a href="#"><u>Figure 25: Percentage of the total recovered finished product according to product age.</u></a>	100
<a href="#"><u>Figure 26: Forecast strategies.</u></a>	109
<a href="#"><u>Figure 27: Methodology for designing supply loops.</u></a>	122
<a href="#"><u>Figure 28: Potential network sites and flows.</u></a>	122
<a href="#"><u>Figure 29: An example of potential product flow direction toward processing alternatives.</u></a>	128
<a href="#"><u>Figure 30: Heuristics based on the sample average approximation.</u></a>	140
<a href="#"><u>Figure 31: Bills of materials for the RAMQ context.</u></a>	142
<a href="#"><u>Figure 32: Representation of the calculation of the optimality gap for a sample of size <math>N=100</math>, with <math>N'=400</math>, for the identified solutions: a) Solution 1; b) Solution 2.</u></a>	148
<a href="#"><u>Figure 33 : Résumé des travaux de recherche réalisés dans le cadre du projet de valorisation des aides à la mobilité.</u></a>	181

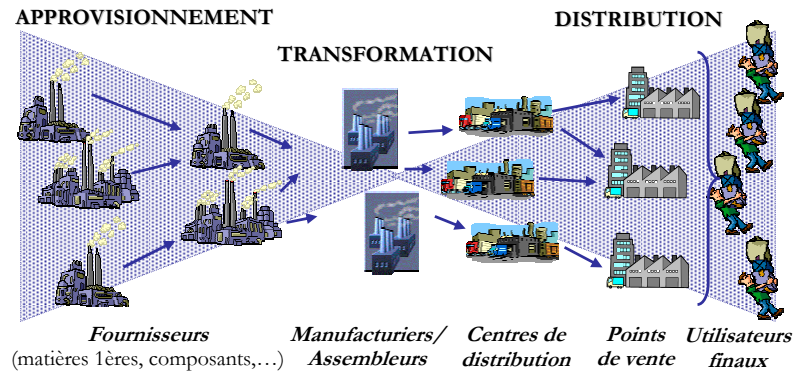
## Introduction

La conception de réseaux logistiques porte sur les décisions de localisation et de définition de la mission des sites, à savoir notamment quel type de produits sera pris en charge par les sites impliqués dans le réseau. Des modèles de programmation mathématique sont généralement développés pour aborder de telles décisions. Ils optimisent une fonction objectif portant sur les coûts ou les bénéfices engendrés, de sorte à satisfaire les besoins estimés des utilisateurs finaux, tout en respectant les contraintes de capacité d'un réseau. Les réseaux étaient jusqu'à tout récemment conçus à l'égard de la chaîne d'approvisionnement, axée sur la production et la distribution de produits neufs. Des pressions économiques, environnementales et sociales de plus en plus fortes poussent toutefois les organisations à étendre leurs responsabilités à l'égard du cycle de vie de leurs produits. Elles visent notamment une utilisation intelligente des ressources non renouvelables et une offre étendue de services plutôt que la simple vente de produits, entre autres par la location de produits et les services de maintenance. Il s'amorce alors une révision des relations d'affaires qui soulève notamment des préoccupations de plus en plus marquées pour la récupération, le traitement et la redistribution de matériels réutilisables. Il en émerge un nouveau domaine, soit celui de la logistique inversée.

Les chaînes d'approvisionnement sont habituellement élaborées pour supporter les processus depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison des produits finis aux utilisateurs finaux (**Figure 1**). Des flux de matériels convergent ainsi de divers fournisseurs pour alimenter les processus de production des manufacturiers. Les produits finis résultants sont ensuite acheminés vers des centres de distribution, puis à des points de vente pour pouvoir satisfaire les besoins des utilisateurs finaux. Trois principales fonctions logistiques sont ainsi généralement distinguées pour de tels réseaux (Lee et Billington, 1993) :

- Approvisionnement en matières premières ;
- Transformation des matières premières en produits intermédiaires et en produits finis ;
- Distribution des produits finis vers les utilisateurs finaux.





**Figure 1 :** Chaîne d'approvisionnement.

La récupération des produits est toutefois une réalité à laquelle les organisations sont ou seront confrontées. Elle peut prendre différentes formes (Fleischmann, 2001) :

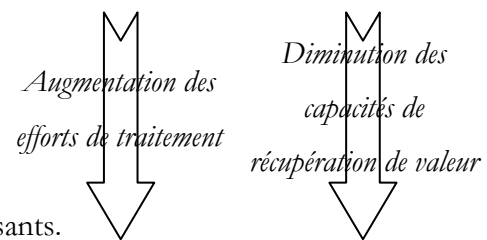
- Retours de produits inutilisés : récupération de produits qui ne répondent plus aux besoins des utilisateurs, mais qui n'en sont pas forcément à la fin de leur vie utile. Elle est généralement associée aux :
  - Produits récupérés sous les modalités d'un contrat de service;
  - Produits récupérés suite au renouvellement des stocks d'une unité d'affaires;
  - Produits récupérés sous réglementation environnementale (ex. : pneus);
  - Produits récupérés pour préserver l'image de marque ou pour maintenir ou améliorer la position concurrentielle (ex. : composants électroniques, cartouches d'encre);
  - Produits retournés volontairement en vue d'une réutilisation ultérieure (ex. : jouets, ordinateurs);
  - Produits placés dans les déchets domestiques;
- Retours commerciaux : récupération de produits afin d'annuler ou de corriger une transaction;
- Retours de produits sous garantie : récupération de produits défectueux ou non-conformes aux spécifications techniques;
- Rebut et produits dérivés des activités du réseau : récupération de matériels ou des émissions résultant généralement des activités de transformation de forme des produits;
- Emballages : récupération des contenants, des matériels d'emballage et des moyens de manutention (ex. : bouteilles, caisses, conteneurs).

Le processus de récupération est encore bien souvent déclenché par les utilisateurs finaux. Les produits peuvent notamment être retournés à des points de collecte préétablis par la communauté ou par l'organisation, par exemple un point de vente ou un point de service, afin d'en assurer le traitement adéquat. Pour certains types de produits offerts sous un contrat de location, tels les photocopieurs, un service de collecte peut être offert par l'organisation.

Jusqu'à tout récemment, les produits récupérés des utilisateurs finaux par les organisations étaient directement réintroduits sur le marché, lorsque possible, revendus à bas prix sur des marchés alternatifs ou tout simplement éliminés. Ces activités étaient alors habituellement sources de dépenses plutôt que de revenus (Rogers et Tibben-Lembke, 1999; Tibben-Lembke et Rogers, 2003; Trebilcock, 2001).

Les volumes de retour de plus en plus importants rencontrés par les organisations, par des politiques davantage libérales (Rogers et Tibben-Lembke, 1999), et les réglementations environnementales de plus en plus sévères appellent toutefois à un changement dans les façons de faire. En plus de la réutilisation directe et de la disposition propre, les organisations cherchent maintenant à améliorer les débouchés possibles des produits récupérés en abordant avec plus d'attention les activités de traitement ou encore de valorisation (Chouinard, 2003; Thierry *et al.*, 1995) :

- Réparation;
- Reconditionnement;
- Remise à neuf (« remanufacture »);
- Récupération de composants (cannibalisation);
- Recyclage des produits inutilisés ou de leurs composants.

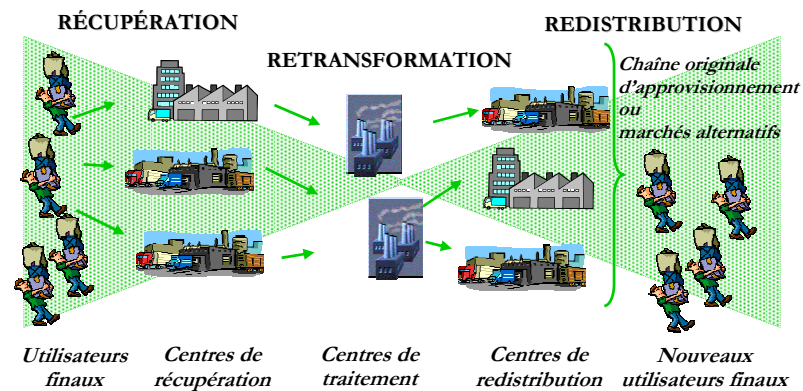


Le recours à l'une ou l'autre des alternatives de traitement, ainsi que les efforts à déployer pour leur réalisation dépendent des volumes de récupération et de demande rencontrés, de l'état des produits récupérés et des capacités de récupération de valeur de l'organisation, notamment suivant la capacité de valorisation et d'entreposage des sites considérés. Sauf en ce qui a trait à l'alternative de réassemblage, pour laquelle la qualité des produits est rétablie à un niveau équivalent de l'état neuf, le niveau de qualité des matériels ou des produits résultants des alternatives de valorisation est habituellement inférieur à ceux offerts à l'état neuf.

Les produits ou les matériels valorisés représentent une source alternative d'approvisionnement dans les réseaux logistiques. Selon Fleischmann (2001), le recours aux produits ou aux matériels valorisés est une alternative bien souvent moins coûteuse que la production ou l'achat de nouveaux. Ils peuvent alimenter les activités de la chaîne originale d'approvisionnement (boucle fermée d'approvisionnement) ou encore être réintroduits sur des marchés alternatifs (boucle ouverte d'approvisionnement) (Chouinard, 2003).

Ainsi, en parallèle avec la chaîne d'approvisionnement, trois principales fonctions logistiques peuvent caractériser les réseaux de logistique inversée (**Figure 2**) :

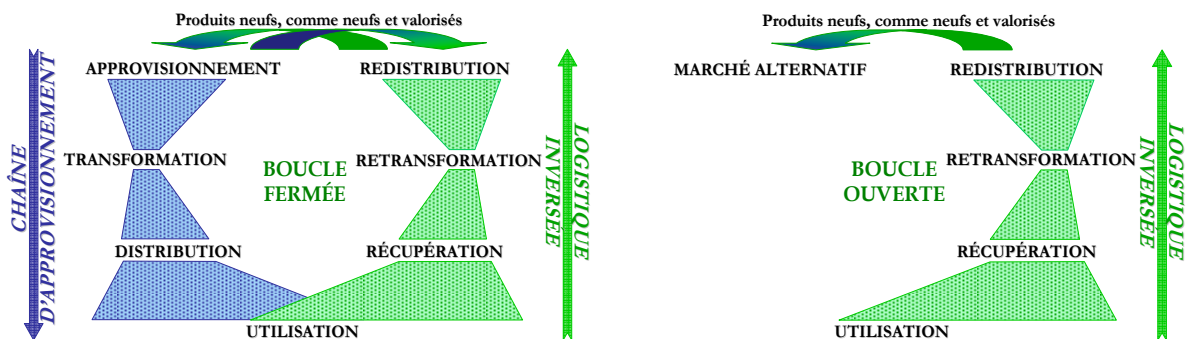
- Récupération des produits inutilisés ;
- Retransformation des produits récupérés en composants et en produits finis réutilisables ou en vue de leur élimination/disposition propre;
- Redistribution des matériels réutilisables vers les clients.



**Figure 2** : Réseau de logistique inversée.

De nouvelles unités d'affaires ou celles déjà en place dans une chaîne d'approvisionnement peuvent assurer ces fonctions de logistique inversée. Leur prise en charge par les unités d'affaires en place peut toutefois avoir un impact sur leur fonctionnement et même sur la dynamique de toute la chaîne d'approvisionnement. Effectivement, des sources alternatives d'approvisionnement peuvent ainsi être mises à la disposition et les ressources du réseau peuvent se voir partagées entre la chaîne d'approvisionnement et la logistique inversée. Ces fonctions logistiques sont toutefois souvent caractérisées d'un haut niveau d'incertitude à l'égard de la quantité et de la qualité des produits impliqués, ainsi que du moment, du délai et du lieu de récupération, de traitement et de redistribution des produits (Chouinard, 2003;

Guide *et al.*, 2000). Cette incertitude a un impact considérable sur les coûts ou les bénéfices rencontrés et, par conséquent, sur l'efficacité et l'efficience d'une boucle d'approvisionnement.



**Figure 3 :** Boucle d'approvisionnement fermée et ouverte.

L'objectif de cette thèse est de proposer des approches de modélisation et des outils de conception devant supporter les décisions stratégiques de conception de réseaux logistiques intégrant la logistique inversée à une chaîne d'approvisionnement. Il vise la création de boucle d'approvisionnement, tant ouverte que fermée. La démarche suggérée vise à étudier certaines questions liées au processus de modélisation et de conception d'une boucle d'approvisionnement.

### ***Modélisation d'une boucle d'approvisionnement :***

- Comment définir les sites et les flux potentiels d'une boucle d'approvisionnement ?
- Comment représenter les capacités, les coûts et les niveaux de service caractérisant les niveaux de performance atteignables d'un réseau potentiel ?
- Comment regrouper les utilisateurs finaux et les produits, se présentant sous différentes versions et générations, pour refléter les niveaux de performance atteignables d'un réseau potentiel ?
- Est-ce que tous les produits et tous les utilisateurs finaux d'un réseau doivent être abordés similairement face aux niveaux de performance atteignables dans la modélisation d'une boucle d'approvisionnement ?
- Comment aborder explicitement le désassemblage et le (ré)assemblage des produits ?
- Comment aborder l'orientation stratégique des volumes de produits récupérés vers les alternatives de traitement considérées suivant leur état ?

- Comment estimer les volumes de récupération et de demande manifestés dans un réseau potentiel par les utilisateurs finaux ?
- Où positionner les volumes de récupération et de demande sur le territoire couvert par le réseau potentiel ?
- Est-ce que les volumes de demande et de récupération évoluent en fonction des changements démographiques et de l'évolution de la flotte de produits en circulation ?
- Comment représenter les incertitudes liées aux volumes de récupération, de traitement et de demande ?

***Conception de la boucle d'approvisionnement :***

- Quels sites d'un réseau potentiel sélectionner pour assurer la récupération, le traitement et la redistribution des produits et ainsi assurer l'accessibilité aux produits valorisés, tout en réduisant les coûts de fonctionnement du réseau ?
- Est-ce que tous les sites sélectionnés ont à prendre en charge tous les produits d'un réseau ou certains sites sont dédiés à certains produits ?
- Quelle proportion des volumes de produits récupérés est à orienter vers les alternatives de traitement considérées, suivant le contexte de fonctionnement du réseau abordé (volumes de demande et de récupération, capacité et coûts d'opération des sites) et l'état des volumes de produits récupérés ?
- Quelle proportion des volumes de demande peut être satisfaite par des produits valorisés (produits finis et pièces de rechange) ?
- Est-ce qu'une proportion minimale des volumes de demande devant être satisfaite par des produits valorisés affecte l'orientation stratégique des volumes de produits vers les alternatives de traitement ?
- Est-ce que l'accessibilité aux pièces de rechange affecte les décisions d'orientation stratégique des volumes de produits vers les alternatives de traitement et, par conséquent, la valeur unitaire des produits valorisés ?
- Comment se répercutent les incertitudes sur les décisions de localisation et de définition de la mission des sites de la boucle d'approvisionnement ?

Dans le contexte abordé, les utilisateurs finaux retournent les produits à l'organisation qui en a assuré la distribution. Il peut s'agir de produits qui ne répondent plus aux besoins des utilisateurs finaux ou encore de produits défectueux. Un service de collecte est offert pour améliorer les possibilités de récupération des produits. Les produits récupérés sont traités en vue d'une réutilisation dans leur forme originale ou pour la récupération de pièces de rechange. Les produits valorisés sont entreposés en vue d'une réutilisation éventuelle, tout en assurant une redistribution plus rapide comparativement à l'approvisionnement en produits neufs. Ils servent à satisfaire les besoins d'utilisateurs finaux ou à la remise en état des produits à moindres coûts (maintenance et valorisation). Les produits neufs sont fournis sur demande par des fournisseurs préétablis. Des états sont assignés aux volumes de produits récupérés, lesquels préconisent une ou plusieurs alternatives de traitement. La localisation et la mission des sites sont à déterminer pour assurer la récupération, le traitement et la redistribution des produits, tout en tenant compte du fonctionnement de la chaîne régulière d'approvisionnement.

Les alternatives de traitement prévoient notamment la réparation des produits finis. Certains d'entre eux peuvent être désassemblés pour le reconditionnement de pièces de rechange. Les produits (produits finis et pièces de rechange) peuvent aussi être disposés, ce qui marque la fin du cycle de vie des produits au sein de la boucle d'approvisionnement. Les volumes de demande et de récupération, la capacité des sites impliqués et les coûts d'opération du réseau conditionnent l'orientation stratégique des volumes de produits vers les alternatives de traitement. Le recours aux produits valorisés (produits finis et pièces de rechange) dépendra toutefois des exigences des utilisateurs finaux et des politiques, des stratégies et des cibles de l'organisation.

Les travaux de cette thèse s'intéressent plus spécifiquement à un service du domaine de la santé, soit celui de la dispensation d'aides techniques. Il se reporte au contexte d'attribution, de maintenance, de récupération, de traitement et de redistribution de fauteuils roulants dans la province de Québec, au Canada (Chouinard *et al.*, 2005; Chouinard, 2003). Ce contexte est régi et administré par la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ). Les fauteuils sont utilisés sans frais par les bénéficiaires admissibles (les utilisateurs finaux) et sont personnalisés à leurs conditions. Les politiques de la RAMQ font en sorte que certains utilisateurs ne sont admissibles qu'aux fauteuils valorisés. Ce contexte est utilisé pour valider les approches de modélisation et les outils de conception proposés dans cette thèse.

Le présent document s'organise comme suit. Le CHAPITRE II examine la littérature à l'égard de la conception et la gestion de réseau logistique intégrant la logistique inversée à la chaîne d'approvisionnement. Les approches de modélisation mathématique de réseaux logistiques y sont également identifiées. Le CHAPITRE III présente le premier article de la thèse. Cet article propose une méthodologie globale de conception de réseau logistique tenant compte des particularités des flux de matériels engendrés par la récupération, le traitement et la redistribution des produits face au contexte étudié : incertitudes sur la qualité, la quantité, le moment et les lieux. Elle conduit à la proposition d'un modèle déterministe formalisant certaines spécificités de modélisation à l'égard du contexte étudié. Au CHAPITRE IV, le deuxième article traite de la définition des paramètres clés du problème devant servir à la représentation des flux de matériels dans le réseau. Certains facteurs aléatoires sont identifiés et caractérisés à l'égard des volumes de demande, de récupération et de traitement. Le CHAPITRE V propose un modèle de programmation stochastique qui récupère ces paramètres pour la conception d'une boucle d'approvisionnement. L'article quantifie l'impact des facteurs aléatoires et des changements possibles des politiques et des stratégies de l'organisation à l'égard de l'utilisation des produits valorisés. Les changements abordés sont ceux pouvant affecter l'accessibilité des produits dans le réseau et, par conséquent, la configuration du réseau logistique requise.

# 1 Revue de littérature

Plusieurs notions de conception et de gestion de boucles d'approvisionnement ainsi que des approches de modélisation et de résolution de réseaux logistiques sont présentées dans ce chapitre. Divers niveaux décisionnels sont abordés à l'égard des boucles d'approvisionnement, puisqu'ils peuvent s'influencer les uns les autres. Ces notions sont présentées de sorte à souligner les particularités associées aux flux de matériels à l'égard de la logistique inversée. Quant à elles, les approches de modélisation et de résolution de réseau logistique sont abordées pour identifier les notions fondamentales de conception, proposées initialement à l'égard de la conception de chaînes d'approvisionnement, sans égard à la récupération et au traitement des produits.

## 1.1 Boucle de valeur

La notion de chaîne de valeur a été introduite par Porter (1985) à l'égard de la chaîne d'approvisionnement. Elle présente le cumul des coûts engendrés tout au long d'un réseau logistique et, par conséquent, la valeur perçue d'un utilisateur final pour l'obtention d'un produit. Deux principales catégories d'activités caractérisent la chaîne de valeur. Les activités primaires réfèrent aux flux de matières, alors que les activités de soutien aux flux d'information et de capital. Différents niveaux décisionnels sont associés à ces activités (**Figure 4**) (Fleischmann *et al.*, 2000) :

- Niveau stratégique : décisions à long terme visant l'instauration des assises de fonctionnement d'une organisation (ex. : localisation des installations, allocation des produits aux installations, choix technologiques, définition des politiques de pilotage) ;
- Niveau tactique : décisions à moyen terme portant sur l'agencement et la réservation des ressources en prévision des besoins à venir d'une organisation (ex. : établissement du plan maître de production) ;
- Niveau opérationnel : décisions au jour le jour pour répondre aux sollicitations manifestées à une organisation (ex. : planification de la production et de la distribution).

L'intégration de la logistique inversée à une chaîne d'approvisionnement transforme cette chaîne par la création d'une boucle d'approvisionnement. Des flux additionnels de matières, d'information et de capital se voient ainsi ajoutés au fonctionnement des organisations.



Les produits récupérés représentent des sources alternatives d'approvisionnement. Ces sources ne sont cependant pas aussi fiables que celles de la chaîne d'approvisionnement. Les matériels peuvent provenir de l'un des acteurs du réseau logistique, notamment en ce qui a trait aux emballages, aux sous-produits résultants des activités de transformation (ex. : production, maintenance et valorisation) ainsi qu'aux renouvellements des stocks. Ils peuvent également provenir des utilisateurs finaux, suite à un rappel du manufacturier, d'un retour sous garantie ou tout simplement suite à une inutilisation de la part de l'utilisateur. Le moment du retour peut difficilement être connu d'emblé. Il dépend généralement de la capacité des produits à répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs ainsi que des conditions d'utilisation et d'entretien auxquelles ils sont soumis. Ce contexte affecte la quantité et la qualité des produits retournés à l'organisation dans le temps et, par conséquent, la variété de produits à gérer. Les activités de logistique inversée se distinguent donc de celles de la chaîne d'approvisionnement par le caractère distinctif de chaque situation de récupération.

Les attentes et les contraintes à l'égard de la réalisation des activités liées à la récupération des produits inutilisés, leur traitement et la redistribution des matériels réutilisables peuvent différer de celles de la chaîne d'approvisionnement. Elles découlent bien souvent de pressions légales (ex. : « *Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE* ») ou économiques (ex. : commerce électronique). Les niveaux de service à l'égard de la récupération et de la redistribution des produits valorisés peuvent différer de ceux de la distribution de produits neufs. Les délais de récupération ne sont généralement pas aussi contraignants pour les organisations, comparativement à la livraison. Certains types de récupération nécessiteront toutefois des interventions rapides afin d'éviter une dépréciation trop importante des produits et ainsi une réduction des possibilités de traitement (ex. : ordinateur). De courts délais de livraison des produits valorisés peuvent aussi être privilégiés, comparativement aux produits neufs, afin de favoriser la redistribution.

Face à ces particularités de fonctionnement, l'objectif des organisations sera alors de mettre en place des mécanismes visant la récupération de valeur des produits récupérés par leur réintroduction efficace sur les marchés, dans leur forme originale ou non, ou par leur disposition propre.

## 1.2 Niveaux décisionnels reliés aux activités primaires et de soutien

Les capacités de récupération de valeur des organisations dépendent de leur capacité à analyser leur chaîne de valeur ainsi qu'à intégrer, organiser, planifier, réaliser et contrôler les activités de logistique inversée parmi les activités courantes. La portée de cette intégration peut toucher plusieurs activités (**Figure 4**) et niveaux décisionnels d'une organisation (**Tableau 1**). Un portait global de cette portée est dressé dans cette section.

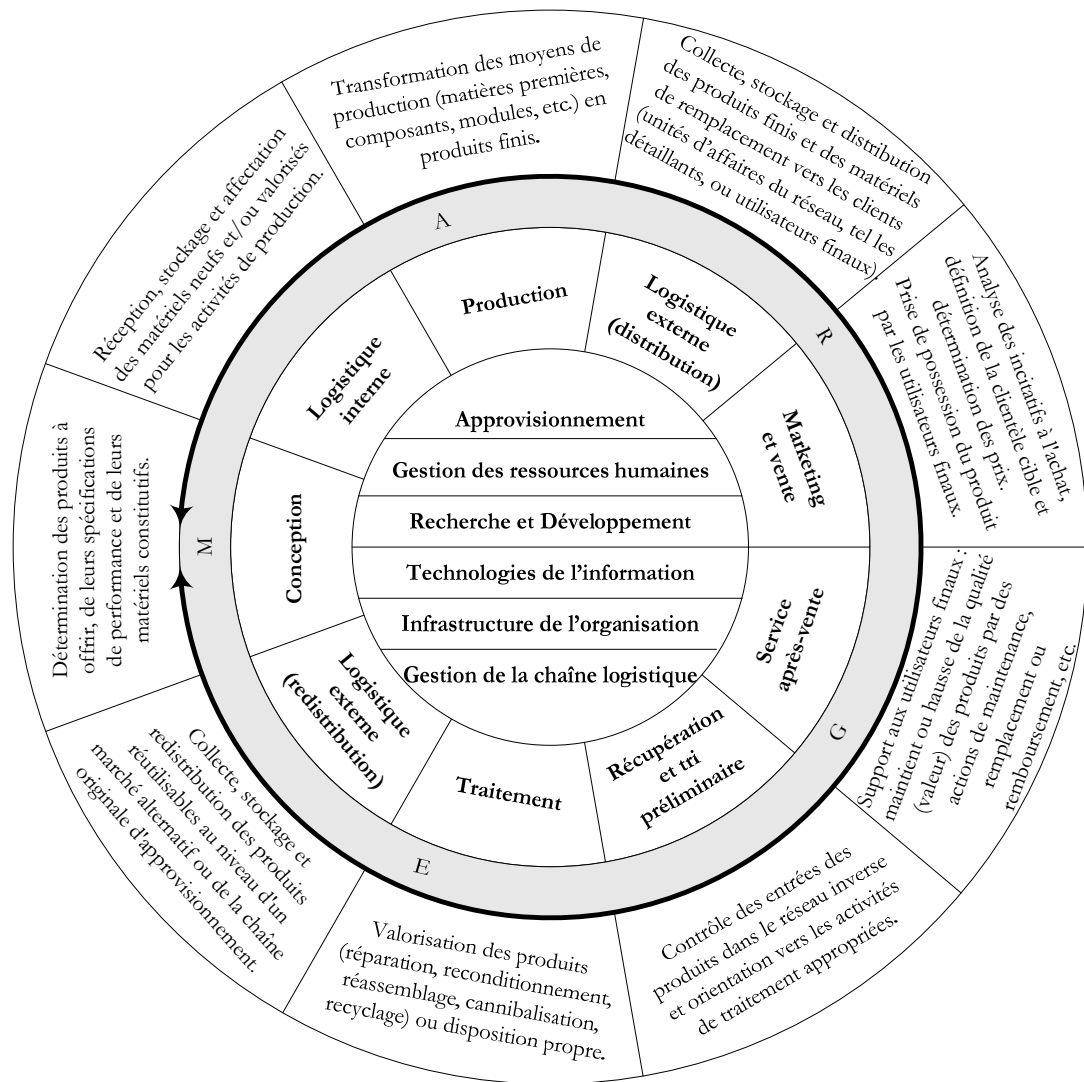


Figure 4 : Boucle de valeur.

## **1.3 Décisions stratégiques**

Les décisions stratégiques visent à déterminer la forme que prendra l'intégration de la logistique inversée au fonctionnement courant de l'organisation. Globalement, ces décisions portent sur la manière de concevoir les produits, d'organiser les processus ainsi que les échanges dans le réseau.

### **1.3.1 Marchés cibles**

Avant d'entreprendre les modifications à son fonctionnement, l'organisation déterminera les marchés, le type de clients (unités d'affaires du réseau ou utilisateurs finaux) et le type de produit ciblés ainsi que les attentes à l'égard des produits et des services (Datta, 1996 ; Beaumon, 1989). Les besoins des clients seront caractérisés sur les bases de données démographiques (âge, sexe, classe sociale, conditions et intensité d'utilisation), mais également de données relatives aux produits mis en circulation (état, âge, loi de dégradation). Au besoin, le territoire couvert par l'organisation sera divisé en zones géographiques restreintes, désignées ici en termes de zones d'utilisateurs, pour souligner l'accessibilité des clients aux produits et aux services ainsi que l'ampleur des besoins à leur égard. Des familles de produits pourront être distinguées pour simplifier cette caractérisation. Elles serviront à refléter les besoins distinctifs des clients, mais aussi les efforts à déployer par l'organisation pour supporter un ou plusieurs stades de cycle de vie des produits. Suivant les informations disponibles sur les marchés cibles, des prévisions seront faites sur les volumes de demande et de récupération afin de mieux maîtriser leur évolution. Chaque zone peuvent être abordées séparément afin d'apprécier leur profil distinctif. Toutes ces informations serviront à définir les spécifications à atteindre à l'égard des produits (niveau de qualité, caractéristiques physiques, fonctionnelles, environnementales, coûts, niveau de personnalisation, etc.) et des services (coûts, niveaux de service), soit suivant les attentes perçues ainsi que les contraintes et les capacités de l'organisation. Elles dicteront la manière d'organiser le réseau, les processus et les produits de l'organisation.

### **1.3.2 Réseaux**

Plusieurs considérations influenceront la structure d'un réseau logistique, tant à l'égard de la logistique inversée que de la chaîne d'approvisionnement (Chouinard, 2003). Un réseau peut

opérer en boucle ouverte ou en boucle fermée (section 1.1). La boucle ouverte permet d'éviter le mélange des produits neufs et des produits valorisés sur les mêmes marchés. La boucle fermée peut nécessiter la reconfiguration des chaînes courantes d'approvisionnement, afin de tenir compte de la réintroduction possible des produits sur les marchés. Les activités de logistique inversée peuvent être partiellement ou complètement externalisées, suivant les compétences que l'organisation désire maintenir ou développer. Les activités de logistique inversée peuvent être réalisées par des installations dédiées ou intégrées à celle de la chaîne d'approvisionnement. Le recours aux ressources en place permet de profiter des compétences acquises à l'égard des produits et des processus. Les activités de logistique inversée peuvent se présenter sous une intégration verticale et horizontale. Le premier niveau d'intégration précise le nombre de voies possibles dans un réseau (centralisation/ décentralisation) et le second le nombre de niveaux d'installations au sein de chaque voie. La centralisation peut permettre d'atteindre une certaine économie d'échelle et d'envergure, alors que la décentralisation assure une meilleure proximité avec les clients (échange d'information, délai de service, etc.). Le nombre d'acteurs dans chaque voie dépend notamment des compétences et des ressources mises à la disposition, ainsi que des volumes de produits impliqués.

Différentes installations et ressources (ressources humaines et équipements) potentielles peuvent être considérées pour former un réseau. Plusieurs modes (camion, train, bateau, avion, etc.) et alternatives de transport (flotte privée ou prestataire de service logistique) peuvent aussi assurer les liaisons entre les installations. Les différentes options possibles seront comparées et évaluées, sur la base de divers critères (coûts totaux, couvertures géographique, etc.), de sorte à retenir celles les plus appropriées au contexte de l'organisation et ainsi déterminer le réseau potentiel (Punniamoorthy et Ragavan, 2003; Brown et Gibson, 1972). Le choix final parmi toutes les options possibles se fera généralement suite à une analyse économique de la configuration du réseau. Il prendra en considération les contraintes du réseau, telles les contraintes de capacité, les sources de demandes et de récupération et les alternatives de traitement envisageables, en abordant explicitement ou non l'état des produits récupérés. L'orientation des produits vers les alternatives de traitement peut se faire par le biais de proportions fixes (Listes et Dekker, 2005; Fandel et Stammen, 2004; Jayaraman *et al.*, 2003; Shih, 2001; Barros *et al.*, 1998; Krikke, 1998). D'autres approches proposent une borne inférieure sur les produits à disposer proprement, alors que le reste des produits est voué à la

remise en état ou plus spécifiquement au réassemblage (« *remanufacture* ») (Listes, 2007; Lu et Bostel, 2007; Fleischmann, 2001). Les détails des principaux modèles de conception de réseau logistique proposés à ce jour sont présentés dans le premier article de la thèse, au Chapitre 2.

Des niveaux de service et des conditions d'approvisionnement (coûts, délais, disponibilité, etc.) différents à l'égard des produits neufs et valorisés influenceront la configuration du réseau. La configuration aura un impact sur les coûts de fonctionnement, et par conséquent sur le prix des produits et des services, et le partage de revenus dans le réseau (Savaskan et Van Wassenhove, 2006; Savaskan *et al.*, 2004). Un changement du modèle d'affaires de l'organisation, notamment à l'égard d'alliance stratégique ou de collaboration (Debo *et al.*, 2003), d'approche par commerce électronique ou encore de location plutôt que de la vente de produits (Mont *et al.*, 2006), peut nécessiter une révision de la configuration d'un réseau logistique. La modification du partage des risques, des responsabilités et des bénéfices peut effectivement entraîner un changement de rôle des unités d'affaires et nécessiter une dynamique différente dans un réseau.

### 1.3.3 Produits

Les produits sont généralement conçus de sorte à simplifier et même à rentabiliser les activités du réseau manufacturier. Jusqu'à récemment, les produits étaient essentiellement pensés en perspective des activités de production (conception pour l'assemblage [DFA] et la manufacture [DFM]). La tendance actuelle à l'offre de services plutôt qu'aux produits seuls amène les organisations à se préoccuper davantage de la qualité de leurs produits en cours d'utilisation (conception pour la qualité [DFQ], la maintenabilité [DFMt] et la fiabilité [DFR]). Les pressions environnementales de plus en plus fortes les poussent aussi à étendre leurs responsabilités à l'égard des produits sur tout leur cycle de vie (conception pour la récupération [DFR], le désassemblage [DFD], la gestion du cycle de vie des produits [DFLC] et la prise en compte des considérations environnementales [DFE]). Ces notions sont souvent désignées sous le concept global de Design for X (Kuo *et al.*, 2001). Les décisions de conception de nouveaux produits (ex. : choix des matériels, modularisation, jauge d'usure, etc.) et de modifications des produits en circulation (ex. : mise à jour ou remplacement des technologies), notamment suite à la valorisation, influenceront la manière de réaliser les activités dans le réseau, le prix de vente des produits ainsi que le niveau de demande et de retour à leur égard (Debo *et al.*, 2006 ; Debo *et al.*, 2005 ; Debo *et al.*, 2003).

### 1.3.4 Processus

La viabilité de fonctionnement d'un réseau repose sur la manière d'organiser et d'agencer les processus à réaliser et de définir les ressources requises à leur accomplissement. Des ressources spécialisées ou du moins flexibles peuvent être exigées face à la diversité et à la complexité des opérations, dues entre autres aux incertitudes reliées à la logistique inversée. Le choix des ressources ou encore le choix technologique peut se faire lors de la conception du réseau (Martel, 2005) et des installations (Asef-Vaziri et Laporte, 2005 ; Hassan, 2000). La conception des installations sera généralement abordée de sorte à réduire les coûts et les efforts d'implantation, tout en améliorant les échanges entre les postes de travail. Les espaces de travail et d'entreposage seront aménagés de sorte à assurer une manipulation efficace et sécuritaire des produits (récupérés, neufs ou valorisés). Au besoin, des moyens de manutention adaptés seront sélectionnés (de Brito et de Koster, 2003), pouvant servir ou non à la fois aux activités du réseau direct et inverse entre les acteurs internes et/ou externes. Il peut s'agir de moyens durables ou non, dont le nombre sera suffisant face aux échanges rencontrés.

Les échanges de matières et d'information seront supportés et synchronisés par des systèmes d'information adaptés à la diversité de produits pouvant se présenter dans une boucle d'approvisionnement. Ils seront contrôlés à l'aide d'indicateurs de performance clairement identifiés (Beamon, 1998), élargis aux activités de logistique inversée. Toute l'information requise à l'identification des produits manipulés et à leur orientation potentielle dans le réseau inverse devra y être contenue (Chouinard *et al.*, 2005 ; Chouinard *et al.*, 2003 ; Chouinard, 2003; Kokkinaki *et al.*, 2003). Chouinard *et al.* (2005, 2003) et Chouinard (2003) proposent une approche pour définir une cartographie des processus visant l'intégration des activités de logistique inversée à celles de la chaîne courante d'approvisionnement. Cette approche permet d'identifier toute l'information requise au suivi des processus et des produits, sur tout leur cycle de vie.

Des outils d'aide à la décision et des outillages seront sélectionnés pour une standardisation partielle ou complète des résultats engendrés des activités, notamment en regard au tri et de la valorisation des produits. Les incertitudes dans le réseau pourront ainsi être réduites ou du moins être mieux maîtrisées. Le transport, la manutention et même le suivi des produits sur tout leur cycle de vie peuvent soulever des défis de traçabilité. Des nouvelles technologies ayant

démontrées leur efficacité pour la chaîne d'approvisionnement (Gunasekaran *et al.*, 2006), tel le RFID, peuvent être considérées à l'égard de la logistique inversée.

Par ces outils et méthodes, on souhaitera mettre en place toutes les mesures permettant d'assurer l'accessibilité aux produits, tant neufs que valorisés, et ainsi contribuer aux possibilités de récupération de valeur. Adéquatement supportés, les retours peuvent représenter une forme de feedback des clients (Mason, 2002) qui pourra éclairer l'organisation quant aux améliorations à apporter aux produits ainsi qu'aux processus opérationnels et décisionnels.

## **1.4 Décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles spécifiques aux activités primaires**

Les diverses activités primaires de la boucle d'approvisionnement requièrent des attentions particulières en vue de leur mise en œuvre. Les activités primaires abordées dans cette section réfèrent spécialement à la récupération, au traitement et à la redistribution. Au niveau stratégique, des politiques seront établies pour régir les flux de matériels, d'information et de capital au cours des activités. Les décisions tactiques et opérationnelles porteront quant à elles principalement sur l'affectation des ressources aux activités suivant les besoins manifestés dans un réseau et les capacités disponibles. Chacune des activités primaires est ici d'abord traitée séparément. Leur coordination est abordée en fin de section.

### **1.4.1 Service après-vente**

Le service après-vente, spécialement les activités liées aux interventions de maintenance, est inclus ici parmi les activités primaires reliées à la logistique inversée. Ces interventions ont pour objectif de maintenir ou de rétablir à un certain niveau la qualité des produits en circulation. Elles peuvent permettre une récupération ultérieure de produits en meilleur état. Elles peuvent aussi servir à noter les changements portés à la composition et à l'état des produits en circulation, ce qui facilite l'identification des produits retournés et les prises de décision à leur égard.

La maintenance peut se produire sous la garantie du manufacturier. La fiabilité et la maintenabilité des produits et des composants qui les constituent permettent d'évaluer l'étendue de la garantie offerte (Dhillon, 1999). La fiabilité est la probabilité qu'un produit

accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu sur une période de temps donnée et dans des conditions données. La maintenabilité est la probabilité qu'un produit soit remis en état de fonctionnement dans des limites de temps spécifiées, pour des procédures prescrites et des conditions données. Ces caractéristiques doivent être déterminées tant pour les produits neufs que valorisés. Elles doivent tenir compte, suivant la situation, du recours possible à des matériels valorisés comme alternative aux matériels équivalents à l'état neufs lors de la réparation.

Pour que l'organisation puisse rétablir ou maintenir le niveau de qualité des produits en circulation de façon économique, des politiques d'entretien seront définies. Elles seront abordées de manière à établir l'étendu des actions à apporter (maintenance préventive, corrective et/ou opportuniste), le type de matériel à utiliser lors des remplacements (neufs et/ou valorisés) et l'intervalle qui séparera deux interventions préventives. C'est sur la base de ces politiques que la disponibilité des ressources humaines et matérielles sera planifiée. Une fois le moment de maintenance venu, on établira l'ordre d'exécution des activités et les actions détaillées à porter aux produits. Ces décisions prendront en considération l'ajout possible de défaillances inattendues, en regard aux interventions à réaliser et à l'introduction possible de nouvelles interventions. Les activités devront être réalisées en respect avec les standards de qualité de l'organisation, afin d'obtenir ou de maintenir la confiance des clients.

Le service après-vente peut enclencher les activités de logistique inversée. Des composants peuvent effectivement être remplacés des produits réparés. Les produits complets peuvent également être remplacés, lorsque les conditions de garantie le permettent ou tout simplement suite à une décision prise de la part de l'utilisateur final ou du centre de service impliqué.

### **1.4.2 Récupération**

Le processus de récupération assure deux principaux rôles dans le réseau inverse. Il contrôle d'abord l'entrée des produits dans le réseau inverse. Il permet ensuite l'orientation des produits récupérés vers la ou les alternatives de traitement appropriées. C'est au cours de ce processus que les produits sont identifiés et que leur état est évalué afin d'estimer leur potentiel de récupération de valeur.



Deux catégories de système de récupération peuvent être distinguées (Guide et van Wassenhove, 2000). Il y a la récupération de rebuts (« *waste stream* »), qui représente une acceptation passive des produits inutilisés face à la responsabilité accrue des organisations envers leurs produits, et la récupération mercatisée (« *market-driven system* »), qui représente les retours motivés par des incitatifs financiers mis en place par l'organisation (crédit, remboursement, dépôt). Pour le premier cas, le niveau moyen de qualité des produits récupérés est généralement plus bas. Les niveaux d'incertitudes sont également plus élevés. Les efforts et les ressources à déployer pour la prise en charge de ce type de retour seront donc plus importants.

La récupération des produits inutilisés auprès des utilisateurs finaux peut également être réalisée de deux façons différentes (Beullens, 2004; Beullens *et al.*, 2003) : les produits inutilisés peuvent être retournés par les utilisateurs aux points de collecte préétablis (retour volontaire ou expédition) ou être recueillis directement chez l'utilisateur par l'organisation (service de récupération). L'infrastructure du réseau et, au besoin, la manière de procéder à la collecte auprès des utilisateurs finaux sera alors à établir (section 1.4.5.1).

Peu importe la situation, le contrôle de l'entrée des produits dans le réseau inverse doit se faire dans le respect des politiques de récupération établies par l'organisation. Elles devront être clairement définies et transparentes aux clients pour éviter toutes ambiguïtés à l'égard des retours. Elles dictent sous quelles conditions les retours peuvent être autorisés (qualité du produit, état de l'emballage, délai depuis l'achat, etc.) et, au besoin, la manière d'établir les montants remboursés ou crédités. Les politiques peuvent être caractérisées de très libérales à très conservatives (Rogers et Timben-Lembke, 1999), ce qui aura un impact inévitable sur les volumes de retour rencontrés. Les politiques peuvent influencer les décisions d'achats des clients, particulièrement dans un contexte d'achats électroniques (Mukhopadhyay et Setoputro, 2004) ou de personnalisation de produits (Mukhopadhyay et Setoputro, 2005). Les politiques peuvent favoriser les retours au sein de l'organisation, de sorte à éviter les pertes vers des concurrents potentiels et vers des marchés alternatifs non contrôlés par l'organisation. Elles peuvent aussi contribuer à l'image de marque. Les contraintes environnementales abordées par l'organisation affecteront aussi les volumes de demande et de récupération rencontrés par l'organisation (Bloemhof-Ruuward *et al.*, 2004; Georgiadis et Vlachos, 2004).

Les décisions à l'égard de l'orientation des produits dans le réseau inverse reposent quant à elles sur les possibilités de récupération de valeur suivant l'état des produits. L'état des produits récupérés pourra être évalué dès la récupération, afin d'autoriser ou non le retour et de déterminer le montant à rembourser ou à créditer. Cette évaluation pourra aussi être réalisée ou approfondie suite à la récupération, afin d'orienter les produits dans le réseau inverse. L'objectif de la démarche sera d'éviter des coûts inutiles par l'entreposage, le transport et la maintenance des produits et leur traitement. Deux politiques d'orientation des produits vers les alternatives de traitement peuvent alors être envisagées. On pourra retenir l'alternative de traitement qui respecte au mieux la condition du réseau (volumes de récupération et de demande, capacité des sites, niveau des stocks), mais qui ne favorise pas forcément la récupération de valeur maximale des produits, ou encore retenir l'alternative avec la meilleure possibilité de récupération de valeur des produits (Chouinard *et al.*, 2005; Inderfurth et Teunter, 2001). Pour ce dernier cas, on pourra attendre que des besoins se manifestent réellement à l'égard de produits valorisés avant d'entreprendre le traitement (Chouinard *et al.*, 2005).

### 1.4.3 Traitement

Au cours des activités de traitement, des transformations seront portées aux produits afin de permettre leur réutilisation ultérieure, dans leur forme originale ou non, ou de voir à la fin de leur cycle de vie. Le traitement inclut la réutilisation directe, la valorisation [réparation, reconditionnement, remise à neuf (« *remanufacture* », désassemblage pour la récupération de matériels réutilisables (cannibalisation) et le recyclage] et la disposition propre (Thierry *et al.*, 1995 ; Chouinard, 2003). La réutilisation directe peut notamment nécessiter un réemballage ou une reconfiguration des produits. La valorisation fait généralement intervenir un certain degré de désassemblage (Lambert et Gupta, 2004; Inderfurth et Teunter, 2001), la réparation ou le remplacement de matériels constitutifs, la mise au point et le nettoyage des produits. Quant à la disposition des produits (ex. : matières dangereuses), des règles peuvent être à respecter par l'organisation. Les activités seront réalisées de manière à tenter de récupérer de la valeur des produits récupérés, suivant la politique d'orientation des produits dans le réseau inverse : récupération maximale de la valeur potentielle des produits récupérés ou minimisation des coûts (maximisation des profits).

La récupération maximale de la valeur potentielle des produits récupérés se fait par la sélection d'emblée de la meilleure alternative de traitement assigné à un produit, sans considération explicite de la capacité et des besoins d'un réseau (Krikke, 1998). La minimisation des coûts (maximisation des profits) se fait par une analyse de différents compromis quant aux alternatives de traitement, de stockage, de transport ainsi que de production et d'approvisionnement. Un produit récupéré n'est alors pas forcément traité par l'alternative permettant la récupération maximale de sa valeur potentielle. Dans les deux cas, les décisions peuvent se faire en tenant compte ou non de la diversité des matériels constitutifs pouvant être obtenue suite au traitement, en considérant ou non l'état des produits impliqués (Aras *et al.*, 2004), engendrée par les divers moyens de traitement envisagés (Teunter, 2006). La première stratégie fixe d'une certaine manière au préalable les volumes de produits à orienter vers chaque alternative de traitement, alors que la seconde permet une certaine flexibilité quant au traitement des produits. Pour ce dernier cas, le traitement des produits se fait en réponse partielle ou complète à la demande manifestée pour les différents produits (produits finis, modules d'assemblage, composants, matières premières).

L'orientation des produits dans le réseau inverse requière une certaine connaissance des produits, des alternatives de traitement et des résultats pouvant en découler (Teunter, 2006 ; Lambert et Gupta, 2004; Inderfurth et Teunter, 2001), suivant les faisabilités techniques, économiques, commerciales et environnementales (Krikke, 1998). La séquence de transformation des produits (assemblage, désassemblage et réassemblage) et les procédures utilisées (ex : destructive ou non destructive) seront alors à établir au préalable. Les coûts et les bénéfices, économiques et mêmes environnementaux, reliés à chaque alternative de traitement seront aussi identifiés, et ce, pour chaque produit (produits finis, modules d'assemblage, composants et matières premières). Les informations seront traduites sous forme d'arbre hiérarchique ou encore de nomenclature (Lambert et Gupta, 2004; Lambert, 2003), faisant intervenir des produits ou des familles de produits (produits finis, modules d'assemblage, composants et matières premières) suivant le niveau décisionnel considéré. Les produits seront agrégés, sur la base de similitudes fonctionnelles (face aux besoins des utilisateurs finaux et des processus de l'organisation), opérationnelles et logistiques (face au cheminement possible des produits dans le réseau et des coûts impliqués), en un nombre plus restreint de familles pour des décisions stratégiques et moins restreint pour des décisions tactiques. Ils seront

généralement considérés individuellement pour des décisions opérationnelles. Tout nouveau produit introduit dans le réseau pourra être intégré à une famille existante suivant les similitudes avec les produits courants. Ces informations peuvent servir à fixer les alternatives de traitement devant servir à l'orientation des produits dans le réseau inverse pour les différents niveaux décisionnels (récupération maximale de la valeur potentielle des produits récupérés). Elles peuvent aussi servir à représenter la hiérarchie des alternatives de traitement envisageables lors des prises de décision (minimisation des coûts/maximisation des profits). Des paramètres seront ajoutés à la nomenclature de produits pour spécifier les faisabilités de désassemblage (Fandel et Stammen, 2004) et même de réassemblage. Des standards de qualité à l'égard des activités de traitement devront être établis par l'organisation enfin de déterminer les mesures à mettre en place visant à les faire respecter.

La planification des activités de traitement consiste à réserver les ressources suivant les volumes de produits orientés vers chaque alternative, les volumes de matériels générés et le moment de traitement retenu (section 1.4.5.2). Au niveau opérationnel, on déterminera les produits à traiter et le niveau de désassemblage face aux besoins manifestés au réseau.

Il peut être pertinent de prendre en compte dans les décisions que l'état des produits récupérés peut influencer le prix de vente et par conséquent les revenus atteignables dans le réseau (Mitra, 2007).

#### **1.4.4 Redistribution**

La redistribution consiste à orienter les matériels générés lors des activités de traitement vers leur prochaine étape de cycle de vie. Les produits réutilisables seront redistribués vers l'une des unités d'affaires du réseau (boucle fermée), notamment afin d'alimenter les activités de production, de maintenance, de valorisation ou tout simplement pour satisfaire les besoins de nouveaux utilisateurs, ou encore vers des unités d'affaires opérant au niveau de marchés alternatifs (boucle ouverte). Les matériels qui auront été rejetés lors des activités de traitement, puisqu'ils ne répondent à aucun besoin du réseau ou qu'ils auront atteint la fin de leur cycle de vie, seront quant à eux acheminés vers les sites ciblés pour leur disposition propre. La redistribution sera abordée suivant le type de demande à combler et le niveau de service à atteindre.

Le réseau peut opérer sous un mode de redistribution référant aux caractéristiques de l'une ou l'autre stratégie générale de pilotage (Chouinard *et al.*, 2005 ; Guide *et al.*, 2003) : stratégie en flux poussés (« *push* » ou « *remanufacture-to-stock* ») ou stratégie en flux tirés (« *pull* » ou « *remanufacture-to-order* »). Avec une stratégie en flux poussés, les produits récupérés seront traités dès leur entrée dans le réseau inverse, afin de satisfaire des besoins ultérieurs. Pour ce qui est de la stratégie en flux tirés, les produits seront traités seulement lorsque des besoins à leur égard se seront clairement manifestés. La première approche de pilotage permet de réduire le temps de réaction du réseau face aux besoins, alors que la seconde permet d'éviter d'entreprendre des modifications inutiles aux produits, notamment dans un contexte de personnalisation. Un point de découplage peut être introduit dans le réseau afin de profiter des avantages des deux approches. Des volumes différents de produits récupérés et valorisés à entreposer se rencontreront suivant la stratégie considérée.

#### **1.4.5 Flux de matériels et stocks**

Les activités d'un réseau s'intègrent les unes aux autres notamment par les flux de matériels et les stocks. Les politiques adoptées à l'égard des différentes activités primaires dicteront les volumes de produits intégrés dans le réseau, leur orientation et la localisation de leur point de stockage. Certaines décisions porteront particulièrement sur la manière d'assurer un contrôle efficace et efficient des flux de matériel et des stocks dans le réseau.

##### **1.4.5.1 Transports**

Les activités de transport assurent l'échange de produits dans le réseau, entre les différentes unités d'affaires et même avec les utilisateurs finaux. Les activités de transport sont liées à la collecte et à la livraison des produits.

##### **COLLECTE**

La collecte réfère ici tout particulièrement à la récupération des produits inutilisés auprès des clients de l'organisation, soit des unités d'affaires du réseau, tel un détaillant, ou des utilisateurs finaux (Beulens, 2004; Beulens *et al.*, 2003).

Suivant le système de collecte envisagé (section 1.4.5.1), l'infrastructure d'un réseau de collecte peut prendre différentes formes. Il peut faire intervenir des centres de dépôt non-pilotés

(« *unmanned* ») ou des centres de collectes intelligents avec main-d'œuvre. La localisation de ces centres peut se faire lors de la conception du réseau logistique, notamment afin d'assigner les utilisateurs finaux aux centres de récupération et ainsi optimiser leur couverture du territoire (Owen et Daskin, 1998). Des classes ou des familles distinctes de produits peuvent être à définir (ex. : produits électroniques, vêtements, livres ou encore matières plastiques, métaux, etc.). Elles seront requises lorsque des exigences différentes à l'égard de la récupération se présenteront (contraintes environnementales, techniques, économiques, commerciales et profils de demande et de récupération), en considérant ou non l'intégration du réseau inverse au réseau direct. Au besoin, le type approprié de véhicules et la configuration requise par les classes ou les familles de produits considérées sera à déterminer (Graham, 2001).

La planification des activités de collecte consiste à déterminer le moment de visite des points de collecte et les routes empruntées par chaque véhicule, d'après la condition du réseau (volume de retour, capacité des sites et des véhicules, etc.). La planification peut être réalisée de sorte à minimiser les délais ou les distances parcourues sur chaque route ou encore à minimiser le nombre de véhicules utilisés. La planification peut nécessiter la division des zones de collecte en secteurs et, pour chaque secteur, la répartition de la cédule périodique de collecte entre plusieurs véhicules. On évaluera au besoin les gains amenés par la prise en charge conjointe de plusieurs classes ou familles de produits et par l'intégration de la collecte aux livraisons, en respectant au besoin les contraintes de précedence. Au niveau opérationnel, les routes de véhicules seront établies sur la base des volumes de retour rencontrés. Au besoin, le format des véhicules et la manière d'intégrer la collecte aux livraisons seront abordés.

#### LIVRAISON

La livraison réfère au transport des produits entre les unités d'affaires en vue de la (re)distribution des produits aux utilisateurs finaux. La redistribution associée à la logistique inversée diffère peu de la distribution rencontrée dans les chaînes d'approvisionnement.

Tout comme pour la collecte, les centres de (re)distribution sont à localiser, soit lors de la configuration du réseau ou de la définition de la couverture du territoire par les centres de (re)distribution (section 1.4.5.1). Des classes ou des familles de produits distinctes peuvent aussi être envisagées. La livraison peut faire intervenir autant des produits neufs que valorisés. Elle peut même être intégrée à la collecte. La planification et l'ordonnancement des livraisons

dans une boucle d'approvisionnement s'effectueront de manière similaire à la chaîne d'approvisionnement.

#### 1.4.5.2 Stocks

Les stocks conservés dans le réseau ont pour objectif de pallier aux incertitudes face aux approvisionnements, tant en ce qui a trait aux délais, aux volumes de demande et de récupération et à la fiabilité des approvisionnements.

On distingue généralement trois types de stocks : produits récupérés, produits valorisés et produits neufs. Deux autres types de stocks peuvent également être distingués : produits triés et dédiés à une alternative de traitement et produits en circulation. Le quatrième type de stocks représente les produits récupérés dont l'état les dédie à une alternative de traitement donnée. Ces produits pourraient ultérieurement être orientés vers une alternative de traitement inférieure (possibilité de récupération de valeur inférieure), suivant la condition du réseau (volume de récupération et de demande, niveau des stocks et capacités des sites). L'état des stocks de produits en circulation pourrait être exploité afin d'anticiper ou même d'enclencher au besoin les retours de produits, lorsque certaines conditions auront été atteintes (ex. : fin de contrat de location). Chaque type de stocks représente donc un potentiel de récupération de valeur, mais pour lesquels un compromis sera à faire suivant les coûts engendrés, notamment de stockage, les niveaux de service atteignables et les possibilités de récupération de valeur.

Les coûts de stockage des produits introduits dans le réseau inverse dépendent des investissements faits depuis la récupération et des coûts de perte d'opportunités (Teunter *et al.*, 2000). Ces investissements varieront notamment suivant l'ampleur des coûts d'acquisition et de traitement des produits, par le remplacement de composants par des équivalents à l'état neuf et/ou valorisé. Les coûts de stockage influenceront notamment l'analyse comparative des coûts face au traitement, à l'entreposage, au transport, à la production et à l'approvisionnement lors des différentes prises de décision.

La localisation des stocks sera déterminée lors de la conception du réseau et de l'aménagement des installations. En fait, des espaces d'entreposage seront mis à la disposition et la manière de configurer ces espaces sera régulièrement revue suivant le roulement des stocks. Différentes classes de produits pourront être à définir d'après l'importance des stocks à l'égard du bon

fonctionnement du réseau. Différentes politiques de contrôle des stocks seront retenues pour chacune des classes (Silver et Peterson, 1985).

Suivant les politiques de gestion des stocks considérées, les actions dans le réseau (récupération, traitement, transport, production et approvisionnement) seront entreprises à intervalle régulier, lorsque le volume de produits stockés aura atteint un certain niveau ou suite à une demande de l'un des clients du réseau (une unité d'affaire du réseau ou l'utilisateur final). Les actions dans le réseau inverse se prendront suivant les niveaux des stocks de produits récupérés et présentant un potentiel de valorisation, de produits valorisés et de produits équivalents cumulés suite aux activités régulières d'une chaîne d'approvisionnement. Ils peuvent s'appuyer à la fois de bornes supérieures et inférieures sur les niveaux des stocks, suivant une politique de disposition propre en mode de flux poussés ou de flux tirés (van der Laan *et al.*, 2003; van der Laan et Salomon, 1997).

La planification consistera à déterminer la fréquence de révision de l'état des stocks, les moments de réapprovisionnement et les quantités nécessaires au réapprovisionnement (Dekker, 2003; van der Laan *et al.*, 2003; Fleischmann, 2001; Minner, 2001). On examinera également les possibilités de regrouper les réapprovisionnements en des tailles de lots économiques (Minner et Lindner, 2003). Les décisions se feront notamment de sorte à minimiser les coûts fixes (coûts de commande, coûts de mise en route de production/traitement des produits et coûts de transport/manutention) et variables de réapprovisionnement ainsi que les coûts de stockage, qui incluent les coûts de pertes d'opportunité liés au capital investi. L'ordonnancement des activités s'effectuera finalement suivant la condition du réseau.

#### **1.4.5.3 Volumes de demande et de récupération**

Les flux de matériels dans le réseau sont initiés par des volumes estimés ou rencontrés de demande et de récupération. Les prévisions alimenteront les décisions stratégiques et tactiques, alors que les volumes rencontrés au jour le jour appuieront les décisions opérationnelles. La qualité des prévisions dictera la qualité des décisions.

La demande peut provenir de clients actuels ou de nouveaux clients. Elle peut se présenter suite à une nouvelle acquisition ou à un remplacement (échange ou maintenance). Pour



certaines situations, des produits valorisés pourront être utilisés en alternative aux produits neufs. La substitution peut être envisagée entre des produits de générations différentes. Pour d'autres, seules des produits neufs ou valorisés peuvent être envisagés. La récupération peut survenir suite à un retour volontaire (remplacement, inutilisation du produit, fin de cycle de vie) ou à des démarches entreprises par l'organisation pour récupérer les produits auprès des utilisateurs (inutilisation du produit, fin de cycle de vie et condition de retour atteinte, tel la fin de contrat de location). Les produits peuvent être récupérés dans différents états.

Les volumes de récupération et de demande peuvent ainsi être dépendants ou indépendants. Des produits et même des clients différents peuvent être impliqués au niveau de la demande et de la récupération. Des conditions différentes d'approvisionnement (quantité, qualité, coûts, délais) nécessiteront toutefois une distinction des clients (ex. : zone de demande et zone de récupération), des produits (familles ou classes de produits et états) et même des activités impliquées dans le réseau (ex. : demande suite à un remplacement, récupération suite à des démarches entreprises par l'organisation).

Différentes approches de prévisions s'offrent aux chercheurs et aux gestionnaires. Pour des prévisions à long terme, on souhaitera obtenir un portrait global des besoins manifestés au réseau, tant à l'égard de la demande que de la récupération, sur la base de données historiques portant sur le fonctionnement du réseau. Des modèles simples, basés notamment sur les séries temporelles ou chronologiques, sont souvent indiqués (Makridakis *et al.*, 1998). Puisque les clients et les produits de l'organisation risquent d'évoluer, ce qui influencera les besoins manifestés au réseau, il peut être pertinent de considérer le statut de la population des marchés ciblés par l'organisation ainsi que le statut des produits en circulation. À plus court terme, tel pour la planification des activités, il peut être pertinent d'exploiter la dynamique entre les volumes de demande et de récupération (Toktay *et al.*, 2004; Toktay, 2003; Kelle et Silver, 1989). Les prévisions pourront se faire en distinguant la demande pour des produits neufs et valorisés. En ce qui a trait à la récupération, il peut être pertinent de distinguer différents états pour lesquels une ou plusieurs alternatives de traitement seraient préconisées.

**Tableau 1 : Décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles à l'égard de la conception et du pilotage d'une boucle d'approvisionnement.**

NIVEAU STRATEGIQUE	SERVICE APRES-VENTE	RECUPERATION	TRAITEMENT	(RE)DISTRIBUTION	FLUX DE MATERIELS ET STOCKS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des marchés cibles → localisation, caractérisation et détermination des besoins et attentes des utilisateurs finaux :</li> <li>- Caractéristiques des produits et des services offerts.</li> </ul>				
		<p>Conception de la boucle d'approvisionnement → choix des unités d'affaires et définition des activités réalisées par chacune des unités :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Boucle ouverte ou fermée;</li> <li>- Externalisation partielle ou complète des activités;</li> <li>- Réseau de logistique inversée dédié ou intégré à la chaîne d'approvisionnement;</li> <li>- Ressources partagées ou non avec celles de la chaîne d'approvisionnement;</li> <li>- Réseau centralisé ou décentralisé;</li> <li>- Activités réalisées au sein d'une même installation ou réparties entre plusieurs;</li> <li>- Modes (camion, train, etc.) et des moyens de transport (flotte privée ou prestataire de services logistiques);</li> <li>- Sélection et localisation des sites;</li> <li>- Mission des sites.</li> </ul>			
		<p>Conception des processus → intégration des flux de matières, d'information et de capital :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tâches à réaliser;</li> <li>- Ressources spécialisées ou non, flexibles ou non;</li> <li>- Ressources partagées ou non avec celles de la chaîne d'approvisionnement;</li> <li>- Aménagement des installations;</li> <li>- Support d'information et outil d'aide à la décision;</li> <li>- Indicateur de performance.</li> </ul>			
		<p>Conception des produits → choix des matériels et des technologies constitutives ainsi que des procédés de transformation des produits (production, maintenance, valorisation et disposition propre) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conception en vue des activités de transformation, de l'utilisation et de la réduction des impacts environnementaux (Conception pour X).</li> </ul>			

	SERVICE APRES-VENTE	RECUPERATION	TRAITEMENT	(RE)DISTRIBUTION	FLUX DE MATERIELS ET STOCKS
NIVEAU STRATEGIQUE	<p>Définition des politiques d'entretien des produits:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenabilité;</li> <li>- Fiabilité;</li> <li>- Garantie;</li> <li>- Stratégie de maintenance (préventive, corrective, opportuniste);</li> <li>- Stratégie de remplacement (par des produits neufs ou valorisés).</li> </ul>	<p>Définition des politiques de retour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Classes ou familles de produits récupérées;</li> <li>- Niveau de service;</li> <li>- Conditions d'autorisation des retours;</li> <li>- Coût de (ré)acquisition (montant crédité ou remboursé);</li> <li>- Moyens de récupération (sites et moyens de transport);</li> <li>- Zones de collecte;</li> <li>- Collecte intégrée ou séparée de la (re)distribution.</li> </ul>	<p>Définition des politiques de traitement des produits :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Séquence de désassemblage et de (ré)assemblage;</li> <li>- Procédure de désassemblage et de (ré)assemblage;</li> <li>- Coûts et bénéfices des alternatives de traitement (produits finis, modules, composants et matières);</li> <li>- Alternatives de traitement hiérarchisées d'après les possibilités de récupération de valeur;</li> <li>- Nomenclatures et familles de produits;</li> <li>- Stratégie d'orientation des produits (récupération de valeur maximal ou optimisation des coûts / bénéfices);</li> <li>- Standards de qualité.</li> </ul>	<p>Définition des politiques de (re)distribution :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Classes ou des familles de produits (re)distribués;</li> <li>- Niveau de service;</li> <li>- Stratégie de pilotage (push-pull);</li> <li>- Prix des produits ;</li> <li>- Moyens de (re)distribution (sites et moyens de transport);</li> <li>- Zones de demande;</li> <li>- Intégration ou séparation de la redistribution à la distribution.</li> </ul>	<p>Définition des politiques de gestion des stocks :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Classe de produits suivant la rigueur de contrôle des stocks;</li> <li>- Contrôle continu ou périodique du niveau des stocks;</li> <li>- Coûts de stockage.</li> </ul>
NIVEAU TACTIQUE	<p>Planification de la maintenance:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment de la maintenance;</li> <li>- Réserve des capacités de réparation;</li> <li>- Ressources (humaines et matérielles).</li> </ul>	<p>Planification de la collecte :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment de collecte;</li> <li>- Réservations des capacités de collecte;</li> <li>- Routes des véhicules;</li> <li>- Nombre de véhicules;</li> <li>- Division des zones de collecte en secteurs et répartition des cédules périodique de collecte entre différents véhicules.</li> </ul>	<p>Planification du désassemblage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment du désassemblage;</li> <li>- Réserve des capacités de traitement</li> <li>- Ressources (humaines et matérielles).</li> </ul>	<p>Planification de la redistribution :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment des livraisons;</li> <li>- Réserve des capacités de (re)distribution;</li> <li>- Route des véhicules;</li> <li>- Nombre de véhicules;</li> <li>- Division des zones de demande en secteurs et répartition des cédules périodique de (re)distribution entre différents véhicules.</li> </ul>	<p>Planification des approvisionnements :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moment de commande;</li> <li>- Quantité à commander;</li> <li>- Taille des lots;</li> <li>- Paramètre de contrôle des stocks (point de commande, niveau maximal des stocks, stock de sécurité).</li> </ul>
NIVEAU OPERATIONNEL	<p>Ordonnancement des activités de maintenance.</p> <p>Diagnostic des pannes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Liste des points à vérifier.</li> </ul>	<p>Ordonnancement du désassemblage et du (ré)assemblage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveau de désassemblage et de (ré)assemblage.</li> </ul> <p>Ordonnancement du traitement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise à jour, mise à niveau, réparation, reconditionnement, nettoyage, remballage.</li> </ul>	<p>Ordonnancement des routes de véhicules.</p> <p>Sélection des véhicules.</p> <p>Intégration de la collecte aux livraisons.</p>	<p>Définition des routes de véhicules.</p> <p>Sélection des véhicules.</p> <p>Intégration de la collecte aux livraisons.</p>	<p>Lancement des réapprovisionnements.</p>

## 1.5 Notions de conception de réseaux logistiques

La conception de réseau logistique consiste à déterminer le type, le nombre et la localisation des sites de même que leurs relations d'affaires. Différentes approches peuvent être envisagées pour la résolution de tels problèmes :

- Modèle de programmation déterministe;
- Modèle de programmation stochastique;
- Modèle de simulation.

Un modèle de programmation mathématique, qu'il soit déterministe ou stochastique, est un outil d'optimisation. Il propose la configuration de réseau logistique adaptée au contexte de fonctionnement d'une organisation sur l'horizon de planification considéré, soit suivant les besoins à rencontrer, les capacités utilisées et les coûts ou les revenus qu'il peut engendrer. Quant à lui, un modèle de simulation est un outil qui, par itérations successives, permet d'identifier et d'évaluer des stratégies qui amélioreront les inefficacités rencontrées dans un réseau donné. Seuls les concepts fondamentaux axés sur les modèles de programmation mathématique sont abordés dans les sections qui suivent.

### 1.5.1 Modèle de programmation mathématique

Les décisions abordées par les modèles de programmation mathématique à l'égard de la conception de réseau logistique réfèrent généralement à la localisation et l'allocation.

#### 1.5.1.1 Décisions de localisation

Par les décisions de **localisation**, on entend habituellement la sélection des sites les plus appropriés, parmi des ensembles de sites potentiels préalablement définis (ex. : ensemble de sites de production, ensemble de sites d'entreposage, etc.), pour satisfaire les besoins du réseau. Ce choix se fait par l'intermédiaire de variables binaires (0/1) associées à chaque site potentiel. Le nombre d'ensemble de sites potentiels permet d'identifier s'il s'agit d'un réseau à **simple** ou à **multi échelons**.

Certains problèmes de localisation pure sont proposés dans la littérature. Owen et Daskin (1998) les regroupent sous trois grandes catégories :

- Problème médian (« *P-median problem* ») : localiser P sites de sorte à minimiser les distances, pondérées de la demande, entre les zones de demande et les sites à localiser;
- Problème de couverture (« *Covering problem* ») :
  - Localisation des sites de couverture (« *Location set covering problem* ») : localiser les sites de sorte à minimiser les coûts de localisation tout en rencontrant un niveau de service donné, exprimé par la distance maximal de service à couvrir;
  - Maximisation de la couverture (« *Maximal covering problem* ») : localiser les sites de sorte à maximiser la quantité de demande couverte;
- Problème du centre (« *Centre problem* ») : localiser les sites de sorte à minimiser la distance de couverture entre les zones de demande et les sites.

Les décisions de localisation peuvent également porter sur le choix des ressources (ressources humaines et équipements) utilisées dans le réseau, notamment en ce qui a trait à la production et à la distribution (Martel, 2005; Paquet *et al.*, 2004; Li et Tirupati, 1994; Verter et Dincer, 1992).

### 1.5.1.2 Décisions d'allocation

Pour sa part, l'**allocation** consiste à affecter les activités associées aux sites et aux ressources dans un réseau. Ces décisions permettent notamment de déterminer par quel(s) site(s) ou quelle(s) ressource(s) un produit spécifique sera produit ou distribué.

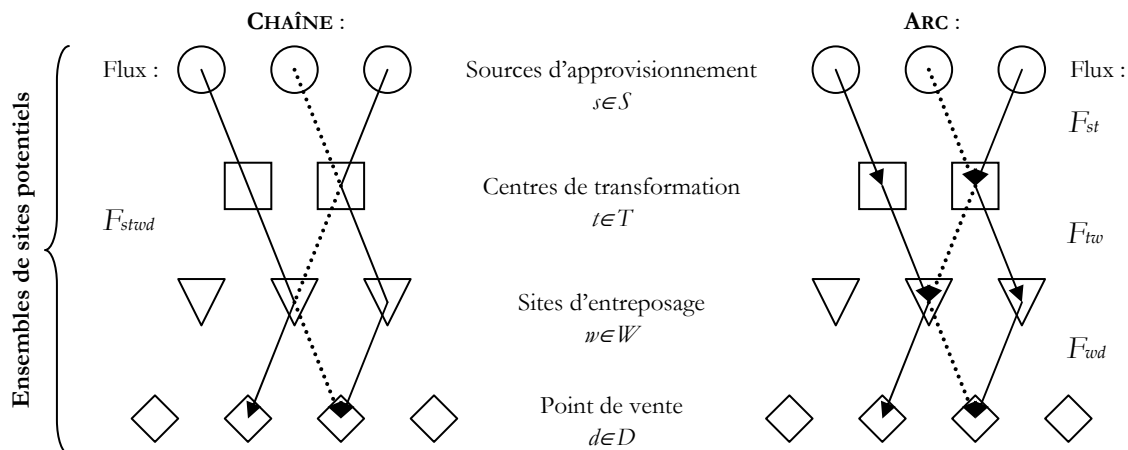
## 1.5.2 Formulation du modèle

### 1.5.2.1 Modélisation des flux

Pour représenter les flux au sein d'un réseau logistique, deux approches (**Figure 5**) peuvent être abordées, soit une formulation basée sur les (Martel, 2004) :

- **Chaînes** : Une variable de décision est associée aux flux sur un chemin donné du réseau pour satisfaire les besoins d'un nœud terminal depuis la source d'approvisionnement, reliant ainsi les différents nœuds rencontrés sur ce chemin (ex : un fournisseur, un manufacturier, un entrepôt et un point de vente).

- **Arcs** : Une variable de décision est assignée aux flux entre deux nœuds du réseau ou au sein d'un même nœud pour satisfaire les différents besoins du réseau (ex. : approvisionnement en matières premières, satisfaction des besoins au niveau d'un point de vente).



**Figure 5** : Modélisation des flux de matériel au sein d'un réseau logistique.

L'avantage de la première approche est qu'il est possible de retracer le cheminement d'un produit dans le réseau, depuis la source d'approvisionnement jusqu'au point de vente par exemple. Cette approche simplifie le calcul des coûts tout au long de la chaîne empruntée. Effectivement, il est alors possible de tenir compte plus facilement et adéquatement de la valeur ajoutée au niveau de chaque nœud du réseau, notamment d'après la valeur unitaire des produits et des coûts de transport dans le calcul des coûts d'entreposage.

Cette formulation exige cependant la considération d'un ensemble donné de produits, incluant notamment les matières premières, les composants constitutifs et les produits finis. Cet ensemble transite dans une chaîne et subit une manipulation donnée au sein des nœuds impliqués. Les changements possibles des activités de transformation ou de l'état des produits au sein de chaque nœud doivent se faire par une énumération de chaînes. Cette approche peut être un exercice laborieux pour les réseaux manufacturiers plus complexes, faisant intervenir plusieurs sources d'approvisionnement et différentes sources de demande. La formulation basée sur les arcs permet de représenter plus simplement l'entrée et la sortie de produits différents au sein des nœuds. Il n'est cependant possible que de retracer l'origine et la destination des produits sur les arcs seulement, ce qui complexifie le calcul de la valeur ajoutée tout au long d'un réseau.

### 1.5.2.2 Modélisation des produits et des processus de transformation de forme

Les flux sur les chaînes ou les arcs seront distingués pour des produits ou des familles de produits pour représenter la réponse à des besoins variés dans un réseau. On aura recours à cette approche lorsque les flux pour ces produits ou familles de produits présentent des conditions différentes de coûts, de capacité et de niveaux de service (Martel, 2004). Il en résultera alors un modèle à **multi commodités**.

La taille des problèmes est habituellement réduite par la définition de familles de produits (Shapiro, 2001; Ballou, 1998). Le regroupement peut se faire notamment en s'appuyant d'une classification ABC (Ramanathan, 2006; Flores *et al.*, 1992; Ernst et Cohen, 1990). Les produits regroupés en une famille doivent répondre à des besoins communs, comparables ou complémentaires et engendrés des coûts similaires tout au long du réseau. Ils doivent emprunter les mêmes cheminements potentiels dans le réseau et être soumis à des processus logistiques similaires (transport, production, manutention, entreposage). Dans un contexte de réseaux manufacturiers, des familles de matières premières, de composants, de modules d'assemblage et de produits finis seront définies. Elles représenteront les besoins pouvant provenir autant des utilisateurs finaux que des sites du réseau.

La transformation de forme des familles de produits est habituellement abordée par la **nomenclature de produit** ou par un **graphe d'activités**. Les deux approches présentent d'une certaine manière la quantité relative de familles de produits impliquées lors des étapes de production par un graphe acyclique orienté (**Figure 6**). La première est particulièrement appliquée aux industries de production discrète (Martel, 2005; Paquet *et al.*, 2004; Arntzen *et al.*, 1995), alors que la seconde est spécialement appliquée aux industries de production continue (Vila, 2006; Vila *et al.*, 2006; Vila *et al.*, 2005; Philpott et Everett, 2001; Dogan et Goetschalckx, 1999). Par une approche de graphe d'activités, un ensemble de recettes associées aux activités décrivent comment les intrants sont transformés en extrants par l'utilisation de différentes ressources. Une telle approche peut être pertinente pour les industries de production discrète, lorsque plusieurs types de produits peuvent être obtenus de la réalisation d'une recette (Lakhal *et al.*, 2001; 1999), suite à des procédés divergents plutôt que convergents tel qu'abordé dans une approche par nomenclature. La **Figure 6** présente la modélisation des processus de transformation des produits sous ces deux approches.

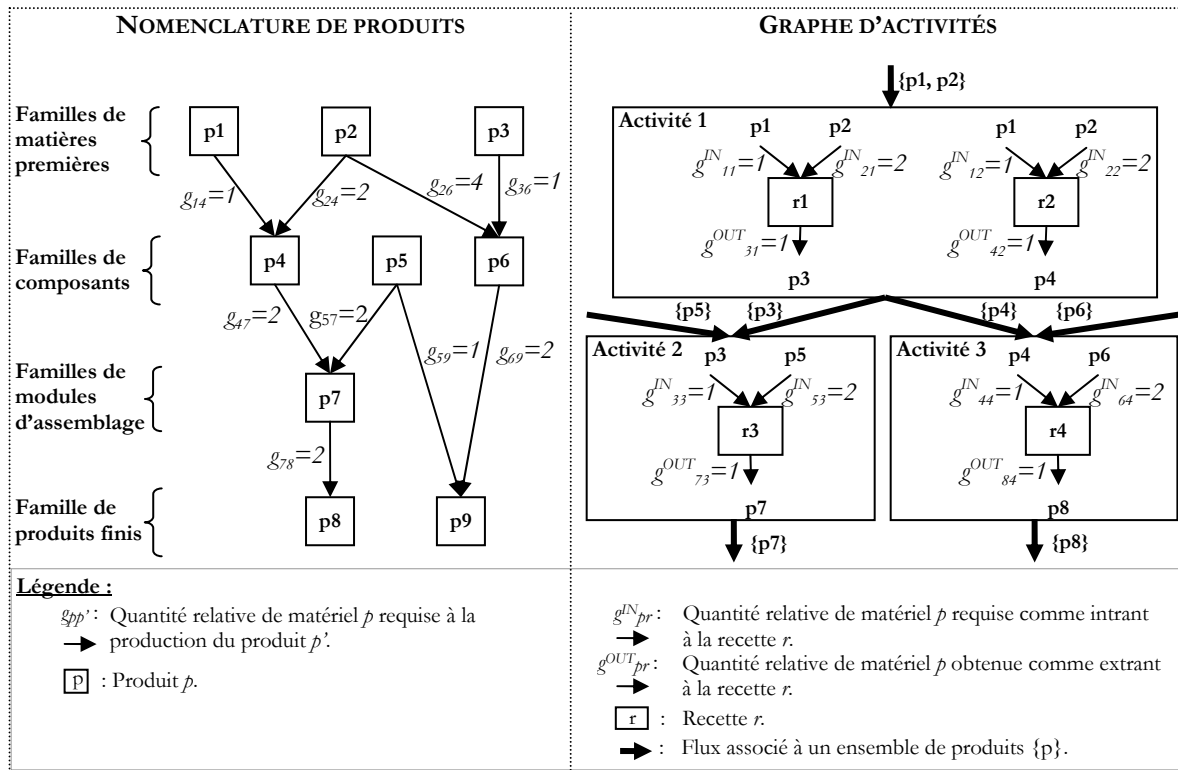


Figure 6 : Nomenclature de produits et graphe d'activités.

### 1.5.2.3 Modélisation des coûts ou des profits

D'une manière générale, les modèles de programmation mathématique répondent à une fonction objectif, exprimée en des termes économiques, sujette notamment à des contraintes de capacités et de satisfaction des besoins dans le réseau.

Dans un contexte de réseau domestique (local), sans décision sur les opportunités de vente d'un réseau, c'est la **minimisation** des coûts qui sera considérée (Paquet *et al.*, 2004; Mazzola et Schantz, 1997; Pirkul et Jayaraman, 1996; Li et Tirupati, 1994; Shuman, 1991; Cohen et Moon, 1991). En ce qui a trait à la chaîne d'approvisionnement, la formulation générique des problèmes peut se présenter comme suit :

**Minimiser :** Coûts fixes des sites et des ressources + Coûts de transformation des matières en produits finis + Coûts d'immobilisation des stocks + Coûts des flux dans le réseau

**Sujet à :** Contraintes de demande  
 Contraintes d'approvisionnement  
 Contraintes sur les capacités de transport



Contraintes sur les capacités de production  
 Contraintes sur les capacités d'entreposage  
 Contraintes d'équilibre de flux aux sites  
 Contraintes sur le nombre de sites  
 ...

Pour sa part, la **maximisation** des profits est abordée lorsque les revenus générés dans un réseau varient avec le profil de demande (Vila *et al.*, 2007; Vila, 2006; Martel, 2005), alors que le profil de demande est supposé connu pour une formulation axée sur la minimisation des coûts. Le profil de demande peut notamment varier avec le délai de livraison et le prix des produits offerts. Les revenus peuvent aussi varier en tenant compte de l'environnement économique globale de l'organisation (Martel, 2005; Mohamed et Zubair, 2004), tel que les taux de change, les droits douaniers et la fiscalité.

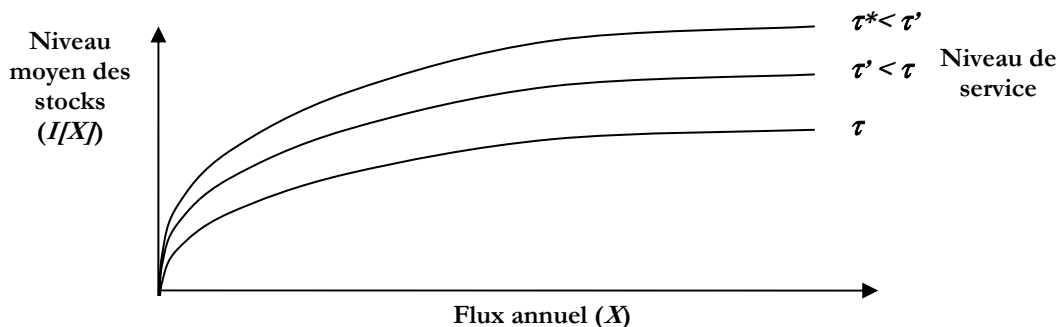
Les sites et les choix technologiques considérés peuvent entraîner des économies d'échelle et d'envergure dans un réseau, notamment en ce qui a trait aux coûts d'entreposage et de transport. La représentation de ces économies entraîne une **formulation non-linéaire**.

Les économies d'échelle lors de la conception de réseaux logistiques sont bien souvent modélisées par une fonction exponentielle du type (Martel, 2005; Ballou, 1998) :

$$c(q) = \nu q^b$$

où  $\nu$  est un coût de base et où l'exposant  $b$  reflète l'ampleur des économies d'échelle suivant une quantité  $q$ . Ces paramètres sont généralement estimés par régression à partir des données collectées par l'organisation à l'égard des sites ou choix technologiques considérés ou estimés par simulation, à l'égard des changements dans les façons de faire anticipés par une organisation. Différentes approches sont proposées dans la littérature pour aborder les économies d'échelle et d'envergure, ou tout simplement pour traiter la non-linéarité des coûts. Elles peuvent être abordées par le biais des choix technologiques (Martel, 2005; Paquet *et al.*, 2004; Vila, 2006; Vila *et al.*, 2007, 2006, 2005), l'approximation linéaire par partie ou encore la linéarisation successive (Martel, 2005; Martel et Vankadadri, 1999; Fleischmann, 1993; Cohen et Moon, 1991). La complexité de résolution des problèmes se trouve toutefois accrue.

En plus des économies d'échelle, les coûts logistiques peuvent également varier avec le niveau de service offert (Martel, 2005), particulièrement en ce qui a trait aux coûts d'entreposage (**Figure 7**). Le niveau de service dépend notamment de la proximité des clients du réseau et de la capacité d'entreposage des sites envisagés. Plus le délai d'approvisionnement est long pour un entrepôt, plus le niveau de stocks (de sécurité) à conserver devra être élevé pour satisfaire efficacement aux besoins des clients.



**Figure 7 :** Relation entre le flux annuel et le niveau moyen des stocks dans l'entrepôt en fonction du niveau de service.

Il est à noter cependant qu'une telle relation ne donne aucune indication sur la capacité d'entreposage à utiliser pour satisfaire la demande. Une relation additionnelle doit alors être établie afin de relier le niveau moyen de stock conservé sur la période d'horizon considérée à la quantité maximale de produits pouvant être contenue dans l'entrepôt (Martel, 2005). En pratique, un facteur d'amplification déterminé à partir des données historiques d'une organisation sur les stocks dans ses installations est utilisé. Une relation simplifiée est couramment utilisée en s'appuyant de la règle dictant que pour une commande de quantité  $Q$ , un stock cyclique moyen de  $Q/2$  est conservé. Ainsi, la capacité estimée de l'entrepôt sera de  $2I[X]$ .

On suppose généralement que le niveau de service est connu et fixé lors de la résolution des modèles de programmation mathématique. De plus, les problèmes sont bien souvent ramenés à une **formulation linéaire** en représentant les coûts du réseau par des composants fixes et variables. Les premiers réfèrent aux décisions de localisation et les seconds aux décisions d'allocation, variant avec les flux de matériels.

#### 1.5.2.4 Modélisation des périodes d'horizon

On distingue généralement deux types de problème suivant le nombre de périodes d'horizon considérées. Un modèle **statique** ne couvre qu'une seule période de planification, tandis qu'un modèle **dynamique** tiendra compte des interactions au sein du système sur plusieurs périodes d'un horizon de planification. Un modèle dynamique permet d'analyser l'impact que peut avoir une décision prise à un certain moment, à l'égard du réseau logistique, vis-à-vis l'évolution du contexte concurrentiel d'une organisation. Le réseau logistique est développé de sorte à prendre certaines décisions stratégiques, à des moments opportuns, tout en cherchant à optimiser la solution sur tout l'horizon considéré. On cherchera à éviter des changements trop fréquents à la configuration du réseau pour faire face adéquatement aux besoins futurs. Cette approche est particulièrement pertinente lorsque les coûts et le profil de demande varient au fil du temps. Martel (2005) distingue deux catégories de modèles dynamiques, soit les **modèles multi périodes** (Zubair et Mohamed, 2004; Li et Tirupati, 1994; Shulman, 1991) et les **modèles multi saisons** (Martel, 2005; Dogan et Goetschalcks, 1999; Arntzen *et al.*, 1995). Bien qu'une description dynamique du problème représente une approche plus élégante et adéquate de modélisation, elle augmente toutefois la taille des problèmes et la complexité de résolution. Dans certains cas, les modèles statiques sont résolus séquentiellement pour évaluer la configuration du réseau logistique sur plusieurs périodes d'un horizon donné et ainsi mieux comprendre le comportement du système à long terme.

#### 1.5.2.5 Modélisation de la demande

Les besoins manifestés à un réseau, initiant les flux dans un modèle de programmation mathématique, sont représentés par la demande des utilisateurs finaux. Les volumes de demande pour des périodes d'horizon futures s'estiment généralement par des méthodes de prévisions. Pour des prévisions à long terme, tel lors de la conception de réseau logistique, les méthodes basées sur les séries temporelles sont généralement indiquées (Makridakis *et al.*, 1998). Les volumes de demande sont estimés au niveau des points de vente, particulièrement pour les contextes où les utilisateurs finaux ont à se déplacer pour procéder à l'acquisition des produits. Ils sont estimés au niveau de zones géographiques restreintes d'utilisateurs finaux (Ballou, 1998, 1994) lorsqu'une organisation offre le service de livraison auprès des utilisateurs finaux ou que des besoins spécifiques se manifestent à l'égard des produits. Des **zones de demande** sont ainsi distinguées.

Les zones de demande peuvent servir à aborder conjointement ou non les décisions de localisation de points de vente et d'assignation des zones à ces points (section 1.5.1.1), notamment afin de capturer les opportunités de vente (Vila, 2006; Vila *et al.*, 2007, 2006, 2005), pour procéder à une évaluation des niveaux de service atteignables, à l'estimation des coûts de transport (Martel, 2005) et même à la sélection des moyens de transport. Ces décisions peuvent être soumises à des contraintes sur les temps de réponse admissibles, pour éliminer les chaînes ou les arcs (section 1.5.2.1) qui ne répondent pas aux critères imposés, et même sur l'assignation d'un point de vente unique pour chaque zone (Geoffrion et Graves, 1974). L'intégration de ces décisions de localisation et d'assignation aux décisions de conception d'un réseau logistique aboutit toutefois à des problèmes complexes, pouvant difficilement être résolus de façon exacte.

Les zones de demande sont habituellement définies préalablement à la conception d'un réseau par le recours aux méthodes de clustérisation (Geoffrion, 1976). Ces méthodes s'appuient sur la comparaison des coordonnées de latitude et longitude des utilisateurs finaux (Ballou, 1998, 1994). Les distances séparant chaque utilisateur ou encore la distance séparant les utilisateurs des points de vente considérés sont également utilisées comme facteur de comparaison. Les coordonnées et les distances sont déterminées par des systèmes d'information géographique à l'aide des codes postaux. Un premier regroupement des utilisateurs finaux est généralement effectué par l'utilisation de codes postaux tronqués, en considérant notamment les trois premiers caractères seulement. La distance séparant les utilisateurs finaux des points de vente est abordée lorsque la localisation des points de vente est supposée connue et fixée a priori.

Les volumes de demande d'un réseau sont habituellement supposés connus et fixés avant la résolution d'un modèle de programmation mathématique. Certains modèles représentent la variation possible de ces volumes par la définition de scénarios de demande (Tsiakis *et al.*, 2001; MirHassani *et al.*, 2000; Laporte *et al.*, 1994). Il en résulte alors un modèle stochastique.

#### 1.5.2.6 Modélisation des facteurs aléatoires

Un **modèle stochastique** se différencie d'un **modèle déterministe** par sa capacité à influencer les décisions prises face à la manifestation de facteurs aléatoires. La résolution d'un modèle déterministe s'appuie sur des paramètres supposés connus et fixés a priori, alors que ces paramètres peuvent être des variables aléatoires dans un modèle stochastique. Parmi les

facteurs aléatoires considérés dans la littérature, notons la demande, la fiabilité des fournisseurs, les délais d'approvisionnement et de transport, la valeur des produits, etc. (Goetschalcks *et al.*, 2002; Vidal et Goetschalcks, 1997).

Les effets de la variation d'un paramètre sur la valeur donnée par la fonction objectif d'un modèle peuvent être étudiés par analyse de sensibilité (Saltelli *et al.*, 2004). Aucun changement n'est toutefois porté aux décisions du modèle.

Les modèles stochastiques permettent d'intégrer divers facteurs aléatoires aux prises de décisions d'un modèle. Cette approche permet d'établir des configurations robustes face aux variations possibles du contexte concurrentiel d'une organisation. Les modèles stochastiques avec recours sont les plus couramment utilisés pour la conception de réseau logistique, particulièrement les modèles avec recours à deux étapes (Louveaux et Schultz, 2003; Birge et Louveaux, 1997).

#### MODÈLES AVEC RECOURS À DEUX ÉTAPES

Les modèles avec recours à deux étapes réfèrent à deux ensembles de décisions. Les décisions associées au premier ensemble se prennent avant la manifestation de facteurs aléatoires dans le réseau. Elles réfèrent à la localisation des sites et le choix des ressources, tant humaines que matérielles. Les décisions du second ensemble de décisions caractérisent la réaction du réseau face à la manifestation des facteurs aléatoires. Il réfère à l'allocation des activités aux sites et aux ressources retenues. Ces décisions se prennent alors à l'égard de la réalisation de scénarios aléatoires donnés, caractérisés par une probabilité d'occurrence, en tenant compte des décisions prises à la première étape. L'objectif de résolution d'un tel problème est d'optimiser la somme des coûts fixes et des coûts ou des bénéfices espérés. Les coûts et les bénéfices espérés se présentent comme la somme, sur les différents scénarios, des coûts ou des bénéfices pondérés de la probabilité d'occurrence de chaque scénario.

Les probabilités d'occurrence de chaque scénario sont déterminées différemment suivant que les facteurs aléatoires sont considérés comme dépendants ou indépendants (Sen et Higgle, 1999) :

**Facteurs dépendants :** Les facteurs aléatoires sont sujets à une influence commune.

Des scénarios discrets, caractérisés par une probabilité d'occurrence, sont définis afin

de caractériser différents contextes de fonctionnement possible du réseau. Par exemple, un réseau logistique peut être reconfiguré suivant deux possibilités de part de marché. Le premier scénario peut prévoir une augmentation de la part de marché, alors que le second repose sur le maintien de la part de marché. Le résultat prendra compte des deux scénarios suivant leur importance estimée.

**Facteurs indépendants :** Aucun lien apparent ne relie les différents facteurs aléatoires d'un modèle. Une loi de distribution de probabilités décrira chaque facteur. Un scénario est généré pour une combinaison donnée de facteurs. La probabilité d'occurrence d'un scénario est décrite par le produit des probabilités obtenues à l'égard des valeurs considérées de chaque facteur aléatoire. La fonction économique doit évaluer toutes les combinaisons de valeurs possibles des facteurs aléatoires. Les combinaisons augmentent exponentiellement avec le nombre de facteurs aléatoires.

### 1.5.3 Résolution du modèle

Pour certains problèmes complexes, les méthodes classiques de résolution s'avèrent parfois inefficaces à trouver une solution exacte dans des temps de calcul raisonnables. On doit alors recourir à des algorithmes d'optimisation. Plusieurs méthodes peuvent être envisagées suivant la nature et la complexité des problèmes rencontrés.

La méthode la plus répandue est l'algorithme de séparation et d'évaluation (« *Branch and Bound* »). Il s'agit d'une méthode d'énumération implicite des solutions. Lors de l'étape de séparation (« *branching* »), les solutions du problème sont énumérées. Cette étape permet de diviser la région réalisable en sous-régions, pouvant à leur tour être divisées récursivement en d'autres sous-régions. Chaque sous-région possède un ensemble de solutions réalisables. Un arbre de solutions est ainsi construit, formant l'arbre de décision ou l'arbre de recherche. L'étape d'évaluation (« *bounding* ») intervient pour éviter l'énumération systématique de toutes les solutions. Les solutions trouvées sont utilisées dans la phase d'évaluation pour définir une borne supérieure et inférieure de la solution optimale. L'algorithme s'arrête généralement suivant une contrainte imposée sur le temps de calcul ou sur la précision de la solution. La plupart des outils commerciaux d'optimisation repose sur cette méthode de résolution.

D'autres méthodes s'appuient sur l'algorithme de séparation et d'évaluation, mais permettent de restreindre astucieusement l'espace des solutions par l'introduction de contraintes

supplémentaires au problème initial. Elles réfèrent généralement aux méthodes de décomposition (« *branch and cut* »). La plus connue d'entre elles est la décomposition de Benders (Paquet *et al.*, 2004; Dogan et Goetschalckx, 1999; Cohen et Moon, 1991; Geoffrion et Graves, 1974). Cette méthode repose sur la division d'un problème en un problème maître et en un ensemble de sous-problèmes. Des solutions sont successivement obtenues du problème maître et corrigées, au besoin, par les variables duales calculées des sous-problèmes pour ainsi ajouter une coupe d'optimalité au problème maître. L'algorithme s'arrête sur la base d'un critère d'arrêt sur les temps de calcul ou sur la précision de la solution. Dans un contexte stochastique, sont équivalent est désigné par la méthode de décomposition « *L-Shaped* » (« *L-Shaped decomposition method* ») (Santoso *et al.*, 2005; Laporte *et al.*, 1994; Van Slyke et Wets, 1969).

Certains problèmes peuvent être résolus efficacement par la relaxation lagrangienne (Pirkul et Jayaraman, 1996; Shulman, 1991). Cette méthode consiste à modifier le problème initial en introduisant certaines des contraintes à la fonction objectif. Ces contraintes, pondérées d'un multiplicateur de Lagrange, ajoutent une pénalité à la fonction objectif si elles ne sont pas satisfaites. La difficulté de cette méthode de résolution consiste à déterminer la valeur des multiplicateurs.

Les métaheuristiques sont abordées en dernier recours lorsque ces dernières méthodes de résolution se sont avérées vaines. Les métaheuristiques sont des algorithmes itératifs qui progressent vers un optimum par échantillonnage d'une fonction objectif. Dans un espace de recherche, une ou plusieurs solutions sont évaluées et comparées afin d'éliminer les solutions de mauvaise qualité et ainsi arriver vers une solution optimale approximée. Une borne inférieure et supérieure de la solution est calculée dans cette démarche. L'algorithme prend fin lorsqu'un critère d'arrêt est rencontré, soit en fonction du temps de calcul ou encore de la précision obtenue des bornes calculées. Parmi les métaheuristiques les plus connues, notons :

- Les algorithmes évolutionnaires, incluant les algorithmes génétiques (Syarif *et al.*, 2002) ;
- Le recuit simulé ;
- La recherche avec tabous (Mazzola et Schantz, 1997) ;
- Les algorithmes de colonies de fourmis ;
- Etc.

Des méthodes ont été proposées plus spécifiquement à l'égard de modèles stochastiques avec recours à deux étapes faisant intervenir des facteurs aléatoires indépendants. Il s'agit de la méthode d'approximation de la moyenne d'échantillonnages (*Sample Average Approximation – SAA*), basée sur les techniques d'échantillonnage de Monte Carlo (Santoso *et al.*, 2005). Cette méthode permet de contourner les difficultés d'évaluation des probabilités d'occurrence des scénarios. Des échantillons de scénarios sont définis hors de la procédure d'optimisation, suivant les fonctions de distribution considérées pour les facteurs aléatoires. Une ou des solutions sont d'abord obtenues d'échantillons faisant intervenir un nombre plus restreint de scénarios. La réaction des solutions face aux facteurs aléatoires est ensuite étudiée avec un échantillon de plus grande taille. Pour les deux étapes, la partie des coûts reliée aux décisions sujettes aux facteurs aléatoires se calcule par la moyenne des coûts pour chaque scénario. Cette méthode incorpore une procédure d'analyse de convergence. Une borne inférieure et borne supérieure est ainsi calculée à l'égard de la solution optimale du problème (Shapiro, 2003). Ces bornes servent à sélectionner la meilleure solution et évaluer la qualité du résultat.

## **1.6 Conclusion**

Le présent chapitre propose un cadre méthodologique pour la modélisation et la conception de boucle d'approvisionnement. Un survol des approches courantes de modélisations des activités spécifiques à la logistique inversée a d'abord été effectué. Les approches de différents niveaux décisionnels ont été présentées, tant du point de vue de la conception et de la gestion des produits, des processus et du réseau logistique, pour obtenir une meilleure compréhension de la modélisation des flux de matériels. Certaines spécificités des implications logistiques ont pu ainsi être identifiées. Les approches courantes de modélisation et de conception de réseau logistique ont ensuite été exposées. Elles serviront de base pour la proposition de méthodes et d'outils pour le contexte d'étude abordé, suivant la particularité des flux de matériels rencontrée.



## 2 Méthodologie de conception de boucle d'approvisionnement

L'article intitulé « *Design of reverse logistics networks for multi-products, multi-states, and multi-processing alternatives* » est présenté dans ce chapitre. Il a été accepté en avril 2006 pour publication dans le livre « *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies* ». Cet article a été proposé sous invitation des éditeurs du livre, soit de MM Hosang Jung, Frank Chen, de Virginia Tech (Virginie, États-Unis), et de M Bongju Jeong, de Yonsei University (Séoul, Corée du Sud). Les termes, les figures et la formulation mathématique ont été révisés pour assurer la cohérence tout au long de la thèse.

### 2.1 Résumé

Le premier article de la thèse propose une méthodologie générale de conception de boucles d'approvisionnement. Cet article positionne d'abord les approches courantes de modélisation de réseaux logistiques abordant la logistique inversée. Un tableau synthèse résume les caractéristiques des principaux modèles de programmation mathématique proposés dans la littérature pour la conception de tels réseaux. Le contexte abordé dans le cadre des présents travaux et les principales spécificités de modélisation qu'il soulève sont ensuite présentés. Ces spécificités portent sur : la localisation et la détermination des volumes de demande et de récupération; la définition des familles de produits et de leurs nomenclatures; la caractérisation des conditions de traitement et de l'état des produits récupérés. Ces spécificités sont conceptualisées et intégrées à un modèle de programmation mathématique déterministe.

## Design of reverse logistics networks for multi-product, multi-state, and multi-processing alternatives

*Marc Chouinard<sup>1,2</sup>, Sophie D'Amours<sup>1</sup>, Daoud Aït-Kadi<sup>1,2</sup>*

1. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada, G1K 7P4
2. Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et en intégration sociale (CIRRIS), Institut de réadaptation en déficience physique de Québec, 525 boul. Hamel, Québec, Québec, Canada, G1M 2S8

**Abstract.** This paper proposes a modeling methodology for designing reverse logistics networks. The model aims at determining the location and mission of sites as regards the recovery of unused products from end-users, valorisation or disposal of recovered products and (re)distribution of new or reusable (valorised) products. Valorisation activities refer to repair, refurbishing, remanufacturing and disassembling for reusable part recovery (cannibalization). The proportions of recovered products to direct to either valorisation or disposal are not known a priori, but are determined according to the demand and recovery volumes, site capacities and anticipated state of recovered products. This model may be used to evaluate the impact of reintegrating valorised products (finished products and parts) into current supply chains initially designed for distribution and maintenance of new products only. The paper discusses key parameters such as the location and estimation of the recovery and demand volumes for new and reusable (valorised) products, as well as the probability that a recovered product be in a specific state, which could lead to one or many processing alternatives (repair, disassembling, disposal, etc.). This mathematical model is inspired by a recent policy of wheelchair allocation and valorisation in the Province of Quebec (Canada), governed and managed by a governmental agency.

## 2.2 Introduction

Economical and environmental pressures to reduce consumption of non-renewable resources increase organisational responsibility regarding return or end of life of products. The Kyoto Protocol, recent directives on electronic wastes in Europe and significant recovery volumes in the electronic industry are some examples. Direct reuse, valorisation activities, which refer to repair, refurbishing, remanufacturing, product disassembling for reusable parts recovery and

recycling (Thierry *et al.*, 1995), and even disposal are being considered with increasing interest. For healthcare systems, product reuse is seen as an economical alternative in order to reduce continuously rising costs and to fulfil increasing demand while ensuring high service levels. A recent study concerning wheelchairs conducted by the *Régie de l'assurance maladie du Québec* (RAMQ) shows that the valorisation activities, realized autonomously by mandated rehabilitation centres, can improve accessibility to such devices while reducing expenditures (Côté *et al.*, 2003). Thus, the RAMQ and rehabilitation centres in the Province of Quebec (Canada) are now interested in reviewing the actual configuration of their logistics network, which was initially designed only for the allocation of new products and maintenance. The RAMQ is also involved in the evaluation of impacts of such a configuration on logistics costs and service levels. New modeling approaches to support the design of logistics networks must be investigated in order to consider the recovery of unused products from end-users and the use of valorised products (finished products and parts) instead of new. A generalized approach is proposed in this paper.

Strategic decisions concerning design of reverse logistics networks concern recovery, processing and redistribution. Sites must be located. All logistics activities need to be assigned to suitable sites, while respecting capacity and ensuring effective and efficient response to network needs. Costs and service levels obtained depend on the choices made.

Proportion of products to be directed toward processing alternatives can influence a network configuration with business units being dedicated to specific processing alternatives and even to one or several products. Products may be used to meet network needs in a variety of ways: they can be repaired, refurbished or reassembled for finished product supply, or disassembled for parts supply. If preferable, products can even be disposed. The product state, demand and return volumes into the network, site capacities and operating costs all determine how product flows will be processed and whether processed products will be used to respond partly or completely to network needs. *The objective of this paper is to suggest a methodology for designing logistics networks, while evaluating the strategic proportion of product flows to direct toward each of these alternatives in an efficient and effective way to meet network needs.*

This paper presents various models suggested to design specific reverse logistics networks. In light of these models, a logistics network reengineering process is suggested to represent

network flows in a multi-product, multi-state and multi-processing alternatives context. It deals with the design of reverse networks, while considering current supply chain networks, to efficiently supply processed products as alternatives to new. To complete it and to widen horizons, new parameter definition approaches and a mathematical model are proposed.

## **2.3 Related reverse logistics design models**

Several models for the design of reverse logistics networks are proposed in the literature (**Table 2**). The formulation of these models proposes some distinctive modeling methods in addition to those currently developed for supply chains (Jayaraman and Pirkul, 2001; Martel, 2001; Geoffrion and Graves, 1974).

### **2.3.1 Location and determination of demand and return volumes**

One significant distinction with respect to modeling of reverse logistics networks is underlined by Fleischmann (2001). Within the supply chain context, models are generally developed in such a way that networks satisfy final demand from end-users (pull flows); while flows must be directed, as best as possible, in reverse logistics networks (push flows). In some cases, processed products can be reintroduced into the supply chain to partially or completely satisfy demand, thus causing disequilibrium between supply and demand. Most of the recent models take this situation into account with demand, recovery and site capacity constraints. A closed or open supply loop, with product reintegration in the original supply chain or on alternative markets, is then considered.

Some proposed models consider that unused products from end-users are already in established recovery centres, whereas others use the concept of user zones. For each of these zones, the demand and recovery volumes are generally defined upfront (Listes, 2007; Lu and Bostel, 2007; Fleischmann, 2001) or the recovery volumes are represented as a fraction of the demand volumes (Fandel and Stammen, 2004). They are used to locate recovery centres, processing centres and warehouses and to evaluate transportation costs, while allowing consideration of service levels. Indeed, zones can be defined according to distance separating user zones from sites offering products and services (service centres).

### 2.3.2 Product families and bill of materials

Few models deal with multi-commodity networks. Some tackle it for product decomposition. It is notably approached by Fandel and Stammen (2004) with a reverse bill of materials or by Spengler *et al.* (1997) and Shi (2001) with mass relation between materials. The former approach specifies which product families may be recovered from others and which disassembling sequence is to be used.

### 2.3.3 Processing conditions and product states

Generally, only one (Listes and Dekker, 2005; Fandel and Stammen, 2004; Jayaraman *et al.*, 2003; Shih, 2001; Krikke, 1998) and sometimes two options for processing alternatives (Listes, 2007; Lu and Bostel, 2007; Fleischmann, 2001) are considered in proposed models. When more than one processing alternative is considered, the proportion of product flows directed toward one or another alternative is generally determined and fixed *a priori*. Fleischmann (2001) proposes a lower bound on product flows to be disposed and thus considers technical, commercial and environmental feasibilities related to product reintroduction into markets. A certain degree of freedom is then considered as to processing alternatives.

According to the state of recovered product flows, different processing alternatives may occur. Listes and Dekker (2005) consider this aspect by assigning states with proportions of recovered product flows. A processing alternative is associated to each state, and processed products are used to fulfil a given demand.

Typically, recovered products are reintroduced into networks in a state similar to those in the supply chain. Hence, new or as-new product reuse or sales of only valorised products represents distribution activities in those networks. In this way, end-users do not have a valorised products alternative to new or as-new products. Valorised products, especially in a public setting, may represent an economical supply source and a compromise solution allowing improved performance in terms of service delay and satisfaction. It may also have an impact on the logistics network environmental performance. Little work evaluating these impacts has been done.

Several methods have been proposed to establish recovery and processing strategies and to evaluate their impact on costs and benefits to an organisation (Teunter, 2006). Some

contributions at the strategic level, such as Krikke (1998), aim at defining the proportions of product flows to be directed to each processing alternative *a priori*, according to the quality of returned product and its constitutive parts, and then to configure the network accordingly. Teunter (2006) has adapted this preliminary approach by considering multiple disassembling processes and partial disassembling in addition to product quality.

Some reverse logistics specificities are mentioned in the literature; however, these references offer few suggestions on how to explicitly integrate them in the modeling of logistics networks. When specificities are introduced into models, parameters are generally defined as deterministic and little flexibility is suggested regarding recovery, processing and redistribution. Most of the models proposed in the literature do not approach the fact that the same recovered product may be used to meet various needs, in particular in terms of valorised finished products and parts. Different processing alternatives may also arise according to product state and the capacity and needs in a network. Ideally, more than one processing alternative should be considered to improve value recovery possibilities and to limit environmental impacts. However, modelling of product flow is complicated in such a context. Additional efforts are then required to define products, end-users and organisation activities, and thus, to detail all potential network flows in a simple way. This paper aims to contribute to the development of an extended model tackling these issues. The characteristics of this model, compared to those identified in the literature, are summarized in **Table 2**.

**Table 2:** Main characteristics of related reverse logistics design models.

MODEL CHARACTERISTICS		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
	Covered logistics functions											
	Product development					✓		✓				
	Procurement of product					✓		✓				✓
	Transformation of raw materials to intermediate and finished products			✓		✓		✓		✓	✓	
	Distribution of finished product to end-users			✓		✓		✓		✓	✓	✓
	After-sales service (such as maintenance)											✓
	Recovery of unused products	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Transformation of recovered products to reusable raw materials, intermediate and finished products	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Redistribution of reusable materials to end-users		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
	Kind of model											
	Allocation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Location	✓ <sup>e</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>e</sup>	✓	✓	✓	✓
	Modeling of network flows											
	Chains			✓				✓	✓		✓	

Location and determination of demand and recovery volumes	Arcs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Reverse logistics integration to current supply chain										
	Reverse logistics only	✓			✓		✓				
	Closed and open supply loop		✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓
	Service features										
	End-users demand satisfaction	✓ <sup>a</sup>	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>a</sup>	✓	✓	✓	✓
	Maximum time (distance) to serve end-users (with the use of user zones)			✓		✓		✓		✓	✓
	Demand and recovery volume										
	Dependent					✓					✓
	Independent	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Product families and bill of materials	Multi-commodity model	✓			✓	✓		✓			✓
	Bill of materials (BOM)										
	Assembling					✓		✓			✓ <sup>b</sup>
	Disassembling (1. quantity of raw materials, components or assembly modules to recover from a product; 2. mass relation between materials)	✓	2		✓	2	1	✓	1,2		✓
	Technical, commercial and environmental or other ass./dis. feasibilities					✓					✓
Processing conditions and product states	Multi-state								✓		✓
	Multi-processing alternatives										
	Direct reuse (product quality as rigorous as those distributed in the current supply chain)		✓	✓		✓		✓	✓	✓	
	Valorisation activities (repair, refurbishing, remanufacturing, cannibalization, recycling)	✓	✓				✓	✓	✓		✓
	Disposal (end of lifecycle of products)	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
	Product flows directed into the reverse network										
	Fixed recovered product volumes (1. known volumes; 2. portion of sales)	✓	1	1	✓	1	2	✓	1	1	1
	Fixed proportions of recovered product flows directed to processing alternatives	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
	Lower bound on product flows to be disposed (1. after sorting and grading; 2. after processing)			✓	1					✓	1,2
	Upper bound on product flows to be repaired, refurbished or reassembled (reintroduced in their original form)		✓					✓			✓
Reintegration of reusable products (according to 1. demand and recovery volumes; 2. site capacities; 3. product states)	✓ <sup>a</sup>	1	1	2	✓	1,2	2	1	✓	1,2,3	
Dynamics characteristics (multi-period)					✓						
Stochastic features	Demand for products and parts							✓	✓		✓
	Proportion of demand fulfilled with valorised products										✓
	Recovery of unused products								✓	✓	✓
	Product states										✓
	Objective function										
Minimization of costs	Minimization of costs	✓	✓	✓			✓	✓			✓
	Maximization of profits				✓	✓			✓	✓	
Cost included	Fixed facility costs	✓ <sup>B</sup>	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>B</sup>	✓	✓	✓
	Development costs					✓					
	Production costs			✓		✓		✓	✓	✓	
	Handling and transportation costs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Carrying costs		✓	✓	✓	✓			✓		✓
	Penalty costs for not serving demand			✓							

Penalty costs for not collecting products from end-users			✓					✓		
Processing costs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Value recovery from using valorised products										
Decrease of production load or supply for new products			✓				✓	✓	✓	
Revenue from selling valorised products			✓	✓			✓			
Use of valorised products at lower cost instead of new										✓
Capacity										
Development				✓						
Transportation										✓
Processing	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
Production				✓						
Storage			✓	✓	✓		✓			✓
Supply				✓						
Bound on number of facilities	✓ <sup>a</sup>			✓	✓	✓				
International features				✓						
Stochastic formulation										
Two stage model – analysis of a fixed set of scenarios								✓		
Two stage model – analysis of a finite but large set of scenarios based on sample average approximation (SAA)										✓
Three stage model – analysis of a fixed set of scenarios								✓		
Method of solution applied					N/A					
A heuristic method					✓			✓	✓	✓
Commercial MIP solver	✓	✓	✓	✓			✓	✓		

[1] Spengler *et al.*, 1997; [2] Krikke, 1998; [3] Fleischmann, 2001; [4] Shih, 2001; [5] Fandel and Stammen, 2004; [6] Jayaraman *et al.*, 2003; [7] Bloemhof-Ruwaard *et al.*, 2004; [8] Listes and Dekker, 2005; [9] Listes, 2007; [10] Lu and Bostel, 2007; [11] Chouinard *et al.* (Appendix).

- a Recovery only
- b Reassembling considered by the replacement of unusable parts (component or assembly module in state  $s=3$  and  $s=4$ )
- c Multi recycling processes
- d Reintegration of reusable products according to process capacities
- e Processes location
- f Minimize economic costs, energy use and residual waste
- g Fixed cost of selecting a process
- h Bound on number of occurrences of a process at a location

## 2.4 Logistics network reengineering process

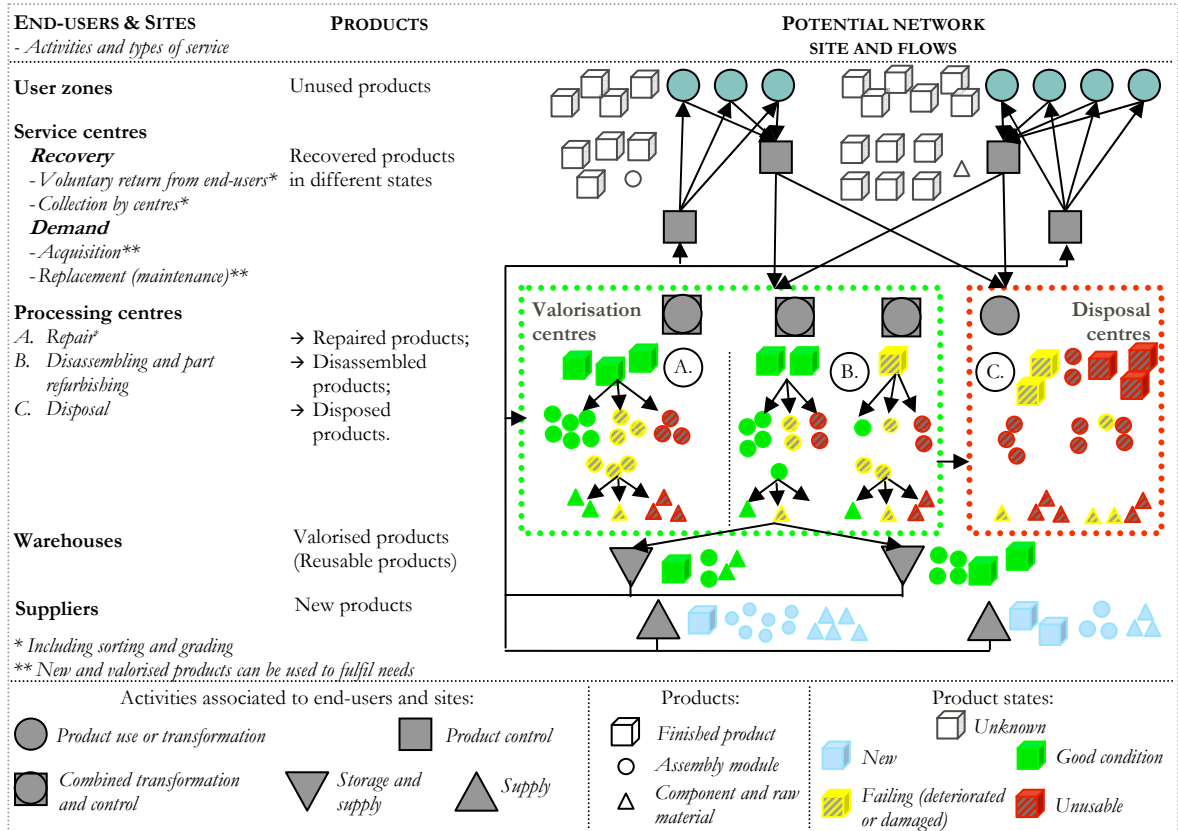
First, the necessary information to dress a total portrait of the studied network, as regards to products, end-users, capacities, constraints, etc., is identified. Such a parameter definition step is critical in the design methodology. In his book, Shapiro (2001) has extensively discussed the importance of parameter definition in supply chain design. Additional aspects are to be considered with a view to their adaptability to reverse logistics integration. The considered parameters include: i) demand and recovery zones (user zones) and demand and recovery volumes for each zone (service forecasts); ii) product families; iii) bill of materials, including recovery; iv) processing conditions and product states; (sections 2.4.2-2.4.5).



The next step of this reengineering process is the development of a mathematical programming model. It shows how reverse logistics characteristics may be conceptualized and integrated (sections 2.4.6 and 2.9) with the use of these parameters. Additional required constraints of flow conservation are detailed with figures in the paper. Constraints of the mathematical model, detailed in the Appendix, are presented with notations using square brackets in these figures ([Eq.]).

### 2.4.1 Studied context

The network (**Figure 8**) consists of service centres already in place satisfying end-users within user zones defined geographically. These centres distribute new and valorised products and offer maintenance and recovery services. New products are delivered by established external suppliers. Each service centre may also ensure product collection, mainly of finished products, using their private vehicle fleet or a service logistics provider. Voluntary returns from end-users are possible, following product replacement or maintenance activities. Recovered products must then be forwarded to a suitable processing centre, for finished product repair, parts disassembling and refurbishing, or disposal. Products to be directed toward processing alternatives depend on their states, site capacities and demand and recovery volumes. Valorised products generated in these centres are stored to meet the needs of service and processing centres, notably to repair products. Both new and valorised parts may be used for repair. Processing and service centres used for recovery, and warehouses are to be located so as to improve accessibility to valorised products, and to minimize costs of integrating the reverse logistics network with the current supply chain. Valorised products meet lower quality standards and are cheaper than new ones. The network reported here is a generalization of the wheelchair allocation problem in Quebec, (Chouinard *et al.*, 2005; Chouinard, 2003).



**Figure 8:** Potential network sites and flows.

## 2.4.2 Location and determination of demand and recovery volumes

The number of end-users is too high for each to be considered individually at the design stage. They are represented by restricted geographical areas, here called user zones, which allow locating and forecasting demand and recovery volumes. Zones can also be assigned to a limited number of service centres in a case of collection notably, according to the distance separating them. It is useful to estimate transportation costs, particularly when more than one transportation mode may be considered to fulfil demand or to recover products.

For supply chains, user zones are defined as demand zones. A general approach to locate these zones is to weight end-user coordinates ( $X_j$ ,  $Y_j$ ) with their demand volume ( $W_j$ ), known and fixed *a priori*, as follows:

$$X_j = \frac{\sum_{i \in V_j} W_i X_i}{\sum_{i \in V_j} W_i} \quad j = 1, \dots, m; \quad Y_j = \frac{\sum_{i \in V_j} W_i Y_i}{\sum_{i \in V_j} W_i} \quad j = 1, \dots, m$$

where  $V_j$  is zone  $j$  including end-users  $i$ .

Clustering methods are generally recommended for the aggregation process (Ballou, 1994). Some general rules are suggested in the literature to control location, size and number of zones for supply chains (Ballou, 1994).

It is difficult to apply this approach to reverse logistics as products in circulation represent a potential of recovery, which can be fed back to the organisation. In most reverse logistics cases, recovery origins and quantities are not known *a priori*.

In a context where reverse logistics are integrated into the supply chain, modeling of such user zones must consider two types of flows, direct (demand) and reverse flows (recovery). These two types of flows can be treated by distinct or common zones (**Figure 9**). The choice will depend on the studied context and five principal factors can influence this choice:

- Demand and recovery could occur in common and/or distinct service centres;
- Different territory could be covered by service centres for demand and recovery;
- Link may occur between direct and reverse flows;
- Depending on the link between direct and reverse flows, service costs (delay, transportation costs) can be evaluated separately or jointly;

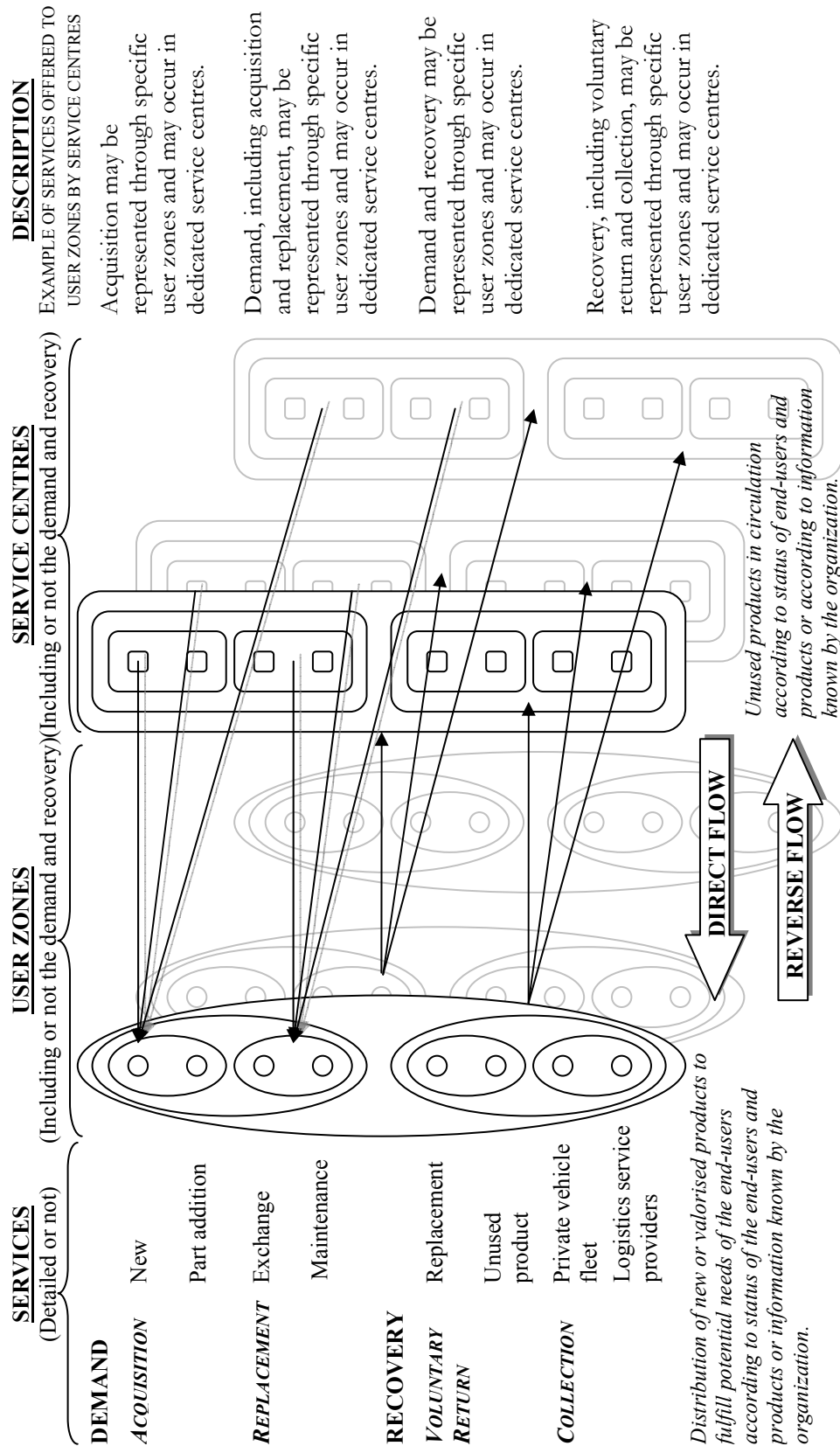
In addition, various **service types** can arise into networks, both for the demand and the recovery. **The demand** can come from the current end-users, but also new ones. It can occur during **acquisition** (*new product* or *part addition* to a product in circulation) or **product replacement** (*exchange* or *maintenance*). The demand can be satisfied by new or valorised products. **The recovery** can arise following **voluntary return** (*replacement* or *unused product*) on behalf of the end-user or from **collection** by the organisation (*private vehicle fleet* or *logistics service providers*). Products in different states may be involved and require the use of distinct resources. Distinct geographical areas can be considered and particular sites can be used for each service type. **Figure 9** presents different service types that can occur between user zones and service centres.

According to the situation, the product and end-user characteristics can influence the organisation activities. Certain information known by the organisation that links end-users and products, such as contract conditions, can also be used to evaluate needs into a network. Relevant information can then be used to accurately forecast the possible services in a dynamic and highly uncertain environment caused by reverse logistics integration to the supply chain:

- **End-user status:** age, gender, location, condition and intensity of use, consumer behaviour, social class, etc.
- **Product status:** product family, bill of materials, end of guarantee, value, aesthetic and technical quality when put on the market (e.g.: new or valorised) or in circulation, age, failure law (residual lifespan), etc.
- **Organisation:** location, operating context of sites (service centres, valorisation and disposal centre, etc.), condition at market entry (sale or renting), contract conditions, service type, product state during activities, etc.

The use of this information to create forecasts requires data and, consequently, the end-users and product families (section 2.3.2) in circulation need to be localized beforehand. Therefore, it is preferable to initially locate the end-users and product families in circulation in restricted geographical areas and then establish or distribute forecasts to zones according to their characteristics. However, the adopted approach must consider potential errors related to zone definition:

- Positioning errors (Hillsman and Rhoda, 1978):
  - Accuracy of the estimated transportation cost for aggregated end-users compared to the transportation cost met when all end-users are served individually;
  - Inappropriate allocation of end-users to sites and erroneous location of these sites due to aggregated demand (recovery) volumes rather than individual.
- Demand (recovery) forecast errors:
  - Accuracy of forecasts due to data aggregation, with the use of an inappropriate sample of data. This would not adequately represent each service type that evolves distinctly according to the characteristics of the zones.



**DESCRIPTION**

EXAMPLE OF SERVICES OFFERED TO USER ZONES BY SERVICE CENTRES

Acquisition may be represented through specific user zones and may occur in dedicated service centres.

Demand, including acquisition and replacement, may be represented through specific user zones and may occur in dedicated service centres.

Demand and recovery may be represented through specific user zones and may occur in dedicated service centres.

Recovery, including voluntary return and collection, may be represented through specific user zones and may occur in dedicated service centres.

**Figure 9:** Possible scenarios for the modeling of user zones.

The level of details relating to the extent of geographical areas, by individually approaching or not direct and reverse flows and by separately considering or not each service type, has an impact on the evaluation of the network performance. In fact, different users and products can be involved according to the situation and will require products and services at different costs and service levels.

### 2.4.3 Product families

Product variety managed by an organisation may be relatively significant. To facilitate later stages of logistics network design, products (finished products and parts, including assembly modules, components and raw materials) are generally grouped into families. A family contains products with similar characteristics which use equivalent processes throughout the logistics network. Products are grouped, for logistics network design, on the basis of logistics processes characteristics.

Definition of product families is usually done with ABC classification methods, Analytic Hierarchy Process (AHP) or clustering algorithms (Ramanathan, 2006; Srinivasan and Moon, 1999; Flores *et al.*, 1992; Ernst and Cohen, 1990). For the supply chain, products are grouped according to the following process characteristics (Martel, 2004):

- Demand profile (risks, seasonality, ...);
- Production, storage and handling resources used (human resources and equipment);
- Distribution channels and service levels required;
- Means of transportation considered.

However, to extend these approaches to reverse logistics, it is necessary to consider the fact that products may be reintroduced into the network at several levels and may be subject to modifications before their reintegration. Additional characteristics then need to be considered (Chouinard, 2003; Krikke, 1998):

- Technical feasibility to recover and process products;
- Commercial feasibility to redistribute reusable products;
- Environmental feasibility to recover and process products;
- Product flows (demand and return volumes, states of products);
- Economical and environmental costs and benefits in product lifecycle.

Distinct families may be defined for supply chains and reverse logistics, however, considering both at once would complicate subsequent analysis steps of logistics network

design. Some links may also occur between different products grouped in different families and product substitutability may be allowed in some network stages. The suggested methods can then require explicit use of bills of materials, but they must be adapted to a reverse logistics context.

#### 2.4.4 Bill of materials

In a supply chain context, different volumes of part families (raw materials, components or assembly modules) can be assembled at different stages of the manufacturing network to fulfil the demand for finished product families. Regarding reverse logistics, different volumes of part families can be disassembled from recovered finished product families, to recover those in good condition or to replace the failing and unusable ones. These activities can occur at different stages of the network and may involve many sites. For logistics network design, the bills of materials (BOMs) are used to specify product needs or supplies, and assembling or disassembling sequence at each stage of the network (**Figure 10**).

Some papers suggest clustering and association mining methods to define the BOMs. Romanowski *et al.* (2005) propose a method that clusters the design of products, represented as BOMs, into product families. Srinivasan and Moon (1999) suggest an approach to define product families, which takes into account BOMs and the fact that products may be used at different levels of the network.

Contrary to BOMs considered for supply chains, which is presented by an acyclic directed graph, cycles can occur between the graph nodes in the context of reverse logistics (**Figure 10**). This characteristic arises with product flows that can occur in both directions, to consider the (re)assembling and disassembling. Moreover, the nodes can be presented in two generic forms, such as new products or as recovered and valorised products. These later nodes represent, respectively, products that can be disassembled into part families in various states (section 2.4.5) and products that can be used as an alternative to new products, but of lower quality. As for supply chains, quantity associated with each link of the BOMs indicates the portion of product volumes required, which can be involved in a particular network stage. Bold arrows in **Figure 10** represent requirements of new products for assembling, while dotted arrows represent product requirements for reassembling or product supplies while disassembling. It is considered here that only new products can be used in the composition of the new products, whereas new and valorised products can be used to valorise the recovered products.

Quantity characterizing each link ensures flow conservation. For the assembling of new products, it is then possible to ensure the availability of new parts for production. For the reassembling, in particular during maintenance or valorisation activities, the role is similar. However, contrary to the assembling of new products, the reassembling can be done with either new or valorised parts, according to the given case. Flow conservation constraints intervene to ensure that the volume for a given part, of new and valorised part necessary for product reassembling, does not exceed the specified quantity characterizing the link between the two involved nodes.

For the disassembling of recovered products, flow conservation constraints determine the probability of recovering a volume of a part family from a product family. An additional parameter must be considered in order to specify if it is possible to disassemble the targeted product family, as suggested by Fandel and Stammen (2004). This aspect takes technical, commercial and other constraints (disassembling feasibility) into account that can occur while the disassembling (**Figure 10**). In our studied context, the recovered product families can generate only valorised parts, but in various states; therefore other constraints are necessary if this aspect is to be considered (sections 2.4.5, 2.4.6.2 and 2.4.6.3).

### **2.4.5 Processing conditions and product states**

The product families and bills of materials are defined for the supply chain by considering flows of products in identical state to produce finished products respecting quality standards of the organisation. However, product families in different states can occur for reverse networks.

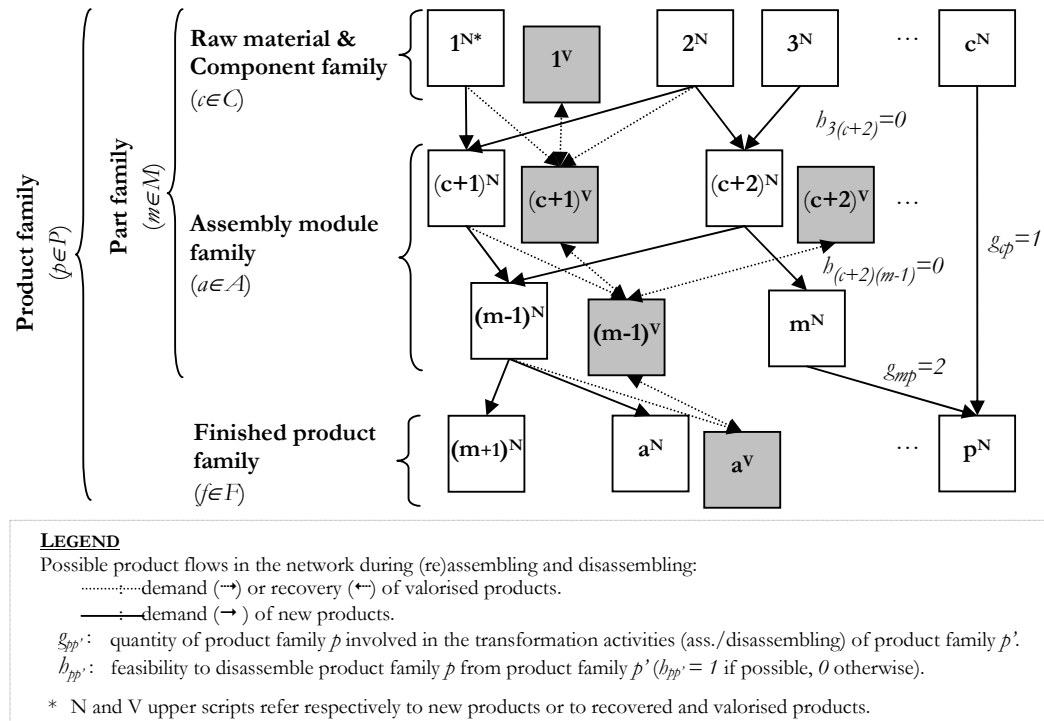
During the processing of the recovered products, the product state will determine if it can be directly reused or has to be directed to some other processing alternative. Subfamilies then need to be defined and assigned to the product families in the mathematical model, according to their state. These states depend on the average general condition of the products in circulation within a zone (section 2.4.2). They also depend on the processing alternative retained for a specific disassembled product family in a given state, since some alternatives may be more destructive. These states can be fixed *a priori*, however it is probably more convenient to assign the state to product families with proportions defined by probability distribution functions. This approach then considers randomness regarding the processing and the reuse of recovered products.



Within the framework of this paper, four states can be assigned to products:

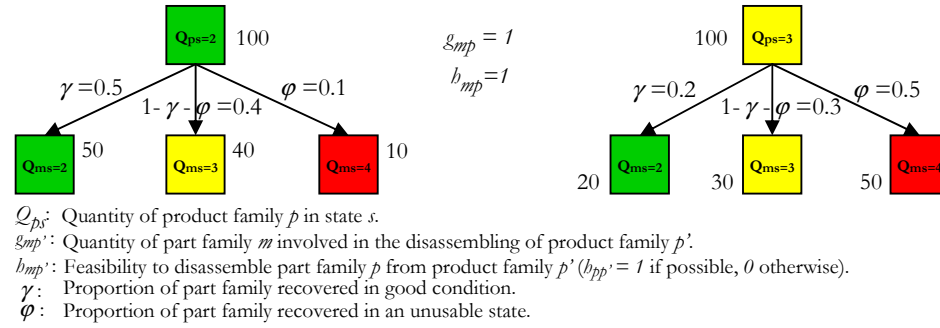
1. New:  $s=1$ ;
2. Good condition:  $s=2$ :  
Which implies that the products can be repaired (finished products) or refurbished (parts) and thus lead to valorised products;
3. Deteriorated or damaged:  $s=3$ :  
Which implies that the products can be disassembled;
4. Unusable:  $s=4$ :  
Which implies that the products are to be disposed.

Probability distribution functions may describe the proportions of products recovered in each state following disassembling (**Figure 11**). These functions would be defined for each product family considered in the model (section 2.4.3). Parts produced during disassembling will have to respect the bills of materials (**Figure 10**).



**Figure 10:** Partial bill of materials for modeling supply loops.

A given state will predestine the product families to a certain processing alternative. However, the model suggested in this paper offers a certain degree of flexibility in this regard (section 2.4.6.3).



**Figure 11:** Proportions of products recovered in each state following disassembling given by the probability distribution functions.

## 2.4.6 Location-Allocation model

The developed mathematical model, introduced in this section, consists primarily in determining a reverse network configuration while considering the use of current supply chain sites and additional business units. It concerns the location of recovery and processing centres and warehouses. The potential product flows are summarized and represented in figures, which indicate the related model constraints. Details concerning model equations are given in the Appendix.

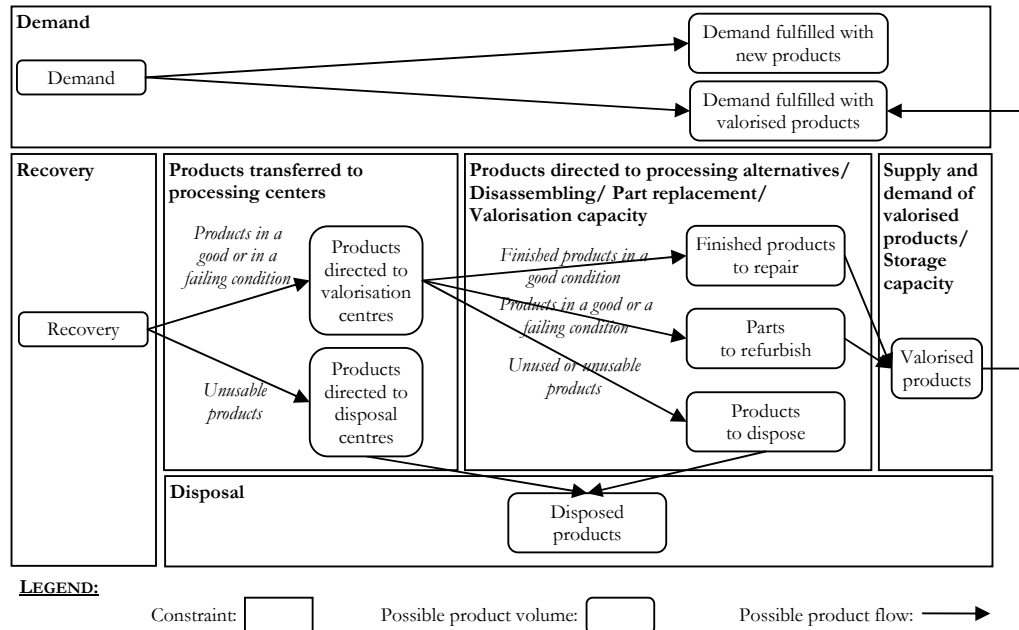
The objective function of the model is to minimize:

- Fixed costs (service centres for recovery and processing centres and warehouses) + variable processing costs + product flow costs (handling, storage and transportation) between sites [Eq. 2.1].

Product flows are subjected to the following constraints:

- Demand [Eq. 2.2, 2.3] (section 2.4.6.1);
- Recovery [Eq. 2.4] (section 2.4.6.1);
- Product flows transferred to processing centres [Eq. 2.5-2.6] (section 2.4.6.2);
- Product flows directed toward processing alternatives [Eq. 2.7-2.10] (section 2.4.6.3);
- Disassembling [Eq. 2.11-2.22] (section 2.4.6.3);
- Disposal [Eq. 2.23-2.26] (section 2.4.6.3);
- Part replacement [Eq. 2.27, 2.28] (section 2.4.6.3);
- Supply and demand of valorised products [Eq. 2.29-2.31] (section 2.4.6.3);
- Capacity (transportation, processing, storage) [Eq. 2.32-2.35].

Accent is placed on the specific constraints related to product flows directed to processing centres and alternatives according to the network condition (recovery and demand volumes, site capacities, operating costs) and states of products (**Figure 12**).



**Figure 12:** Summarized relation between product flows and model constraints.

#### 2.4.6.1 Potential logistics network

The potential network for the considered context (section 2.4.1) is presented in **Figure 8** and is detailed in the text starting from user zones, where reverse flows are initiated.

End-users and product families in circulation are aggregated in restricted geographical areas, indicated as **user zones** (section 2.4.2). The recovery, mainly in a case of collection, is supposed to occur in a restricted number of **service centres** in this paper. Selection of service centres as regards recovery will be evaluated by analysis of scenarios, for which user zones will consequently be assigned according to the distance separating them.

The product recovery initiates reverse flows in the network. Aggregated flows of recovered product families are split between the different **processing centres**, which are either **valorisation centres** or **disposal centres**. The former provide effective product reintegration into the original logistics network (closed-loop supply) and the latter handles the end of product lifecycle within this same network (open-loop supply). The valorisation centres can use internal logistics network units, such as service centres with necessary

expertise and resources to deal with valorisation activities or centres dedicated to these activities, or third parties. The disposal centres are third parties.

The valorised products, whose lifecycle is extended within the original network, are stored before their delivery to end-users, and both public and private **warehouses** are considered.

Warehouse and processing centre location and capacity need to be determined to ensure a better delivery delay for valorised products in comparison with new products from suppliers, according to their distance from service centres. These sites must be able to effectively meet the network needs, at both service and valorisation centres.

The supply of new products comes from external **suppliers**, which deliver new finished products and parts on demand. Each supplier offers a specific product variety, represented by the product families. The transportation costs are included in acquisition costs.

Transportation between end-users and sites (excluding suppliers) is carried out by logistics service providers or private vehicle fleets from service centres. Transportation is not considered for product acquisition and in some recovery circumstances, specifically for replacement, since the end-users have to visit service centres. Collection services are offered by the organisation to ensure a greater possibility of recovery, which can be particularly significant when external pressures are exerted on the organisation (by governmental agencies or other).

#### **2.4.6.2 Potential flows**

In addition to the demand and recovery volumes within the potential logistics network and site capacities, the product flows between sites are also directed according to the states of the product families. Details of these flows are schematized in **Figure 13**. The product flows within the logistics network, for both direct and reverse flows, are initiated at the level of user zones.

In this work, the demand expressed by each user zone to the associated service centre arises under two circumstances: acquisition and product replacement (including maintenance). For these two situations, the end-users have to visit service centres where the demand can be filled by either new or valorised products. However, a portion of needs must be filled by valorised products, according to the end-user requirements and according to organisation policies and strategies.

As with demand, two recovery situations can arise: voluntary returns and collection. It is considered here that collection occurs only for the finished products. Different recovery costs are generated, not only according to the recovery situation but also according to the recovery resources needed (section 2.4.2), since a proportion of unused products cannot be recovered from end-users by the organisation, particularly when they cannot be found. No penalty costs are considered for these products.

As previously indicated, four states can be assigned to the product flows (section 2.4.5), each state requiring different processes and resources. In order to avoid unnecessary product flows into the network at a strategic level, flows of recovered products are transferred to appropriate processing centres (**Figure 13**) according to their states. Flows are separated into two categories. All products with reuse potential ( $s=2$ ,  $s=3$ ) are directed toward valorisation centres, whereas all unusable products ( $s=4$ ) are directed toward disposal centres. It is considered that no new or as-new product ( $s=1$ ) is recovered.

### 2.4.6.3 Product flows directed to processing alternatives

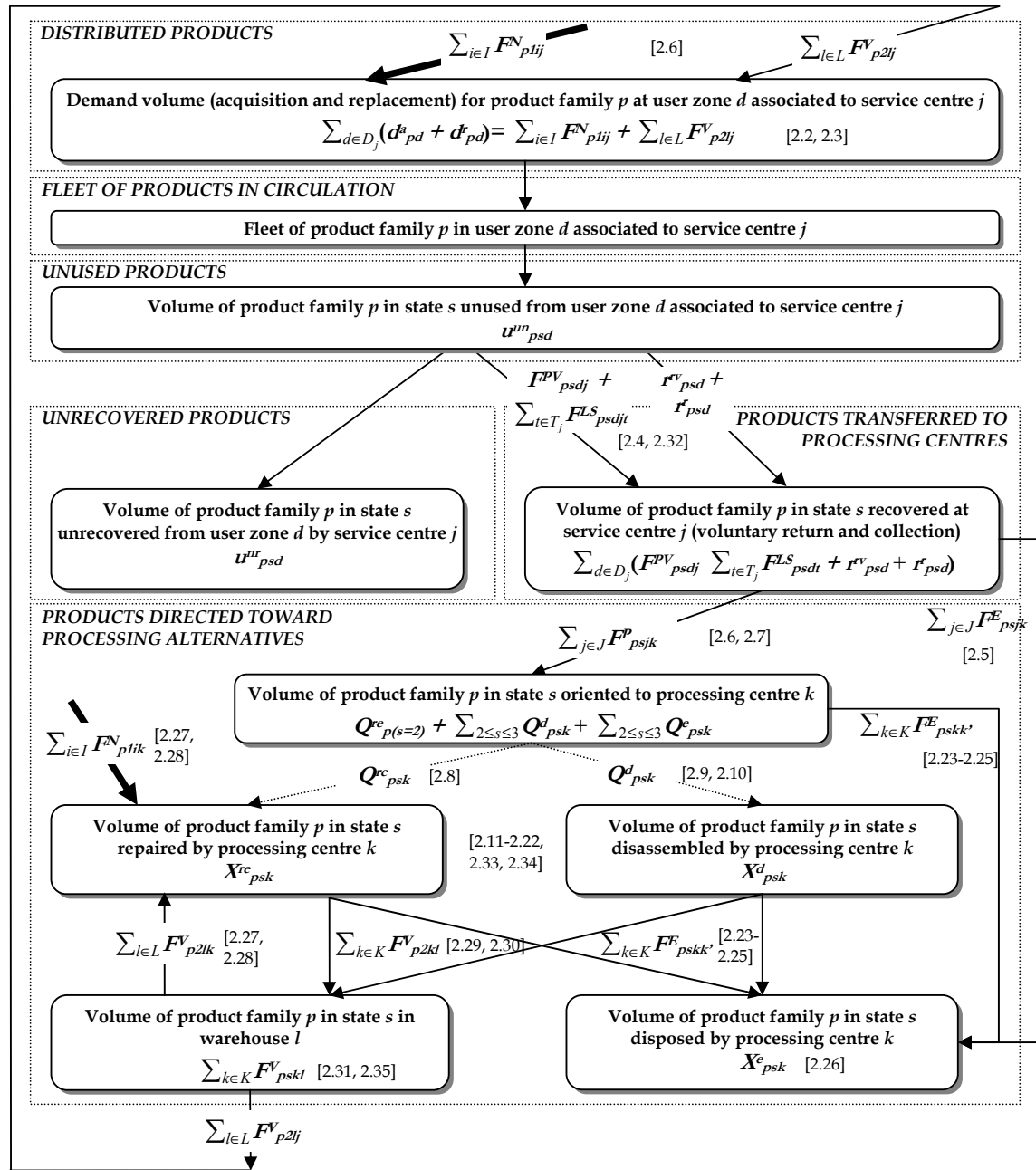
The state associated to product flows is used to determine their direction toward a given processing alternative, but this alternative is not necessarily retained for all products of a family in a given state. In fact, according to the network needs and site capacities (processing centres and warehouses), it is also possible that a portion of the flows is directed toward other alternatives (Figures 1.7).

The state associated to product flows directs them to a given processing alternative. However, it can be redirected toward a lower processing alternative, presenting a lower recovery value. In this paper, three processing alternatives are distinguished, and given in descending recovery value. These alternatives are:

- Repair [ $s=2$  – finished products only in this work];
- Disassembling and part refurbishing [ $s=2$ ,  $s=3$  – finished products and parts];
- Disposal [ $s=2$ ,  $s=3$ ,  $s=4$  – finished products and parts].

A higher ranked processing alternative is initially considered; however, when circumstances do not allow this (demand, overflow of recovered products at the processing centres and warehouses or operating costs), a portion of product flows can then be directed toward the lower ranked alternative (**Figure 14**). The last possible processing alternative, for all recovered products, is disposal. The end of the product family lifecycle is reached when this

alternative is taken. This decision rule for processing applies to both finished product and part families.



**Figure 13** Principal annual aggregated product flows within the potential logistics network.

The flows of products directed toward valorisation centres can be handled in two ways: it can be repaired ( $s=2$ ) or disassembled for part refurbishing ( $s=2$  &  $s=3$ ). The repair

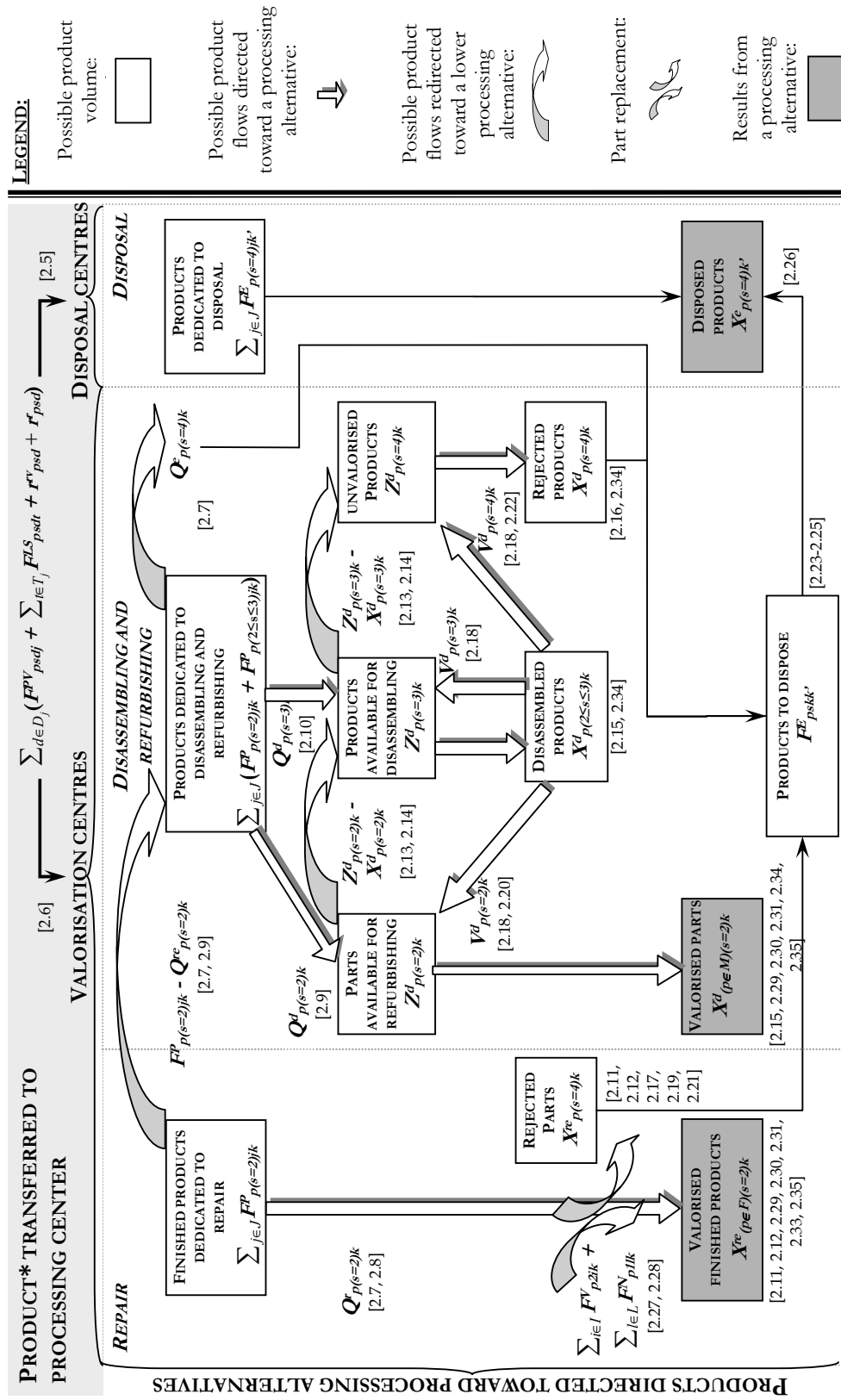
alternative involves here only finished product families, whereas the disassembling and part refurbishing alternative involve finished products as well as part families.

With the repair alternative, no change is made to the original shape of products. Only the unusable parts ( $s=4$ ) are replaced to restore the product quality level to organisation standards. New ( $s=1$ ) or valorised ( $s=2$ ) parts can be used to this end. Finished products are cleaned. Valorised finished product families ( $s=2$ ) are thus obtained.

The disassembling alternative is mainly a question of breaking up the volume of recovered product families to obtain a sufficient volume of valorised parts to efficiently meet all the network needs. Parts in various states are generated from this alternative ( $s=2$ ,  $s=3$  and  $s=4$ ). The unusable parts ( $s=4$ ) are directed toward disposal centres, whereas other parts can be used to feed the network with valorised parts ( $s=2$ ) or can be further disassembled ( $s=2$  and  $s=3$ ) to generate other parts. This alternative includes some adjustments (repair and/or cleaning) before reintroducing this volume of valorised parts into the network.

The volume of valorised product families ( $s=2$ ) obtained (parts and finished products) is used to answer, partially or completely, the network's needs. Needs can be filled either with new ( $s=1$ ) or valorised ( $s=2$ ) products. According to the service type or processing alternative involved, a portion of the needs must be filled only with valorised products.

The volume of reusable products resulting from processing alternatives are termed valorised products ( $s=2$ ). The volume of disposed products ( $s=4$ ) represent the other result of processing alternatives, since the volume of parts dedicated to disassembling ( $s=3$ ) cannot be used to meet end-user needs and can only be further disassembled. If products cannot be further disassembled, they are disposed.



\* The term product in this figure is used as volume of a product family.

Figure 14: Strategic decision for product flows transferred to processing centres and directed toward processing alternatives.



## 2.5 Conclusion and future work

The suggested logistics network reengineering model aims at structuring reverse networks, while considering supply chain activities. It is inspired by the current work on the wheelchair allocation and valorisation context in the Province of Quebec (Canada). Activities related to new product allocation, maintenance, recovery, processing and redistribution are considered. At the end of this reengineering process, a mathematical model is obtained to deal with decisions related to the location of recovery and processing centres, distinguished here as valorisation centres and disposal centres, as well as warehouses. Decisions relate also to the allocation of activities. Processing includes repair of finished products, disassembling and part refurbishing as well as disposal. New modeling approaches are proposed to evaluate the impacts of using valorised products as an alternative to new products on the network performance, from an economic and end-user service (product accessibility and delivery delay) point of view.

Service levels are evaluated with the modeling of user zones. An approach needs to be developed to locate and forecast needs for offered services according to the end-user and product family status. Services include demand (acquisition and product replacement) and recovery (voluntary return and recovery steps undertaken by the organisation). New and valorised products can be used in response to the demand. Different values and delivery delays can be associated to these two types of products, according to involved sites. It is even considered that a certain proportion of the demand be filled by valorised products only, according to end-user requirement or according to established organisation policies and strategies. For recovery steps, the model aims at determining how collection must be carried out, with the use of private vehicle fleets and/or logistics service providers.

To ensure product flow conservation, reverse bills of materials are proposed. Probability distribution functions are suggested to consider the fact that different volume of products in various states can be produced from each processing alternative. It is thus possible to reflect the randomness of processing products. Processing alternative selection is done on the basis of the state of the recovered product families, but also by considering site capacity and demand and recovery volumes. A greater flexibility is then considered for the decisions related to

product flows to be directed to each processing alternative. Some additional product flow conservation constraints have been proposed to deal with this aspect.

Work has been undertaken to develop methodologies to define processing conditions and user zones and to forecast network needs (demand and recovery), following end-users and products in circulation status. These methodologies and the mathematical model suggested in this paper will be validated with data on hand for the wheelchair context in Quebec.

Although some new modeling approaches are proposed, thus covering new logistics functions neglected until now, others could be considered. Notably, resource selection (human resources and equipment) would be interesting to approach. Resolution complexity of developed models should also represent an exciting challenge for researchers in the coming years.

## **2.6 Guidelines to practitioners**

A methodology for designing logistics networks integrating reverse logistics is suggested. It includes the development of a deterministic mathematical programming model. Two major stakes arise with this methodology: data collection and processing, and resolution of large-scale problems.

Data collection and processing needed for the definition of all model parameters represent a significant stage of the methodology. It represents nearly up to 70% of all modeling efforts. The quality of the parameters will dictate the quality of the decisions of location/allocation. Some data might be difficult to obtain like those related to demand, by distinguishing new and valorised products, recovery and product to be directed into a network according to their state. The data are not always collected by current information systems. When they are, they cannot be used directly because of lack in standardized processes, notably for the sorting and grading, and the follow-up of product lifecycle. Reverse logistics is generally characterized by high uncertainty level regarding quantity, quality, variety and timing of recovery. Information systems and decision-making tools must then be considered not only to ensure data capture, but also to attenuate variability by supporting product flows adequately (Chouinard *et al.*, 2005). Proportions or probability distribution functions that feed the model would thus be established with more exactitude and precision.

Taking randomness into consideration while designing logistics networks may require the conversion of a deterministic model to a stochastic model. However, this raises large-scale problems. Recent sampling strategy, notably the sample average approximation (SAA), may be adapted to the proposed model for solving a huge number of scenarios (Santoso *et al.*, 2005). It would then be possible to evaluate the impact of demand, recovery and processing volumes, according to product states, on network configuration.

## 2.7 Acknowledgements

The research work reported here was completed thanks to a Scholarship of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). The authors would also like to thank the management of the Assistive Technology Department (ATD) of the Quebec City Rehabilitation Institute (QCRI), the management of the programs outside Quebec and Technical Aids Program of the Régie de l'assurance maladie du Québec as well as the Société de l'assurance automobile du Québec for their contribution to this work.

The authors are indebted to the anonymous reviewers for their many helpful and thoughtful suggestions and comments on an earlier version of this paper. They would also like to thank François Routhier, Eng. PhD at the ATD of the QCRI, and Dr Angel Ruiz from the CENTOR for their precious participation with this work.

## 2.8 References

- Arntzen BC, Brown GG, Harrison TP, Trafton LL, (1995) Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25(1):69-93.
- Ballou RH, (1994) Measuring transport costing error in customer aggregation for facility location. *Transportation Journal*, 33(3):49-59.
- Bloemhof-Ruwaard JM, Krikke H, Van Wassenhove LN, (2004) OR models for eco-eco closed-loop supply chain optimization. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 15. Springer, 357-379.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, accessible at: [www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca).
- Chouinard M, D'Amours S, Ait-Kadi D, (2005) Integration of reverse logistics activities within a supply chain information system. *Computers in Industry*, 56(1):105-124.

- Côté M, Tremblay J, SOM inc., (2003) *Évaluation du projet de valorisation des aides à la locomotion*. Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Ernst R, Cohen MA, (1990) Operations related groups (ORGs): A clustering procedure for production inventory systems. *Journal of Operations Management*, 9(4):574-598.
- Fandel G, Stammen M, (2004) A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling, *International Journal of Production Economics*, 89(3):293-308.
- Fleischmann M, (2001) *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, Berlin, Germany.
- Flores BE, Olson DL, Dorai VK, (1992) Management of multi-criteria inventory classification. *Mathematical and Computer Modeling*, 16(12):71-82.
- Geoffrion AM, Graves GW, (1974) Multi-commodity distribution system design by Benders decomposition. *Management Science*, 20(5):822-844.
- Hillsman EL, Rhoda R, (1978) Errors in measuring distances from populations to services centers. *Annals of the Regional Science Association*, 12:74-88.
- Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E, (2003) The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150(1):128-149.
- Jayaraman V, Pirkul H, (2001) Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of Operational Research*, 133:394-408.
- Krikke H, (1998) Recovery strategies and reverse logistics network design. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Listes O, (2007) A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2):417-442.
- Listes O, Dekker R, (2005) A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268-287.
- 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.
- Martel A, (2001) Un modèle général pour l'optimisation de réseaux logistiques. *Proceedings du 4<sup>e</sup> Congrès international de génie industriel*, 271-280.
- Martel A, (2004) Conception et gestion de chaîne logistique. Notes de cours, Université Laval, Québec, Canada.
- Ramanathan R, (2005) ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. *Computers & Operations Research*, 33:695-700.
- Romanowski CJ, Nagi R, Sudit M, (2005) Data mining in a engineering design environment: OR applications from graph matching. *Computers & Operations Research*, 33:3150-3160.
- Santoso T, Ahmed S, Goetschalckx M, Shapiro A, (2005) A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1):96-115.
- Shapiro JF, (2001) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury.
- Shih L-H, (2001) Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 32:55-72.
- Spengler T, Püchert H, Penkuhn T, Rentz O, (1997) Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97(2):308-326.
- Srinivasan M, Moon YB, (1999) A comprehensive algorithm for strategic analysis of supply chain networks. *Computer and Industrial Engineering*, 36(3):615-633.
- Teunter RH, (2006) Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*. 34(6):533-537.
- Thierry M, Salomon M, van Nunen J, van Wassenhove L, (1995) Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2):114-135.

## 2.9 Appendix

### 2.9.1 Notation

#### 2.9.1.1 Subscripts

- C:** Raw material and component family ( $c \in C$ ).
- A:** Assembly module family ( $a \in A$ ).
- M:** Part family ( $m \in M = C \cup A$ ).
- F:** Finished product family ( $f \in F$ ).
- P:** Product family ( $p \in P = F \cup M$ ).
- I:** New product supplier ( $i \in I$ ).
- J:** Service centre ( $j \in J$ ).
- D<sub>j</sub>:** User zone associated to service centre  $j$  ( $d \in D_j$ ).
- T<sub>j</sub>:** Logistics service providers for recovery associated to service centre  $j$  ( $t \in T_j$ ).
- K:** Processing centre ( $k \in K$ ).
- L:** Valorised product warehouse ( $l \in L$ ).
- N:** Network node ( $n \in N = I \cup J \cup D \cup K \cup L$ ).
- U:** External network node ( $u \in U = I \cup D$ ).
- V:** Internal network node ( $v \in V = J \cup K \cup L$ ).
- S:** Product family state ( $s \in S$ ).

#### 2.9.1.2 Upperscripts

- a:** Demand associated to product acquisition.
- d:** Disassembling and part refurbishing activity.
- e:** Disposal activity.
- E:** Product flows directed toward disposal centres.
- LS:** Product flows recovered by a logistics service provider.
- P:** Product flows directed toward valorisation centres.
- PV:** Product flows recovered by a private vehicle fleet.
- N:** New product family flows required by service centres and processing centres.
- nr:** Unrecovered product.

- r***: Demand associated to product replacement.  
***re***: Repair activities.  
***rv***: Voluntarily returned product.  
***un***: Unused product.  
***V***: Valorised product family flows required by service and processing centres.  
***w***: Storage activities.

## 2.9.2 Data

- $a_v$** : Fixed cost of using internal network node  $v$ .  
 **$b_{pv}^{PV}$ ;  $b_{pv}^{re}$ ;  $b_{pv}^d$ ;  $b_{pv}^w$** : Capacity related to product family  $p$  at the internal network node  $v$ , specifically service centre  $j$ , processing centre  $k$  or warehouse  $l$ .  
 **$d_{pd}^a$ ;  $d_{pd}^r$** : Expected demand (acquisition, replacement) for product family  $p$  in user zone  $d$ .  
 **$f_{psnn}$** : Unit cost for flow of product family  $p$  in state  $s$  between node  $n$  and  $n'$ .  
 **$g_{pp}$** : Quantity of product family  $p$  involved during activities (ass./disassembling) on product family  $p'$ .  
 **$h_{pp}$** : Feasibility to disassemble product family  $p$  from  $p'$  ( $h_{pp} = 1$  if possible  $0$  otherwise).  
 **$q_p$** : Size of product family  $p$  in standard unit.  
 **$r_{psd}^f$ ;  $r_{psd}^{fv}$** : Expected quantity of product family  $p$  recovered in state  $s$  from user zone  $d$  (replacement, voluntary return), such as  $\sum_{s \leq s} r_{psd}^f = d_{pd}^r$ .  
 **$v_{psk} = [v_{psk}^{re}; v_{psk}^d]$** : Unit cost to disassemble product family  $p$  in state  $s$  at the processing centre  $k$ .  
 **$u_{psd}^{un}$** : Expected quantity of unused product family  $p$  in state  $s$  in user zone  $d$ .  
 **$u_{psd}^{nr}$** : Expected quantity of unused products family  $p$  in state  $s$  not-recovered from user zone  $d$ .  
 **$x_{psk} = [x_{psk}^{re}; x_{psk}^d]$** : Unit cost to repair or to refurbish product family  $p$  in state  $s$  at the processing centre  $k$ .  
 **$\alpha_{psd}^a$ ;  $\alpha_{psd}^r$** : Expected minimal demand proportion (acquisition, replacement) for product family  $p$  answered with valorised products ( $s=2$ ) in user zone  $d$ .  
 **$\varphi_{psk}^{re}$ ;  $\varphi_{psk}^d$** : Expected proportion of product family  $p$  recovered in an unusable state ( $s=4$ ) following valorisation activities (repair, disassembling & part refurbishing) at processing centre  $k$ .

$\gamma_{psk}^{re}$ ;  $\gamma_{psk}^d$ : Expected proportion of product family  $p$  recovered in a good condition ( $s=2$ ) following valorisation activities (repair, disassembling & part refurbishing) at processing centre  $k$ .

### 2.9.3 Decision variables

#### Flow variables [ $F_{psmn}$ ]

$F_{p1iv}^N$ ;  $F_{p2lv}^V$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  exchanged between supplier  $i$  ( $s=1$ ) or warehouse  $l$  ( $s=2$ ) and one of the internal network nodes  $v$ , specifically service centre  $j$  or processing centre  $k$ .

$F_{psdj}^{PV}$ ;  $F_{psdj}^{LS}$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  coming from user zone  $d$  recovered at service centre  $j$  (by private vehicles fleet or logistics service provider  $t$ ).

$F_{psvk}^E$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  dedicated to disposal activities transferred from internal network node  $v$ , as service centre  $j$  or processing centre  $k$ , to processing centre  $k'$ .

$F_{psjk}^P$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  dedicated to valorisation activities transferred from service centre  $j$  to processing centre  $k$ .

$$F_{psmn} = F_{p1iv}^N \cup F_{p2lv}^V \cup F_{psdj}^{PV} \cup F_{psdj}^{LS} \cup F_{psvk}^E \cup F_{psjk}^P$$

#### Processing variables [ $Q_{psk}$ ; $V_{psk}$ ; $X_{psk}$ ; $Z_{psk}$ ]

$Q_{psk} = [Q_{psk}^{re}; Q_{psk}^d; Q_{psk}^e]$ : Quantity of product family  $p$  recovered in state  $s$  directed toward a processing alternative (repair, disassembling & part refurbishing, disposal) at processing centre  $k$ .

$V_{psk} = [V_{psk}^{re}; V_{psk}^d]$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  resulting from valorisation activities (repair, disassembling & part refurbishing) at processing centre  $k$ .

$X_{psk} = [X_{psk}^{re}; X_{psk}^d; X_{psk}^e]$ : Quantity of product family  $p$  recovered in state  $s$  and processed (repair, disassembling & part refurbishing, disposal) at processing centre  $k$ .

$Z_{psk} = [Z_{psk}^d]$ : Quantity of product family  $p$  in state  $s$  available for valorisation, disassembling or disposal following disassembling and part refurbishing activities at processing centre  $k$ .

#### Binary variables [ $Y_v$ ]

$Y_v$ : Binary variable for opening or not internal network node  $v$  ( $Y_v=1$  if node  $v$  is opened and 0 otherwise). Internal network nodes are processing centres ( $k \in K$ ) and warehouses ( $l \in L$ ).

## 2.9.4 Mathematical programming model

### 2.9.4.1 Objective function:

$$CT = \min \sum_{v \in V} a_v Y_v + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} (v_{psk} V_{psk} + x_{psk} X_{psk}) + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} f_{psnn'} F_{psnn'} \quad (2.1)$$

fixed costs (recovery and processing centres and warehouses) + variable processing costs (disassembling and repair or refurbishing) + product flows costs (handling, storage and transportation) between sites n and n'.

### 2.9.4.2 Subject to:

#### Demand constraints:

Demand fulfilled (acquisition, replacements) with new and valorised products:

$$\sum_{d \in D_j} d_{pd}^u + \sum_{d \in D_j} d_{pd}^v = \sum_{i \in I} F_{p1ij}^N + \sum_{i \in I} F_{p2ij}^V \quad p \in P, s \in S, j \in J \quad (2.2)$$

Minimal proportion of demand to be fulfilled with valorised product:

$$\sum_{i \in I} F_{p2ij}^V \geq \sum_{d \in D_j} (a_{pd}^u d_{pd}^u + a_{pd}^v d_{pd}^v) \quad p \in P, s=2 \quad (2.3)$$

#### Recovery constraints:

Unused products are recovered by logistics service providers and private vehicle fleet:

$$u_{psd}^{un} - u_{psd}^{lr} - r_{psd}^{rv} - r_{psd}^r = F_{psdj}^{PV} + \sum_{i \in I_j} F_{psdt}^{LS} \quad p \in F, s \in S, d \in D_p, j \in J \quad (2.4)$$

#### Constraints on flows of recovered products transferred to processing centres (Figure 13):

Recovered products in an unusable state are transferred to disposal centres:

$$\sum_{d \in D_j} (F_{psdj}^{PV} + \sum_{i \in I_j} F_{psdt}^{LS} + r_{psd}^{rv} + r_{psd}^r) = \sum_{k \in K} F_{psjk}^{Ez} \quad p \in P, s=4, j \in J \quad (2.5)$$

Recovered products in a good or failing condition are transferred to valorisation centres:

$$\sum_{d \in D_j} (F_{psdj}^{PV} + \sum_{i \in I_j} F_{psdt}^{LS} + r_{psd}^{rv} + r_{psd}^r) = \sum_{k \in K} F_{psjk}^P \quad p \in P, 1 < s < 4, j \in J \quad (2.6)$$

#### Constraint on recovered product volumes directed toward processing alternatives (Figure 14):

Products transferred to valorisation centres may be directed to one or many processing alternatives:

$$Q_{p(s=2)k}^{re} + \sum_{s \leq 3} Q_{psk}^d + \sum_{s \leq 3} Q_{psk}^e = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} F_{psjk}^P \quad p \in P, k \in K \quad (2.7)$$

Product states designate upper bound on products to be valorised:

$$Q_{psk}^{re} \leq \sum_{j \in J} F_{psjk}^P \quad p \in F, s=2, k \in K \quad (2.8)$$



$$Q_{psk}^d \leq \left( \sum_{j \in J} F_{psjk}^p - Q_{psk}^r \right) \quad p \in F, s=2, k \in K \quad (2.9)$$

$$Q_{psk}^d \leq \sum_{j \in J} F_{psjk}^p \quad p \in P, s=3, k \in K \quad (2.10)$$

#### Disassembling constraints (Figure 14):

Products involved in repair correspond to finished products assigned to repair and to parts resulting from their disassembling:

$$X_{psk}^r = Q_{psk}^r \quad p \in P, s=2, k \in K \quad (2.11)$$

$$X_{psk}^r = V_{psk}^r \quad p \in M, s \in S, k \in K \quad (2.12)$$

Products available for disassembling correspond to finished product assigned to disassembling, to parts resulting from their disassembling and to product downgraded to a lower processing alternative, while downgrading their state:

$$Z_{psk}^d = Q_{psk}^d + (Z_{p(s-1)k}^d - X_{p(s-1)k}^d) \quad p \in P, 2 \leq s \leq 3, k \in K \quad (2.13)$$

$$Z_{psk}^d = Q_{psk}^d + V_{psk}^d + (Z_{p(s-1)k}^d - X_{p(s-1)k}^d) \quad p \in M, 2 \leq s \leq 4, k \in K \quad (2.14)$$

$$Z_{psk}^d = 0; X_{psk}^d = 0 \quad p \in P, s=1, k \in K$$

Products involved in disassembling may be lower or equal to products available in a given state, which assigns a given process (refurbishing or disassembling):

$$X_{psk}^d \leq Z_{psk}^d \quad p \in P, 2 \leq s \leq 3, k \in K \quad (2.15)$$

Products not directed to disassembling are equal to products assigned to the unusable state:

$$X_{psk}^d = Z_{psk}^d \quad p \in P, s=4, k \in K \quad (2.16)$$

Parts obtained from valorisation may be in various states:

$$\sum_{2 \leq s \leq 4} V_{psk}^r = h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^r \quad p \in M, p' \in F \cup A, s'=3, k \in K \quad (2.17)$$

$$\sum_{2 \leq s \leq 4} V_{psk}^d = h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^d \quad p \in M, p' \in F \cup A, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (2.18)$$

Parts obtained from valorisation may have a potential for repair or refurbishing in a maximal proportion:

$$V_{psk}^r \leq \gamma_{psk}^r h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^r \quad p \in M, p' \in F \cup A, s=2, s'=3, k \in K \quad (2.19)$$

$$V_{psk}^d \leq \gamma_{psk}^d h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^d \quad p \in M, p' \in F \cup A, s=2, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (2.20)$$

Parts obtained from valorisation may have to be disposed in a minimal proportion:

$$V_{psk}^r \geq \varphi_{psk}^r h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^r \quad p \in M, p' \in F \cup A, s=4, s'=3, k \in K \quad (2.21)$$

$$V_{psk}^d \geq \varphi_{psk}^d h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^d \quad p \in M, p' \in F \cup A, s=4, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (2.22)$$

#### Disposal constraints:

Products that are not valorised are transferred to disposal centres:

$$\sum_{k' \in K} F^{E}_{pskk'} = Q^e_{psk} \quad p \in F, 2 \leq s \leq 3, k \in K \quad (2.23)$$

$$\sum_{k \in K} F^{E}_{pskk'} = X^{re}_{psk} + X^d_{psk} \quad p \in M, s=4, k \in K \quad (2.24)$$

$$\sum_{k' \in K} F^{E}_{pskk'} = X^{re}_{psk} + X^d_{psk} \quad p \in C, s=3, k \in K \quad (2.25)$$

Products processed in disposal centres come from service and processing centres:

$$\sum_{j \in J} F^{E}_{psjk'} + \sum_{k \in K} F^{E}_{pskk'} = X^{re}_{psk'} \quad p \in P, s \in S, k' \in K \quad (2.26)$$

#### Part replacement constraints:

Parts rejected from repair are replaced by new or valorised ones:

$$X^{re}_{psk} = \sum_{i \in I} F^{N}_{p1ik} + \sum_{l \in L} F^V_{ps2lk} \quad p \in M, s=4, k \in K \quad (2.27)$$

$$X^{re}_{psk} = \sum_{i \in I} F^{N}_{p1ik} + \sum_{l \in L} F^V_{ps2lk} \quad p \in C, s=3, k \in K \quad (2.28)$$

#### Constraints on supply and demand of valorised products:

Valorised products are directed to warehouses:

$$X^{re}_{psk} = \sum_{l \in L} F^V_{p2kl} \quad p \in F, s=2, k \in K \quad (2.29)$$

$$X^d_{psk} = \sum_{l \in L} F^V_{p2kl} \quad p \in M, s=2, k \in K \quad (2.30)$$

Valorised products throughput in warehouses:

$$\sum_{k \in K} F^V_{p2kl} = \sum_{v \in V} F^V_{p2lv} \quad p \in P, l \in L \quad (2.31)$$

#### Capacity constraints:

Private vehicle fleet capacity of service centre must be respected:

$$\sum_{d \in D} \sum_{2 \leq s \leq 4} F^{PV}_{psdj} \leq b^{PV}_{sj} \quad p \in F, s \in S, j \in J \quad (2.32)$$

Valorisation centres capacity must be respected:

$$\sum_{s \in S} X^{re}_{psk} \leq b^{re}_{pk} Y_k \quad p \in P, k \in K \quad (2.33)$$

$$\sum_{s \in S} X^d_{psk} \leq b^d_{pk} Y_k \quad p \in P, k \in K \quad (2.34)$$

Warehouses capacity, in term of a maximum throughput, must be respected:

$$q_p \sum_{k \in K} F^V_{p2kl} \leq b^v_{pl} Y_l \quad p \in P, l \in L \quad (2.35)$$

#### Restriction of non-negativity:

$$Y_n \in \{0, 1\}, n \in N \quad (2.36)$$

$$F_{psnn'} \geq 0 \quad \forall (p, s, n, n') \quad (2.37)$$

$$D_{psn}, Q_{psn}, V_{psn}, X_{psn}, Z_{psn} \geq 0 \quad \forall (p, s, n) \quad (2.38)$$

### **3 Modélisation des sites, des produits et des utilisateurs finaux pour la conception d'une boucle d'approvisionnement**

L'article intitulé « *Modeling sites, resources, products and end-users for designing supply loops - Application to healthcare systems* » est inséré dans ce troisième chapitre de la thèse. Cet article sera soumis au journal « *Computers in Industry* ». Il a été réalisé avec la participation de MM Rémy Glardon et Luca Canetta, tous deux de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Lausanne, Suisse). La partie de l'article portant sur le regroupement des utilisateurs finaux en zones géographiques restreintes à l'aide de la clustérisation a été réalisée en collaboration avec M Luca Canetta.

#### **3.1 Résumé**

Dans le deuxième article, des approches de modélisation sont proposées pour la définition des paramètres clés du modèle relatif au premier article de la thèse, pour ainsi répondre aux spécificités soulevées. Ces paramètres interpellent les différentes entités du réseau : les sites (centres de récupération, centres de traitement, entrepôts) et les ressources potentiels, les produits (produits finis et pièce de rechange) et les utilisateurs finaux. Ils servent à représenter le plus fidèlement possible les flux potentiels du réseau et, par conséquent, à souligner les différentes sources de demande et de récupération face aux niveaux de performance atteignables en termes de capacités, de coûts et de niveaux de service. Les approches de modélisation sont validées à l'égard du contexte des fauteuils roulants attribués dans la province de Québec, au Canada, par la Régie de l'assurance maladie du Québec. Différents facteurs aléatoires importants sont identifiés et caractérisés dans cette démarche. Ceux-ci portent sur les volumes de récupération, de demande et de traitement, plus spécifiquement à l'égard de l'état des produits récupérés. Ces volumes sont estimés en tenant compte de catégories d'âge définies à l'égard des utilisateurs finaux et des produits en circulation. Cette approche permet d'apprécier l'influence du vieillissement de la population et de la flotte de produits en circulation, par la réintroduction des produits dans la boucle d'approvisionnement, sur les besoins pouvant se manifester au réseau. Le contexte d'opération du réseau est également caractérisé, plus particulièrement à l'égard des proportions moyennes des volumes de demande pouvant être satisfaits par des produits valorisés, du prix unitaire des produits

valorisés et, par conséquent, des coûts d'entreposage. Les paramètres utilisés pour décrire ce contexte servent à représenter quelques variations possibles du fonctionnement du réseau, notamment face aux politiques et stratégies à adopter suivant l'accessibilité aux produits valorisés dans le réseau.

## **Modelling network sites, resources, products and end-users for designing supply loops - Application to healthcare systems -**

*Marc Chouinard<sup>1,2</sup>, Sophie D'Amours<sup>1</sup>, Daoud Aït-Kadi<sup>1,2</sup>, Rémy Glardon<sup>3</sup>, Luca Canetta<sup>3</sup>*

1. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada, G1K 7P4
2. Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et en intégration sociale (CIRRIS), Institut de réadaptation en déficience physique de Québec, 525 boul. Hamel, Québec, Québec, Canada, G1M 2S8
3. Laboratoire de gestion et procédés de production (LGPP), Institut de production et robotique, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse, CH-1015.

**Abstract.** Designing logistics networks requires the modelling of many key parameters. This paper discusses the challenges raised in designing supply loops. Modelling approaches are proposed for the representation of product flows initiated by product recovery from end-users, their processing and redistribution, in addition to current product flows in supply chains. A potential network is first established by identifying potential sites and resources, and achievable performances in terms of capacities, costs drivers and service level targets. Potential product flows are then defined through the grouping of products and end-users to reduce problem size and suitably represent achievable network performances. Product families and geographical user zones are defined to forecast demand and recovery volumes. User zones are considered to represent yearly evolution and dispersions of recovery and demand volumes, notably according to demographic statistics. They are used to estimate transportation costs related to the collection of unused products and to locate the service centres which collect products. Product families and their related bills of materials are defined to represent recovery and demand volumes from disassembling and (re)assembling processes. States of recovered products are identified to represent possible proportions of product volumes to direct toward processing alternatives (repair, disassembling, disposal, etc.). The proposed methods are applied to a

specific wheelchair allocation, maintenance, recovery, processing and redistribution context in the Province of Quebec, Canada, governed and managed by a public insurer.

### 3.2 Introduction

It is common knowledge that the definition of parameters requests major efforts prior to the optimization process. It represents more than 50% of the time allocated to the design process. Parameters must be carefully chosen in order to accurately represent the studied system, while sufficiently reducing the problem size.

Designing logistics networks involves deciding on location of sites (e.g.: factories, warehouses) and on definition of their mission, notably by specifying the product types handled by sites. Decisions are made among sites and resources (human resources and equipment) defining a potential network. They generally rest on forecasted demand and capacity constraints, while meeting an economic objective function. Prior to the resolution of such models, information on potential network capacities, cost drivers and service level targets are used to group end-users in geographical demand zones and products in families. They are used to represent distinct consolidated product flows. Bills of materials are defined to detail how products are processed. They specify the relative quantities of part families (raw materials, components and assembly modules) that are required to assemble finished products. Several approaches are proposed in the literature to parameterise such models (Shapiro, 2001). These approaches are adapted here to design supply loops, which integrate the recovery, processing and redistribution of reusable product (reverse logistics activities) to current supply chain activities. They are tackled according to the specific context of wheelchair allocation, maintenance, recovery, processing and redistribution network in the Province of Quebec (Chouinard *et al.*, 2007, 2005; Chouinard, 2003), Canada, supervised by the Quebec Health Insurance Board (*Régie de l'assurance maladie du Québec - RAMQ*).

To discuss this problem and present the different proposed modelling approaches, the paper is organised as follow. First, details about the studied case are given. It presents the current operating context and the undertaken logistics network process. The considered modelling methods and results obtained for the studied case are then commented on. This leads to the

identification and characterization of randomness on network flows. Future research directions are finally presented.

### **3.3 Studied case**

#### **3.3.1 Network**

The RAMQ is a government agency which manages several health programs in the Province of Quebec, such as the mobility aids program that include wheelchairs. It currently mandates thirteen rehabilitation centres notably for wheelchair (finished products) allocation and maintenance. Since June 2000, the RAMQ requires that these centres recover unused finished products from end-users. Recovered finished products can be repaired for reallocation, and disassembled for the refurbishing of their parts. Reusable processed products (finished products and parts) are designated as valorised products. Recovered products that are not valorised are disposed. More than one processing alternative may be considered according to the different states of the products, capacities of sites and network needs for valorised products.

#### **3.3.2 Products**

Finished products are identified under three wheelchair categories: manual wheelchairs (MAW), motorized wheelchairs (MOW) and positioning bases (PB). About sixty finished product models are currently in circulation. New models are regularly introduced on the market, at a three-year interval, following the RAMQ homologation and invitation to tender process. Finished products are personalized to suit the end-user's condition by adding specialized equipment and choosing adapted parts from each of the part categories, such as leg rests, arm rests, etc. Finished products are made up of more than forty different part categories. For significant part categories, up to five different part versions may be proposed. Usually, parts of a specific finished product are not compatible with others.

#### **3.3.3 End-users**

Finished products are used free of charge by admissible end-users, according to RAMQ criteria. Final decisions regarding the selection of a finished product are made by the end-users,

according to suggestions from the occupational therapists. Replacements can occur when the condition of end-users or products has sufficiently deteriorated, again, according to the RAMQ criteria.

Depending on product availability, both new and valorised products may be used to fulfil demand. Valorised products meet lower quality standards compared to new. Some end-users are admissible to valorised finished products only, according to RAMQ criteria. Others have the alternative of valorised ones to benefit from shorter delivery delay (Vincent *et al.*, 2003). Valorised parts may be used to reduce repair costs.

Recovery generally occurs following product replacement or death of end-users, which may require collection by rehabilitation centres by means of a private vehicle fleet or with recourse to logistics service providers.

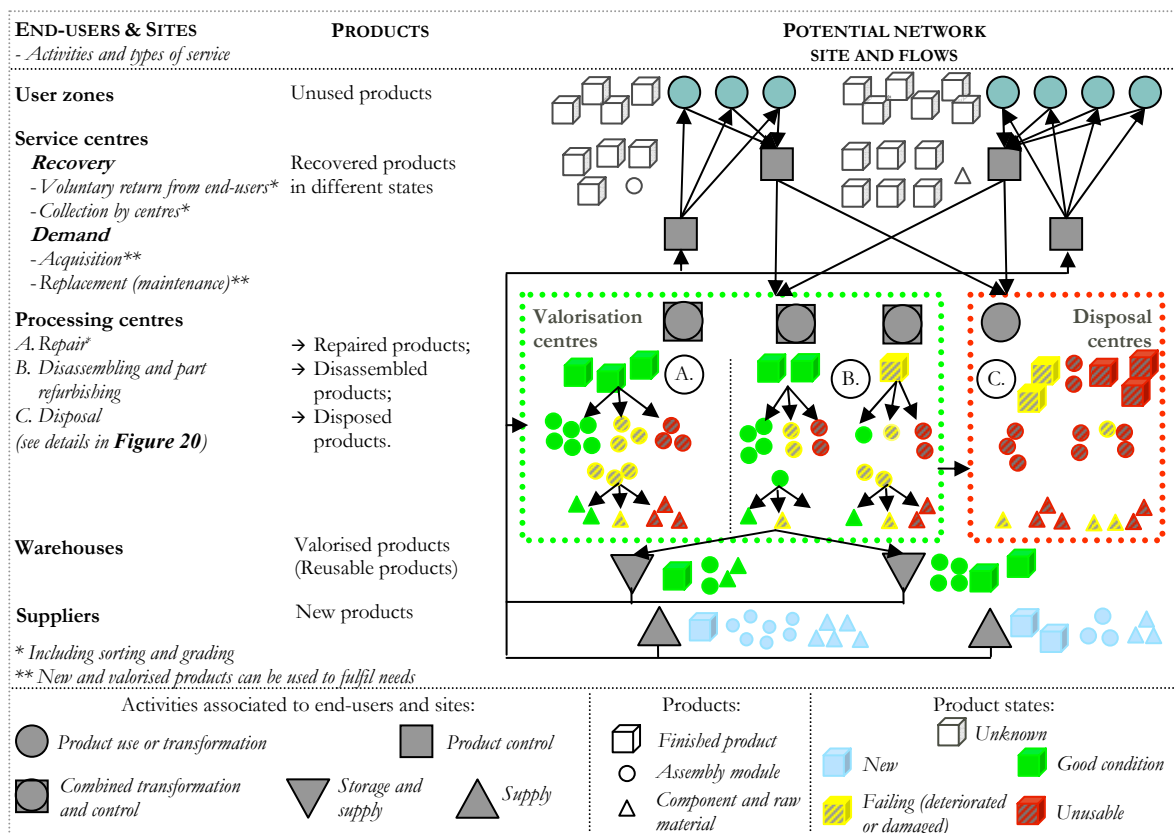
End-users generally go to neighbouring rehabilitation centres, in order to quickly access services. The Province of Quebec is divided into 18 socio-sanitary areas. Demographic statistics are made public for these areas and are detailed for smaller territory divisions, called districts or “*centres locaux de services communautaires*” (CLSC). There are more than 160 districts. Relevant data are provided by the Ministry of Health and Social Services of Quebec (MSSSQ, 2005).

### **3.3.4 Current local operating context**

The thirteen rehabilitation centres currently operate on an autonomous basis. Recovery, processing and redistribution are carried out by the centres that allocate the wheelchairs. Centres are self-financed from RAMQ lump sums. A recent study conducted by the RAMQ shows that valorisation can improve finished product availability to end-users while reducing expenditures (Côté *et al.*, 2003). For the period from June 15, 2000 to March 31, 2002, the RAMQ saved about 3.8 million dollars from a total budget of 54.3 million dollars by redistributing valorised products.

### 3.3.5 Logistics network redesign

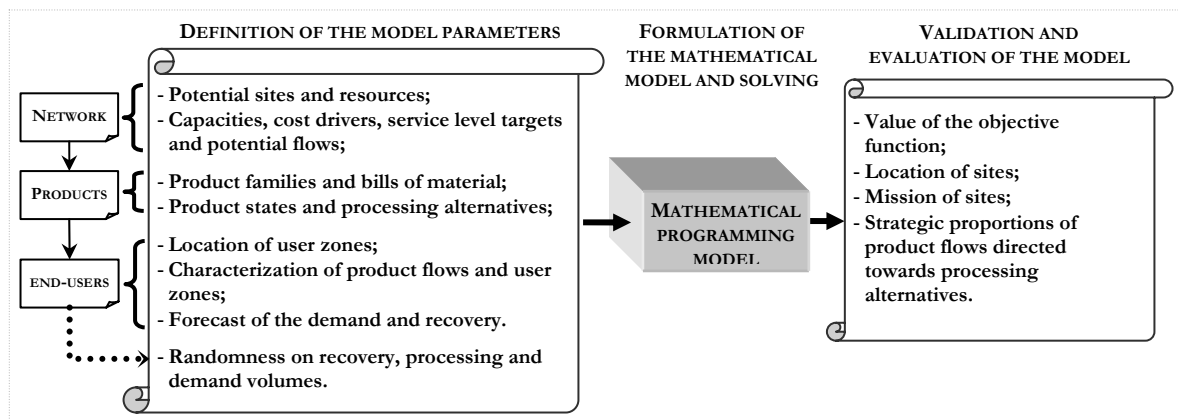
A logistics network redesign process is undertaken to locate service used for collection, processing centres and warehouses. This process is also used to redefine their mission. These location/allocation decisions are simultaneously dealt with the definition of strategic proportions of product flows to direct toward processing alternatives (**Figure 15**): finished product repair, disassembling for part refurbishing or disposal. The resulting repaired finished product and refurbished parts, designated as valorised products, are stored to partly or completely fulfil an anticipated demand. New products are delivered on demand by established suppliers. A mathematical programming model is available to deal with these decisions (Chouinard *et al.*, 2007a; 2007b), while maintaining or increasing service levels and reducing operating costs with greater availability for valorised products.



**Figure 15:** Potential network sites and flows.

The design process requires a significant effort to define key parameters. **Figure 16** summarizes a design methodology from definition of model parameters to the model solution and validation.





**Figure 16:** Methodology for designing supply loops.

### 3.4 Modelling approaches for supply loops

Modelling approaches are proposed in the literature, mainly concerning supply chains. However, different issues may be raised in modelling key parameters to design supply loops (Table 3). Some approaches from the literature and difficulties they could lead to, according to the studied context, are first identified in the following sections. Then, the tackled approach is detailed. The specificities inherent to healthcare systems and the required services to the population are also taken into account.

#### 3.4.1 Network

The definition of the potential network and flows is presented in this section.

##### 3.4.1.1 Potential sites and resources

The potential network is defined by the sites and resources, such as handling resources and transport modes, which are considered to support product flows.

Approaches used for the identification of potential sites and resources do not differ from the supply chain approaches (Punniyamoorthy and Ragavan, 2003; Brown and Gibson, 1972). All possible options are evaluated and compared, under established criteria (raw material and labour availability, proximity of end-users, etc.), to retain the ones that may best serve the organisation.

Table 3: Issues in modelling supply loops.

PARAMETERS	CHARACTERISTICS	INTEREST	ISSUES RAISED IN DESIGNING SUPPLY LOOP
Potential sites and resources	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recovery and processing centres, warehouses in addition to current supply chain sites;</li> <li>- Resources used and transportation modes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identify the potential network.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reverse logistics network may be dedicated or integrated to a current supply chain;</li> <li>- Reverse logistics activities may be partly or completely outsourced;</li> <li>- Reverse network may be centralized or decentralized;</li> <li>- Reverse logistics processes may be operated in one site or distributed between many sites.</li> </ul>
Costs drivers and service level targets	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costs (acquisition, transportation, handling, processing, holding);</li> <li>- Benefits;</li> <li>- Service level in terms of distance or product volumes;</li> <li>- Capacities and constraints.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Define the potential network flows;</li> <li>- Define achievable network performance;</li> <li>- Define limits of flows.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reverse logistics and supply chain processes may share or not same resources or resources;</li> <li>- Activities may be realized under economy of scale and scope;</li> <li>- Processing costs may depend on product state and on retained processing alternative;</li> <li>- Quality, cost drivers and service level target for valorised products may differ from new;</li> <li>- Unit product value may depend on retained processing alternative and on considered supply sources to repair products (ex.: use of valorised product at lower cost instead of new);</li> <li>- Different holding costs may be considered for recovered, valorised and disposed products, according to opportunity costs.</li> </ul>
Product families and bill of materials	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generic product function for organisation processes and end-users needs or requirements (demand, recovery and processing profile);</li> <li>- Product impacts on organisation costs and benefits;</li> <li>- Disassembling and (re)assembling sequence and involved part quantities.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Represent particular product paths through a network, which could be supplies by specific sites in response of specific needs, from end-users and network processes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Products may be used to fulfil demand from end-users or processing centres, to repair products;</li> <li>- Products may have different economical and environmental impact on network costs and benefits throughout their lifecycle;</li> <li>- New and valorised products may be substituted or not to fulfil demand;</li> <li>- Disassembling may result in products in various states;</li> <li>- Technical, commercial and environmental feasibility may occur in product recovery, processing and redistribution.</li> </ul>
Product states and processing alternatives	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Product processing alternatives (repair; refurbishing; remanufacturing; disassembling for part recovery; recycling; clean disposal);</li> <li>- Product proportions assigned to processing alternatives according to expected product volumes states.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflect product flows to be directed toward processing alternatives.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- One or many processing alternatives may be considered for recovered products;</li> <li>- Different potential value recovery may result from processing alternatives (decrease of production load, revenue from selling recovered product, use of valorised product at lower cost instead of new).</li> </ul>
User zones location	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Location of demand and recovery sources.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reflect end-users accessibility to products and services.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- User zones may represent a demand source, a recovery source or both of them;</li> <li>- User zones may be assigned to distinctive service and recovery centres;</li> <li>- Service levels may differ for demand and recovery;</li> <li>- Products may intervene within demand and recovery and require distinct service levels.</li> </ul>
Product flows and user zones characterization	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procurement conditions (sales or renting; contract terms; product type and state);</li> <li>- Recovery conditions (guarantee; unused products following users' dissatisfaction or product dysfunction; product end of lifecycle);</li> <li>- Processing conditions (product aesthetics, age and wear or technical quality);</li> <li>- Demographic statistics and product fleet characteristics.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Characterize conditions under which product flows may be initiated.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Different end-users and product characteristics may influence product flows;</li> <li>- Product flows may vary according to practices of sites.</li> <li>- Product flows may vary according to evolution and dispersion needs from end-users.</li> </ul>
Forecasts on demand and recovery volume	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demand and recovery volumes on future horizon periods according to demographic and product fleet changes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimate expected end-users needs dispersion and profile as for product and services.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- End-users needs may evolve differently according to characteristics of user zones in terms of population, end-users and product fleet.</li> </ul>
Identification of random factors	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Randomness on recovery, processing and demand volumes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Represent possible variation on product flows.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Product flows depend on product capacity to meet specific end-user needs as well on conditions of use and maintenance to which they are subjected.</li> </ul>

In this paper, all current rehabilitation centres can be considered as service and processing centres and as warehouses for valorised products. Service centres deal with needs or requirements from end-users through various service types differentiated as follow: 1) Demand: 1a) Acquisition; 1b) Replacement. 2) Recovery: 2a) Voluntary return from end-users (including replacement); 2b) Collection by centres.

All service centres ensure both allocation and maintenance, and some of them may represent potential service centres for collection. Some current service centres have modified their operations to increase their valorisation (repair and disassembling) and storage capacities, and some adjustments may still be made to a certain level according to current resources. Most centres are located in high density population areas. These centres are then considered as potential valorisation centres and warehouses. Specific third parties are considered for disposal. Product transportation between sites and end-users, specifically following recovery, may be completed by both current private vehicle fleets and logistics service providers.

#### **3.4.1.2 Achievable capacities, cost drivers and service level targets**

Site capacities, cost drivers and service level targets are defined to characterize the achievable network performance and to determine the potential network flows.

Achievable network performance parameters are generally defined through fixed and variable costs, which define the use of the potential sites and resources in a network according to expected maximum service levels and capacities. They may be estimated from past transactions or established through simulation, according to new organisation policies and strategies.

Estimating such parameters is of great concern in designing supply loops, especially for processing and holding costs. They may depend on product states and on availability of valorised products, as parts to repair finished products, which influence unit product value.

In the industry, the unit value of valorised products may be estimated as low as 20% of an equivalent new one (Fleischmann *et al.*, 2003). In a customization context, unit value depends on modifications brought to products, according to end-user's needs. Choice of valorised finished products would generally be considered when few additional changes are required, and thus avoiding unnecessary costs. Failed or unusable parts may be replaced by new or valorised

ones before or after knowing the exact needs from end-users. They would preferentially be replaced as early as possible in order to restore product appearance and functionality, and thus increase reallocation potential.

Annualised holding cost rates generally range from 20% to 40% of the stored product value. In the case where recovered, valorised, new and disposed products may be stored, different holding cost rates can be evaluated according to the related opportunity costs (Teunter *et al.*, 2000).

#### FIXED COSTS

Fixed costs for operating potential sites and resources are estimated in the studied case from data collected in current sites or given by the considered logistics service providers and third parties.

#### SERVICE LEVELS AND TRANSPORTATION COSTS

Service levels and transportation costs for private vehicle fleets are estimated based on average distances between sites and end-users. Distances are obtained from a commercial geographical information system, which take into account the transportation network. Other transportation costs are given by the logistics service providers. End-users are assigned beforehand to the nearest service centre with regard to services associated to demand. They are assigned according to the distance separating them from the centre to ensure a greater service level. End-users are assigned to service centres considered for collection while locating these centres with the use of the developed mathematical programming model. Only the links between end-users and service centres that respect the established service levels for recovery will be evaluated. Proximity of sites is also considered to define potential product flows. In particular, valorised product flows between warehouses and service centres are considered only if they ensure a shorter delivery delay compared to supply with new products.

#### PROCESSING COSTS

Disassembling and (re)assembling costs are currently standardized in valorisation centres for all part categories of the three wheelchair categories to encompass all product states (Zwingmann

and Aït-Kadi, 2006). They are used to characterize valorisation alternatives, except for disposal for which costs are given by third parties.

The valorised product unit value used is that estimated by Diallo and Aït-Kadi (2005) and Côté *et al.* (2003). It includes sorting and grading, processing and administrative costs. Failed and unusable parts are replaced on finished products before storage to restore product appearance and functionality. When only valorised parts are used, the resulting finished product unit value is estimated at about 12%, 7% and 10% of an equivalent new one, respectively, for manual and motorized wheelchairs, and positioning bases. The estimated average unit value is at about 20%, 13%, 15% respectively when both new and valorised parts are used. As for valorised parts, unit value is evaluated at about 15% of equivalent new ones. Up to 80% of these values are related to part acquisition, disassembling and (re)assembling (Côté *et al.*, 2003). The rest is related to additional repair (finished products) and refurbishing (parts) costs, which include cleaning and disinfecting (13%), and technical control (7%). This cost portion is applied as additional processing costs, with part acquisition, disassembling and reassembling costs, when repair or refurbishing occurs.

#### HOLDING COSTS

In this paper, only valorised products may be stored to fulfil the anticipated demand. The annualised holding cost rate is estimated to an average of 30% of valorised product unit value (Cloutier, 2004), including opportunity costs calculated from the repair and refurbishing costs. It is used to evaluate the holding costs in warehouses. The previously identified unit values for finished product are then used to define scenarios to evaluate the network design decisions.

### 3.4.2 Products

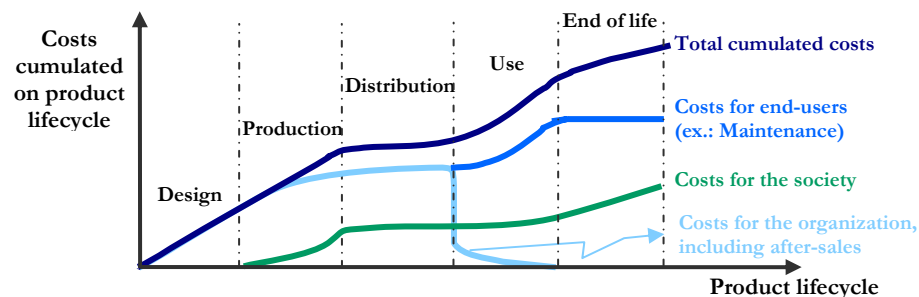
Consolidated product flows are elaborated to reduce problem size associated to network design decisions. They represent specific recovery or demand from end-users and processing alternatives which may require distinct product paths in the considered network.

### 3.4.2.1 Product families

Products are generally grouped into families to represent consolidated product flows on the basis of similarities that they may present in the considered network.

Several methods may be used to define product families: single criterion or multi-criteria approaches. A multi-criteria approach may be considered with an ABC classification using the Analytic Hierarchy Process (AHP) (Flores *et al.*, 1992) or clustering methods (Ramanathan, 2006; Ernst and Cohen, 1990). Many criteria may be used in modelling product families for supply chains (Martel, 2004): service level, seasonality, risk; production, storage and handling resources; distribution channels; means of transportation. Other relevant criteria may be required to integrate reverse logistics.

Distinct families may be defined for supply chain and reverse logistics. However, this would complicate the solving of supply loops. Products may be involved in many activities (design, production, distribution, maintenance, recovery, processing and redistribution) and may influence the network operating costs in different ways (**Figure 17**). Links may also occur between products during the processing (part replacement) and product substitutability with new or valorised products may be allowed.



**Figure 17:** Cost structure through product lifecycle (Alting, 1993)

In this paper, the grouping of products into families is made according to two main characteristics:

- Needs and requirements coming from the activities and end-users:
  - Product category or class (e.g.: electronics product, television, etc);
  - Service level, seasonality and risk related to the management of products;

- Technical, commercial and environmental feasibilities to recover, process and redistribute the products;

- Potential economic impacts on the network design decisions:

- Activities related to the network design decisions;

- Recovery and (re)distribution channel and resources used in the different activities (production, handling, etc.).

These two main characteristics are based on the ABC classification method. They are measured by volume (needs and requirements) and cost (potential economic impacts) percentages calculated from organisation data. They may be detailed, as enumerated, for a greater representation of organisation responsibilities through products lifecycle. Use of multi-criteria approaches must then to be considered.

Volume and cost percentages may be tackled simultaneously or separately according to all activities related to network design decisions (distribution, maintenance, recovery, etc). The aim is to define families which have a significant impact on design decisions. Finished product families and then their part families have to be identified in a product (re)transformation context.

Product categories are used to refine the regrouping of products. Products in a category presenting a significant impact on the network design decisions (class A according to the Pareto analysis) may be grouped in different families within their category. Other products may be grouped in a simple way according to their product categories (classes B & C) and even by grouping some categories. Products associated to a category which present less impact (class C) may be neglected or grouped with others according to the similarities or complementarities raised by transactional data.

In the studied context, volume and cost percentages related to finished products are measured with regard to the following activities: initial acquisition (value paid to the suppliers, transportation and handling); adjustments (product dimensioning and personalization); maintenance; transportation (collection of unused products); valorisation (repair). As for parts, activities only refer to: initial acquisition (value paid to the suppliers, transport and handling). Disassembling, (re)assembling and refurbishing costs are not detailed in the database according

to the involved parts. An ABC classification of products and product categories is carried out with regard to these activities, while considering common service levels, resources and recovery and (re)distribution channel for all products.

The ABC classification allows the validation of the current product categories and contributes to target those which have a significant impact on the network design decision. Three finished product families and approximately five part families for each of these families are thus defined (**Figure 18**). No specific models are grouped to form families, since products regularly change and most of the costs are common to all products in a given category. Categories are not grouped with others since none of them are complementary to others. Such a definition supposes that all products in a family are substitutable. Although reality is somewhat different, this approach considers more representative product flows, initiated to fulfil a given need, which leads to fairly similar economical impacts.

The design of a new supply loop may require the use of lifecycle analysis techniques, such as Life Cycle Cost (LCC) or the Life Cycle Assessment (LCA) (Wenzel *et al.*, 1997), to get a detailed portrait of impacts of product lifecycle on organisation costs and benefits. Future products may be integrated into one of the current families according to anticipated similarities or be used to form new families.

#### **3.4.2.2 Bill of materials**

The bill of materials (BOM) is used to define the disassembling and (re)assembling sequence of product families, and the relative quantity of involved part families.

Srinivasan and Moon (1999) explicitly tackle bills of materials (Martel, 2005) at the time of definition of part families, specifically in an inventory control context. Part families are defined, each finished product considered separately, with a clustering method. A heuristics is proposed to consider the network structure, represented through established sites.

To adapt this approach to supply loop modelling, finished product families have to be defined first. The heuristics now has to consider the network structure represented through potential sites.



As proposed by Fandel and Stammen (2004), disassembling feasibilities (section 3.4.2.1) can be presented through binary parameters in the BOM (Figure 18).

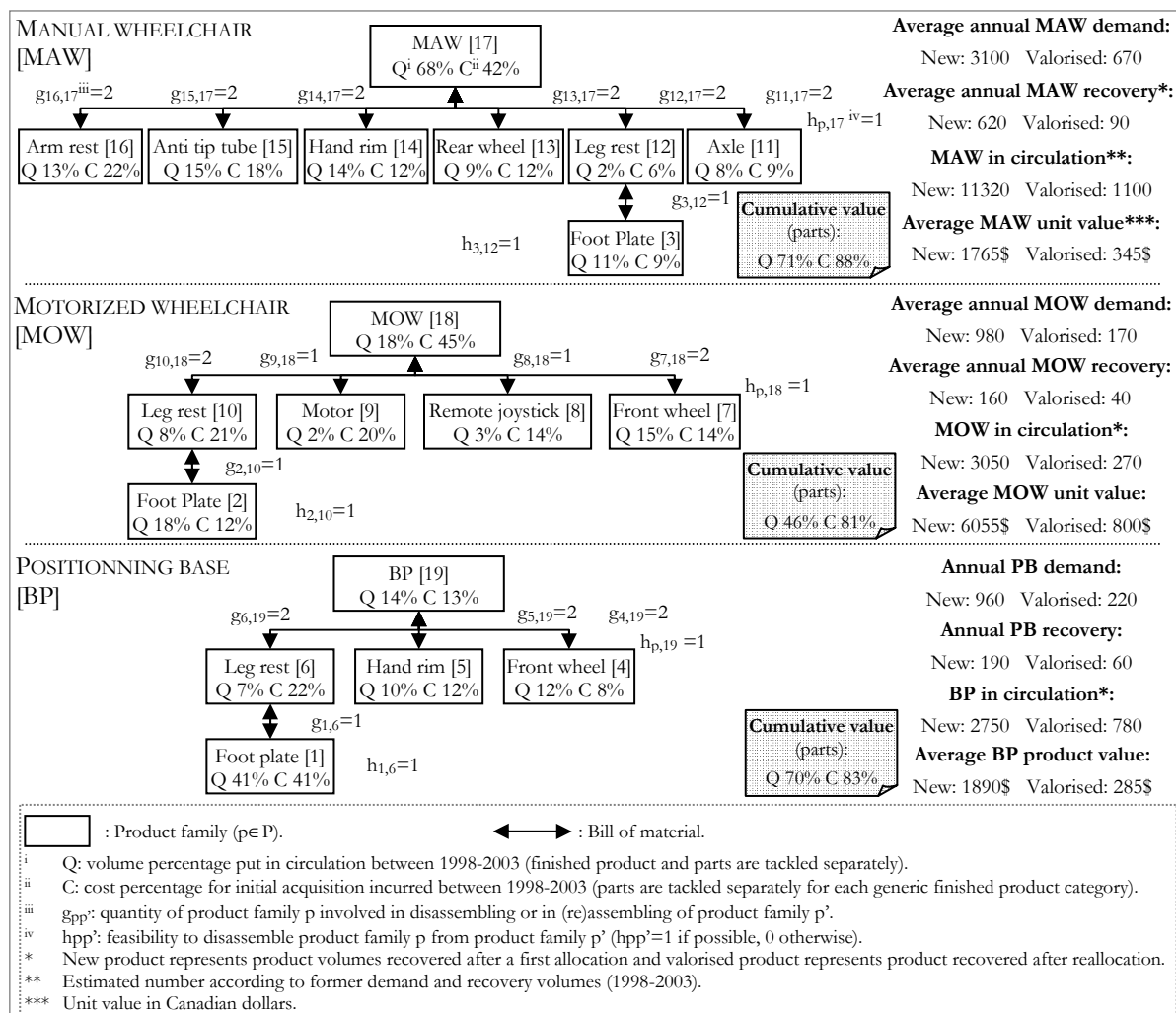
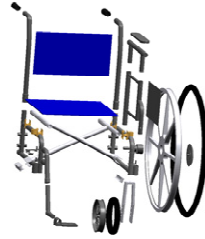


Figure 18: Bills of materials and product families resulting from an ABC classification.

For the studied context, the bills of materials are defined by the links between product categories, which now refer in a restricted number to product families (Figure 19). No technical or environmental constraint is related to the disassembling and reassembling sequences. Parts may be replaced by either new or valorised ones.



**Figure 19:** Exploded view of most manual wheelchair generic parts.

### 3.4.2.3 Product states and processing alternatives

Product states are used to set proportions of product flows to direct to processing alternatives.

Many recovery, processing and redistribution strategies may be considered by organisations. Three steps are generally required to define such strategies (adapted from Teunter, 2006): 1. Determine all possible disassembling and (re)assembling sequences and processes; 2. Determine all possible recovery, processing and redistribution alternatives, and the associated costs and revenues, including those of their related parts; 3. Determine optimal recovery, processing and redistribution strategies.

Several authors deal with the first and third steps with a view toward process planning (Inderfurth and Teunter, 2001). At a strategic level, especially for designing supply loops, some approaches are suggested to define recovered product flows to direct toward processing alternatives.

Proportions of product flows to direct toward processing alternatives are generally fixed a priori. Krikke (1998) proposes a method to determine such proportions. A dynamic stochastic programming algorithm is used to fix proportions while maximizing processing profits, without explicitly considering network needs or requirements and capacities. It rests on conditional recovery probabilities established according to historical data of the recovered product states. Teunter (2006) proposes an adapted version of this method. It considers several disassembling processes (e.g.: destructive or non-destructive) and allows partial product disassembling. Conditional recovery probabilities are established according to product states and disassembling processes.

Fleischmann (2001) uses a lower bound on recovered product volumes to dispose and which allows the model to fix the optimal proportions of product to remanufacture, in an as-new state.

Barros *et al.* (1998) and Listes and Dekker (2005) refer to different kinds of recovered product volumes, which may be considered as recovered product volumes in different states. Then, a given recovery, processing and redistribution strategy is fixed for each of these states.

In this paper, five states are used to define product flows:

1. Unknown:  $s = 0$ ;

2. New:  $s = 1$ ;

3. Good condition:  $s = 2$ :

Which implies that the products can be repaired (finished products) or refurbished (parts) and thus lead to valorised products;

4. Deteriorated or damaged:  $s = 3$ :

Which implies that the products can be disassembled;

5. Unusable:  $s = 4$ :

Which implies that the products are to be disposed.

Products are recovered in an unknown state ( $s = 0$ ). The states are determined after a sorting and grading step ( $s = 2, s = 3$  &  $s = 4$ ) at the level of service centres. It is considered that no new products ( $s = 1$ ) are recovered. Unusable products ( $s = 4$ ) are transferred to disposal centres. Other products ( $s = 2$  &  $s = 3$ ) are transferred to valorisation centres. Portions of these products may be directed toward one or many processing alternatives. Processing alternatives may be considered according to product states (**Figure 20**).

In valorisation centres, finished product in good condition ( $s = 2$ ) can be repaired. Their failed and unusable parts ( $s = 3$  &  $s = 4$ ) are disassembled and replaced. Parts in good condition ( $s = 2$ ) are refurbished and cleaned before reassembling. Finished products and parts in good condition or failed ( $s = 2$  &  $s = 3$ ) can also be disassembled. Parts in various states ( $s = 2, s = 3$  &  $s = 4$ ) can thus be recovered. Only parts in good condition ( $s = 2$ ) can be refurbished. Resulting repaired and refurbished products are designated as valorised products.

Valorised products ( $s=2$ ) are then transferred to warehouses. Other products from valorisation centres ( $s=3$  &  $s=4$ ), notably those that cannot be further disassembled in repair alternative to replace unusable parts, are transferred to disposal centres.

Two sets of proportions are used to define the product states in the network and to direct product flows toward processing alternatives. The first set of proportions is used to define products in good condition and thus upper bounds for flows to direct toward repair or refurbishing. The second specifies unusable products and thus lower bounds for flows to direct toward disposal. The proportions of flows to direct toward disassembling are obtained according to these two bounds. Products may be directed toward a lower processing alternative according to both network needs and capacities.

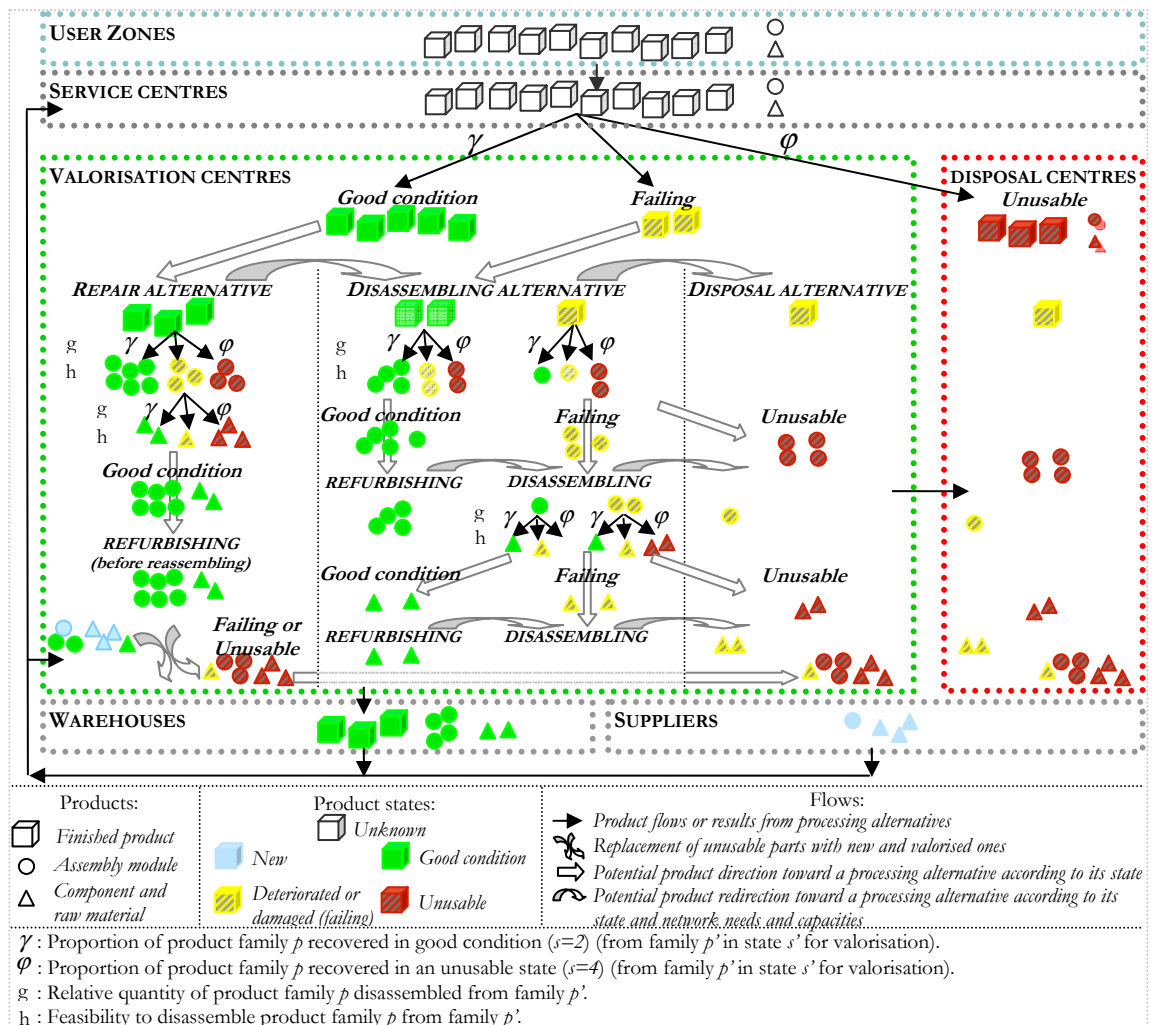


Figure 20: An example of product flow directed toward processing alternatives.

The definition of proportion is based on historical observation of states of finished products made at the time of sorting and grading (2000-2003), on both a monthly and yearly basis. No clear evolution of these proportions has been noted over time for each finished product family. The variation of the proportions has been represented by converting the monthly proportions in probability distribution functions with use of a commercial statistical analysis tool. The Gamma and Weibull distribution best represents the wheelchairs context in the Province of Quebec for the three finished products family, with a goodness of fit around 80%. Since no data have been collected concerning parts, probability distribution functions are derived from proportions of the related finished product family, while representing the probabilities of recovering parts in the different states, according to the state of the disassembled product (section 3.4.4).

### **3.4.3 End-users**

The demand and recovery volumes from end-users are located. Each service type (section 3.4.1.1) they initiate is then differentiated according to the characteristics of the population, end-users and the applicable products in circulation. Finally, demand and recovery volumes associated to each service type are forecasted to reflect their evolution with these characteristics. Two error types are considered in this approach:

- Positioning errors (Hillsman and Rhoda, 1978):
  - Accuracy of the estimated transportation cost for aggregated end-users compared to the transportation cost met when all end-users are served individually;
  - Inappropriate allocation of end-users to sites and the erroneous location of these sites due to aggregated demand (recovery) volumes rather than individuals.
- Demand (recovery) forecast errors:
  - Accuracy of forecasts due to data aggregation, with the use of an inappropriate number of data. This would not adequately represent each service type that evolves distinctly according to the characteristics of the zones.

### 3.4.3.1 User zones location

Geographical areas designated as user zones are considered to locate consolidated recovery and demand volumes, in order to reduce the size of the problem. They serve to estimate service levels, according to distance between end-users and service centres, and are used for the location of these centres for collection (section 3.4.1.2). They are also used to estimate transportation costs, occurring using different means of transport for collection. User zones are defined according to current end-users identified with historical data (1998-2003).

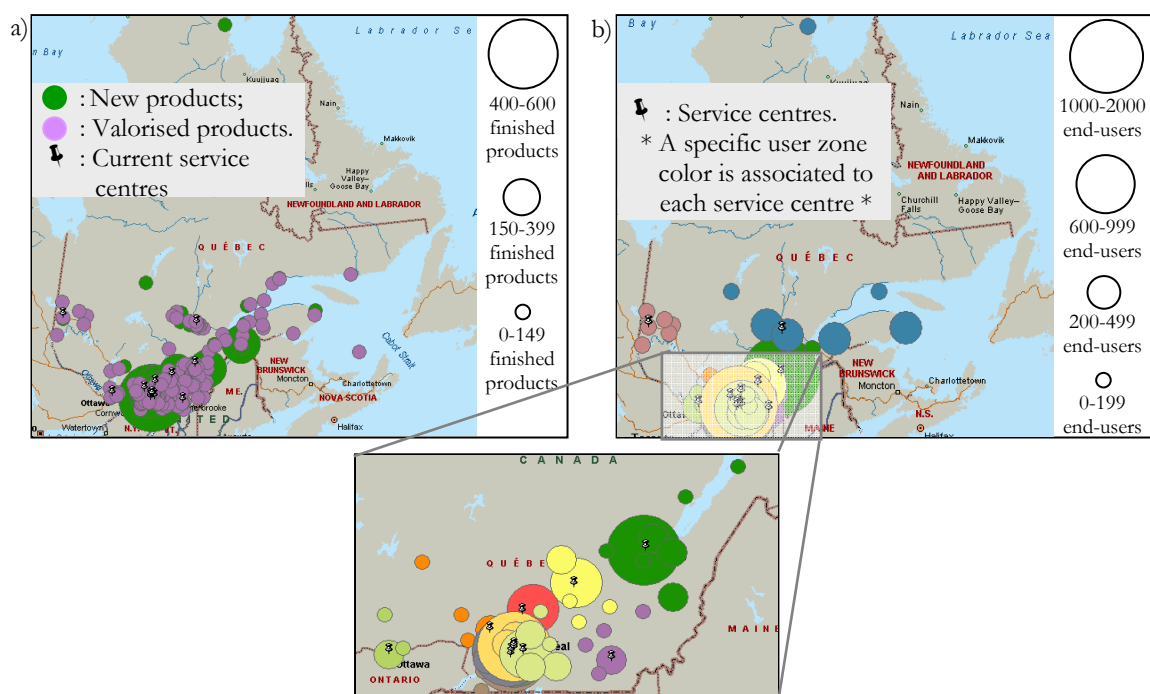
User zones are usually defined using clustering methods. Guidelines are given in the literature to control location, size and number of zones (Ballou, 1994, 1992; House and Jamie, 1981). They notably suggest the number of zones to define and the minimal proportion of total demand to distribute between each of them. A zone centroid is then calculated by weighting end-user's latitude and longitude coordinates according to its demand proportion (demand associated to an end-user coordinate/total demand in the considered user zone).

Attention must be focused on the fact that zones may represent both recovery and demand, which may or not be considered into distinct zones. They may even be distinguished according to the service type initiated (replacement, collection, etc.) and the involved product families, which are both characterized by distinct service level targets and cost drivers.

In this paper, user zones are used to represent both demand and recovery for all product families. The service levels are known for all service types associated to demand and recovery and are the same for all product families. The zones are defined and assigned to a specific service centre on the basis of service levels associated to demand, but can be assigned to a distinct service centres with respect to service levels associated to recovery (section 3.4.1.2).

The clustering method advocated in this work uses successively Kohonen Neural Networks, also called Self-Organising Map (SOM), and K-means clustering algorithm (Canetta *et al.*, 2005). Groupings are made according to the coordinates of the end-users, and distance between them and current service centres. User coordinates are obtained from a commercial geographical information system according to the first three characters of their postal code. Several users may thus have the same coordinates.

In this approach, data are initially standardized using the W-normalization index (Milligan and Cooper, 1988). Ten user zones are imposed as a maximum for the algorithm for each service centre, following a study completed by Ballou (1994). Löbner's performance index is used to evaluate quality of groupings (Löbner, 1996). This index is calculated according to the number of clusters. A suitable number of zones are defined according to the greatest relative progress of this index. Sixty-two user zones are defined for the studied case, which represent between three to eight user zones for each current service centres as regard demand (**Figure 21**).



**Figure 21:** a) New and valorised products in circulation; b) User zones locations.

The centroid of zones is calculated by weighting coordinates of end-users with the proportion of products in their possession (number of finished products in circulation associated to an end-user coordinate/total number of finished products in circulation in the considered user zone). It could also be calculated by weighting the coordinates of the end-users with the proportion of the population possessing wheelchairs (population possessing wheelchairs associated to an end-user coordinate/total population in the considered user zone). The centroid is calculated for all finished product families. Both approaches underline in certain ways the potential demand and recovery importance of each end-user in a zone, by moving the centroid closer to end-users with high amounts of products in circulation. However, it does

not consider demographic changes (moving, death, etc.). It will be tackled through the forecast of the demand and recovery volumes (section 3.4.3.3).

### 3.4.3.2 Characterisation of product flows and user zones

Various factors influencing recovery, processing and demand volumes are identified in this section. They are used to determine, on a yearly basis, the operating context of sites and the characteristics of the defined user zones in term of population, end-users and products in circulation. Thus they characterize the conditions under which product flows may be initiated. They are determined according to former demand and recovery volumes (1998-2003), sorting and grading data (2000-2003) and demographic statistics (MSSSQ, 2005).

Characterization of product flows is generally obtained through data visualization and statistics. Scatterplot and bivariate statistics, such as correlation coefficients, may be used to this end (Makridakis *et al.*, 1998).

#### IDENTIFICATION OF INFLUENCING FACTORS

Several factors influencing recovery, processing and demand volumes have been identified for the studied context in the previous sections. They mainly refer to products and service types which initiate demand and recovery. Others, related to end-users, are tackled here. These factors are used to identify whether products and end-user characteristics may affect product flows, notably with population ageing and prolongation of the product lifecycle. Correlation coefficients  $[R_{XY}]$  are calculated for each finished product family to represent how end-user's age and gender or product state at the time of allocation and age at the time of recovery  $[X]$  may influence recovery, processing and demand volumes  $[Y]$ .

Recovery, processing and demand volumes are correlated with the characteristics of end-users and product families (**Table 4**). User's gender brings little variation to the observed values. Correlation is lower for demand of valorised finished products, since allocation depends on RAMQ criteria. They are mainly allocated to less active people and, consequently, to older people. Correlation is also lower for product replacement, which depends on the RAMQ cost limits as for product adjustment. End-user age influences recovery, especially following death which represents a great proportion of collection done by current service centres (MAW $\cong$ 60%,



MOW $\cong$ 30% and BP $\cong$ 50%). Recovery is characterized by the inverse relation between product age and recovery volumes. Recovery volumes are higher for newly allocated products.

Average duration of use (time between allocation and recovery) is estimated at about four years for MAW and MOW, and two and a half years for BP. The average product lifecycle (time between the first allocation and its disposal) is estimated at about seven years for MAW and MOW and five years for BP. Product volumes directed toward processing alternatives are also correlated with product age. As product age increases, the proportions of product directed toward repair and disassembling decrease and proportions of product directed toward disposal increase. Currently, disassembled products are mainly used to repair products in valorisation activities. Contrarily to MAWs and MOWs, BPs are generally allocated to less active people and require fewer adjustments to restore products appearance and functionality after recovery. Part replacements associated to BPs thus increase according to product wear and age, and require parts of the same generation. Consideration of product age, in addition to end-user age, disaggregates the data too much, so that both influences cannot be evaluated simultaneously.

**Table 4:** The correlation coefficient [ $R_{xy}$ ] between: a) user age and demand volumes, for acquisition and replacement, according or not to user gender; b) user age and recovery volumes, according to the product state at time of allocation; c) product age and recovery volumes, according to the recovery motivation; d) product age and recovery volumes, according to the product state at time of allocation; e) product age and processing volumes.

a)

PRODUCTS		CORRELATION COEFFICIENT [ $R_{xy}$ ]												
		DEMAND - Acquisition						DEMAND - Replacement						
		MAW		MOW		BP		MAW		MOW		BP		
END-USERS	Age	Men & Women	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.
		Men	0.44	0.28	0.33	0.09	0.53	0.40	-0.30	0.20	0.03	0.29	-0.26	0.25
		Women	0.49	0.39	0.33	0.10	0.49	0.49	-0.05	0.27	0.18	0.22	0.36	0.34

b)

PRODUCTS		CORRELATION COEFFICIENT [ $R_{xy}$ ]					
		RECOVERY					
		MAW		MOW		BP	
END-USERS	Age	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.
			0.48	0.41	0.38	0.30	0.52

\* Database used does not distinguish the recovery case.

c)

RECOVERY MOTIVATION		CORRELATION COEFFICIENT [ $R_{xy}$ ]		
		RECOVERY		
		MAW	MOW	BP
Death	Product age	-0.66	-0.73	-0.73
Unused	Product age	-0.66	-0.47	-0.58

\* Data from a database centred on product sorting and grading, which does not distinguishes product state at time of allocation.

d)

PRODUCTS	CORRELATION COEFFICIENT [R <sub>XY</sub> ]					
	RECOVERY					
	MAW		MOW		BP	
	New	Valo.	New	Valo.	New	Valo.
Product age	-0.76	-0.48	-0.76	-0.65	-0.62	-0.64

\* Estimated product age according to the collected date of first allocation, which does not distinguish the recovery case (end-user death or once product unused, which include replacement or voluntarily return).

e)

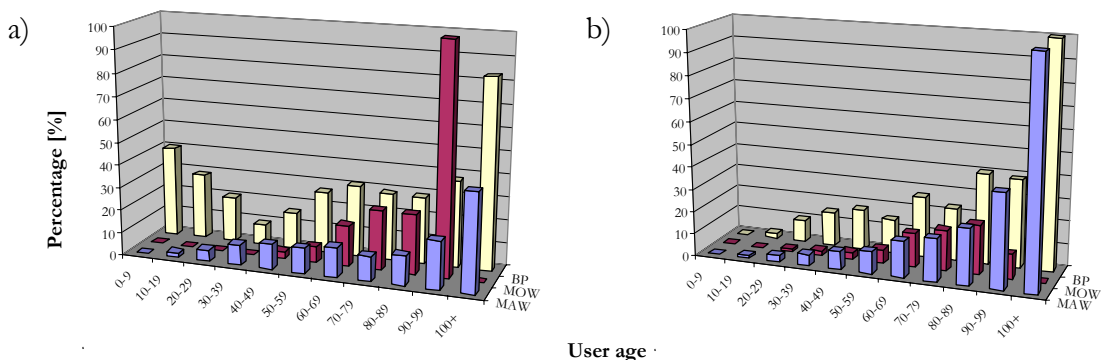
PRODUCTS	CORRELATION COEFFICIENT [R <sub>XY</sub> ]								
	PROCESSING - Repair			PROCESSING - Disassembling			PROCESSING - Disposal		
	MAW	MOW	BP	MAW	MOW	BP	MAW	MOW	BP
Product age	-0.95	-0.87	-0.90	-0.81	-0.66	0.46	0.92	0.93	0.66

According to such information, user age and product age are used to reflect the evolution of demand and recovery, and processing volumes respectively. User gender and product state at time of allocation are considered at a later stage to evaluate differences in practices of network sites.

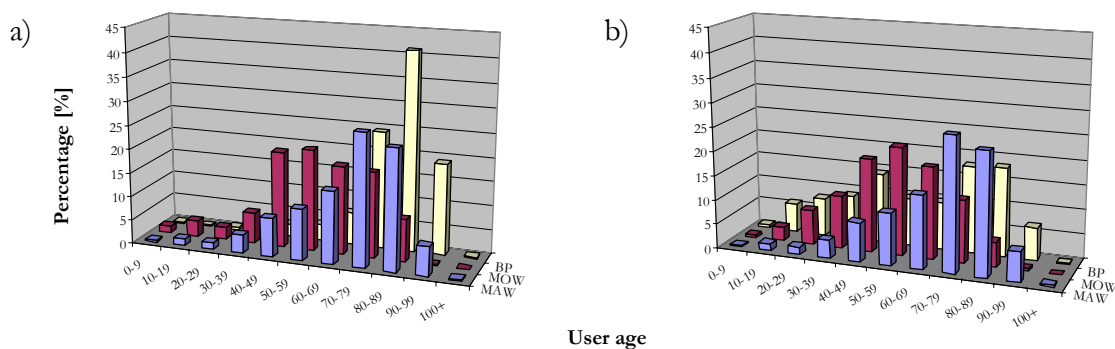
No seasonality has been clearly observed and the correlation coefficient seems to vary little over the years.

#### CHARACTERIZATION OF PRACTICES IN SERVICE, RECOVERY AND PROCESSING CENTRES

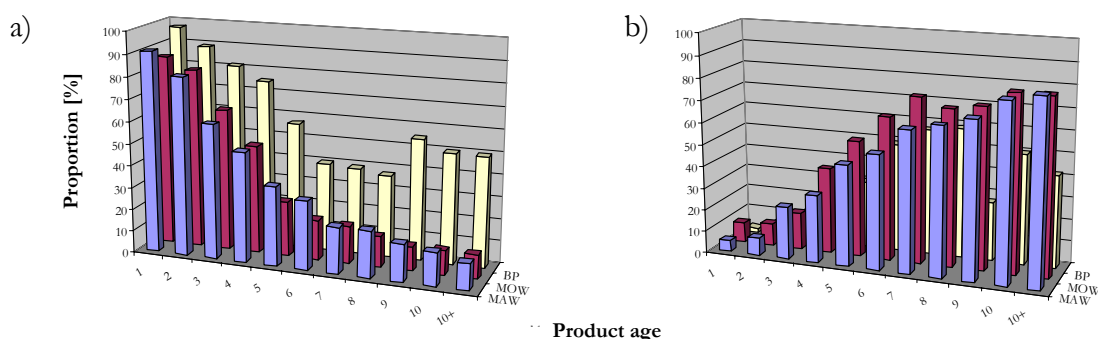
The identified influencing factors are used to denote practice differences between sites. Practices of sites are distinguished through proportions for specific combination of influencing factors. The following figures (**Figure 22** to **Figure 25**) present the yearly average of recovery, processing and demand proportions obtained from all current service centres and a specific centre, used in later examples. End-user ages are presented here using a ten year age bracket.



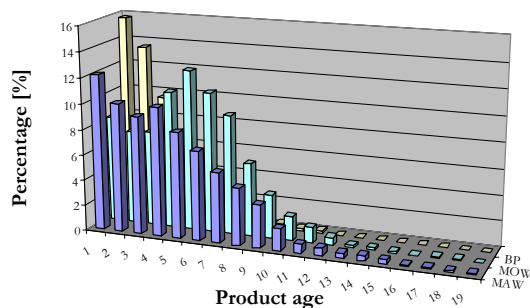
**Figure 22:** Percentage of total demand satisfied through valorised finished products for each ten year end-user age bracket: a) Acquisition; b) Replacement.



**Figure 23:** Percentage of the total demand per a ten year end-user age brackets: a) Acquisition; b) Replacement.



**Figure 24:** Proportion of recovered finished product directed toward processing alternatives according to product age: a) Repair; b) Disposal.



**Figure 25:** Percentage of the total recovered finished product according to product age.

Such information may be useful to identify if the proximity of suppliers and confidence of the employees in valorised products may influence practices of sites. Average proportions of valorised product allocated in service centres vary between 2 and 32 %. The average for the Province of Quebec is about 16% ( $MAW \cong 12\%$ ,  $MOW \cong 12\%$ ;  $BP \cong 26\%$ ). It varies according to the end-user age bracket. However, proportions of end-users whom are only admissible to

valorised products cannot be obtained from historical data. No conclusion may thus be drawn on the will of current service centres to allocate valorised products. As for proportions of finished products directed toward processing alternatives according to their states, they are globally known for all current service centres put together, but are individually known for only some centres, which use a sorting and grading decision support tool. This tool has been developed to reflect the criteria considered by employees in sorting and grading activities. Differences have been noticed according to finished product ages between centres that use or not this tool. However, average proportions between centres vary little, by considering product age bracket (see the following section) or without considering product age (example for Repair: MAW $\cong$ 54%, MOW $\cong$ 42%; BP $\cong$ 81%). Such results show that current service centres have similar practices as for sorting and grading.

#### END-USER AND PRODUCT AGE BRACKETS

In order to facilitate the later forecast stage, end-users and finished product age brackets are defined.

An empirical rule is used to define appropriate end-user age brackets. Five age brackets are defined: 0-39; 40-59; 60-69; 70-79; 80+. Each bracket accounts for about 20% of current end-users (10% if considering gender). Since a maximum of 8 user zones are associated to current service centres, a minimum of about 1% (10%/8 zones) of end-users is then distributed to related zones for each age-gender combination. This value is arbitrary, but ensures a minimum of data for the later forecast stage and then to evaluate the related errors.

Product age brackets for finished product families are defined according to distinctive stages of product lifecycle, which present specific proportions of recovered products (**Table 14**) and of products directed toward processing alternatives (**Table 13**). Three product age brackets are retained here: 0-2; 3-6; 7+. The first bracket is related to finished product families recovered inside the average half duration of use by end-users. The second bracket is related to families recovered before the average lifecycle and after the average half duration of use. The last age bracket is specifically related to finished product families recovered after the average lifecycle. The average durations of the three finished product families are considered here.

End-users and product age brackets may be used to present proportions as shown in previous figures (**Figure 22** to **Figure 25**).

#### CHARACTERIZATION OF USER ZONES

The retained influencing factors are used to determine the characteristics of the user zones in terms of population, end-users and products in circulation. Such characteristics may be measured through the numbers or proportions of end-users and products in circulation that meet the considered influencing factors on a yearly basis. They may reflect the evolution and dispersion of the demand and recovery volumes.

**Table 5** presents the proportions of end-users and population having wheelchairs, without consideration of the families, according to their age and gender. Demographic statistics are obtained according to district codes (section 3.3.3) assigned to end-users in zones. This is an estimate, since the district codes covered by zones were not validated at the time of this work, but reflects the reality as close as possible. The number of products in circulation is estimated according to demand and recovery volumes occurring between 2000 and 2003.

**Table 5:** User zone characteristics measured by a) proportions of end-users and b) population having wheelchairs for a specific service centre.

a)

Age	PROPORTION OF CURRENT END-USERS WITH WHEELCHAIR									
	Men					Women				
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Total	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Total
0-40	0.54%	1.09%	1.16%	3.29%	6.08%	0.49%	1.24%	0.87%	2.30%	4.90%
40-60	0.62%	1.34%	1.34%	5.24%	8.53%	0.74%	1.71%	1.68%	5.17%	9.30%
60-70	0.59%	1.16%	0.59%	3.29%	5.64%	0.30%	0.96%	0.79%	4.30%	6.36%
70-80	1.71%	1.36%	0.96%	6.95%	10.98%	0.84%	2.03%	1.61%	8.33%	12.81%
80 +	1.48%	1.53%	0.45%	5.98%	9.45%	1.16%	5.39%	1.73%	17.68%	25.96%
<b>Total</b>	<b>4.95%</b>	<b>6.48%</b>	<b>4.50%</b>	<b>24.75%</b>	<b>40.68%</b>	<b>3.54%</b>	<b>11.33%</b>	<b>6.68%</b>	<b>37.78%</b>	<b>59.32%</b>

b)

Age	PROPORTION OF POPULATION WITH WHEELCHAIR									
	Men					Women				
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Total	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Total
0-40	0.07%	0.08%	0.04%	0.27%	0.10%	0.07%	0.09%	0.03%	0.20%	0.08%
40-60	0.15%	0.19%	0.09%	0.80%	0.26%	0.18%	0.23%	0.11%	0.72%	0.28%
60-70	0.63%	0.57%	0.16%	1.49%	0.63%	0.33%	0.44%	0.20%	1.71%	0.66%
70-80	3.09%	1.03%	0.42%	4.42%	1.92%	1.30%	1.19%	0.56%	4.04%	1.76%
80 +	7.80%	3.66%	0.67%	12.27%	5.37%	3.25%	6.66%	1.30%	16.89%	7.32%
<b>Total</b>	<b>0.37%</b>	<b>0.26%</b>	<b>0.09%</b>	<b>1.08%</b>	<b>0.37%</b>	<b>0.27%</b>	<b>0.45%</b>	<b>0.13%</b>	<b>1.54%</b>	<b>0.52%</b>

The characteristics of the user zones vary significantly. Some zones are in rural areas, which are confronted with an exodus of young people toward urban areas. Others may include healthcare institutions. Some zones, such as zone 40 in **Table 5**, present a higher density of the population with a loss of mobility that may require specific services.

### 3.4.3.3 Forecast of the demand and recovery volumes

Demand and recovery volumes are forecasted for each user zone according to changes that occur in the characteristics of user zones in terms of the population, end-users and products in circulation.

Different forecast approaches are proposed in the literature. Some deal specifically with recovery. They use the probability of a recovery after a demand (Toktay *et al.*, 2004; Toktay, 2003; Kelle and Silver, 1989). In healthcare systems, forecasts are often based on demographic statistics. Forecasts are done on incidence rates, rather than on a specific number of occurrences. Incidence rates represent the ratio between the number of occurrences and the size of the associated population over a given horizon period, according to the characteristics of the user zones. Forecasts may be made through projections based on age-period-cohort models, Bayesian age-period-cohort models or functional data analysis (Erbas *et al.*, 2005). Occurrences for future periods are then calculated by multiplying the forecasted rates with the predicted size of the associated population for the same period. The predicted size of a population is usually calculated by government forecasting agencies, with use of sophisticated models (Ahlburg, 1987).

For long-term forecasts, used in the design of logistics networks, simple models based on time series are generally appropriate (Makridakis *et al.*, 1998). The forecasted volumes are often considered as deterministic. When stochastic models are taken into account, random factors may be represented as dependant, through discrete scenarios, or as independent with the use of specific distribution function. Normal or Lognormal distributions usually represent random demand. In designing supply loops, the randomness of demand and recovery are considered through a limited number of discrete scenarios (Listes, 2007; Listes and Dekker, 2005).

For the studied case, the forecasts of the demand and recovery volumes for finished products are made by considering the previously identified influencing factors and consequently the characteristics of the user zones. They are evaluated separately for each service type, except for replacement. Forecasts on constitutive part families are not detailed in this paper, but are established with traditional simple linear regression.

For the sake of comparison, forecasts ( $f_i$  and  $F_i$ ) on a yearly basis ( $t$ ) deal here with both demand and recovery volumes ( $F_i=[D, R]$ ) and rates ( $f_i=[d, r]$ ) (rate = volume/size of the associated population or number of products in circulation for a given set of characteristics). Since the products in circulation cannot be completely deduced from historical data, the characteristics of the user zones are only defined according to the size of the associated population. The population is characterized by the Ministry of Health and Social Services of Quebec (MSSSQ, 2005) according to the demographic statistics given for each district on an annual basis until 2026. Forecasts are made by considering time ( $t$ ) or the size of the associated population ( $p$ ) as independent variable: [ $f_i(t), F_i(t)$ ] (volume and rate); [ $F_i(p_i)$ ] (volume).

The forecasts of the demand and recovery volumes deal with each finished product family and service type separately, except for replacement. They were carried out by separating, or not, sections of data that are set according to the age and gender of end-users, age of products at the time of recovery and state at the time of allocation (new and valorised), which thus reflects different combinations of identified influencing factors.

The forecasts are calculated for both user zones and service centres. Two forecasting strategies are thus considered in this paper. One consists in establishing forecasts at the level of current service centres, which are then distributed to each of their related zones. The second strategy consists in establishing forecasts directly at the level of user zones.

Forecasts are done using simple linear regression models. A specific model is used for each considered zone and site, each service type, each product family and each combination of influencing factors (characteristics of end-users and products in circulation). These approaches are illustrated below for the case of a specific service centre for manual wheelchairs.

#### *First strategy*

The forecasts are first determined at the level of the current service centres and are then distributed to their related user zones, while considering the characteristics of zones. The distribution is made proportionally to the number of end-users and products in circulation for a given set of characteristics that correspond to the influencing factors considered for the

forecasts (forecast factors) and, depending to the approach, to differentiate the forecasts (specification factors). The considered approaches are summarized in **Figure 26**.

Proportions used to differentiate the forecasts according to the specification factors are assumed to be the same for all time periods (2000-2003). They are estimated as an average annual value. The numbers of end-users and products in circulation for a given set of characteristics are those previously determined according to the historical data for the latest time horizon period (2003).

An example of demand forecasts for acquisition (approaches 1.1 and 1.2), with time set as an independent variable ( $d_i(t)$ ), is presented in **Table 8**. It represents the average of the forecasts between 2000 and 2003. The results show the sum of the demand for new and valorised products and all end-user characteristics in the zones.

#### *Second strategy*

Forecasts are directly calculated at the level of the user zones, by considering the characteristics of the zones. The considered approaches are summarized in **Figure 26**.

The results for the acquisition and collection of manual wheelchairs obtained from a specific service centre are presented in **Table 8** to **Table 10**. They relate to the forecasts with time ( $D_i(t)$ ,  $R_i(t)$ ,  $d_i(t)$ ) or the size of the associated population ( $D_i(p_i)$ ) as an independent variable. The results present the sum of demand for new and valorised manual wheelchairs, without distinguishing the end-user and product characteristics. Rates have been converted to volumes by multiplying them with the appropriate size of the associated population.

#### DISCUSSION ON FORECAST ERRORS

The observation of the mean absolute errors (MAE) shown in **Table 8** to **Table 10** indicates that the consideration of the user zones and service centres affects the forecast errors. The errors are generally higher in zones because of greater data dispersion. Errors in zones are reduced by establishing forecasts directly at the level of zones, thus reflecting their specific evolution, rather than by distributing forecasts of current service centres to their related zones.



Forecasts established on disaggregated data according to the characteristics of the population, end-users and products in circulation also lead to increased forecast errors (not represented in the tables). Forecast errors are accentuated for demand of valorised products and recovery. This may suggest that the stationary state has not yet been reached. Forecasts for such situations are also affected by the fact that few data are currently available for some service centres and user zones.

Forecasts on demand and recovery rates or with the use of the size of the associated population ( $p$ ) as an independent variable bring few changes in errors.

Forecasts detailed and realized according to the characteristics of the user zones in terms of population, end-users and products in circulation may bring useful details on the evolution and dispersion of the demand and recovery volumes. They may be of great interest to evaluate different policies and strategies, notably for sorting and grading according to product age and admissibility of end-users to valorised product through age categories. Such forecasts rest however on a high amount of data over several horizon periods.

Gains in accuracy obtained from the application of one of the suggested forecast approaches cannot be determined at this point. Forecasts also have to be evaluated over several horizon periods to get conclusive remarks about the quality of the forecast approaches, notably through the use of statistical measures such as the MAE. Other statistical measures may also be calculated to compare forecasting performances, notably with the use of the Theil U-statistic which gives a relative comparison of formal forecasting methods with naïve approaches while emphasizing on large errors (Makridakis *et al.*, 1998). These forecast approaches also have to be compared with those considered in healthcare systems.

#### **3.4.4 Randomness in product flows**

Parameters that reflect randomness on recovery, processing and demand volumes are defined in this section according to observations made throughout the paper. Some specifications have to be made first for the modelling of the demand and recovery volumes.

Since the recovery may affect the location of service centres and result in transportation costs in a context of collection, recovery volumes are defined at the level of user zones. Demand

volumes (acquisition and replacement) are established at the level of current service centres, since the location of these centres is not put in question in such a context.

Two approaches are considered to represent demand fulfilment with valorised products. They are elaborated to evaluate the impacts on the network design decisions and to support recommendations regarding policies and strategies to be adopted by the organisation. The first suggests a lower bound on the proportions of demand to be fulfilled with valorised products. These proportions are given by the average values met in current service centres, for each finished product families (**Table 11** in appendix). The second does not impose bounds on these proportions.

Recovery volumes are not estimated from the forecasts, since a steady state has probably not yet been reached. Different approaches may be considered in such a context. The current recovery volumes could notably be adjusted according to the growth rate of demand, population or products in circulation. Adjustments are done here according to the growth rate of demand, since the product fleet is not completely known from historical data.

In a first instigation of the network design decisions, no distinction is made regarding the forecasts according to the characteristics of the user zones in term of population, end-users and products in circulation. Average forecast errors of the order of 15% to 35% noted for service centres are used to denote randomness on demand and recovery volumes (**Table 6**), while assuming the forecast errors to be normally distributed with zero mean.

**Table 6:** Normally distributed demand and recovery volumes.

	<b>Dist. fct</b>	<b>MAW</b>	<b>MOW</b>	<b>BP</b>	<b>Parts</b>
<b>Demand</b> (acquisition and replacement)	$N[\mu_D, \sigma_D]$	$\sigma_D/\mu_D \approx 15\%$	$\sigma_D/\mu_D \approx 30\%$	$\sigma_D/\mu_D \approx 35\%$	$\sigma_D/\mu_D \approx 25\%$
<b>Recovery</b> (collection only)	$N[\mu_R, \sigma_R]$	$\sigma_R/\mu_R \approx 30\%$	$\sigma_R/\mu_R \approx 30\%$	$\sigma_R/\mu_R \approx 30\%$	$\sigma_R/\mu_R \approx 25\%$

Randomness on product states are represented through the two identified sets of probability distribution functions (section 3.4.2.3). The first set defines the states of recovered products at the level of service centres. Parameters of the functions of this set are defined for finished product families by the average practices of current service centres. This approach reflects the desire for standardization of sorting and grading. No function is assigned to part families, since it is considered that parts recovered at service centres are unusable. The second set of

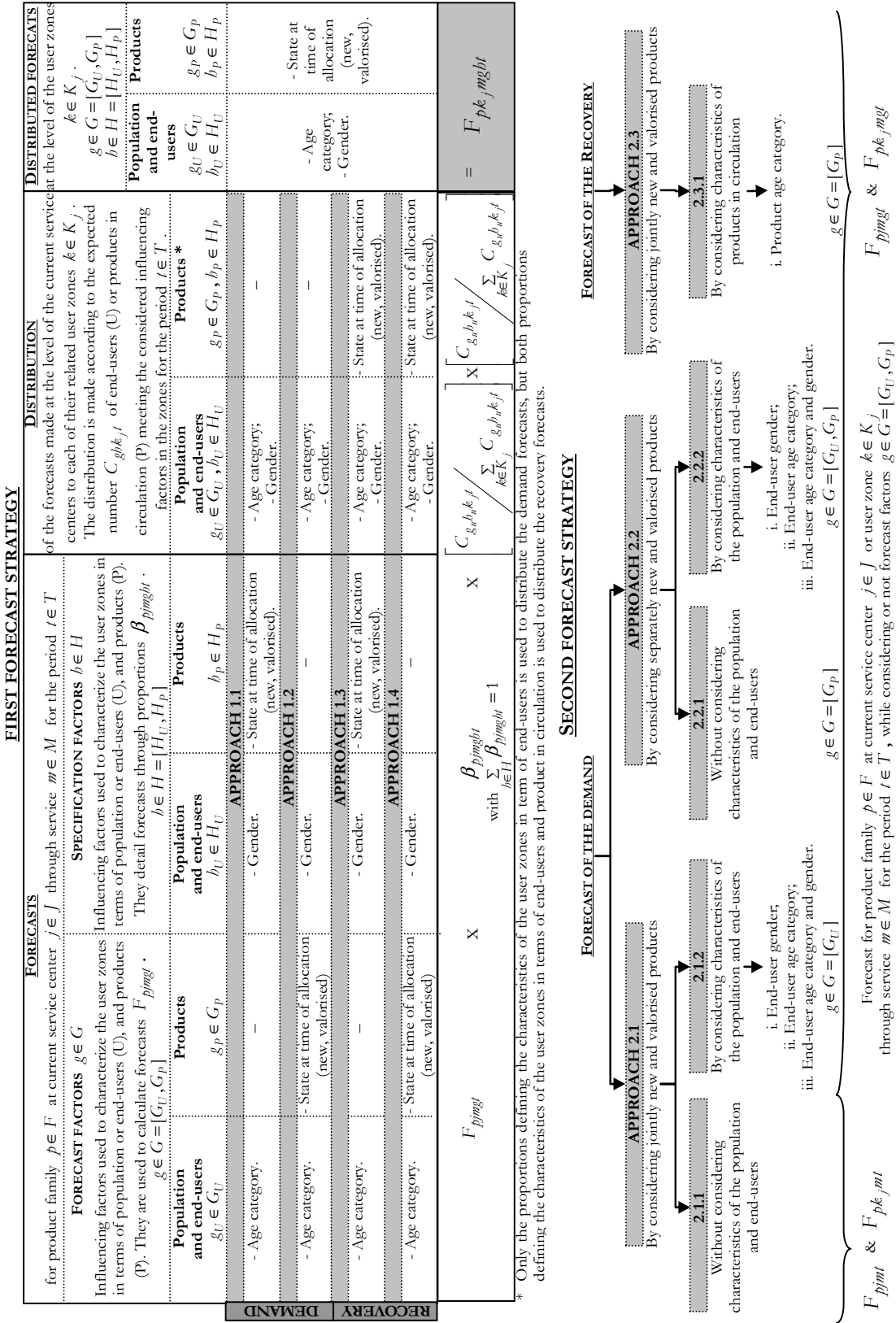
functions defines the states of parts recovered at the level of valorisation centres, following the alternative of repair and disassembling for part refurbishing. No data were available at the time of this work to define such proportions. The functions defining the proportions are derived from the related finished product families. The states of parts disassembled from products in good and failed conditions are given respectively by functions defined from data on finished products with ages below and above average half duration of use. No further consideration of product characteristics (age category, state at time of allocation) is considered in the definition of product states. The service and valorisation centres are represented by distinct functions to reflect the independent operating context. **Table 7** summarizes the distribution functions used to establish the states of the product families. The Gamma and Weibull distributions are chosen because of their goodness of fit for the studied case.

To reflect the variability of the accessibility to valorised products and specifically the variability of the unit value of valorised finished products, the design of the logistics network is evaluated under two average unit values. The first reflects the use of new parts only to repair recovered finished products and the second considers the use of both new and valorised products, which leads to higher and lower unit values for valorised finished products (section 3.4.1.2).

The probability distribution functions are used to define scenarios on recovery, processing and demand volumes, by considering four different operating contexts according to the proportions of the demand fulfilled with valorised products and their unit values. Scenarios are defined outside of the optimization procedure with the Monte Carlo sampling methods for the identified distribution functions. The negative values given by these functions are considered as equal to zero. The combination of proportions that define product family in good and unusable conditions is corrected, if needed, to ensure their sum to be lower or equal to 1.

**Table 7:** Average and standard deviation  $[\mu, \sigma]$  for proportions [%] defining states of product volumes with use of Gamma and Weibull distribution functions.

	DIST. FCT	FINISHED PRODUCT FAMILIES			PART FAMILIES					
		MAW	MOW	BP	Dis. from prod. in good cond.			Dis. from prod. in failed cond.		
					MAW	MOW	BP	MAW	MOW	BP
Repair	Weibull	$G$	$G$	$G$	$W$	$G$	$W$	$W$	$G$	$G$
	$W[\alpha, \beta]$	$\mu : 54$ $\sigma : 4$	$\mu : 41$ $\sigma : 7$	$\mu : 81$ $\sigma : 3$	$\mu : 90$ $\sigma : 10\%$	$\mu : 89$ $\sigma : 13$	$\mu : 88$ $\sigma : 9$	$\mu : 33$ $\sigma : 7$	$\mu : 20$ $\sigma : 20$	$\mu : 46$ $\sigma : 43$
Disposal	Gamma	$W$	$W$	$W$	$G$	$W$	$G$	$W$	$W$	$G$
	$G[\alpha, \beta]$	$\mu : 36$ $\sigma : 4$	$\mu : 46$ $\sigma : 7$	$\mu : 13$ $\sigma : 3$	$\mu : 3$ $\sigma : 3$	$\mu : 4$ $\sigma : 3$	$\mu : 1$ $\sigma : 1$	$\mu : 53$ $\sigma : 7$	$\mu : 60$ $\sigma : 15$	$\mu : 69$ $\sigma : 26$



**Figure 26: Forecast strategies.**

**Table 8:** Average (2000-2003) annual demand and mean absolute error in a context of acquisition for a current service centre and its related user zones using the first forecast strategy: a) use of time period as independent variable.

Average MAE	Approach 1.1.				Approach 1.2.				Sum	All zones	Sum	All zones
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40				
40	80	46	294	460	49	106	84	220	460	460	460	460
3	10	3	12	5	7	25	35	67	5	5	5	5

a)

**Table 9:** Average (2000-2003) annual demand and mean absolute error in a context of acquisition for a current service centre and its related user zones using the second forecast strategy: a) volume with time as independent variable; b) volume with the size of the associated population ( $p_i$ ) as independent variable; c) rate with time as independent variable (rate is converted in volume).

Average MAE	Approach 2.1.1.				Approach 2.1.2.i. (user gender)				Approach 2.1.2.ii. (user age)				Approach 2.1.2.iii. (user age and gender)							
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones
42	81	4	49	288	460	42	81	49	288	460	42	81	49	288	460	42	81	50	288	460
0	4	1	9	5	5	0	4	1	9	5	0	4	1	9	5	0	4	1	9	5

a)

Average MAE	Approach 2.2.1.				Approach 2.2.2.i. (user gender)				Approach 2.2.2.ii. (user age)				Approach 2.2.2.iii. (user age and gender)							
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones
42	81	49	288	460	460	42	81	49	288	460	42	81	49	288	460	42	81	50	288	460
0	4	1	9	5	5	0	4	1	9	5	0	4	1	9	5	0	4	1	9	5

b)

Average MAE	Approach 2.1.1.				Approach 2.1.2.i. (user gender)				Approach 2.1.2.ii. (user age)				Approach 2.1.2.iii. (user age and gender)							
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones
42	81	49	288	460	460	42	81	49	288	460	42	81	49	288	460	42	81	50	288	460
0	3	1	9	8	8	0	2	1	9	8	0	3	0	10	8	0	3	0	10	9

c)

Average MAE	Approach 2.1.1.				Approach 2.1.2.i. (user gender)				Approach 2.1.2.ii. (user age)				Approach 2.1.2.iii. (user age and gender)							
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	All zones
42	81	49	288	460	460	42	81	49	288	460	42	81	49	288	460	42	81	50	288	460
0	4	1	9	6	8	0	4	1	9	6	0	4	1	10	7	0	4	2	10	8

**Table 10:** Average (2000-2003) annual recovery and mean absolute error in a context of collection for a current service centre and its related user zones using the second forecast strategy: a) volume with time as independent variable.

Average MAE	Approach 2.3.1.				Approach 2.3.2. (product age)				Sum	All zones	Sum	All zones
	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40	Zone 37	Zone 38	Zone 39	Zone 40				
14	25	14	107	159	14	25	14	107	159	159	159	159
1	3	5	7	16	1	3	5	7	16	16	16	16

a)

### 3.5 Conclusion

A methodology which integrates several modelling approaches is proposed in this paper to define key parameters in designing supply loops. Parameters are used to determine and characterize potential product flows. They aim to support decisions related to location of sites and the definition of their mission. The methodology is applied to the specific context of wheelchair allocation, maintenance, recovery, processing and redistribution in the Province of Quebec, Canada, governed and managed by a public insurer. In this context, products and services are offered free of charge to admissible end-users. The methodology is elaborated on generic bases. It may be used for other applications, notably in the automotive or electronic industry.

The methodology is elaborated to evaluate the possible recovery and demand from both end-users and network activities, which may involve products of different generations and states. The evolution and dispersion of the demand and recovery may change according to the characteristics of the population, end-users and products in circulation. According to the states of the recovered products, several processing alternatives may be considered to improve the recovery value possibilities; for example through the reuse of repaired or refurbished products rather than the acquisition of new products. Processed or valorised products may be used to meet, partly or completely, the needs or requirements in a network. This may affect accessibility to products and thus result in changes in service levels and operating costs. Strategic proportions of recovered product volumes directed toward processing alternatives are based, in addition to their states, on network conditions according to the demand and recovery volumes and on the capacities of sites and the network operating costs. The suggested modelling methods deal with all of these aspects.

The suggested methodology introduces the identification and characterization of several random factors with respect to the quality, quantity, time and place of recovery, processing and redistribution. They may be used as reference in a later design stage to justify the deployment efforts to lead to a robust supply loop in a highly uncertain environment, while evaluating several scenarios in the optimization procedure. Stochastic programming models solved with sample average approximation methods may be used to this end.

The modelling approaches suggested in the methodology rest on the data cumulated by an organisation. These data are related to recovery, processing and redistribution, and take into account the current operating context in a specific network. Data availability and integrity are of great concern in such a methodology. Restricted data may limit the analysis and characterization of the network. Lower data integrity may increase the randomness in estimates and forecasts.

Methods and tools are to be proposed to support the modelling of logistics networks for which data are not available or unusable, especially following changes in the organisation policies and strategies that are considered to support the product lifecycle. Such methods and tools may notably rest on simulation.

### 3.6 Acknowledgements

The research work reported here was completed thanks to a Scholarship of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). The authors would also like to thank the management of the Assistive Technology Department (ATD) of the Quebec City Rehabilitation Institute (QCRI), the management of the programs outside Quebec and Technical Aids Program of the Régie de l'assurance maladie du Québec as well as the Société de l'assurance automobile du Québec for their contribution to this work.

### 3.7 References

- Ahlburg DA, (1987) Population forecasting. In: Makridakis S, Wheelwright SC (eds.). *The Handbook of Forecasting – a Manager's Guide*, chapter 9. John Wiley & Sons, New York, United States.
- Alting L, (1993) Life-cycle design of products: a new opportunity for manufacturing enterprises. In: Kusiak A (ed.) *Concurrent Engineering : Automation, Tools, and Techniques*, chapter 1, John Wiley & sons, New York, United States
- Ballou RH, (1994) Measuring transport costing error in customer aggregation for facility location. *Transportation Journal*, 33(3):49-59.
- Ballou RH, (1992) *Business Logistics Management*. Prentice-Hall, New Jersey, United-States.
- Barros AI, Dekker R, Scholten V, (1998) A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2):199–214.
- Brown PA, Gibson DF, (1972) A quantified model for facility site selection application to multiplant location problem. *AIIE Transactions*, 4(11):1-10.

- Canetta L, Cheikhrouhou N, Glardon R, (2005) Applying two-stage SOM-based clustering approaches to industrial data analysis. *Production Planning and Control*, 16(08):774-784.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, accessible at: [www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca).
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, (2007a) A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*. Accepted
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, (2007b) Design of reverse logistics networks for multi-product, multi-state, and multi-processing alternatives. In: Jung, H., Chen, F., Jeong, B. (eds.), *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies*. Springer.
- 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.
- Cloutier C, (2004) Proposition d'une stratégie de déploiement de réseau pour la valorisation des aides à la mobilité dans le contexte québécois. Essai de MBA, Université Laval, Québec, Canada.
- Côté M, Tremblay J, SOM inc, (2003) Évaluation du projet de valorisation des aides à la locomotion. Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Diallo C, Aït-Kadi D, (2005) Rapport du Comité de travail sur les outils d'aide au tri des fauteuils roulant. Rapport final, Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Erbas B, Hyndman RJ, Gertig DM, (2005) Forecasting age-specific breast cancer mortality using functional data models. *Statistics in Medicine*, 26(2):458-470.
- Ernst R, Cohen MA, (1990) Operations related groups (ORGs): A clustering procedure for production inventory systems. *Journal of Operations Management*, 9(4):574-598.
- Fandel G, Stammen M, (2004) A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling, *International Journal of Production Economics*, 89(3):293-308.
- Fleischmann M, (2001) *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, Berlin, Germany.
- Fleischmann M, van Nunen JAEE, Gräve B, (2003) Integrating closed-loop supply chains and spare-parts management at IBM. *Interfaces*, 33(6):44-56.
- Flores BE, Olson DL, Dorai VK, (1992) Management of multicriteria inventory classification. *Mathematical and Computer Modelling*, 16(12):71-82.
- Hillsman EL, Rhoda R, (1978) Errors in measuring distances from populations to services centres. *Annals of the Regional Science Association*, 12:74-88.
- House RG, Jamie KD, (1981) Measuring the impact of alternative market classification systems in distribution planning. *Journal of Business Logistics*, 2(2):1-31.
- Inderfurth K, Teunter RH, (2001) Production planning and control of closed-loop supply chains. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 149-174. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Kelle P, Silver EA, (1989) Forecasting the returns of reusable containers. *Journal of Operations Management*, 8(1):17-35.
- Krikke H, (1998) Recovery strategies and reverse logistics network design. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.



- Listes O, (2007) A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2):417-442.
- Listes O, Dekker R, (2005) A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268-287.
- Löbler H, Buchholz P, Petersohn H, (1996) Neural Networks as competitors for methods of data reduction in SPSS. *Arbeitspapier Nr. 2 Universität Leipzig*.
- Makridakis S, Wheelwright SC, Hyndman RJ, (1998) *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & sons, New York, United States.
- Martel A, (2005) The design of production-distribution networks: a mathematical programming approach. In: Geunes J, Pardalos PM, (eds.), *Supply Chain Optimization*, chapter 9. Springer, New York, United States.
- Martel A, (2004) Conception et gestion de chaîne logistique. Notes de cours, Université Laval, Québec, Canada.
- Milligan GW, Cooper MC, (1988) A study of standardization of variables in cluster analysis. *Journal of Classification*, 5:181-204.
- Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec (MSSSQ), (2005) La population du Québec par territoire des centres locaux de services communautaires, par territoire des réseaux locaux de services et par région sociosanitaire de 1981 à 2026, Québec, Canada.
- Punniyamoorthy M, Vijaya Ragavan P, (2003) A strategic decision model for the justification of technology selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21:72-78.
- Ramanathan R, (2006) ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. *Computers & Operations Research*, 33(3):696-700.
- Shapiro JF, (2001) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury Press, California, United States.
- Srinivasan M, Moon YB, (1999) A comprehensive algorithm for strategic analysis of supply chain networks. *Computer and Industrial Engineering*, 36(3):615-633.
- Teunter RH, van der Laan EA, Inderfurth K, (2000) How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics? *Omega*, 28(4):409-415.
- Teunter RH, (2006) Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6):533-537.
- Toktay LB, (2003) Forecasting product returns. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 203-219. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Toktay LB, van der Laan EA, de Brito M, (2004) Managing product returns: The role of forecasting. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 3. Springer, Berlin, Germany.
- Vincent, C, Routhier F, Guérette C, (2003) Évaluation d'un programme de valorisation de fauteuils roulants. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 70(1):21-32.
- Wenzel H, Hauschild MZ, Alting L (1997) *Environmental Assessment of Products, Volume 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. Chapman and Hall, London, England.
- Zwingmann X, Ait-Kadi D, (2006) DiDeRot, Détermination de durées de réparation et d'opération. Rapport préliminaire, Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale (CIRRIS), Université Laval, Québec, Canada.

### 3.8 Appendix

**Table 11:** Percentage of total demand satisfied through new and valorised finished products for each ten year end-user age bracket.

Demand	End-user age	In the Province of Quebec						In a specific service centre					
		MAW		MOW		BP		MAW		MOW		BP	
		New	Valorised	New	Valorised	New	Valorised	New	Valorised	New	Valorised	New	Valorised
Acquisition	0-9	100	0	100	0	60	40	100	0	100	0	0	0
	10-19	98	2	100	0	71	29	90	10	100	0	50	50
	20-29	95	5	100	0	80	20	92	8	100	0	67	33
	30-39	91	9	100	0	91	9	90	10	100	0	0	0
	40-49	89	11	97	3	84	16	95	5	100	0	100	20
	50-59	89	11	93	7	73	27	93	7	92	8	60	40
	60-69	87	13	82	18	69	31	88	12	78	22	70	30
	70-79	89	11	74	26	71	29	88	12	80	20	69	31
	80-89	87	13	74	26	71	29	84	16	91	9	70	30
	90-99	79	21	0	100	62	38	75	25	50	50	68	32
	100+	57	43	0	0	17	83	60	40	0	0	0	0
<b>Average</b>	<b>88</b>	<b>12</b>	<b>87</b>	<b>13</b>	<b>70</b>	<b>30</b>	<b>87</b>	<b>13</b>	<b>89</b>	<b>11</b>	<b>69</b>	<b>31</b>	
Replacement	0-9	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
	10-19	99	1	100	0	98	2	100	0	100	0	100	0
	20-29	97	3	99	1	90	10	100	0	100	0	71	29
	30-39	95	5	98	2	85	15	93	7	100	0	92	8
	40-49	92	8	97	3	82	18	88	13	100	0	79	21
	50-59	90	10	94	6	85	15	84	16	98	2	93	7
	60-69	84	16	85	15	73	27	82	18	77	23	50	50
	70-79	81	19	82	18	77	23	87	13	75	25	74	26
	80-89	75	25	78	22	60	40	79	21	80	20	57	43
	90-99	58	42	89	11	61	39	50	50	100	0	63	38
	100+	0	100	0	0	0	100	0	100	0	0	0	0
<b>Average</b>	<b>89</b>	<b>11</b>	<b>91</b>	<b>9</b>	<b>77</b>	<b>23</b>	<b>86</b>	<b>14</b>	<b>91</b>	<b>9</b>	<b>70</b>	<b>30</b>	

**Table 12:** Percentage of the total demand per a ten year end-user age brackets.

Age			0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	100+
Province	Acquisition	MAW	0.3	1.5	1.5	3.8	8.1	10.8	15.2	27.4	25.0	6.2	0.3
		MOW	1.4	3.4	2.6	6.4	20.0	21.1	18.3	17.8	8.8	0.2	0.0
		BP	0.2	0.3	0.5	1.1	2.7	3.5	6.8	24.3	41.3	19.0	0.3
	Replacement	MAW	1.1	9.0	9.0	13.2	16.3	14.6	12.8	14.6	7.7	1.7	0.0
		MOW	0.4	2.9	7.2	10.9	19.2	22.2	18.8	12.9	5.1	0.5	0.0
		BP	0.6	6.0	7.7	9.1	14.3	9.8	9.7	17.9	18.2	6.7	0.1
Specific centre	Acquisition	MAW	0.2	0.7	0.8	2.9	6.6	8.7	11.3	27.6	31.5	9.2	0.4
		MOW	3.5	0.5	2.5	7.1	16.2	19.2	18.2	20.7	11.1	1.0	0.0
		BP	0.0	0.5	0.7	0.0	1.2	1.2	7.2	21.7	43.9	23.1	0.5
	Replacement	MAW	1.6	5.3	7.8	13.5	12.5	11.6	10.3	19.4	13.2	4.4	0.3
		MOW	1.0	3.6	4.6	6.2	21.1	23.7	18.0	12.4	7.7	1.5	0.0
		BP	0.6	4.2	4.2	7.1	8.3	8.9	9.5	20.2	27.4	9.5	0.0



## 4 Une approche de programmation stochastique pour la conception de boucles d'approvisionnement sous un environnement incertain

Le quatrième chapitre de la thèse est dédié au dernier article intitulé « *A stochastic programming approach for designing supply loops* ». L'article a été accepté pour une édition spéciale du journal « *International Journal of Production Economics* » portant sur la modélisation avancée et la conception innovatrice de chaînes d'approvisionnement « *Advanced Modeling and Innovative Design of Supply Chains* ». La version présentée dans la thèse est identique à la version corrigée retournée aux éditeurs de l'édition spéciale.

### 4.1 Résumé

Le dernier article de la thèse propose un modèle de programmation stochastique. Il permet d'intégrer les facteurs aléatoires identifiés à l'étape de paramétrisation au modèle déterministe initialement proposé. Un grand nombre de scénarios sont élaborés suivant les volumes espérés de demande et de récupération et les états pouvant être associés aux volumes de produits récupérés. Ces scénarios sont développés sous différents contextes de fonctionnement en tenant compte de la proportion minimale de la demande à être satisfaite par des produits valorisés, ainsi que de la valeur unitaire des produits valorisés. Ces scénarios sont générés hors de la procédure d'optimisation par les techniques d'échantillonnage de Monte Carlo. Le modèle stochastique résultant a été résolu à l'aide d'une heuristique basée sur la méthode d'approximation de la moyenne d'échantillonnages (« *Sample Average Approximation – SAA* »). Cette approche, plus réaliste comparativement à l'utilisation de paramètres moyens par un modèle déterministe, permet d'étudier l'étendue de l'impact des facteurs aléatoires sur les résultats du modèle. Elle permet de caractériser la variation possible de la mission des unités d'affaires impliquées et de l'orientation stratégique des volumes de produits récupérés vers les alternatives de traitement et, par conséquent, des niveaux de performance atteignables dans le réseau. En plus de servir à la conception de la boucle d'approvisionnement, le modèle proposé peut servir à l'étude de l'impact des changements de politiques d'une organisation, pouvant affecter l'accessibilité aux produits notamment d'après les besoins à satisfaire par des produits valorisés et par la valeur unitaire de ces produits. Pour une première évaluation de la configuration requise de la boucle d'approvisionnement, les volumes de produits dans le réseau

sont représentés sans aucune distinction des catégories d'âge des utilisateurs finaux et des produits en circulation.

## **A stochastic programming approach for designing supply loops**

*Marc Chouinard<sup>1,2</sup>, Sophie D'Amours<sup>1</sup>, Daoud Aït-Kadi<sup>1,2</sup>*

1. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada, G1K 7P4
2. Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et en intégration sociale (CIRRIS), Institut de réadaptation en déficience physique de Québec, 525 boul. Hamel, Québec, Québec, Canada, G1M 2S8

**Abstract.** A stochastic programming model for designing logistics networks integrating reverse logistics into current supply chains is proposed in this paper. It aims at evaluating impacts of randomness related to recovery, processing and demand volumes on the design decisions. These decisions deal with the location of service and processing centres and warehouses, regarding processed products with reuse potential, the definition of mission of sites and, consequently, the product accessibility. Flows of recovered products may be directed toward one or a number of processing alternatives, according to the different states of the recovered products as well as to the network conditions, which relate to recovery and demand volumes with respect to capacity constraints and operating costs. Notably, recovered products may be repaired, disassembled for part refurbishing or disposed. Such products are indicated here as valorised products and represent an economical supply alternative, which meets lower quality standards in comparison with new products. Portions of needs fulfilled by valorised products are defined according to the requirements of end-users, as well as management policies and strategies. The model aims at improving valorised product accessibility, while reducing the total operating costs of such a network. A heuristics based on the sample average approximation, involving the Monte Carlo sampling methods, is proposed to solve the problem.

**Key words:** design of logistics networks, supply loops, reverse logistics, stochastic programming, heuristics, sample average approximation

## 4.2 Introduction

Networks integrating reverse logistics are generally confronted with high uncertainty levels, especially regarding the quality and quantity of the recovered products, as well as the time, delay and location of recovery and redistribution (Chouinard, 2003; Guide *et al.*, 2000). Uncertainties have an impact on the resources that need to be deployed to ensure product recovery, processing and redistribution and thus to allow the creation of effective and efficient supply loops (Chouinard *et al.*, 2007a, 2007b).

Particularly when end-users are involved, recovery possibilities depend on the product capacity to meet user needs, as well as on the conditions of use and maintenance to which they have been subjected. Recovered products may be directed toward one or many processing alternatives, according to the different states of products as well as to the network conditions, characterized by the demand and recovery volumes and the network capacities and operating costs. Many alternatives are generally considered in order to attain greater value recovery capacities from products (Thierry *et al.*, 1995): repair, refurbishing, remanufacturing, disassembling for part refurbishing (cannibalization) and recycling. Reusable products and parts resulting from these processing alternatives represent economical supply alternatives to new products (Fleischmann, 2001). They are designated here as valorised products, with the exception of remanufactured products, whose quality is upgraded to “as-new”, processed products meet lower quality standards. Products may be reintegrated into original supply chains (closed supply loop) or be introduced into alternative markets (open supply loop).

Various approaches are proposed in the literature to tackle the distinctive characteristics associated to the design of supply loops. Some models in the literature deal with reverse logistics only. Product flows are thus directed toward different processing alternatives primarily according to the site capacities, without considering the states of recovered product and needs for valorised products. These models apply particularly to the context of recycling or disposal of hazardous materials (Jayaraman, 2003; Shih, 2001; Spengler *et al.*, 1997) in which volumes of recycled or disposed materials are fixed upfront as a proportion or mass ratio associated to products.

Other models integrate reverse logistics into current supply chains. They generally consider one or two processing alternatives. When more than two processing alternatives are considered, the proportions of product flows directed toward different processing alternatives are generally fixed a priori (Listes and Dekker, 2005; Krikke *et al.*, 1999; Krikke, 1998; Barros *et al.*, 1998). Proportions are established notably according to expected states of recovered products (Teunter, 2006; Krikke, 1998). The product flows are directed toward one or many processing centres according to these proportions and to site capacities, while allowing the processed product volumes to be lower than the demand volumes, or lower than the recovered product volumes. Disequilibrium may thus occur between recovery and demand.

The disequilibrium between supply and demand may be avoided by allowing product flows to be directed toward many processing alternatives, and also by considering alternative supplies. Alternative supplies may notably come from suppliers and sites in the network associated to the supply chain or the reverse logistics. Such models are specially proposed in a remanufacturing context, in which the processed products may be used to decrease the production load. For these models, a lower limit is fixed for the product flows to be disposed (Lu and Bostel, 2007; Fleischmann, 2001). The remaining recovered product flows are remanufactured to meet network needs, either partially or completely, according to site capacities. Products in an “as-new” state are thus reintroduced into the supply chain.

Some models explicitly tackle recovery and demand in product disassembling, and even (re)assembling processes, with the use of bills of materials. Fandel and Stammen (2004) suggest the use of binary parameters to define technical, commercial and environmental feasibilities associated to the disassembling processes.

Such models may however seek the maximization of value recovery from products rather than determining the strategic proportion of product flows that are to be directed toward processing alternatives while optimizing the design of the logistics network.

Although high uncertainty levels are recognized for supply loops, few models approach them under a stochastic environment. Contributions to this subject come notably from Listes (2007) and Listes and Dekker (2005), who propose stochastic models to study a small number of discrete scenarios concerning demand and recovery volumes. Recent work propose the use of

sample average approximation, based on the Monte Carlo methods, to solve network design problems with a finite but large number of scenarios (Vila *et al.*, 2007; Santoso *et al.*, 2005).

A stochastic programming model is proposed in this paper to study the impacts of random factors related to the recovery, processing and demand volumes on the design of supply loops. It aims at locating service and processing centres, and warehouses for valorised products. It aims also at defining missions of sites, including those of the original supply chain, and at determining the strategic proportion of product flows to be directed toward processing alternatives. The recovered products may be repaired (finished products only), disassembled for part refurbishing or disposed. Product flows are directed toward processing alternatives according to their states and as well as to the network conditions, which relate to recovery and demand volumes with respect to capacity constraints and operating costs. Valorised products may be used to fulfil partly or completely the demand from end-users and involved businesses units, to complete notably maintenance and valorisation especially. The demand proportion fulfilled with valorised products is defined according to the requirements from end-users and management policies and strategies. Details on modelling such a problem and the resulting stochastic programming model are presented in the first sections of the paper. The solution approach, based on the sample average approximation (SAA), with use of the Monte Carlo sampling methods, is then detailed. Finally, computational results are presented and analyzed with reference to a specific case study.

### 4.3 Methodology

A significant modelling step is required prior to model execution and validation (**Figure 27**). It consists of defining potential network sites and flows (**Figure 28**) as well as all parameters feeding the developed model (Chouinard *et al.*, 2007a, 2007b). These parameters aim at suitably reflecting supply and recovery in the network, as well as achievable network performances in terms of cost drivers and service level targets. They are summarized in **Figure 27**, and presented in the following sections, according to the considered generic context. The modelling approaches propose a method of converting a deterministic model (Chouinard *et al.*, 2007a) into a stochastic one. The resulting stochastic programming model is presented following the presentation of the model parameters.



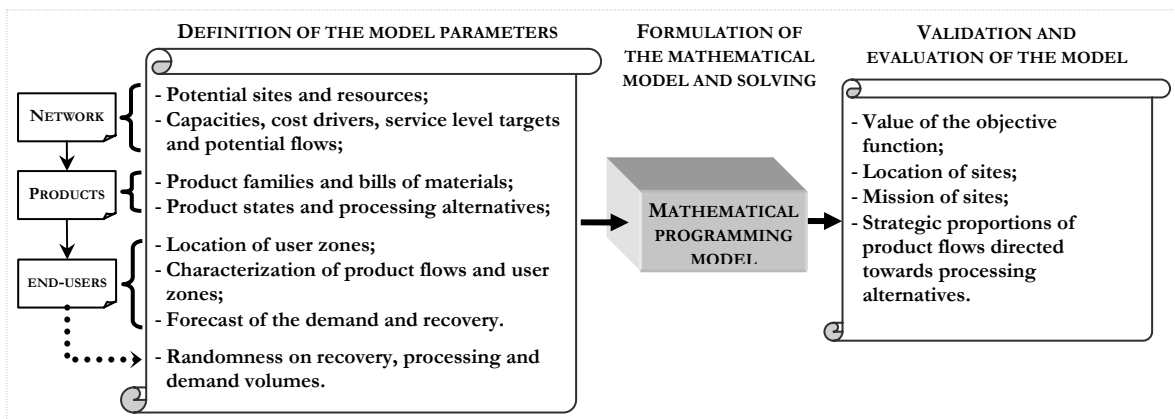


Figure 27: Methodology for designing supply loops.

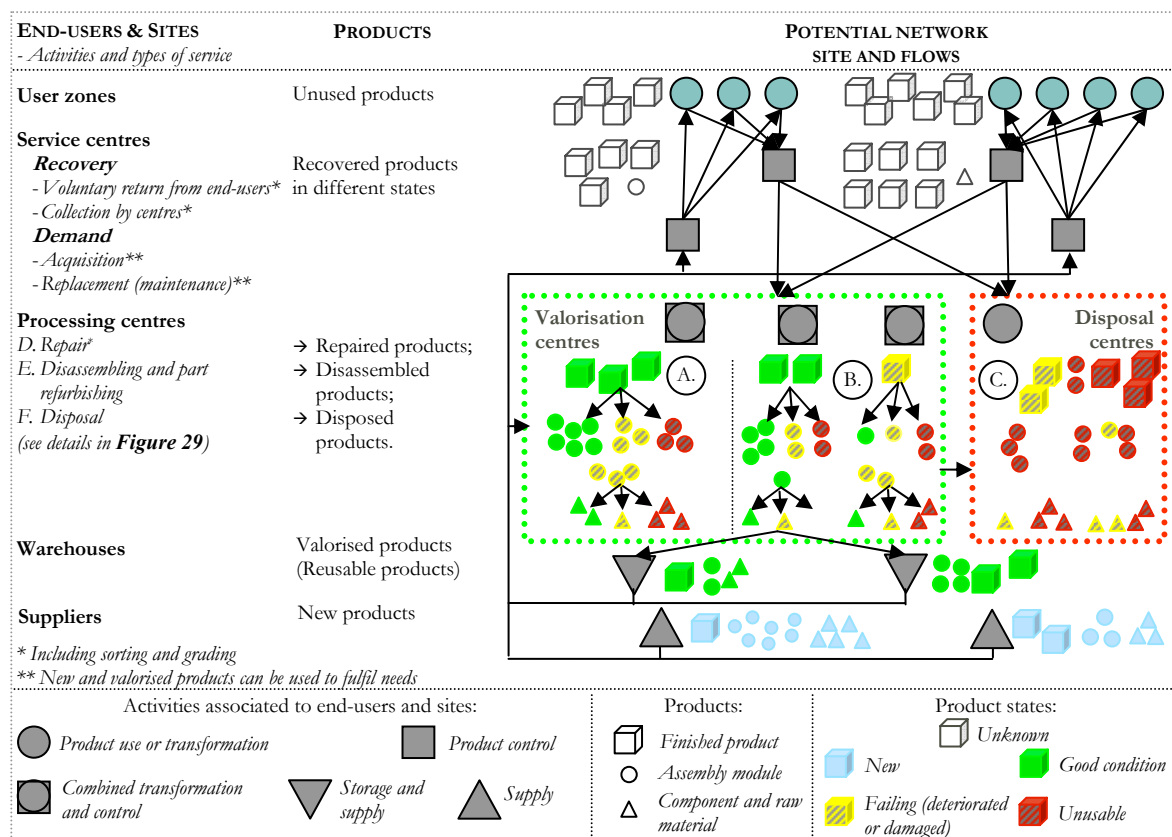


Figure 28: Potential network sites and flows.

### 4.3.1 Potential network

The potential network is defined by its sites and resources (human resources and equipments), to which activities are assigned. They are associated here with established business units, such

as sites in current supply chains and third parties, and are differentiated as service centres, processing centres, warehouses and suppliers.

The service centres ( $j \in J$ ) deal with both demand and recovery from end-users. The demand is differentiated in product acquisition and replacement. It may be filled as much by new products as by valorised ones. The recovery can take the form of voluntary returns, following replacements or the return of unused products. It can also take the form of collection initiated by a service centre, as a service offered to end-users to increase recovery. In this context, end-users are asked to return products once they are unused, but no penalty costs occur if they are not returned. The model may be adapted to include penalty costs, as suggested by Fleischmann (2001).

The processing centres ( $k \in K$ ) are distinguished as valorisation centres and disposal centres. The former process products having a reuse potential, while restoring product quality to a lower standard level than the new products, and the latter end product lifecycle within the original network.

The resulting valorised products are stored in warehouses ( $l \in L$ ) before being delivered to service and valorisation centres, according to needs of end-users and sites, e.g. for maintenance and valorisation.

Established external suppliers ( $i \in I$ ) deliver new products on demand.

The network design decisions concern the location of service centres used for collection, processing centers and warehouses for valorised products.

Transportation between network sites and end-users occurs by means of the transportation system of the original supply chain. Delivery costs from suppliers are included in the acquisition costs.

#### **4.3.2 Potential network capacities, cost drivers and service level targets**

Site capacities, cost drivers and service level targets are defined to characterize the achievable network performances and to determine the potential network flows. Site capacities and fixed

and variable costs are estimated on the basis of the available information for the concerned sites. This information is given by the considered third parties. Transportation costs and service levels are defined on the basis of the distance between sites and end-users.

The service levels are used to define the potential product flows between sites and end-users according to the distance. End-users are here assigned beforehand to the nearest service centres as for services associated to demand, since centres are considered as widely dispersed. The decisions on the location of the service centres used for collection and on assignment of end-users to these centres are tackled with the mathematical programming model. Product flows are elaborated while ensuring shorter delivery delay for valorised products compared to the delivery of new products.

Standardized disassembling and (re)assembling costs are used to characterize the activities in processing centres. They are estimated to encompass different product states. Separate repair and refurbishing costs are defined to reflect the cleaning, disinfecting, technical control and other additional costs that may occur with these processing alternatives. These costs are represented in the model as they can vary with the product states.

Since both new and valorised products may be used to repair finished products, different resulting unit product values are considered to evaluate the impact on the model decisions, notably by considering average unit value when either or both new and valorised products are used for repair. Holding costs in warehouses are estimated according to the unit product values and estimated holding cost rates, including opportunity costs, while considering that only valorised products are stored to fulfil anticipated network needs. In a situation where recovered, valorised, new and disposed products may be stored, different holding cost rates may be evaluated according to the related opportunity costs (Teunter *et al.*, 2000).

### **4.3.3 Product families and bills of materials**

Product families and bills of materials are defined in order to reduce problem size. This is done while ensuring that the families represent adequately the recovery and demand from network processes and end-users, which may require different network paths or result in distinctive achievable network performances.

The grouping of the products into families is made according to criteria presented under two main characteristics:

- Needs and requirements into the network from the activities and end-users:
  - Product category or class (e.g.: electronics product, television, etc);
  - Service level, seasonality and risk related to the management of products;
  - Technical, commercial and environmental feasibilities to recover, process and redistribute the products;
- Potential economic impacts on the network design decisions:
  - Activities related the network design decisions;
  - Recovery and (re)distribution channel and resources used in activities (production, handling, etc.).

These two main characteristics are measured respectively by volume and cost percentages, as with the ABC classification method. They are addressed while considering their distinctive criteria through clustering methods. Only products with significant impacts on network design decisions are retained in the procedure. Product families ( $p \in P = F \cup M$ ) are differentiated first as finished products families ( $f \in F$ ) and then as part families ( $m \in M$ ), including raw materials or components ( $c \in C$ ) and assembly modules ( $a \in A$ ), associated with the identified finished product families. These families are used in a cannibalization context to represent disassembling of parts for the repair of products.

Links between product families are represented through bills of materials (Martel, 2005), defined according to pre-established generic disassembling and (re)assembling trees associated to products in a family. Bills of materials define the relative quantities of product families involved in disassembling and (re)assembling processes. Additional parameters are used to characterize technical, commercial or environmental feasibilities associated to disassembling process, as suggested by Fandel and Stammen (2004).

#### **4.3.4 Product states and processing alternatives**

Product states are defined to set the strategic proportions of product flows to direct toward processing alternatives.

Five states ( $s$ ) are used to define product flows:

1. Unknown:  $s = 0$  ;

2. New:  $s = 1$ ;

3. Good condition:  $s = 2$ :

Which implies that the products can be repaired (finished products) or refurbished (parts) and thus lead to valorised products;

4. Deteriorated or damaged:  $s = 3$ :

Which implies that the products can be disassembled;

5. Unusable:  $s = 4$ :

Which implies that the products are to be disposed.

Unknown state ( $s = 0$ ) is associated to unused products in user zones. The states are determined with a sorting and grading step ( $s = 2, s = 3$  &  $s = 4$ ) at the level of service centres. It is considered that no recovered product in new state ( $s = 1$ ) is reintroduced into the supply loop. Flows of recovered products may be directed toward many processing alternatives according to their states as well as to the network conditions, which relate to recovery and demand volumes with respect to capacity constraints and operating costs. Only products in good condition ( $s = 2$ ) may be used to fulfil network needs after repair (finished product families) or refurbishing (part families). They are then designated as valorised products. Processing alternatives considered according to product states are showed with an example in **Figure 29**.

Repair and disassembling are two alternatives with different impacts on the supply loop. When repair occurs, unusable parts may be replaced by valorised or new parts. Whereas when disassembling occurs, disassembled parts with reuse potential may be reintroduced into the supply loop after refurbishing as an alternative supply sources to new parts.

Repair is considered only for the finished product. It requires replacement of parts recovered in an unusable state ( $s = 4$ ). Failing parts ( $s = 3$ ) are disassembled for the replacement of their unusable constitutive parts ( $s = 4$ ), when possible. Otherwise, for part families at lower disassembling level of bills of materials ( $c \in C$ ), failing parts ( $s = 3$ ) are replaced. Parts in good condition ( $s = 2$ ) are refurbished before reassembling.

Concerning disassembling, only parts with reuse potential ( $s = 2$ ) may be refurbished. Parts in good ( $s = 2$ ) or in failing ( $s = 3$ ) state may be further disassembled or be directed toward disposal.

Two sets of proportions are used to define the product states in the network and to direct product flows toward processing alternatives. They are defined based on historical observation of the states of products in the reverse network. The first set of proportions defines products in good condition and thus upper bounds on flows to direct toward repair or refurbishing. The second specifies unusable products and thus lower bounds on flows to direct toward disposal. Proportions of flows to direct toward disassembling are obtained according to flows defined with respect to these two bounds. Products can be directed toward a lower processing alternative according to both network needs and capacities (**Figure 29**).

For the studied case, Gamma and Weibull functions were identified as representative probability distribution functions to define such proportions and to reflect randomness regarding the states of recovered products. The proportions used to establish the lower and upper bounds are defined separately outside of the optimization procedure with the Monte Carlo sampling methods, using these distribution functions. Many scenarios of product states are then defined while combining and correcting the values, if needed, to ensure their sum to be lower or equal to 1 (100%).

Two sets of parameters are defined with these distribution functions. The first set is used to establish the states of finished products recovered at the level of service centres. It is used only to transfer finished products toward suitable processing centres, since it is considered that parts recovered from service centres are too deteriorated to be valorised. All unusable products ( $s = 4$ ) are transferred to disposal centres. The second set is used to establish the states of parts resulting from repair and disassembling alternatives.

Probability distribution functions are defined for each product family. Each service and processing centre is represented by distinct functions. In the studied case, the parameters of the functions for each product family are although the same for all the centres. It reflects a standardized approach for sorting and grading and valorisation, while maintaining an independent operating context in centres. Parameters of the functions for part families are

established by distinguishing the states of the product families from which they are disassembled.

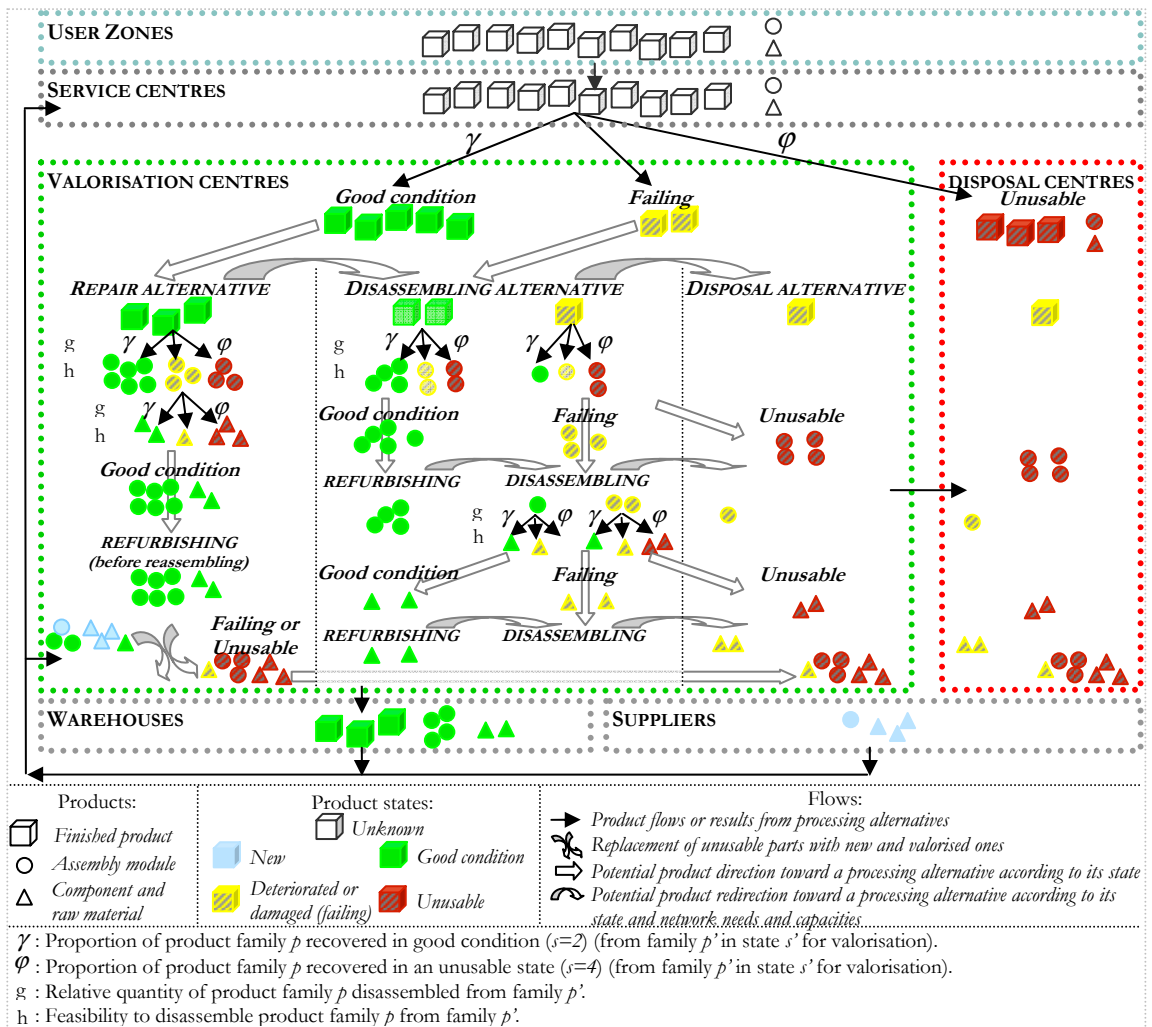


Figure 29: An example of potential product flow direction toward processing alternatives.

#### 4.3.5 User zone locations

End-users are grouped in geographical areas indicated as user zones ( $d \in D$ ). They are used to support the decisions concerning the location of service centres used for collection and to estimate the resulting transport costs.

End-users are grouped with clustering methods (Canetta *et al.*, 2005; Ballou, 1994) on the basis of latitude and longitude coordinates and distance separating them from their assigned service

centres, as for services associated to demand. End-user coordinates and distances are given by a geographical information system with use of the first three postal code characters. Following a study by Ballou (1994), ten user zones per service centre are initially imposed as a maximum.

The centroid of zones (Ballou, 1994) is calculated by weighting coordinates of end-users with the proportion of products in their possession (number of finished products in circulation associated to an end-user coordinate/total number of finished products in circulation in the considered user zone). In some ways, this approach emphasizes the importance of demand and recovery associated to each end-user in a zone, by moving centroid closer to end-users with high amount of product in circulation.

#### **4.3.6 Characterization of product flows and user zones**

Factors influencing recovery, processing and demand volumes are identified to reflect conditions under which product flows are initiated. The characteristics of the population, end-users, and products in circulation, are considered to represent distinct evolution and dispersion of the demand and recovery volumes on the covered territory, as well as the changes on product states. Such characteristics are generally obtained through scatterplot and bivariate statistics (Makridakis *et al.*, 1998), such as correlation coefficients.

In the studied case, end-user and product age are identified as influencing factors. The proportions of the demand fulfilled with valorised products, and the proportions of product flows directed toward processing alternatives, vary according to the age of end-users and products respectively. However, as a first instigation of the network operating context, no distinction is made here with regard to these influencing factors.

#### **4.3.7 Forecasts of the demand and recovery volumes**

Forecasts of the demand and recovery volumes are established for each product family on the basis of historical data using linear regression with time as an independent variable. Demand volumes for acquisition and replacement are estimated at the level of service centres, whereas recovery volumes that are met following the collection undertaken by the service centres are estimated at the level of user zones.



The randomness of annual recovery and demand volumes are represented with normal distribution functions (Demand:  $N[\mu_D, \sigma_D]$ ; Recovery:  $N[\mu_R, \sigma_R]$ ). The forecasts give the average on volumes for future horizon periods. Standard deviations are estimated from the forecast errors, while assuming the errors to be normally distributed.

Forecasts may be done with the use of the identified influencing factors. Such forecasts are generally made through linear projections based on age-period-cohort models, Bayesian age-period-cohort models or functional data analysis (Erbaş *et al.*, 2005). They deal specifically with incidence rates and thus have to be converted into volumes by multiplying forecasted rates with the predicted size of the associated population for the same period, in a given geographical area. The predicted size of a population is usually calculated by government forecasting agencies, with the use of sophisticated models (Ahlburg, 1987).

#### 4.3.8 Stochastic programming model

A two-stage stochastic programming model (Louveaux and Schultz, 2003; Birge and Louveaux, 1997) is proposed to take into account randomness. It is developed for a single period context, such as a year. The first stage of the model deals with the location of service and processing centres, and warehouses  $[Y]$  and the assignment of user zones to service centres for the collection  $[W]$ . The second stage deals with definition of mission of sites and of the strategic proportions of product flows to direct toward processing alternatives. It is tackled through five sets of continuous variables defining flows of product  $p$  in state  $s$  between network node  $n$  and  $n'$   $[F_{pnm}]$  and volumes of product  $p$  in state  $s$  at processing centre  $k$  directed toward a processing alternative  $[Q_{psk}]$ , processed  $[X_{psk}]$  or available  $[Z_{psk}]$  for further processing, and resulting from processing  $[V_{psk}]$ . The second stage decisions depend on the first stage decision variables  $Y$  and on a realization (or a scenario)  $\omega \in \Omega$  of the random parameters for a given network operating context. Random parameters relate to recovery, demand and processing volumes, which depend on the states of recovered products. A network operating context defines policies and strategies adopted by an organisation notably to face competitiveness, legislations or changes in organisation mission. Such a context changes here with minimal demand proportions to be fulfilled with valorised products, according to requirements or needs from end-users and business units, and with unit value of valorised products.

### Binary variables

The first stage decisions refer to:

$Y = [Y_k, Y_l]$ : Binary variables for using or not processing centre  $k$  or warehouse  $l$  ( $Y = 1$  if site  $k$  or  $l$  is used and 0 otherwise).

$W_{dj}$ : Binary variables for assigning user zone  $d$  to service center  $j$  for collection ( $W_{dj} = 1$  if user zone  $d$  is served by service centre  $j$  for collection and 0 otherwise).

### Continuous variables

The second stage decisions, for a specific scenario  $\omega \in \Omega$ , refer to:

**Flow variables** [ $F_{psm}(\omega)$ ]:

$F_{p1in}(\omega); F_{p2ln}(\omega)$ : Volume of product family  $p$  in state  $s$  exchanged between supplier  $i$  ( $s = 1$ ) or warehouse  $l$  ( $s = 2$ ) and network node  $n$ , such as service centre  $j$  or processing centre  $k$ .

$F_{p0dj}(\omega)$ : Volume of product family  $p$  collected in an unknown state ( $s = 0$ ) from user zone  $d$  of service centre  $j$  with private vehicle fleet [ $F_{psdj}$ ].

$F_{psnk}(\omega)$ : Volume of product family  $p$  directed toward disposal ( $s \geq 2$ ) transferred from network node  $n$ , such as service centre  $j$  or processing centre  $k$ , to processing centre  $k'$ , designated as disposal centre.

$F_{psjk}(\omega)$ : Volume of product family  $p$  directed toward repair or disassembling ( $1 < s < 4$ ) transferred from service centre  $j$  to processing centre  $k$ , designated as valorisation centre.

$F_{p2kl}(\omega)$ : Volume of product family  $p$  which has been valorised ( $s = 2$ ) in processing centre  $k$  transferred to warehouse  $l$ .

**Processing variables** [ $Q_{psk}(\omega); Z_{psk}(\omega); X_{psk}(\omega); V_{msk}(\omega)$ ]:

$Q_{psk}(\omega) = [Q_{psk}^{RE}(\omega), Q_{psk}^D(\omega), Q_{psk}^E(\omega)]$ : Volume of finished product family  $p \in F$  recovered in state  $s$  directed toward a processing alternative (repair [ $Q^{RE}$ ], disassembling & part refurbishing [ $Q^D$ ], disposal [ $Q^E$ ]) at processing centre  $k$ .

$X_{psk}(\omega) = [X_{psk}^{RE}(\omega), X_{psk}^D(\omega), X_{psk}^E(\omega)]$ : Volume of product family  $p$  recovered in state  $s$  and processed (repair  $[X^{RE}]$ , disassembling & part refurbishing  $[X^D]$ , disposal  $[X^E]$ ) at processing centre  $k$ .

$Z_{psk}(\omega) = [Z_{psk}^D(\omega)]$ : Volume of product family  $p$  in state  $s$  available for refurbishing, disassembling and disposal resulting from disassembling and part refurbishing alternative at processing centre  $k$ .

$V_{psk}(\omega) = [V_{psk}^{RE}(\omega), V_{psk}^D(\omega)]$ : Volume of part family  $p \in M$  in state  $s$  resulting from valorisation (repair  $[V^{RE}]$ , disassembling & part refurbishing  $[V^D]$ ) at processing centre  $k$ .

### Model parameters

Model parameters, which may change according to the considered scenario  $\omega \in \Omega$ , relate to:

$b_{pk}^{RE}; b_{pk}^D; b_{pl}$ : Capacity related to product family  $p$  in state  $s$  for product repaired or disassembled at processing centre  $k$  and stored at warehouse  $l$ .

$c = [c_k, c_l]$ : Vector of fixed cost to operate processing centre  $k$  or warehouse  $l$ .

$d_{pj}^a(\omega); d_{pj}^r(\omega)$ : Demand (acquisition  $[d^a]$ , replacement  $[d^r]$ ) for product family  $p$  at service centre  $j$ .

$f_{psmn}$ : Vector of unit cost for flow of product family  $p$  in state  $s$  between network node  $n$  and  $n'$ , such as user zone  $d$ , supplier  $i$ , service centre  $j$ , processing centre  $k$  or warehouse  $l$ . Unit cost for flow between processing centre  $k$  and warehouse  $l$   $[f_{pskl}(\omega)]$  includes holding cost, calculated with valorised product unit value and holding cost rate.

$g_{pp'}$ : Relative quantity of part family  $p \in M$  involved in processing (ass./disassembling) of product family  $p' \in F \cup A$ .

$b_{pp'}$ : Feasibility to disassemble part family  $p \in M$  from product family  $p' \in F \cup A$  ( $b_{pp'} = 1$  if possible 0 otherwise).

$q_p$ : Size of product family  $p$  in standard unit.

$r_{pj}^r(\omega); r_{pj}^{un}(\omega)$ : Voluntarily return of product family  $p$  to service centre  $j$  (replacement [ $r^r$ ], unused products [ $r^{un}$ ]).

$r_{pd}^e(\omega)$ : Recovery of unused product family  $p$  at user zone  $d$  assigned to service centre  $j$ .

$v_{psk} = [v_{psk}^{RE}, v_{psk}^D]$ : Vector of unit cost to disassemble part family  $p \in M$  in state  $s$  in processing centre  $k$ .

$x_{psk} = [x_{psk}^{RE}, x_{psk}^D, x_{psk}^E]$ : Vector of unit cost to process (repair [ $x^{RE}$ ], disassembling & part refurbishing [ $x^D$ ], disposal [ $x^E$ ]) product family  $p$  in state  $s$  in processing centre  $k$ .

$\alpha_{psj}(\omega)$ : Minimal demand proportion for product family  $p$  to be fulfilled with valorised products ( $s = 2$ ) in service centre  $j$ .

$\phi_{psj}(\omega)$ : Proportion of product family  $p$  in an recovered unusable state ( $s = 4$ ) at service centre  $j$ .

$\phi_{pp'ss'k}(\omega)$ : Proportion of part family  $p \in M$  disassembled in an unusable state ( $s = 4$ ) from product family  $p' \in F \cup A$  in state  $s'$  at processing centre  $k$ .

$\gamma_{psj}(\omega)$ : Proportion of product family  $p$  recovered in a good condition ( $s = 2$ ) at service centre  $j$ .

$\gamma_{pp'ss'k}(\omega)$ : Proportion of part family  $p \in M$  disassembled in a good condition ( $s = 2$ ) from product family  $p' \in F \cup A$  in state  $s'$  at processing centre  $k$ .

### Objective function

The resulting model formulation is then:

$$f(Y) = \min_{Y \in \{0,1\}} \{\text{Fixed costs} + \text{Expected variables costs}\}$$

$$f(Y) = \min_{Y \in \{0,1\}} \{c^T Y + E[Q(Y, \omega)]\} \quad (4.1)$$

where  $Q(Y, \omega)$  is the optimal value of the following linear programming function:

$$Q(Y, \omega) = \min \{\text{Flow costs} + \text{Repair or Refurbishing costs} + \text{Disassembling costs}\}$$

$$Q(Y, \omega) = \min \left\{ \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} f_{psm'}^T(\omega) F_{psm'}(\omega) + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} (x_{psk}^T(\omega) X_{psk}(\omega) + v_{psk}^T(\omega) V_{psk}(\omega)) \right\} \quad (4.2)$$

s.t.

## Constraints

### ***Demand constraints:***

Demand (acquisition, replacement) is fulfilled with products delivered from suppliers (new products) and warehouses (valorised product);

$$\sum_{i \in I} F_{p1in}(\omega) + \sum_{l \in L} F_{p2ln}(\omega) = d_{pj}^a(\omega) + d_{pj}^r(\omega) \quad p \in P, j \in J, n \in J \quad (4.3)$$

Minimal proportion of demand to be fulfilled with valorised product:

$$\sum_{l \in L} F_{p2ln}(\omega) \geq [d_{pj}^a(\omega) + d_{pj}^r(\omega)] \alpha_{psj}(\omega) \quad p \in P, s = 2, j \in J, n \in J \quad (4.4)$$

### ***Recovery constraints:***

User zones are served by only one service centres for collection:

$$\sum_{j \in J} W_{dj} = 1 \quad (4.5)$$

Unused products are recovered by private vehicle fleet from end-users:

$$F_{p0dj}(\omega) = W_{dj} r_{pd}^c(\omega) \quad p \in P, d \in D, j \in J \quad (4.6)$$

### ***Constraints on flows of recovered products transferred to processing centres:***

Recovered products in an unusable state are transferred to disposal centres:

$$\sum_{k \in K} F_{psnk}(\omega) = [r_{pj}^r(\omega) + r_{pj}^n(\omega) + \sum_{d \in D_j} F_{p0dj}(\omega)] \varphi_{psj}(\omega) \quad p \in P, s = 4, j \in J, n \in J \quad (4.7)$$

Recovered products in a good or a failing condition are transferred to valorisation centres:

$$\sum_{k \in K} F_{psjk}(\omega) = [r_{pj}^r(\omega) + r_{pj}^n(\omega) + \sum_{d \in D_j} F_{p0dj}(\omega)] \gamma_{psj}(\omega) \quad p \in F, s = 2, j \in J \quad (4.8)$$

$$\sum_{k \in K} F_{psjk}(\omega) = [r_{pj}^r(\omega) + r_{pj}^n(\omega) + \sum_{d \in D_j} F_{p0dj}(\omega)] [1 - \varphi_{psj}(\omega) - \gamma_{psj}(\omega)] \quad p \in F, s = 3, j \in J \quad (4.9)$$

### ***Constraints on recovered product volumes directed toward processing alternatives:***

Products transferred to valorisation centres may be directed to one or many processing alternatives:

$$Q_{p(s=2)k}^{RE}(\omega) + \sum_{2 \leq s \leq 3} Q_{psk}^D(\omega) + \sum_{2 \leq s \leq 3} Q_{psk}^E(\omega) = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} F_{psjk}(\omega) \quad f \in F, k \in K \quad (4.10)$$

Product states designate upper bound on products to be valorised:

$$Q_{psk}^{RE}(\omega) \leq \sum_{j \in J} F_{psjk}(\omega) \quad p \in F, s = 2, k \in K \quad (4.11)$$

$$Q_{psk}^D(\omega) \leq [\sum_{j \in J} F_{psjk}(\omega) - Q_{psk}^{RE}(\omega)] \quad p \in F, s = 2, k \in K \quad (4.12)$$

$$Q_{psk}^D(\omega) \leq \sum_{j \in J} F_{psjk}(\omega) \quad p \in F, s = 3, k \in K \quad (4.13)$$

**Disassembling constraints:**

Products involved in repair correspond to finished products assigned to repair and to parts resulting from their disassembling:

$$X_{psk}^{RE}(\omega) = Q_{psk}^{RE}(\omega) \quad p \in F, s = 2, k \in K \quad (4.14)$$

$$X_{psk}^{RE}(\omega) = V_{psk}^{RE}(\omega) \quad p \in M, s \in S, k \in K \quad (4.15)$$

Products available for disassembling correspond to finished product assigned to disassembling, to parts resulting from their disassembling and to product downgraded to a lower processing alternative, while downgrading their state:

$$Z_{psk}^D(\omega) = Q_{psk}^D(\omega) + [Z_{p(s-1)k}^D(\omega) - X_{p(s-1)k}^D(\omega)] \quad p \in F, 2 \leq s \leq 3, k \in K \quad (4.16)$$

$$Z_{psk}^D(\omega) = V_{psk}^D(\omega) + [Z_{p(s-1)k}^D(\omega) - X_{p(s-1)k}^D(\omega)] \quad p \in M, 2 \leq s \leq 4, k \in K \quad (4.17)$$

$$Z_{psk}^D(\omega) = 0; X_{psk}^D(\omega) = 0 \quad p \in P, s = 1, k \in K$$

Products involved in disassembling may be lower or equal to products available in a given state, which assigns a given process (refurbishing or disassembling):

$$X_{psk}^D(\omega) \leq Z_{psk}^D(\omega) \quad p \in P, 2 \leq s \leq 3, k \in K \quad (4.18)$$

Products not directed to disassembling are equal to products assigned to the unusable state:

$$X_{psk}^D(\omega) = Z_{psk}^D(\omega) \quad p \in P, s = 4, k \in K \quad (4.19)$$

Parts obtained from valorisation may be in various states:

$$\sum_{2 \leq s' \leq 4} V_{psk}^{RE}(\omega) = h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^{RE}(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, s' = 3, k \in K \quad (4.20)$$

$$\sum_{2 \leq s' \leq 4} V_{psk}^D(\omega) = h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^D(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (4.21)$$

Parts obtained from valorisation may have a potential for repair or refurbishing in a maximal proportion:

$$V_{psk}^{RE}(\omega) \leq [h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^{RE}(\omega)] \gamma_{pp'ss'k}^P(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, s = 2, s' = 3, k \in K \quad (4.22)$$

$$V_{psk}^D(\omega) \leq [h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^D(\omega)] \gamma_{pp'ss'k}^P(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, s = 2, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (4.23)$$

Parts obtained from valorisation may have to be disposed in a minimal proportion:

$$V_{psk}^{RE}(\omega) \geq [h_{pp'} g_{pp'} X_{p's'k}^{RE}(\omega)] \varphi_{pp'ss'k}^P(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, s = 4, s' = 3, k \in K \quad (4.24)$$

$$V_{psk}^D(\omega) \geq [b_{pp'}g_{pp'}X_{p's'k}^D(\omega)]\varphi_{pp's's'k}^P(\omega) \quad p \in M, p' \in F \cup A, s = 4, 2 \leq s' \leq 3, k \in K \quad (4.25)$$

**Disposal constraints:**

Products that are not valorised are transferred to disposal centres:

$$\sum_{k' \in K} F_{psnk'}(\omega) = Q_{psk}^E(\omega) \quad p \in F, 1 < s < 4, k \in K, n \in K \quad (4.26)$$

$$\sum_{k' \in K} F_{psnk'}(\omega) = X_{psk}^{RE}(\omega) + X_{psk}^D(\omega) \quad p \in M, s = 4, k \in K, n \in K \quad (4.27)$$

$$\sum_{k' \in K} F_{psnk'}(\omega) = X_{psk}^{RE}(\omega) + X_{psk}^D(\omega) \quad p \in C, s = 3, k \in K, n \in K \quad (4.28)$$

Products processed in disposal centres come from service and processing centres:

$$X_{psk'}^E(\omega) = \sum_{n \in J \cup K} F_{psnk'}(\omega) \quad p \in P, s \in S, k' \in K \quad (4.29)$$

**Part replacement constraints:**

Parts rejected from repair are replaced by new or valorised ones:

$$\sum_{i \in I} F_{p1in}(\omega) + \sum_{l \in L} F_{p2ln}(\omega) = X_{psk}^{RE}(\omega) \quad p \in M, s = 4, k \in K, n \in K \quad (4.30)$$

$$\sum_{i \in I} F_{p1in}(\omega) + \sum_{l \in L} F_{p2ln}(\omega) = X_{psk}^{RE}(\omega) \quad p \in C, s = 3, k \in K, n \in K \quad (4.31)$$

**Constraints on supply and demand of valorised products:**

Valorised products are directed to warehouses:

$$\sum_{l \in L} F_{p2kl}(\omega) = X_{psk}^{RE}(\omega) \quad p \in F, s = 2, k \in K \quad (4.32)$$

$$\sum_{l \in L} F_{p2kl}(\omega) = X_{psk}^D(\omega) \quad p \in M, s = 2, k \in K \quad (4.33)$$

Valorised products throughput in warehouses:

$$\sum_{k \in K} F_{p2kl}(\omega) = \sum_{n \in J \cup K} F_{p2ln}(\omega) \quad p \in P, l \in L \quad (4.34)$$

**Capacity constraints:**

Valorisation centres capacity must be respected:

$$X_{psk}^{RE}(\omega) \leq b_{pk}^{RE} Y_k \quad p \in P, s = 2, k \in K \quad (4.35)$$

$$\sum_{s \in S} X_{psk}^D(\omega) \leq b_{pk}^D Y_k \quad p \in P, k \in K \quad (4.36)$$

Warehouses capacity, in term of a maximum throughput, must be respected:

$$q_p \sum_{k \in K} F_{pskl}(\omega) \leq b_{pl} Y_l \quad p \in P, s = 2, l \in L \quad (4.37)$$

**Non-negativity restriction:**

$$F_{psmn}(\omega) \geq 0 \quad \forall(p, s, n, n') \quad (4.38)$$

$$Q_{psk}(\omega), V_{psk}(\omega), X_{psk}(\omega), Z_{psk}(\omega) \geq 0 \quad \forall(p, s, j, k) \quad (4.39)$$

Two major difficulties are raised when solving such a problem (Santoso *et al.*, 2005). First, evaluation of the objective function  $f(Y)$  rests on the expected value  $E[Q(Y, \omega)]$  of the linear program  $Q(Y, \omega)$ . Exact computation of this expected value is made through multiple integrals when random parameters are independently represented by continuous distribution functions. Computation must be carried out for all possible combinations of random parameter values. For now, such an approach is impossible for complex problems when taking into account several random parameters. Moreover, even if the expected value of the linear program  $Q(Y, \omega)$  may be found, an additional difficulty appears when solving a non-linear function, since this function varies with possible network configurations  $Y$ . These resolution difficulties are circumvented here with the use of a heuristics based on the sample average approximation (SAA) method. This method is detailed in the following section.

## 4.4 Sample average approximation

The resolution with the sample average approximation (SAA) method rests on approximating the expected value  $E[Q(Y, \omega)]$  by the average of the values obtained by solving  $Q(Y, \omega)$  for a large sample of scenarios. A configuration  $Y$  is obtained while respecting the constraints of the model for all scenarios. Scenarios are generated outside of the optimization procedure with the Monte Carlo sampling methods. They are defined according to distribution functions describing random factors for a specific network operating context. Consequently, the “true” problem (Equations (4.1)) is approximated by the problem:

$$\min_{Y \in \{0,1\}} \{\hat{f}_N(Y) = c^T Y + \frac{1}{N} \sum_{\omega \in \Omega'_N} [Q(Y, \omega)]\} \quad (4.40)$$

### 4.4.1 Algorithmic strategy

Solving with the sample average approximation is usually made by using an algorithmic strategy, that is built around the identification of near-optimal solutions and the evaluation of their proximity to the optimum. It consists in defining a sample of size  $N$  for which the SAA



problem may be solved in reasonable time with a commercial solver, such as CPLEX. Several independent samples  $j=1, \dots, M$  of size  $i=1, \dots, N$  are generated to explore different potential solutions. Program (4.40) is solved for each sample  $j$  with scenarios  $\{\omega_1^j, \dots, \omega_N^j\} = \Omega_N^j \subset \Omega$ , which gives the optimal value of the objective function  $v_N^j$  and a feasible solution  $\widehat{Y}_N^j$ .  $M$  near-optimal solutions could thus be identified in this first part of the algorithm. Then, the identified near-optimal solutions are evaluated with a sample of size  $N'$ , much bigger than  $N$ , to determine the best solution.

A statistical confidence interval of the optimality gap is then derived from these results, based on Shapiro (2003). First, it can be shown that the estimated value of the objective function calculated from a small sample size is less than or equal to the value of the true problem. The average value estimated from many instances thus represents a lower bound for the optimal value of the true problem. Moreover, the quality of a solution improves as the sample size increases. Therefore, the estimated value of the objective function for a given solution evaluated with a larger sample size represents an upper bound on the optimal value of the true problem. The retained solution used to evaluate this upper bound is usually one of the  $M$  near-optimal solutions giving the smallest estimated value of the objective function in the first part of the algorithm.

The SAA algorithm is summarized as follows:

**Step 1:** Generate  $j=1, \dots, M$  independent samples of size  $i=1, \dots, N$ ,  $\{\omega_1^j, \dots, \omega_N^j\} = \Omega_N^j \subset \Omega$ . Solve the SAA program:

$$\min_{Y \in \{0,1\}} \{c^T Y + \frac{1}{N} \sum_{\omega \in \Omega_N^j} [Q(Y, \omega)]\}$$

Let  $v_N^j$  and  $\widehat{Y}_N^j$  be respectively the corresponding optimal objective value and the solutions for the samples  $j=1, \dots, M$ .

**Step 2:** Compute the statistical lower bound based on the average optimal objective value obtained from samples  $j=1, \dots, M$ :

$$\bar{v}_{N,M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v_N^j \quad (4.41)$$

**Step 3:** Select a feasible solution  $\bar{Y}$  among those obtained in step 1. Estimate the value of the objective function with a sample of size  $N'$ , much larger than  $N$ , by solving:

$$\hat{f}_{N'}(\bar{Y}) = c^T \bar{Y} + \frac{1}{N'} \sum_{\omega \in \Omega_{N'}} [Q(\bar{Y}, \omega)] \quad (4.42)$$

The value of  $\hat{f}_{N'}(\bar{Y})$  is an estimated upper bound of the “true” problem objective function  $v^*$ .

**Step 4:** Compute an estimate of the optimality gap of the solution  $\bar{Y}$ .

$$gap_{N,M,N'}(\bar{Y}) = f_{N'}(\bar{Y}) - \bar{v}_{N,M} \quad (4.43)$$

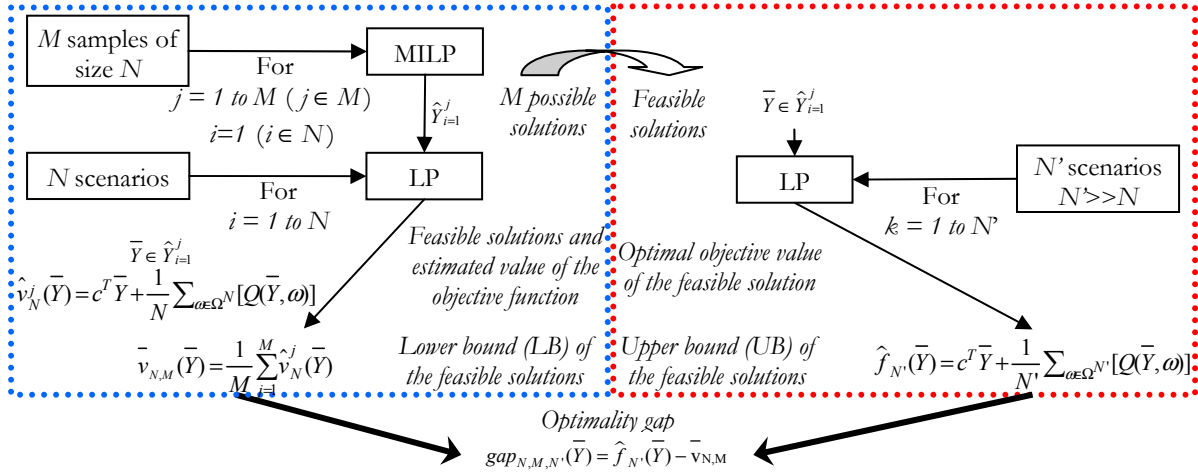
When the estimated gap is judged as unreasonable, additional samples or increased sample size  $N$  must be tested. Note that the original algorithm also includes computation of the estimated variance of the estimated optimality gap, to detail its variability.

An example of the application of this method for designing logistics networks may be found in Santoso *et al.* (2005) and, for the forest industry context, in Vila *et al.* (2007).

#### 4.4.2 Heuristics based on the sample average approximation method

A heuristics based on the SAA method is proposed for solving the model. The heuristics reduces the computational times for large scale problems by avoiding the determination of binary variables subject to constraints defined by a large number of scenarios ( $i = 1, \dots, N$ ), for all considered samples ( $j = 1, \dots, M$ ). The network configuration is fixed using a SAA program with a limited number of scenarios. For simplification, it is fixed from the first scenario of each of the considered samples, which lead to solutions  $\bar{Y} \in \hat{Y}_{i=1}^j$ . The average  $\bar{v}_{i=1,M}$  of all values  $v_{i=1}^j$  of the objective solution obtained with these solutions is judged not reasonable to get a good representation of the lower bound of the optimal value of the true problem. These solutions are then evaluated with the defined samples of size  $N$ . Non-feasible solutions, which do not respect the constraints defined for all scenarios of each sample, are rejected after this evaluation. Otherwise, an estimated value of the objective function  $\hat{v}_N^j(\bar{Y})$  is calculated for each sample. The average  $\bar{v}_{N,M}(\bar{Y})$  of this estimated value for each sample for a given feasible solution represents a lower bound for the solution. Just as for the SAA method, feasible

solutions are then evaluated with a sample of size  $N'$ , greater than  $N$  but lower or equal to the total amount of scenarios covered by all samples ( $N' \geq N \times M$ ). An optimality gap is finally evaluated for each solution to appreciate how solutions react to randomness. The heuristics is schematized in **Figure 30**.



**Figure 30:** Heuristics based on the sample average approximation.

In this paper, the  $M$  independent samples are elaborated under various operating contexts. When the solutions given by these samples are divergent, the quality of these solutions is evaluated separately in the computation of the optimality gap. These results may be used to evaluate how the operating contexts can impact a solution, and to support recommendations regarding the policies and strategies adopted by an organisation.

## 4.5 Computational results

The numerical experiments using the heuristics based on the sample average approximation method to solve a case study are presented in this section. The case study characteristics and the details of the implementation of the heuristics are presented first. The computational efficiency and the quality of the stochastic programming solutions compared to a deterministic approach are then commented on.

### 4.5.1 Studied case

The studied case refers to the wheelchairs allocation and maintenance context in the Province of Quebec (Canada), governed and managed by the Quebec Health Insurance Board (“Régie de

*l'assurance maladie du Québec - RAMQ*). Thirteen rehabilitation centres are mandated by the RAMQ to undertake these services, offered free of charge to admissible end-users. Since June 2000, the centres have been asked to recover the unused wheelchairs from end-users, to process them and to reuse reusable products. Recovery occurs mainly following a product replacement or the death of the end-user. In this latter case, a collection service is offered to families in order to ensure recovery of the products. Both private vehicle fleet and logistics service providers may be considered by the centres to carry out the collection.

The integration of these activities into the current operating context of rehabilitation centres has widened the admissibility to wheelchairs for people with loss of mobility. It also reduces the delivery delay for wheelchairs with a quality close to a new one. For the period from June 15, 2000 to March 31, 2002, the RAMQ has saved about 3.8 million dollars from a total budget of 54.3 million dollars by reallocating valorised products (Côté *et al.*, 2003).

Each rehabilitation centre currently operates on an autonomous basis. Steps are being initiated to organise and support all the related activities (Chouinard *et al.*, 2005; Chouinard, 2003). More specifically, plans are underway to establish a provincial inventory of valorised products, while maintaining or improving services to end-users, all the while and reducing the operating costs of such supply loops. The potential network under consideration involves the current sites and additional third parties. As a first approach, all rehabilitation centres are represented as service centres for allocation, maintenance and recovery. Service centres are then set fixed for collection in the model. However, some of them are also considered as potential valorisation centres and warehouses. Those that are considered can see their storage and processing capacities increased to a given level. They are located near areas with high population density. Third parties may be involved as disposal centres. New products are delivered from established suppliers. The collection is completed by a private vehicle fleet of the service centres. The principal characteristics of this potential network are summarized in **Table 15** and in **Figure 31** for the bills of materials.

**Table 15:** Potential network characteristics.

<b>Potential network</b>	Service centres	13
	Potential processing centres	6 valorisation centres 2 disposal centres
	Potential warehouses	6

<b>Products</b>	Finished product families	3 [Manual wheelchairs - MAW, Motorized wheelchairs - MOW, Positioning base - BP]
	Part families (see <b>Figure 31</b> )	16 4-7 part families per finished products
<b>End-Users</b>	User zones	62 3-8 zones per service centres

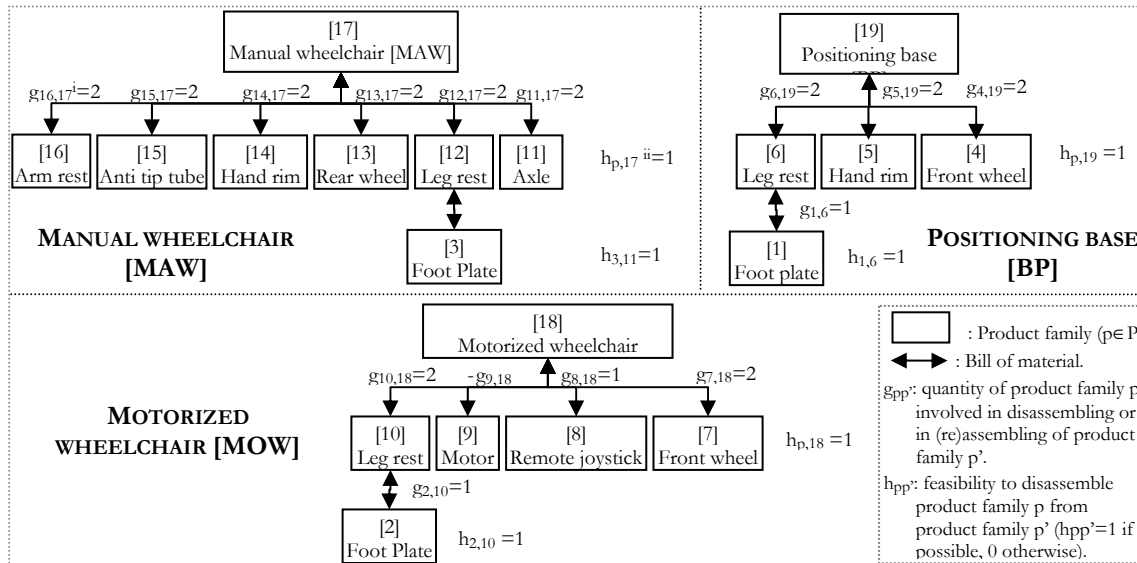


Figure 31: Bills of materials for the RAMQ context.

### 4.5.2 Implementation of the solving method

Prior to solving the problem, all parameters need to be defined, such as those of the distribution functions used to represent the identified random factors (Chouinard *et al.*, 2007b). Different operating contexts must also be characterized in this stage depending on the product accessibility. This, however, may change according to the supply loop capacity to respect requirements from end-users, as well as organisation policies and strategies. These contexts are represented through unit value associated to valorised products and minimal demand volume proportions to be fulfilled by valorised products.

Two average unit values are considered when dealing with valorised products, especially for those resulting from repair. The first reflects the value of the repaired products for which only valorised parts are used, and the second the value of the repaired products when both new and

valorised parts are used. These values are used in the computation of the holding costs. The valorised product unit values are presented as percentages of the new product unit value.

Two situations are also considered concerning the minimal proportions of demand to be fulfilled with valorised products, particularly for finished products. The proportions may thus be given by average values met in current service centres, for each finished product family, or be fixed at zero.

Various scenarios are defined to cover a broad range of random factors with respect to recovery, processing and demand volumes (**Table 16** and **Table 17**), while considering different operating contexts (**Table 18**). Sixteen case instances  $M$  are thus developed, which represent four independent instances by possible combination of operating contexts subject to a random environment (**Table 19**). Case instances are treated with samples of size  $N = 25, 50, 100$ . They are defined with the use of the same four samples of scenarios for the four operating context. The quality of the selected solution is then evaluated with samples of size  $N' = 400$ .

**Table 16:** Normally distributed demand and recovery volumes.

	Dist. fct	MAW	MOW	BP	Parts
<b>Demand</b> (acquisition and replacement)	$N[\mu_D, \sigma_D]$	$\sigma_D/\mu_D = 15\%$	$\sigma_D/\mu_D = 30\%$	$\sigma_D/\mu_D = 35\%$	$\sigma_D/\mu_D = 25\%$
<b>Recovery</b> (collection only)	$N[\mu_R, \sigma_R]$	$\sigma_R/\mu_R = 30\%$	$\sigma_R/\mu_R = 30\%$	$\sigma_R/\mu_R = 30\%$	$\sigma_R/\mu_R = 25\%$

**Table 17:** Average and standard deviation for proportions [%] defining states of products with use of Gamma and Weibull distribution functions.

	DIST. FCT	FINISHED PRODUCT FAMILIES			PART FAMILIES					
		MAW	MOW	BP	Dis. from prod. in good cond.			Dis. from prod. in failed cond.		
					MAW	MOW	BP	MAW	MOW	BP
<b>Repair</b>	Weibull $W[\alpha, \beta]$	$G$ $\mu : 54$ $\sigma : 4$	$G$ $\mu : 41$ $\sigma : 7$	$G$ $\mu : 81$ $\sigma : 3$	$W$ $\mu : 90$ $\sigma : 10\%$	$G$ $\mu : 89$ $\sigma : 13$	$W$ $\mu : 88$ $\sigma : 9$	$W$ $\mu : 33$ $\sigma : 7$	$G$ $\mu : 20$ $\sigma : 20$	$G$ $\mu : 46$ $\sigma : 43$
	or Gamma $G[\alpha, \beta]$	$W$ $\mu : 36$ $\sigma : 4$	$W$ $\mu : 46$ $\sigma : 7$	$W$ $\mu : 13$ $\sigma : 3$	$G$ $\mu : 3$ $\sigma : 3$	$W$ $\mu : 4$ $\sigma : 3$	$G$ $\mu : 1$ $\sigma : 1$	$W$ $\mu : 53$ $\sigma : 7$	$W$ $\mu : 60$ $\sigma : 15$	$G$ $\mu : 69$ $\sigma : 26$

**Table 18:** Characteristics of the operating context.

DEMAND FOR VALORISED PRODUCTS (% of demand, as for acquisition and replacement)								UNIT VALUE OF VALORISED PRODUCTS (% of unit value of new products)							
Imposed minimal demand proportions				No minimal demand proportions				Lower value (repair with valorised parts)				Higher value (repair with new and valorised parts)			
MAW	MOW	BP	Parts	MAW	MOW	BP	Parts	MAW	MOW	BP	Parts	MAW	MOW	BP	Parts
13	13	26	0	0	0	0	0	12	7	10	15	20	13	15	15

**Table 19:** Case instances ( $j=1,\dots,M$ ) elaborated according to the considered random factors and operating context.

RANDOM FACTORS	OPERATING CONTEXTS	Imposed minimal demand proportions	No minimal demand proportions
Recovery volumes Processing volumes Demand volumes	Lower valorised product unit value	Case instances: # 1, 2, 3, 4	Case instances: # 5, 6, 7, 8
	Higher valorised product unit value	Case instances: # 9, 10, 11, 12	Case instances: # 13, 14, 15, 16

The sample average approximation algorithmic was implemented in C++ with CPLEX 9.0. All computations were carried out on a Pentium IV 2.4 GHz PC running Windows XP.

### 4.5.3 Computation performance and quality of the stochastic solutions

The applicability of the approach is evaluated through the computational times and the quality of solutions. Solutions obtained with the use of the stochastic programming approach and a deterministic version of the model, using average values of the random factors, are thus compared. Solutions are also compared to those obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately. These comparisons are carried out to underline the effects of the variability on the model decisions.

The computational times observed with the heuristic approach are similar for all case instances and operating contexts. They increase linearly with the sample size  $N$ , since the heuristics consists in solving successively one MILP problem and  $N-1$  LP problems. The computational time of the heuristic approach is compared to that obtained using the SAA approach, for a sample of size  $N = 3$ , in **Table 20**. The number of continuous variables and constraints with the heuristics is the same for each MILP and each of the successive LP problems (**Table 21**). It differs from the corresponding SAA program for which the number of continuous variables and constraints simultaneously increases with the sample size  $N$ .

**Table 20:** Computational times.

		Sample size $N$	CPU time [sec]
Heuristics	MILP	1	0.34
	LP	1	0.22
	1MILP+2LP	3	0.78
SAA	MILP	1	0.34
	MILP	3	3.11

**Table 21:** Number of variables and constraints for solving the problem with the heuristics or the SAA method.

	Sample size $N$	Variables		Constraints	
		Binary	Continuous	Equality	Inequality
Heuristics	1 (MILP)	14	8 011	2 696	2 040
	1 (LP)	-	8 011	2 696	2 040
SAA	1	14	8 011	2 696	2 040
	25	14	200275	67 400	51 000
	50	14	400 550	134 800	102 000
	100	14	801 100	269 600	204 000

Two close solutions are identified with the proposed approach (**Table 22**), whereas only one solution is obtained using a deterministic model. These two solutions are also obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately, with the use of the first case instance of each operating context (**Table 23**). Contrary to the deterministic model, the results of the stochastic program also suggests the use of a restricted number of valorisation centres and warehouses (**Table 26**). The solution is the same for each operating context. However, since each operating context results in different objective value (**Table 24**), operating contexts were evaluated separately.

**Table 22:** Designs obtained with the stochastic approach, for  $N=100$ ,  $N'=400$  and  $M=16$ .

	Number of processing centres (valorisation centres)	Number of warehouses
<b>Solution 1*</b>	6 (4)	4
<b>Solution 2</b>	5 (3)	3

\* Solution also identified with the deterministic model.

**Table 23:** Solutions obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately.

	Number of occurrences for all scenarios ( $N=100$ )			
	$\hat{j}=1$	$\hat{j}=5$	$\hat{j}=9$	$\hat{j}=13$
<b>Solution 1</b>	62	62	55	55
<b>Solution 2</b>	38	38	45	45

The use of a restricted number of valorisation centres and warehouses affects the proportions of the demand volumes fulfilled with valorised products and, consequently, the proportions of the product flows directed toward each processing alternative (**Table 24**). It decreases the volume of the finished products directed toward repair. However, it increases the volume of the products directed toward disassembling and, consequently, the proportions of the parts available to repair products in circulation. The resulting average proportion of the valorised



parts made available with both solutions (Solution 1: 10.4%; Solution 2: 25.6%) is however higher or equivalent to the current average proportion (10.1%). The use of a higher proportion of valorised parts allows a decrease of about 0.35% of the objective function value.

**Table 24:** Proportions of demand volumes fulfilled with valorised products and proportions of recovered product volumes directed to processing alternatives for the identified solutions.

Solution	% of demand for valorised products								% of recovered product volume repaired								% of recovered product volume disposed					
	MAW		MOW		BP		Parts		MAW		MOW		BP		MAW		MOW		BP			
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		
1	32.7	1.2	34.5	2.2	57.2	3.5	10.4	5.3	74.8	2.9	77.3	4.1	89.6	2.8	0.0	0.0	1.0	3.2	0.0	0.1		
2	26.8	1.0	29.4	1.3	47.7	2.9	25.6	6.6	61.5	2.4	65.9	3.6	74.8	2.4	0.0	0.0	1.2	3.9	0.0	0.1		

The unit values used for the valorised products seem to accurately represent the supply loop operating context. These values have little impact on the model decisions. No clear variations arise on decisions regarding product flows directed toward processing alternatives for both solutions according to these values. An increase of almost two thirds of the unit value for valorised products leads to a maximum increase of about 0.7% of the objective function value. However, an increase of the needs for valorised parts could affect the network configuration when the unit value of valorised finished products is higher. Seven scenarios are thus affected by the unit value of valorised products (**Table 23** and **Table 25**).

**Table 25:** Percentage of variation of the parameters for the solutions obtained when all scenarios of the case instances are optimized separately ( $N=100$ ).

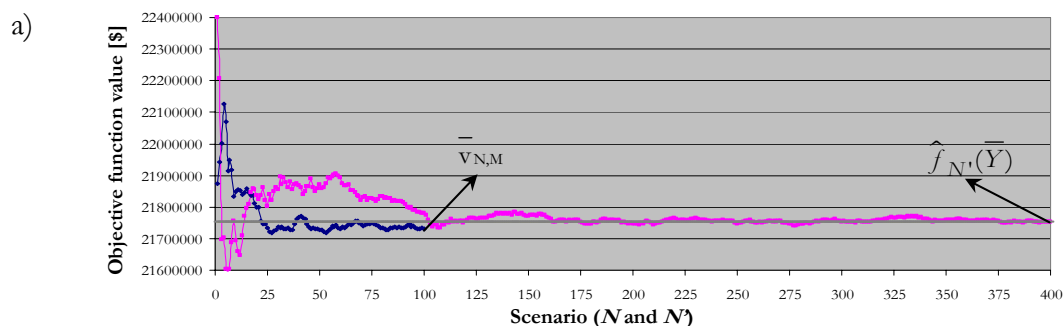
	Percentage [%] of variation according to the average of all considered scenarios		
	Solution 1	Solution 2	Seven scenarios affected by the unit value of valorised products
<b>Demand volumes</b>	Finished products: +0.16 Parts: -0.32	Finished products: -0.19 Parts: +0.39	Finished products: -0.31 Parts: +0.75
<b>Recovery volumes</b>	Finished products: +0.53	Finished products: -0.64	Finished products: +0.08
<b>Proportions defining product states</b>	s=2: +0.72 s=4: -0.31	s=2: -0.88 s=4: +0.38	s=2: -0.17 s=4: -1.04

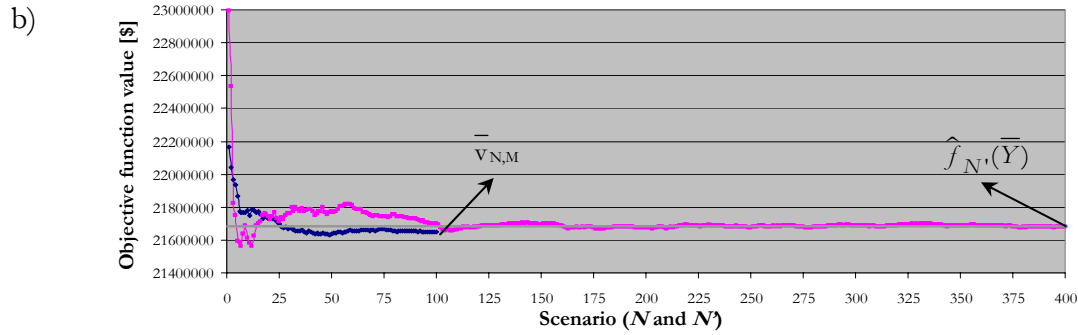
The proportions of the demand volumes fulfilled with valorised products are the same for all case instances with a given solution, as the minimal proportions of the demand volumes from end-users needs are imposed or not. This result supports product valorisation. Only the

capacity of the valorisation centres limits the proportions of the product flows directed toward repair. Indeed, the average proportions met (Solution 1: MAW: 74.8%; MOW: 77.3%; BP: 89.6%; Solution 2: MAW: 61.5%; MOW: 65.9%; BP: 74.8%) is lower than the average available proportions (MAW: 83.8%; MOW: 77.6%; BP: 93.3%). However, the proportions of the demand volumes fulfilled with valorised products within the involved sites vary with the considered operating context. Indeed, when no proportion is imposed, the redistribution of the valorised products occurs mainly at service and processing centres near the considered warehouses. A variation of about 0.02% of the objective function value is then observed.

Moreover, the use of new products only for the demand fulfilment leads to an increase of about 20% of the operating costs of such logistics network. Such an increase is obtained without considering the recovery and processing of unused products.

Evocative results are obtained from the considered case instances, and this, from small sample sizes (**Table 26**). The optimality gaps are equivalent for all operating contexts. The calculation of the optimality gaps is represented in **Figure 32** for a sample of size  $N = 100$  with  $N' = 400$ . **Table 26** presents the results of a specific operating context ( $j = 5, \dots, 8$ ) for the two identified solutions. Moreover, the computational times are reasonable for designing logistics networks. The heuristics based on the SAA method seems to be well adapted for designing stochastic logistic networks, such as for logistics networks integrating reverse logistics. The sample size must however be carefully fixed, since it may be difficult to perceive a clear tendency on the network performance starting from a restricted number of scenarios.





**Figure 32:** Representation of the calculation of the optimality gap for a sample of size  $N=100$ , with  $N'=400$ , for the identified solutions: a) Solution 1; b) Solution 2.

The results given by the proposed model could be used to carry out a detailed analysis of the needs fulfilled in the network and, consequently, of the unit value of the valorised products. Recommendations could then be made for the management of these products in the network, for example by establishing the use of parts mainly for product maintenance or valorisation. If necessary, the unit value of the valorised products could be adjusted according to the results obtained and the management approaches considered.

**Table 26:** Costs statistics (million \$) of the identified solutions according to different samples of size  $N$  and  $N'=400$  for  $j=5, \dots, 8$ .

$N'$	Solution 1			Solution 2		
$N$	25	50	100	25	50	100
$\hat{f}_{N'}(\bar{Y})$	21.75			21.68		
Std dev	0.62			0.62		
Min	19.98			20.00		
Max	23.21			23.11		
Gap [% of $\hat{f}_{N'}(\bar{Y})$ ]	0.24	0.14	0.11	0.18	0.12	0.09

## 4.6 Conclusion

The suggested methodology deals with the design of robust supply loops, while minimizing the operating costs and improving the valorisation potential for recovered products. It relies on the study of several scenarios for recovery, demand and processing volumes, according to the recovered product states, to appreciate the impacts of randomness on design decisions. The scenarios are defined by the Monte Carlo sampling methods, with the use of distribution

functions for each considered random factor. The scenarios are developed under various operating contexts to represent possible changes in product accessibility, to fulfil needs of end-users and to complete processing alternatives, which can result in changes in the organisation policies and strategies. The problem is solved through a heuristics based on the sample average approximation method. Experiments show that evocative results may be obtained from samples of moderate size. This methodology can thus be advantageously used for solving large scale problems. If needed, it could be adapted by integrating other solving techniques, such as Benders decomposition method (L-shaped method). This methodology, in addition to supporting supply loops design decisions, leads to the development of an analysis tool which may be used to define adapted policies and strategies for product flow management. Such a tool may be used to fix suitable sorting and grading criteria or to determine the needs to be fulfilled with valorised products. The methodology may be approached with greater refinement in the modelling, while representing potential flows according to the age bracket of end-users and products in circulation. Such an approach may lead to a better understanding of the network response to considered policies and strategies.

## 4.7 Acknowledgements

The research work reported here was completed thanks to a Scholarship of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT). The authors would also like to thank the management of the Assistive Technology Department (ATD) of the Quebec City Rehabilitation Institute (QCRI), the management of the programs outside Quebec and Technical Aids Program of the Régie de l'assurance maladie du Québec as well as the Société de l'assurance automobile du Québec for their contribution to this work.

## 4.8 References

- Ahlburg DA, (1987) Population forecasting. In: Makridakis S, Wheelwright SC (eds.). *The Handbook of Forecasting – a Manager's Guide*, chapter 9. John Wiley & Sons, New York, United States.
- Ballou RH, (1994) Measuring transport costing error in customer aggregation for facility location. *Transportation Journal*, 33(3):49-59.
- Barros AI, Dekker R, Scholten V, (1998) A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2):199–214.

- Birge JR, Louveaux F, (1997) *Introduction to Stochastic Programming*, Springer, New York, United States.
- Canetta L, Cheikhrouhou N, Glardon R, (2005) Applying two-stage SOM-based clustering approaches to industrial data analysis. *Production Planning and Control*, 16(08):774-784.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, accessible at: [www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca).
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, (2007a) Design of reverse logistics networks for multi-product, multi-state, and multi-processing alternatives. In: Jung, H., Chen, F., Jeong, B. (eds.), *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies*. Springer.
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, (2007b) Modelling networks sites, resources, products and end-users for designing supply loops - Application to healthcare systems. *Computers in Industry*. Submitted.
- 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.
- Côté M, Tremblay J, SOM inc. , (2003) Évaluation du projet de valorisation des aides à la locomotion. Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Erbas B, Hyndman RJ, Gertig DM, (2005) Forecasting age-specific breast cancer mortality using functional data models. *Statistics in Medicine*, 26(2):458-470.
- Fandel G, Stammen M, (2004) A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling, *International Journal of Production Economics*, 89(3):293-308.
- Fleischmann M, (2001) *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, Berlin, Germany.
- Guide VDR, (2000) Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18:467-483.
- Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E, (2003) The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150(1):128-149.
- Krikke HR, (1998) Recovery strategies and reverse logistics network design. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Krikke HR, van Harten A, Schurr PC, (1999) Business case océ: Reverse logistic network re-design for copiers. *OR Spektrum*, 21(3): 381-409.
- Listes O, (2007) A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2):417-442.
- Listes O, Dekker R, (2005) A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268-287.
- Louveaux FV, Schultz R, (2003) Stochastic integer programming. In: A Ruszczyński, Shapiro A, (eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science - Stochastic Programming*, Volume 10, chapter 4, Elsevier.
- 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.
- Martel A, (2005) The design of production-distribution networks: a mathematical programming approach. In: Geunes J, Pardalos PM, (eds.), *Supply Chain Optimization*, chapter 9. Springer, New York, United States.
- Makridakis S, Wheelwright SC, Hyndman RJ, (1998) *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & sons, New York, United States.

- Santoso T, Ahmed S, Goetschalckx M, Shapiro A, (2005) A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1):96-115.
- Shapiro A, (2003) Monte Carlo Sampling Methods. In: A Ruszczyński, Shapiro A, (eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science - Stochastic Programming*, Volume 10, chapter 6, Elsevier.
- Shih L-H, (2001) Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 32:55-72.
- Spengler T, Püchert H, Penkuhn T, Rentz O, (1997) Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97(2):308-326.
- Srinivasan M, Moon YB, (1999) A comprehensive algorithm for strategic analysis of supply chain networks. *Computer and Industrial Engineering*, 36(3):615-633.
- Teunter RH, (2006) Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6):533-537.
- Teunter RH, van der Laan EA, Inderfurth K, (2000) How to set the holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics? *Omega*, 28(4):409-415.
- Vila D, Martel A, Beauregard R, (2007) Taking market forces into account in the design of production-distribution networks: A positioning by anticipation approach. *The Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(1):29-50.
- Thierry M, Salomon M, van Nunen J, van Wassenhove L, (1995) Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2):114-135.

## Conclusion

La récapitulation des principales contributions de la thèse et une série de pistes de recherches futures sont présentées dans ce chapitre.

## Contributions

Cette thèse propose une méthodologie générique de modélisation et de conception de boucle d'approvisionnement dans un contexte multi-produits, multi-états et multi-alternatives de traitement. Elle a été validée avec le cas de dispensation de fauteuils roulants dans la province de Québec, au Canada, régi et administré par la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ). Le premier article de la thèse positionne les approches courantes de modélisation et de conception de réseaux logistiques, spécialement celles abordant la logistique inversée, et les spécificités relatives au contexte abordé. Ces spécificités sont conceptualisées et intégrées à un modèle de programmation déterministe. Le deuxième article de la thèse propose des outils et des méthodes de modélisation pour la définition des paramètres clés du modèle. Des facteurs aléatoires sur les volumes de récupération, de demande et de traitement, suivant l'état des volumes de produits récupérés, ont été identifiés et caractérisés dans cette démarche. Différents contextes de fonctionnement ont également été caractérisés, particulièrement à l'égard de la proportion moyenne des volumes de demande pouvant être satisfaits par des produits valorisés, du prix unitaire des produits valorisés et, par conséquent, des coûts d'entreposage. Le dernier article de la thèse propose une méthode de résolution du modèle de programmation stochastique obtenu par l'intégration de ces facteurs aléatoires. Il s'agit d'une heuristique inspirée de la méthode d'approximation de la moyenne d'échantillonnages (« *Sample Average Approximation – SAA* »), faisant appel aux techniques d'échantillonnage de Monte Carlo. L'heuristique a été utilisée pour évaluer, dans des temps de calcul raisonnables, l'impact des facteurs aléatoires sur les décisions du modèle, et ce, pour différents contextes de fonctionnement. Ces contextes servent à évaluer différentes politiques et stratégies à adopter par une organisation suivant l'accessibilité aux produits valorisés. Le modèle est proposé dans une perspective de justification des ressources, tant humaines que matérielles, à utiliser par un réseau intégrant la logistique inversée.

## **Perspectives de recherche**

Les travaux réalisés dans cette thèse proposent un éclairage novateur sur la modélisation et la conception de boucles d'approvisionnement et laissent entrevoir des perspectives de recherche prometteuses. Ces perspectives portent sur la définition des paramètres clés au cours de la modélisation, sur l'approche de résolution des modèles de conception de boucles d'approvisionnement ainsi que sur le contexte spécifique de conception et de pilotage de la boucle d'approvisionnement en fauteuils roulants dans la province de Québec.

## **Modélisation des paramètres clés**

### **Localisation et détermination des volumes de demande et de récupération**

La localisation des volumes de demande et de récupération repose sur le regroupement des coordonnées de latitude et de longitude des utilisateurs actuels de l'organisation en un nombre plus restreint de zones géographiques. Les méthodes courantes de clustérisation sont utilisées à cette fin. Le positionnement des zones se fait par la pondération des coordonnées des utilisateurs par le ratio du nombre de produit en leur possession sur le nombre total de produit dans les zones considérées, sans distinction des produits en circulation. Les volumes de demande et de récupération sont estimés pour des périodes futures par régression linéaire simple. Seuls les volumes de récupération sont estimés ici au niveau des zones d'utilisateurs, alors que les volumes de demande sont estimés pour les centres de service auxquels les zones sont rattachées. Différentes approches de prévision sont envisagées pour tenir compte de l'évolution de la démographie et de la composition de la flotte de produits en circulation. La localisation et la détermination des volumes de demande et de récupération servent à initier les flux qui définissent le réseau et à estimer les coûts de transport, notamment suite à des démarches de récupération entreprises par les centres de service. L'évaluation de ces coûts n'a toutefois pas été approfondie dans les présents travaux. De plus, bien que cette approche de modélisation (localisation et détermination des volumes de demande et de récupération) semble fournir des résultats prometteurs, la qualité des résultats obtenus doit être davantage étudiée et confrontée aux résultats d'approches alternatives pour conclure sur sa validité. Ils doivent également être validés pour chaque type d'application.



La localisation des zones d'utilisateurs repose sur la population possédant des fauteuils roulants au moment de l'étude. Cette composition de la population est vouée à certains changements dans le temps, notamment avec le vieillissement de la population et l'exode des jeunes vers les milieux urbains. Puisque l'attribution et la récupération de fauteuils roulants touche en grande partie une population âgée en perte de mobilité, il serait alors intéressant de suivre l'évolution de la localisation des zones définies par clustérisation, et ce, sur plusieurs périodes d'horizon. Cette information pourrait notamment servir à caractériser une tendance sur le déplacement des zones, pour ainsi proposer une approche de prévision sur leur localisation. Cette approche s'avèrerait pertinente dans une situation où la localisation des zones peut avoir un impact significatif sur les décisions de localisation des sites du réseau et sur les coûts de transport engendrés. Seuls des changements significatifs sur la localisation des zones d'utilisateurs justifieraient une telle approche.

Il a été noté que les produits, particulièrement à l'égard des familles de produits finis, et que les services offerts par l'organisation interpellent un profil d'utilisateurs distinct. Ceux-ci peuvent être répartis différemment sur le territoire et, par conséquent, nécessiter une localisation différente de zones d'utilisateurs en fonction des familles de produits considérées. Cette approche augmenterait possiblement le nombre de zones d'utilisateur et ainsi la taille des problèmes abordés. Elle pourrait toutefois résulter en une meilleure estimation des coûts de transport. L'impact engendré sur les résultats obtenus (temps de résolution, estimation des coûts de transport) pourrait être quantifié afin de justifier ou non le recours à des zones d'utilisateurs distinctes par famille de produits.

Les prévisions sur les volumes de demande et de récupération ont été réalisées à partir de données cumulées sur un nombre limité de périodes d'horizon. La capacité d'évaluation des résultats s'en trouve ainsi réduite. Les approches de prévision abordées dans ces travaux devraient être reprises sur un plus grand nombre de périodes d'horizon afin de tirer des conclusions significatives sur la qualité des résultats obtenus.

Les prévisions sur les volumes ont été réalisées, par régression linéaire simple, en tenant compte de différentes manières des changements démographiques de la population et de la composition de la flotte de produits en circulation. Elles ont notamment été faites sur les volumes et mêmes les taux de demande et de récupération avec le temps comme variable

indépendante, et même en fonction des caractéristiques des zones, d'après la population, les utilisateurs finaux et les produits en circulation. D'autres approches pourraient être envisagées pour la prévision des volumes, notamment par régression linéaire multiple. Les prévisions pourraient aussi être faites sur les taux d'incidence (attribution et récupération de fauteuils) par l'utilisation de modèles d'âge-période-cohorte ou de modèles de données fonctionnelles (« *functional data models* »), afin de comparer les résultats avec ceux obtenus dans les présents travaux. Des données détaillées sur l'évolution de la population, de la flotte de produits en circulation et des taux de demande et de récupération devront toutefois être utilisées, pour un grand nombre de périodes, afin de pouvoir déterminer adéquatement les coefficients qui alimenteront ces modèles. Elles peuvent nécessiter l'avis d'experts, notamment à l'égard des taux de naissance, de perte de mobilité et de mortalité par région cible.

Les prévisions effectuées reposent sur l'hypothèse d'indépendance des volumes de demande et des volumes de récupération. Toutefois, cette hypothèse n'a pas été prouvée. Les résultats ainsi obtenus pourraient être comparés aux résultats obtenus à l'aide de prévisions pour des volumes dépendants. Les prévisions sur des volumes dépendants pourraient s'effectuer d'après des probabilités de récupération suite à une demande. Elles pourraient s'appuyer notamment sur la notion d'inférence bayésienne.

Les aléas sur les volumes de demande et de récupération sont représentés par la loi normale. Bien qu'il s'agisse d'une loi couramment utilisée lors de la modélisation de réseau logistique soumis à des aléas sur les volumes de demande, cette approche reste à valider dans un contexte de conception de boucle d'approvisionnement. D'autres lois de distribution de probabilités pourraient aussi être testées.

En plus de l'estimation des coûts de transport, les zones d'utilisateurs utilisées dans les présents travaux peuvent servir également à la localisation des centres de récupération et à l'évaluation de différentes stratégies de récupération. Il serait ainsi pertinent de comparer une approche centralisée ou décentralisée de récupération, par le recours à un nombre plus ou moins important de centres de service pour procéder à la récupération auprès des utilisateurs. Il pourrait être intéressant de comparer les coûts de récupération encourus par l'utilisation d'une flotte privée de véhicules et/ou par l'implication de prestataires de services logistiques. L'analyse de scénarios ou encore l'utilisation de variables binaires et/ou continues dans le

modèle serait alors à envisager pour évaluer les décisions à cet égard. La complexité du problème risque toutefois d'être ainsi accrue, particulièrement en ce qui a trait à la prise en compte explicite de l'assignation des zones d'utilisateurs aux centres de récupération, en tenant compte notamment des contraintes sur les niveaux de service. Une approche par analyse de scénarios pourrait être envisagée.

Les zones d'utilisateurs pourraient aussi servir à l'étude de l'impact de politiques ciblant une récupération complète, du moins accrue, des produits inutilisés, notamment par la remise d'un dépôt aux utilisateurs finaux. Des simulations sur les volumes de récupération pourraient alors être réalisées avant d'introduire les résultats dans le modèle de conception de boucle d'approvisionnement. Il s'agira alors de mieux caractériser le contexte possible de récupération et d'évaluer l'impact qu'il aura sur la configuration d'un réseau logistique.

### **Familles et nomenclature de produits**

Une simple classification ABC a été réalisée pour le regroupement des produits en familles. Les familles de produits finis ont d'abord été identifiées et ensuite les familles de composants constitutifs, et ce, pour souligner l'impact du suivi des produits sur des portions de cycle de vie prises en charge par une organisation. Les familles identifiées servent à satisfaire des besoins équivalents ou complémentaires dans le réseau et entraînent des coûts logistiques similaires.

Les familles obtenues de cette classification pourraient être comparées à celles définies à l'aide d'une approche multicritères, par exemple par clustérisation, pour tenir compte des différents critères distinctifs des produits à l'égard des besoins manifestés dans un réseau, de la manière d'y répondre et des coûts engendrés suivant les ressources utilisées dans les différents processus du réseau. Une approche tenant compte de la nomenclature de produits pourrait aussi être envisagée dans un contexte où des produits sont impliqués dans des processus logistiques différents, pour ainsi éviter le regroupement de produits intervenant dans des processus distincts.

Des lignes directrices quant au nombre de familles à définir dans un contexte de conception de boucle d'approvisionnement seraient également intéressantes à établir. Ces pistes seraient émises sur la base de résultats obtenus avec différentes approches de définition de famille de

produits, pour des produits regroupés en un nombre plus ou moins restreint de familles, dans le cadre de la conception d'une boucle d'approvisionnement générique.

Les méthodes et les outils d'analyse du cycle de vie des produits pourraient être intégrés à une telle approche. Ils serviraient à souligner l'impact que les produits pourraient avoir sur les coûts de fonctionnement d'un réseau par une prise en charge élargie du cycle de vie des produits, pour des stades de cycle pour lesquels une organisation détiendrait peu ou pas d'information.

### **Conditions de traitement et états des produits**

La définition des états des volumes de produits récupérés et leur orientation vers les alternatives de traitement dans le réseau se fait par le biais de lois de distribution de probabilités. Ces lois dictent les proportions minimales de produits à orienter vers la disposition et les proportions maximales à orienter vers la réparation (produits finis) ou le reconditionnement (composants constitutifs). Pour le contexte des fauteuils roulants au Québec, elles sont établies sur la base des informations cumulées sur les états des produits finis évalués et triés par le personnel technique des centres mandataires courants. Des coûts de désassemblage, de réassemblage, de remise en état et d'entreposage ont aussi été déterminés à partir de données disponibles à l'égard du fonctionnement du réseau logistique étudié. Bien que certains de ces paramètres aient pu être définis directement à partir des données disponibles, d'autres ont dû être estimés sur la base des données collectées à ce jour.

L'information sur les états des composants constitutifs n'était pas disponible au moment de réaliser ces travaux. Les lois de distribution de probabilités utilisées à l'égard de l'orientation des volumes de composants constitutifs vers les alternatives de traitement ont donc été définies à partir de données cumulées pour les produits finis. Elles ont été étudiées suivant l'âge des produits finis, pour ainsi souligner l'état potentiel des produits desquels ils peuvent être retirés. Des données sont actuellement collectées à l'aide d'un outil de tri. Elles pourront servir à valider les lois utilisées à l'égard des volumes de composants constitutifs.

La valeur unitaire des produits valorisés a été déterminée à partir d'une étude réalisée par la Régie de l'assurance maladie du Québec sur les façons de faire actuelles des centres mandataires. Cette étude ne repose cependant pas sur une analyse approfondie des différents

coûts pouvant être associés à la récupération, au traitement et à la redistribution des produits. Depuis cette étude, des changements ont été apportés dans les centres, notamment par la définition de temps standards pour le désassemblage et le (ré)assemblage des produits. Des changements peuvent aussi survenir suivant l'accessibilité aux produits rendue possible par les décisions du modèle. Une analyse des coûts unitaires rencontrés dans le réseau logistique pourrait être effectuée à partir des résultats donnés par le modèle.

L'une des difficultés dans l'évaluation des coûts unitaires des produits valorisés porte sur la connaissance de l'accessibilité aux pièces de rechange lors de la conception d'une boucle d'approvisionnement. Dans un contexte où autant des produits neufs que valorisés peuvent servir à la remise en état des produits, les coûts unitaires varieront suivant les décisions du modèle. Ces coûts pourraient être estimés lors de la conception du réseau suivant la proportion de pièces neuves et valorisées utilisée au cours de la remise en état des produits. Toutefois, cette approche résulterait en un modèle non-linéaire, ce qui augmenterait considérablement la difficulté de résolution. Des estimés peuvent être faits a priori. C'est ce qui a été fait dans cette thèse. Ils doivent toutefois être validés suivant les résultats obtenus. Des ajustements à ces coûts peuvent alors être à faire pour ensuite résoudre à nouveau le problème. Cette approche peut nécessiter plusieurs itérations. Toutefois, la solution peut être peu affectée par les coûts unitaires. Une analyse de sensibilité peut donc être à effectuer à l'égard de l'impact de la variation de coûts unitaires des produits sur la solution du modèle avant d'initier une telle démarche. Les coûts devraient être ajustés s'ils ne reflètent pas adéquatement l'accessibilité aux produits dans le réseau.

Les différents coûts dans le modèle sont représentés par des fonctions linéaires, négligeant ainsi les économies d'échelle et d'envergure pouvant se présenter dans le réseau. Dans un contexte de logistique inversée, où les situations de récupération et de traitement peuvent différer d'une fois à l'autre, il serait intéressant d'apprécier comment ces économies peuvent se manifester.

Certaines difficultés peuvent se présenter lors de la prise en compte des économies d'échelle ou d'envergure dans un modèle de programmation visant la conception d'une boucle d'approvisionnement. Outre l'accessibilité aux données, il pourrait être difficile d'évaluer les flux impliqués par chaque famille de produits de sorte à leur associer les coûts appropriés suivant les niveaux de capacité considérés. Dans certains cas, les ressources du réseau peuvent

être partagées entre la chaîne d'approvisionnement et la logistique inversée. Il faudra alors probablement être en mesure de répartir adéquatement les flux et les coûts entre ces deux portions du réseau logistique et entre les différentes familles de produits. Il faut également tenir compte du fait que le niveau d'utilisation des ressources mises à la disposition de la récupération et du traitement des produits récupérés peut dépendre de la qualité des produits. Une attention particulière devra alors être portée à cette étape de modélisation, si elle s'avère pertinente.

L'assignation des états aux volumes de produits récupérés se fait à partir de données historiques basées sur l'évaluation technique des produits suite à leur récupération. Cette approche suppose alors que ces pratiques demeureront inchangées pour des périodes d'horizon futures. Toutefois, un changement dans les stratégies de maintenance ou encore dans les politiques de réintégration des produits dans la chaîne originale d'approvisionnement peut avoir un impact sur les états des volumes de produits récupérés et, par conséquent, sur l'orientation stratégique des volumes de produits vers les alternatives de traitement. De tels changements pourraient être investigués par le biais de simulation de sorte à pouvoir déterminer les lois de distribution de probabilités utilisées, définissant les états des volumes de produits récupérés, en vue de la conception de boucles d'approvisionnement.

La configuration d'un réseau établi, suivant le contexte de fonctionnement étudié, les capacités nécessaires pour supporter les volumes de matériels pour la période d'horizon étudiée. La viabilité de fonctionnement du réseau repose ensuite sur la manière d'organiser et d'agencer les processus à réaliser, ainsi que sur les ressources retenues pour les accomplir. Différentes stratégies de pilotage des flux pourraient être analysées face à la configuration de réseau, notamment par simulation, pour définir les stratégies, les politiques et les outils adaptés à une gestion des produits sur tout leur cycle de vie. On pourra alors étudier notamment les niveaux de stocks à conserver ainsi que les équipements ou supports informatiques à utiliser pour atteindre une meilleure coordination des activités dans le réseau. Les processus du réseau (service après-vente, récupération, traitement, redistribution) peuvent être étudiés séparément ou conjointement pour une compréhension complète des efforts de déploiement requis.

### **Approche de résolution**

Un modèle de programmation stochastique est proposé dans cette thèse. Le modèle statique est développé d'après l'hypothèse de la linéarité des coûts. Il a été résolu par une heuristique basée sur la méthode d'approximation de la moyenne d'échantillonnages.

La linéarité des coûts peut ne plus tenir s'il est démontré que des économies d'échelle et d'envergure importantes se présentent à l'égard du transport, du traitement et de l'entreposage des produits notamment. Pour tenir compte de la non-linéarité des coûts, les méthodes exactes s'avèrent généralement impuissantes pour les problèmes complexes, ce qui ne laisse que les méthodes approximatives. L'approximation linéaire par partie ou encore la linéarisation successive sont parmi les approches les plus utilisées.

Le modèle stochastique a été résolu pour représenter les impacts des facteurs aléatoires sur les décisions du modèle. Toutefois, leurs impacts respectifs n'ont pas été évalués dans les présents travaux.

Certains facteurs aléatoires ont été abordés dans la thèse. Ceux-ci touchent notamment la qualité et la quantité des volumes de produits dans le réseau et, d'une certaine manière, les lieux de récupération, de traitement et de redistribution. D'autres facteurs aléatoires restent encore à étudier, notamment les coûts logistiques ainsi que les moments et délais de récupération, de traitement et de redistribution.

Pour pouvoir caractériser de manière détaillée les impacts des divers facteurs aléatoires sur le fonctionnement d'un réseau logistique, ceux-ci doivent être étudiés de façon séparée et combinée. Toutefois, le nombre de combinaisons envisageables augmente exponentiellement avec le nombre de facteurs aléatoires. Pour cumuler un nombre suffisant d'informations pertinentes à partir d'un nombre donné de combinaisons, un plan d'expérience doit généralement être défini au préalable. Les résultats obtenus dans un contexte générique à l'égard de plusieurs facteurs aléatoires pourraient servir à émettre des lignes directrices quant à la conception de réseaux logistiques dans un environnement incertain. Elles serviraient notamment à cibler les facteurs à considérer avec plus d'attention lors de l'étape de modélisation, sans avoir à augmenter trop significativement la taille des problèmes abordés.

Le modèle proposé est mono-période. Il serait intéressant de résoudre un modèle multi-période. Toutefois, la taille des problèmes augmente rapidement avec le nombre de paramètres et de facteurs aléatoires considérés. La résolution de problème de grande taille repose généralement sur des algorithmes d'optimisation. La décomposition de Benders, les métaheuristiques ou encore des heuristiques peuvent alors être envisagés. La méthode utilisée doit pouvoir intégrer, au besoin, les techniques de résolution de modèles stochastiques. A priori, les méthodes de résolution de boucle d'approvisionnement s'avèrent relativement semblables à celles proposées dans le cadre de chaînes d'approvisionnement.

### **Perspectives pour la conception et le pilotage de la boucle d'approvisionnement en fauteuil roulants dans la province de Québec**

Les présents travaux de recherche font partie d'un projet de recherche de plus grande ampleur axé sur la réingénierie du réseau d'attribution, de maintenance, de récupération, de traitement et de redistribution des fauteuils roulants dans la province de Québec. Des outils et des méthodes ont été proposés jusqu'à présent pour permettre la conception et la gestion de produits sur tout le cycle de vie pris en charge par l'organisation. Des méthodes de modélisation et des outils de conception de boucle d'approvisionnement sont maintenant aussi mis à la disposition. Certaines questions demeurent toutefois sans réponse quant aux rôles des parties impliquées et à la manière de piloter les flux au sein du réseau.

Au Québec, les centres mandataires sont en meilleure position pour voir à la récupération, au traitement et à la redistribution des produits. Ils sont à proximité des utilisateurs finaux, possèdent les ressources nécessaires et ont une meilleure compréhension des ajustements devant être portés aux fauteuils pour faire face aux besoins en mobilité. Ils détiennent aussi les ressources et l'expertise nécessaire à l'entretien des fauteuils roulants et de leurs composants. Pour leur part, les manufacturiers maîtrisent les étapes de conception et de production et, par conséquent, contrôlent la gamme de produits offerts sur le marché. Ce sont eux qui initient la boucle d'approvisionnement et qui en déterminent l'efficacité atteignable par les choix de technologies et de matériels composants les fauteuils. La RAMQ est en position d'obtenir une vue d'ensemble de la situation dans la province de Québec. Elle peut intervenir face aux politiques et aux stratégies adoptées dans le réseau ou, du moins, les influencer. Toutefois, l'un des reproches qui pourrait être porté au contexte de valorisation des fauteuils roulants au



Québec est l'absence des manufacturiers dans les prises de décisions. Deux positions peuvent donc être envisagées par ceux-ci : prendre une position neutre ou néfaste face à la valorisation ou encore proposer des produits et des services qui leur permettraient d'étendre leur maîtrise du cycle de vie de leurs produits. Cette seconde approche semble la plus favorable pour les manufacturiers, les centres mandataires, la RAMQ et les utilisateurs finaux. Elle permettrait de démontrer leurs intérêts face à la satisfaction des besoins des utilisateurs, tout en consolidant les liens avec leurs principaux partenaires.

Les manufacturiers pourraient aborder l'offre de service par un contrat de location qui lierait les parties impliquées. Ce contrat pourrait notamment porter sur une prise en charge graduelle de la gestion des réapprovisionnements par les manufacturiers (ex. : VMI), particulièrement en ce qui a trait aux pièces de rechange. Il pourrait aussi inclure certaines interventions d'entretien, telle de maintenance préventive, en plus des actions déjà réalisées sous garantie. Des matériels valorisés pourraient être envisagés pour l'entretien et l'ajustement des produits en circulation. Le réapprovisionnement du réseau se ferait alors en considérant l'apport possible en produits valorisés. Les conditions du contrat de location pourraient permettre l'utilisation d'un fauteuil roulant par plus d'un utilisateur. Lorsque le produit n'est plus rentable dans sa forme originale, il pourrait être orienté vers une phase alternative de son cycle de vie (ex. : désassemblage pour les pièces de rechange, recyclage, revente sur des marchés alternatifs prédéterminés, etc.).

Dans cette approche, chacun des partis conserverait son rôle respectif. Les centres mandataires obtiendraient une part des profits engendrés par la location, et ce, de sorte à couvrir les coûts rencontrés lors des actions d'ajustement et d'entretien réalisées pour le compte des manufacturiers. La RAMQ paierait les versements de location en plus des coûts additionnels d'ajustement personnalisé et d'entretien, notamment suite à la maintenance corrective et à la réattribution d'un fauteuil. Une partie de son budget serait ainsi libérée au bénéfice de l'offre de service, plutôt qu'à l'achat d'équipement. Les conditions de location (versements, durée du contrat, clauses de rachat) devront toutefois être clairement établies. En plus de tenir compte des options de personnalisation à la première attribution, elles considéreront l'accessibilité aux produits valorisés.

L'implication élargie des manufacturiers dans la boucle d'approvisionnement entraînerait toutefois une réaffectation des rôles, l'ajout de certaines responsabilités dans le réseau et même

l'implication de nouvelles unités d'affaires. En fait, c'est la structure même des coûts et des revenus dans le réseau qui se verrait affectée, ce qui pourrait avoir une répercussion sur la configuration et le pilotage du réseau.

## **Conclusion générale**

La conception de boucles d'approvisionnement en est encore à ses tous premiers balbutiements. L'approche des organisations à cet égard, particulièrement des manufacturiers, est bien souvent encore réactive, notamment pour satisfaire les réglementations environnementales imposées. D'autres organisations, telle la Régie de l'assurance maladie du Québec, l'abordent pour profiter des avantages économiques perçus, notamment en permettant d'élargir la gamme de produits et de services offerts à la population. Des solutions seront proposées dans les deux situations. Il est toutefois reconnu qu'une démarche proactive plutôt que réactive s'avère davantage profitable à plus long terme. Certains questionnements peuvent alors être soulevés quant aux façons de faire actuelles des organisations.

Les utilisateurs finaux sont de plus en plus avertis et sophistiqués. Ils souhaitent un service après-vente soutenu, notamment pour assurer le bon fonctionnement et la mise à jour continue des technologies utilisées. Pour sa part, la société n'est plus en mesure ou n'est plus prête à supporter à elle seule les impacts sur l'environnement de l'utilisation et de la fin du cycle de vie des produits. Des changements climatiques importants se manifestent sans aucun doute et en appellent non seulement à une conscientisation commune, mais à un changement de philosophie quant à la consommation de produits. Des changements profonds devront être apportés quant aux façons de faire des organisations pour répondre à une diversité de besoins sur tout le cycle de vie des produits, tout en voyant à une utilisation intelligente des ressources non renouvelables. L'offre de service, plutôt que la simple vente des produits, et la récupération des produits en vue de leur réutilisation, dans leur forme originale ou non, est à considérer par les organisations.

Pour les organisations déjà axées sur le service pour les produits offerts, l'introduction des activités de logistique inversée doit amener à une réflexion et, au besoin, à un ajustement sur la participation des différentes unités d'affaires impliquées. On s'intéressera à établir notamment les besoins à satisfaire par des produits valorisés et la proportion de produits valorisés pouvant

être utilisée comparativement aux produits neufs. On voudra donc déterminer les alternatives de traitement envisageables et les possibilités d'orientation des produits vers chacune d'elles, notamment suivant leurs états. La réutilisation des produits doit pouvoir contribuer à l'efficacité et à l'efficience du réseau, suivant les contraintes de fonctionnement propres à l'organisation.

Dans le domaine de la santé, la réutilisation des produits soulève des questions quant à l'hygiène et à la stérilité des produits. Des procédures rigoureuses et des moyens de suivi et de contrôle importants devront être mis en place non seulement pour assurer la qualité des produits remis en circulation, mais pour éviter notamment toute contamination avant la réutilisation.

Peu importe la situation, la récupération, le traitement et la redistribution des produits entraînera un changement important dans les façons de faire des organisations. Il pourra nécessiter une révision de la conception et de la gestion des produits, des processus et des réseaux logistiques pour mieux intégrer les flux de matériels et d'information additionnels.

Cette thèse propose une méthodologie complète visant la conception de boucles d'approvisionnement, depuis l'identification et la modélisation des paramètres clés d'un modèle de programmation mathématique, jusqu'à la résolution et la validation du problème.

Une telle démarche repose sur des besoins importants en données pour obtenir une meilleure compréhension du cycle de vie des produits et pour maîtriser le fonctionnement du réseau. La méthodologie suggérée repose sur des données cumulées ou estimées à partir des façons de faire actuelles d'une boucle d'approvisionnement. Des méthodes et des outils sont encore à développer pour pleinement anticiper les impacts que peuvent avoir la réintégration des produits dans une nouvelle boucle d'approvisionnement ou que peuvent entraîner des changements dans les politiques et les stratégies d'une organisation. Des méthodes et des outils sont aussi à développer et à implanter afin de réduire les facteurs aléatoires et ainsi l'impact qu'ils peuvent avoir sur les décisions d'une organisation.

## Bibliographie

- Aït-Kadi D, Chouinard M, Côté M, D'Amours S, Diallo C, Dionne H, Gagnon B, Jamali MA, Ouhimou M, Routhier F, Tremblay J, Vancraenenbroeck C, Vincent C, Zingmann X, (2001) Audit de la valorisation. Rapport technique, Direction des Programmes des Aides Techniques de l'IRDPQ, Québec, Canada.
- Aras N, Boyaci T, Verter V, (2004) The effect of categorizing returned products in remanufacturing. *IIE Transactions*, 36:319–331.
- Arntzen B, Brown G, Harrison T, Trafton L, (1995) Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 21(1):69-93.
- Asef-Vaziri A, Laporte G, (2005) Loop based facility planning and material handling. *European Journal of Operational Research*, 164(1):1-11.
- Ballou RH, (1994) Measuring transport costing error in customer aggregation for facility location. *Transportation Journal*, 33(3):49-59.
- Ballou RH, (1998) *Business Logistics Management*. Prentice Hall, New Jersey, United States.
- Barros AI, Dekker R, Scholten V, (1998) A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2):199–214.
- Beamon BM, (1998) Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55:281-294.
- Beaumont JR, (1989) An overview of Market Analysis: Who?, What?, Where? and Why? *International Journal of Information Management*, 9(1):51-62.
- Beulens P, (2004) Reverse logistics in effective recovery of products from waste materials. *Review in Environmental Science & Bio/Technology*, 3:283-306.
- Beulens P, Van Oudheusden D, Van Wassenhove LN, (2003) Collection and Vehicle Routing Issues in Reverse Logistics. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 5. Springer, Berlin, Germany.
- Bloemhof-Ruwaard JM, Krikke H, Van Wassenhove LN, (2004) OR models for eco-eco closed-loop supply chain optimization. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 15. Springer, 357-379.
- Birge JR, Louveaux F, (1997) *Introduction to Stochastic Programming*. Springer, New York, United States.
- Brown PA, Gibson DF, (1972) A quantified model for facility site selection application to multiplant location problem. *AIIE Transactions*, 4(11):1-10.
- 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. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, accessible à : [www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca)
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, (2007) Design of reverse logistics networks for multi-product, multi-state, and multi-processing alternatives. In: Jung H, Chen F, Jeong B (eds.), *Trends in Supply Chain Design and Management: Technologies and Methodologies*. Springer.
- 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, (2003) Attribution et valorisation des fauteuils roulants. *Santé et Systémique*, 7(1-2):65-84.

- Chouinard M, Gagnon B, Aït-Kadi D, D'Amours S, Vincent C, (2002) Évaluation des activités de valorisation du Programme des aides techniques de l'IRDPQ basée sur l'audit de la valorisation. Rapport technique, Université Laval, Québec, Canada.
- Chouinard M, D'Amours S, Aït-Kadi D, Vincent C, (2001) Projet de la valorisation des aides à la mobilité – Description du fonctionnement du Programme des aides techniques. Rapport technique, Université Laval, Québec, Canada.
- Cloutier C, (2004) Proposition d'une stratégie de déploiement de réseau pour la valorisation des aides à la mobilité dans le contexte québécois. Essai de MBA, Université Laval, Québec, Canada.
- Cohen M, Moon S, (1991) An integrated plant loading model with economies of scale and scope. *European Journal of Operational Research*, 50(3):266-279.
- Côté M, Tremblay J, SOM inc., (2003) Évaluation du projet de valorisation des aides à la locomotion. Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Datta Y, (1996). Market segmentation: An integrated framework. *Long Range Planning*, 29(6):797-811.
- Debo LG, Toktay LB, Van Wassenhove LN, (2006) Life cycle dynamics for portfolios with remanufactured products. *Production and Operations Management*. À paraître.
- Debo LG, Toktay LB, Van Wassenhove LN, (2005) Market segmentation and technology selection for remanufacturable products. *Management Science*, 51(8):1193-1205.
- Debo LG, Savaskan RC, Van Wassenhove LN, (2003). Coordination in closed-loop supply chains. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 12. Springer, Berlin, Germany.
- de Brito MP, de Koster MBM, (2003) Product and material returns: Handling and warehousing issues. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 6. Springer, Berlin, Germany.
- Dekker R, (2003) Inventory control in reverse logistics. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 175-200. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Diallo C, (2006) Développement d'un modèle d'identification et de gestion des pièces de rechange. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- Diallo C, Aït-Kadi D, (2005) Rapport du Comité de travail sur les outils d'aide au tri des fauteuils roulant. Rapport final, Régie de l'assurance maladie du Québec, Québec, Canada.
- Dhillon BS, (1999) *Engineering Maintainability – How to Design for Reliability and Easy Maintenance*. Gulf, Houston, United States.
- Dogan K, Goetschalckx M, (1999) A primal decomposition method for the integrated design of multi-period-production-distribution systems. *IIE Transactions*, 31:1027-1036.
- Ernst R, Cohen MA, (1990) Operations related groups (ORGs): A clustering procedure for production inventory systems. *Journal of Operations Management*, 9(4):574-598.
- Fandel G, Stammen M, (2004) A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling. *International Journal of Production Economics*, 89(3):293-308.
- Fleischmann M, (2001) *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, Berlin, Germany.

- Fleischmann B, Meyr H, Wagner M, (2000) Advanced Planning. In: Stadler H, Kilger C (eds.) *Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models, Software and Case Studies*, chapter 3. Springer, Berlin, Germany.
- Fleischmann B, (1993) Designing distribution systems with transport economies of scale. *European Journal of Operational Research*, 70(1):31-42.
- Flores BE, Olson DL, Dorai VK, (1992) Management of multicriteria inventory classification. *Mathematical and Computer Modelling*, 16(12):71-82.
- Geoffrion AM (1976) Customer aggregation in distribution modeling. Working Paper 259, Western Management Science Institute, UCLA, Los Angeles, United States.
- Georgiadis P, Vlachos D, (2004) The effect of environmental parameters on product recovery. *European Journal of Operational Research*, 157(2):449-464.
- Goetschalckx M, Vidal CJ, Dogan K, (2002) Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1):1-18.
- Graham BPE, (2001). Collection equipment and vehicules. In: Lund HF (ed.), *The McGraw-Hill Recycling Handbook*, chapter 27, McGrawHill, New York, United States.
- Guide VDR Jr, Jayaraman V, Linton JD, (2003) Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery. *Journal of Operations Management*, 21:259–279.
- Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (2001) Managing product returns for remanufacturing. *Production and Operations Management*, 10(2):142-155.
- Guide VDR Jr, Jayaraman V, Srivastava R, Benton WC, (2000) Supply chain management for recoverable manufacturing systems. *Interfaces*, 30(3):125-142.
- Gunasekaran A, Ngai EWT, McGaughey RE, (2006) Information technology and systems justification: A review for research and application. *European Journal of Operational Research*, 173(3):957-983.
- Hassan MMD, (2000). Toward re-engineering models and algorithms of facility layout. *Omega*, 28(6):711-723.
- Inderfurth K, Teunter RH, (2001) Production planning and control of closed-loop supply chains. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 149-174. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Jamali MA, (2004) Développement de nouvelles politiques optimales de maintenance de systèmes assujettis a des défaillances aléatoires. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- Jayaraman V, Patterson RA, Rolland E, (2003) The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150(1):128-149.
- Kelle P, Silver EA, (1989) Forecasting the returns of reusable containers. *Journal of Operations Management*, 8(1):17-35.
- Lakhil S, Martel A, Kettani O, Oral M, (2001) On the optimization of supply chain networking decisions. *European Journal of Operational Research*, 129(2):259-270.
- Lakhil S, Martel A, Oral M, Montreuil B, (1999) Network companies and competitiveness: A framework for analysis. *European Journal of Operational Research*, 118(2):278-294.
- Li S, Tirupati D, (1994) Dynamic capacity expansion problem with multiple products: Technology selection and timing of capacity additions. *Operations Research*, 42(5):958-976.
- Listes O, (2007) A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2):417-442.

- Kuo T-C, Huang SH, Zhang H-C, (2001) Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41:241-260.
- Kokkinaki A, Zuidwijk R, van Nunen J, Dekker R, (2003) Information and Communication Technology Enabling Reverse Logistics. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 16. Springer, Berlin, Germany.
- Krikke H, (1998) Recovery strategies and reverse logistics network design. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Lambert AJD, (2003) Disassembly sequencing: A survey. *International Journal of Production Research*, 41(16):3721-3759.
- Lambert AJD, Gupta SM, (2004) *Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling*. CRC press, New York, United States.
- Laporte G, Louveaux F, van Hamme L, (1994) Exact solution to a location problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 28(2):95-103.
- Lee HL, Billington C, (1993) Material management in decentralized supply chain. *Operation Research*, 41(5):835-847.
- Listes O, (2007) A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2):417-442.
- Listes O, Dekker R, (2005) A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268-287.
- Louveaux FV, Schultz R, (2003) Stochastic integer programming. In: A Ruszczynski, Shapiro A, (eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science - Stochastic Programming*, Volume 10, chapter 4, Elsevier.
- 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.
- Makridakis S, Wheelwright SC, Hyndman RJ, (1998) *Forecasting: Methods and Applications*. John Wiley & sons, New York, United States.
- Martel A, (2005) The design of production-distribution networks : a mathematical programming approach. In: Geunes J, Pardalos PM, (eds.), *Supply Chain Optimization*, chapter 9. Springer, New York, United States.
- Martel A, (2004) Conception et gestion de chaîne logistique. Notes de cours, Université Laval, Québec, Canada.
- Martel A, Vankatadri U, (1999) Optimizing supply network structures under economies of scale. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM 1999), Volume 1, 56-65. Glasgow, United Kingdom.
- Mason S, (2002) Backward progress – Turning the negative perception of reverse logistics into happy returns. *IIE Solutions*, 34(8):42-46.
- Mazzola JB, Schantz R, (1997) Multiple-facility loading under capacity-based economies of scope. *Naval Research Logistics*, 44(3):229-256.
- Minner S, (2001) Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains. *International Journal of Production Economics*, 71(1-3):417-428.
- Minner S, Lindner R, (2003) Lot sizing decisions in product recovery management. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 7. Springer, Berlin, Germany.
- MirHassani SA, Lucas C, Mitra G, Messina E, Poojari CA, (2000) Computational solution of capacity planning models under uncertainty. *Parallel Computing* 26:511–538.
- Mitra S, (2007) Revenue management for remanufactured products. *Omega*, 35(5):553-562.

- Mont O, Dalhammar C, Jacobsson N, (2006) A new business model for baby prams based on leasing and product remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 14:1509-1518.
- Mukhopadhyay SK, Setoputro R, (2005) Optimal return policy and modular design for build-to-order products. *Journal of Operations Management*, 23:496-506.
- Mukhopadhyay SK, Setoputro R, (2004) Reverse logistics in e-business – Optimal price and return policy. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(1):70-88.
- Owen SH, Daskin MS, (1998) Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3):423-447.
- Paquet M, Martel A, Desaulniers G, (2004) Including technology selection decisions in manufacturing network design models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17( 2):117-125.
- Philpott A, Everett G, (2001) Supply chain optimisation in the paper industry. *Annals of Operations Research*, 108(1):225-237.
- Pirkul H, Jayaraman V, (1996) Production, transportation, and distribution planning in a multi-commodity tri-echelon system. *Transportation Science*, 30(4):291-302.
- Porter M, (1985) *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. Free Press, New York, United States.
- Punniyamoorthy M, Vijaya Ragavan P, (2003) A strategic decision model for the justification of technology selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21:72-78.
- Ramanathan R, (2006) ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization. *Computers & Operations Research*, 33(3):696-700.
- Rogers DS, Tibben-Lembke RS, (1999) *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reverse Logistics Executive Council, Pittsburgh, United States.
- Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M, (2004) *Sensitivity Analysis in Practice: A guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley and Sons, New York, United States
- Santoso T, Ahmed S, Goetschalckx M, Shapiro A, (2005) A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1):96-115.
- Savaskan RC, Bhattacharya S, Van Wassenhove LN, (2004) Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239-252.
- Savaskan RC, Van Wassenhove LN, (2006) Reverse channel design: The case of competing retailers. *Management Science*, 52(1), 1-14.
- Sen S, Higle JL, (1999) An introductory tutorial on stochastic linear programming models. *Interfaces*, 29(2):33-61.
- Silver EA, Peterson R, (1985) *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*. John Wiley and Sons, New York, United States.
- Shapiro A, (2003) Monte Carlo Sampling Methods. In: A Ruszczyński, Shapiro A, (eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science - Stochastic Programming*, Volume 10, chapter 6, Elsevier.
- Shapiro JF, (2001) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury.
- Shih L-H, (2001) Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 32:55-72.
- Shulman A, (1991) An algorithm for solving dynamic capacitated plant location problems with discrete expansion sizes. *Operations Research*, 39(3):423-436.



- Syarif A, Yun Y, Gen M, (2002) Study on multi-stage logistic chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 299-314.
- Teunter RH, (2006) Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6):533-537.
- Teunter RH, van der Laan EA, Inderfurth K, (2000) How to set holding cost rates in average cost inventory models with reverse logistics? *Omega*, 28(4):409-415.
- Thierry M, Salomon M, Van Nunen J, Van Wassenhove LN, (1995) Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2):114-135.
- Tibben-Lembke RS, Rogers DS, (2003) Retail reverse logistics practice. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 43-70. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Toktay LB, (2003) Forecasting product returns. In: Guide VDR Jr, Van Wassenhove LN, (eds.), *Business Aspects of Closed-loop Supply Chains – Exploring the Issues*, 203-219. Carnegie Mellon University Press, Pittsburgh, United States.
- Toktay LB, van der Laan EA, de Brito M, (2004) Managing product returns: The role of forecasting. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 3. Springer, Berlin, Germany.
- Tsiakis P, Shah N, Pantelides CC, (2001) Design of multiechelon supply chain networks under demand uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40:3585–3604.
- Trebilcock B, (2001) Why are returns so though? *Modern Materials Handling*, 56(11):45-51.
- van der Laan EA, Kiesmüller G, Kuik R, Vlachos D, Dekker R, (2003) Stochastic inventory control for product recovery management. In: Dekker R, Fleischmann M, Inderfurth K, Van Wassenhove LN (eds.), *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, chapter 8. Springer, Berlin, Germany.
- van der Laan EA, Salomon M, (1997) Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research*, 102(2):264-278.
- Van Slyke R, Wets RJB (1969) L-Shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic programming. *SLAM Journal on Applied Mathematics*, 17:638-663.
- Verter V, Dincer C, (1992) An integrated evaluation of facility location, capacity acquisition, and technology selection for designing global manufacturing strategies. *European Journal of Operational Research*, 60(1):1-18.
- Vidal C, 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.
- Vila D, (2006) La modélisation mathématique des réseaux logistiques : Procédés divergents et positionnement par anticipation. – Application à l'industrie du bois d'œuvre. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, accessible à : [www.theses.ulaval.ca](http://www.theses.ulaval.ca)
- Vila D, Martel A, Beauregard R, (2007) Taking market forces into account in the design of production-distribution networks: A positioning by anticipation approach. *The Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(1):29-50.
- Vila D, Martel A, Beauregard R, (2006) Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry. *International Journal of Production Economics*, 102:358-378.
- Vila D, Beauregard R, Martel A, (2005) The strategic design of forest industry supply chains. Document de travail du CENTOR DT-2005-RB-2, Université Laval, Québec, Canada.

- Vincent, C, Routhier F, Guérette C, (2003) Évaluation d'un programme de valorisation de fauteuils roulants. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 70(1):21-32.
- Zwingmann X, (2006) Prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- Zwingmann X (2006) DiDeROt: Détermination des durées de réparation et d'opération. Rapport technique, Université Laval, Québec, Canada.
- Zwingmann X, Aït-Kadi D, Coulibaly A, Mutel B, (2006) Optimal disassembly sequencing strategy using constraint programming approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Accepté.
- Zwingmann X, Gagnon B, (2002) Analyse fonctionnelle d'un fauteuil roulant. Rapport technique, Université Laval, Québec, Canada.
- Zubair MM, Mohamed AY, (2004) A Production, distribution and investment model for a multinational company. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(6):495-510.

## ANNEXE 1

### A1 Projet de valorisation des aides à la mobilité

Les présents travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre d'un projet de plus grande ampleur portant sur la valorisation des aides à la mobilité. Ce projet est réalisé dans le cadre d'un partenariat avec la Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ) et l'Institut de réadaptation en déficience physique de Québec (IRDPO).

#### A1.1 Cas d'étude

Les détails du cas d'étude auquel se rapportent les travaux sont présentés dans cette portion de la thèse. Le contexte de fonctionnement des parties impliquées ainsi que les avantages et les difficultés soulevés par les façons de faire actuelles sont d'abord exposés. La démarche de réingénierie de réseau logistique entreprise dans le cadre du projet de valorisation des aides à la mobilité est ensuite résumée.

##### A1.1.1 Fonctionnement et parties impliquées – Contexte Québécois

La Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ) est un organisme gouvernemental qui régit et administre divers programmes de santé dans la province de Québec, dont le programme d'aides à la mobilité. Les aides délivrées dans le cadre de ce programme sont utilisées gratuitement par les bénéficiaires jugés admissibles. Parmi les aides à la mobilité, notons les fauteuils roulants. Au Québec, la RAMQ représente le principal acheteur de fauteuils roulants.

Quatorze centres de réadaptation sont mandatés par la RAMQ pour l'attribution et la maintenance des fauteuils roulants. Depuis juin 2000, la RAMQ exige des centres la récupération des fauteuils inutilisés, notamment suite à un décès ou à un remplacement (**Tableau 27**). Les fauteuils récupérés sont remis en état, en vue d'une réattribution, ou désassemblés pour la récupération de pièces de rechange en bon état. Les produits réutilisables sont réparés ou reconditionnés et nettoyés avant d'être placés en inventaire. Ils sont désignés comme étant des produits valorisés. Les produits qui ne peuvent pas être valorisés sont disposés par des organismes externes.

L'admissibilité d'un bénéficiaire à un fauteuil est évaluée par un ergothérapeute. Les besoins du bénéficiaire seront ensuite identifiés suivant la catégorie d'appareil auquel il est admissible (fauteuil manuel [FMA], fauteuil motorisé [FMO], base de positionnement [BP]). Un fauteuil neuf ou valorisé pourra lui être proposé. Certains bénéficiaires ne sont toutefois admissibles qu'à un fauteuil valorisé. Un fauteuil valorisé ne peut être réattribué que si les coûts d'ajustement de l'appareil face aux besoins du bénéficiaire respectent la limite permise par la RAMQ. Divers modèles peuvent lui être proposés suivant leur capacité à répondre à ses besoins spécifiques. Les besoins seront traduits en spécifications techniques pour le modèle retenu (dimensions, composants et supports adaptés). Chaque modèle est constitué de composants de base. Pour chaque modèle de fauteuils, jusqu'à cinq versions alternatives sont offertes pour près d'une quarantaine de ces composants pour permettre l'ajustement. Les modèles peuvent être livrés dans différentes couleurs. Les composants sont généralement incompatibles entre les différents modèles, même au sein d'un même manufacturier. Le remplacement d'un fauteuil se présentera lorsque la condition de l'utilisateur ou du fauteuil nécessite des ajustements dont les coûts dépasseraient la limite permise par la RAMQ.

Les centres mandataires s'approvisionnent en produits neufs auprès des manufacturiers. Les fauteuils sont livrés à la demande, suivant les spécifications de l'ergothérapeute. Des commandes en pièces de rechange sont aussi lancées pour le réapprovisionnement des magasins, nécessaires à la maintenance et à la valorisation des fauteuils. Les commandes se font encore généralement par voie traditionnelle, soit par le fax. Les usines sont généralement localisées à l'extérieur de la province de Québec. Les centres de distribution sont localisés dans ou à proximité de la province de Québec et desservent plusieurs marchés avoisinants (Ontario, Nouveau-Brunswick, Nouvelle Écosse, Maine, New York et autres). Les délais de livraison de fauteuils neufs peuvent aller jusqu'à quatre à six mois pour certains manufacturiers, suivant les périodes de l'année, alors qu'ils peuvent être moins de trois semaines pour les fauteuils valorisés (Vincent *et al.*, 2003), suivant la disponibilité, les capacités des centres et la demande rencontrée.

Au trois ans, les manufacturiers sont invités à soumettre leurs nouveaux modèles de fauteuil à une étape d'homologation. Au cours de cette étape, des intervenants (ergothérapeutes, mécaniciens) désignés des centres mandataires procèdent à une évaluation des capacités fonctionnelles des fauteuils, particulièrement au niveau des possibilités d'ajustement et de la

qualité de fabrication (accessibilité et maniabilité des composants). Une firme d'ingénieur complète une autre partie de l'évaluation. Elle vérifie la conformité des fauteuils à certaines normes ANSI/RESNA axées sur la sécurité d'utilisation, telle la résistance aux efforts et la stabilité. Seuls les fauteuils répondant aux divers critères d'évaluation seront homologués et pourront faire l'objet d'un appel d'offre. Les modèles retenus seront ajoutés à la liste des produits et des services assurés à la population. Les manufacturiers sont tenus de fournir les pièces de rechange sur une durée de 5 ans suite au retrait d'un appareil de cette liste. Une garantie de 5 ans est généralement offerte pour les FMA et les BP et de 3 ans pour les FMO. Les pièces et la main-d'œuvre sont garanties sur un an. Pour leur part, les produits valorisés sont garantis sur une période de 3 mois.

Les centres mandataires opèrent actuellement de façon autonome. Les produits en leur possession servent essentiellement à leurs propres interventions de maintenance et de valorisation. Les centres s'autofinancent des montants forfaitaires accordés par la RAMQ.

### **A1.1.2 Avantages et difficultés liés à la récupération, au traitement et à la réattribution**

L'intégration des activités de valorisation au fonctionnement des centres mandataires a permis d'élargir l'admissibilité à des fauteuils adaptés aux personnes en perte de mobilité. Elle a également permis de réduire les délais de livraison pour des fauteuils dont la qualité s'apparente à leurs équivalents à l'état neuf. Certaines personnes optent ainsi pour ces appareils pour retrouver plus rapidement une certaine autonomie. Pour la période comprise entre le 15 juin 2000 et 31 mars 2002, la RAMQ a pu réaliser des économies nettes de l'ordre de 3,8 millions de dollars sur un budget total de 54,3 millions de dollars avec le recours aux produits valorisés (Côté *et al.*, 2003).

L'intégration des activités de valorisation a toutefois entraîné une charge additionnelle de travail pour les centres mandataires. Cette charge varie suivant les volumes d'attribution des centres et leur volonté d'offrir une gamme diversifiée de produits valorisés. La grande variété de fauteuils et de composants offerte par les manufacturiers alourdit la réalisation des activités au sein des centres. Certains se sont ajustés à cette charge additionnelle alors que d'autres mettent davantage l'accent sur les activités courantes d'attribution et de maintenance, reportant ou négligeant ainsi les activités de valorisation. Les ressources (humaines et matérielles) et

L'aménagement des installations ont été ajustés à la mesure des budgets établis, suivant les priorités de la direction des centres à l'égard des divers programmes d'aides techniques (aides à la mobilité, aides visuelles, aides auditives, etc.). Pour certains, le manque d'espace les a notamment amené à improviser des espaces d'entreposage pour les produits récupérés et valorisés, tel dans les garages automobiles souterrains ou encore dans des corridors peu utilisés. D'autres ont dû faire appel à des tiers partis pour la récupération, le traitement et l'entreposage des produits. Tous les centres fonctionnent différemment, entraînant ainsi des coûts et des délais qui peuvent varier d'un centre à l'autre et qui affectent l'accessibilité aux produits valorisés.

L'introduction des activités reliées à la récupération et au traitement des fauteuils a eu un impact sur la qualité des produits et des services offerts. Une étude menée en 1998 (Vincent *et al.*, 2003) a démontrée que la clientèle était satisfaite, mais que les intervenants percevaient les activités comme étant mal structurées et inadéquatement organisées.

### **A1.1.3 Réingénierie du réseau de valorisation**

Des démarches ont été initiées pour améliorer les façons de faire au sein de la boucle d'approvisionnement de fauteuils roulants au Québec.

Certains centres, ayant anticipés les bienfaits de la valorisation (ex. : délais, accessibilité et coûts), valorisaient déjà sur une base volontaire. L'Institut de réadaptation en déficience physique de Québec (IRD PQ) est l'un de ces centres et pionniers dans le domaine. Il valorise depuis 1994. En 2000, avec la collaboration de chercheurs de l'Université Laval, il a mis sur pied un projet de recherche visant une réingénierie de ses processus. Ce projet portait sur la proposition d'une nouvelle structure organisationnelle et le développement d'outils d'aide à la décision visant l'intégration des activités de valorisation parmi ses activités courantes. La RAMQ a collaboré à ce projet et s'est jointe à l'équipe en 2002. La problématique s'est alors élargie à une réingénierie de tout le réseau d'attribution, de maintenance, de récupération et de valorisation. Le projet vise maintenant la proposition d'une boucle d'approvisionnement et le développement d'outils d'aide à la décision pour une meilleure utilisation des ressources disponibles.

**Tableau 27 :** Contexte de fonctionnement du réseau d'attribution de fauteuils roulants dans la province de Québec.

ORGANISMES PAYEURS	CENTRES MANDATAIRES	MODÈLES DES MANUFACTURIERS																																		
<p>Au Québec, les acheteurs de fauteuils roulants sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La Régie de l'assurance maladie du Québec (RAMQ);</li> <li>- La Société d'assurance automobile du Québec (SAQ);</li> <li>- La Commission de la santé et de la sécurité du travail de Québec (CSST);</li> <li>- Les assureurs privés (cas rares);</li> <li>- Les utilisateurs payeurs (cas rares).</li> </ul> <p>Quatorze centres de réadaptation sont mandatés par les trois organismes publics pour l'attribution et la maintenance des fauteuils.</p>	<p><b>ATTRIBUTION</b> Deux situations d'attribution :</p> <table border="1" data-bbox="414 808 535 1165"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Année : 2002</th> <th colspan="2">FMA</th> <th colspan="2">FMO</th> <th colspan="2">BP</th> </tr> <tr> <th>N</th> <th>V</th> <th>N</th> <th>V</th> <th>N</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACQUISITION</td> <td>2484</td> <td>580</td> <td>415</td> <td>98</td> <td>647</td> <td>342</td> </tr> <tr> <td>REMPLACEMENT</td> <td>752</td> <td>105</td> <td>585</td> <td>57</td> <td>314</td> <td>97</td> </tr> </tbody> </table> <p>Certains bénéficiaires ne sont admissibles qu'à des fauteuils valorisés, alors que d'autres optent pour ces fauteuils pour profiter de courts délais de livraison.</p>	Année : 2002	FMA		FMO		BP		N	V	N	V	N	V	ACQUISITION	2484	580	415	98	647	342	REMPLACEMENT	752	105	585	57	314	97	<p><b>MODÈLE D'APPAREILS ET COMPOSANTS</b> Vingt cinq modèles de fauteuils (9 modèles de FMA, 8 modèles de FMO et 8 modèles de BP) font partis de la liste des produits et services assurés à la population suite au dernier appel d'offre.</p> <p>Les modèles de fauteuils proviennent de six manufacturiers.</p>							
Année : 2002	FMA		FMO		BP																															
	N	V	N	V	N	V																														
ACQUISITION	2484	580	415	98	647	342																														
REMPLACEMENT	752	105	585	57	314	97																														
<p><b>ATTRIBUTION</b> La RAMQ est le principal organisme payeur. La RAMQ est le seul organisme à demeurer propriétaire des fauteuils attribués.</p>	<p><b>RÉCUPÉRATION</b> Deux situations de récupération : retour volontaire ou démarche entreprise par les centres (flotte privée de véhicule ou prestataire de service logistique) :</p> <table border="1" data-bbox="771 808 893 1165"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Année : 2002</th> <th colspan="2">FMA</th> <th colspan="2">FMO</th> <th colspan="2">BP</th> </tr> <tr> <th>N</th> <th>V</th> <th>N</th> <th>V</th> <th>N</th> <th>V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RÉCUPÉRÉ (temp.)</td> <td>752</td> <td>105</td> <td>585</td> <td>57</td> <td>314</td> <td>97</td> </tr> <tr> <td>RÉCUPÉRÉ (autre)</td> <td>1222</td> <td>153</td> <td>240</td> <td>62</td> <td>368</td> <td>142</td> </tr> <tr> <td>À RÉCUPÉRER</td> <td>1530</td> <td></td> <td>359</td> <td></td> <td>255</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Année : 2002	FMA		FMO		BP		N	V	N	V	N	V	RÉCUPÉRÉ (temp.)	752	105	585	57	314	97	RÉCUPÉRÉ (autre)	1222	153	240	62	368	142	À RÉCUPÉRER	1530		359		255		<p>Chaque modèle est composé de plus d'une quarantaine de composants. Jusqu'à cinq versions différentes de composants sont offertes pour permettre l'ajustement des fauteuils aux besoins des bénéficiaires.</p>
Année : 2002	FMA		FMO		BP																															
	N	V	N	V	N	V																														
RÉCUPÉRÉ (temp.)	752	105	585	57	314	97																														
RÉCUPÉRÉ (autre)	1222	153	240	62	368	142																														
À RÉCUPÉRER	1530		359		255																															
<p><b>MAINTENANCE ET AJUSTEMENT</b> Les trois organismes publics défraient les coûts de maintenance des fauteuils. Seule la maintenance corrective est réalisée actuellement au niveau des centres mandataires. La RAMQ impose une limite de coûts sur les modifications pouvant être portées en regard de l'évolution des besoins des utilisateurs et de l'usure des fauteuils. Lorsque cette limite est atteinte, le fauteuil est remplacé.</p>	<p>Outre le remplacement, le décès représente la majeure partie des cas de récupération (FMA≈60%; FMO≈30%; BP≈50%). Les centres de services doivent bien souvent se déplacer pour récupérer les fauteuils dans ces cas. Les fauteuils inutilisés suite au décès ne sont cependant pas tous retracés et récupérés.</p>	<p>Plus de soixante modèles de fauteuil sont actuellement en circulation dans la province de Québec, ce qui représente un peu plus de 50 000 fauteuils en circulation.</p>																																		
<p><b>RÉCUPÉRATION</b> Depuis juin 2000, la RAMQ exige la récupération de l'ensemble des fauteuils inutilisés.</p> <p><b>TRAITEMENT</b> Les fauteuils récupérés peuvent être :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réparé en vue d'une réattribution;</li> <li>- Désassemblés pour la récupération de pièces de rechange;</li> </ul>	<p><b>TRAITEMENT</b> Les appareils récupérés sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réparés en vue d'une réattribution : FMA : 54%; FMO : 42%; BP : 81%;</li> <li>- Désassemblés pour la récupération de pièces de rechange : FMA : 10%; FMO : 11%; BP : 6%;</li> <li>- Disposés proprement : FMA : 36%; FMO : 47%; BP : 13%.</li> </ul> <p>Garantie pour tous produits valorisés (fauteuils et pièces de rechange) : 3 mois.</p>	<p><b>COÛTS DES FAUTEUILS</b> Le coût moyen des fauteuils neufs (valorisés) est : FMA : 1765\$ (345\$); FMO : 6055\$ (800\$); ABP : 1890\$ (285\$).</p> <p><b>UTILISATION DES FAUTEUILS ET GARANTIE</b></p> <table border="1" data-bbox="1071 283 1291 745"> <thead> <tr> <th></th> <th>FMA</th> <th>FMO</th> <th>BP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Durée moyenne d'utilisation</td> <td>≈4 ans</td> <td>≈4 ans</td> <td>≈2 1/2 ans</td> </tr> <tr> <td>Durée de vie moyenne</td> <td>≈7 ans</td> <td>≈7 ans</td> <td>≈5 ans</td> </tr> <tr> <td>Garantie</td> <td>5 ans</td> <td>3 ans</td> <td>5 ans</td> </tr> </tbody> </table> <p>Une disponibilité de 5 ans doit être assurée par les manufacturiers sur les pièces de rechange suite au retrait des fauteuils de la liste des produits et services assurés.</p>		FMA	FMO	BP	Durée moyenne d'utilisation	≈4 ans	≈4 ans	≈2 1/2 ans	Durée de vie moyenne	≈7 ans	≈7 ans	≈5 ans	Garantie	5 ans	3 ans	5 ans																		
	FMA	FMO	BP																																	
Durée moyenne d'utilisation	≈4 ans	≈4 ans	≈2 1/2 ans																																	
Durée de vie moyenne	≈7 ans	≈7 ans	≈5 ans																																	
Garantie	5 ans	3 ans	5 ans																																	

La réingénierie des processus réalisée à l'IRDPQ repose sur une analyse de tout son système organisationnel. Cette analyse s'est effectuée en deux temps. La première étape portait sur la description des processus opérationnels, tels qu'ils étaient réalisés au début du projet. Avec la participation des intervenants de l'IRDPQ, des diagrammes de processus opérationnel ont été réalisés. Ils présentent les différentes étapes des processus (attribution, maintenance, récupération et valorisation) ainsi que les liens avec les différents supports à l'information et les outils d'aide à la décision utilisés. La description des activités, des informations collectées et des supports utilisés est consignée dans un rapport (Chouinard *et al.*, 2001). La seconde étape portait plus spécifiquement sur l'analyse des stratégies d'affaires (gestion des ressources, échange d'information, etc.). Un audit a été développé pour évaluer les activités en lien avec la récupération et la valorisation (Aït-Kadi *et al.*, 2001). L'audit a été validé et approuvé auprès de l'IRDPQ et la RAMQ. Cet outil a été joint, à l'automne 2001, à un sondage effectué par la RAMQ auprès des centres mandataires à l'égard des activités reliées à la valorisation des fauteuils roulants (Côté *et al.*, 2003). À l'IRDPQ, l'audit a été complété par des intervenants clés et les résultats ont été évalués par l'équipe de recherche (Chouinard *et al.*, 2002). Ces deux étapes d'analyse ont permis d'identifier les lacunes et les difficultés à considérer de sorte à améliorer l'efficacité et l'efficience de l'ensemble des activités de l'IRDPQ, en tenant compte désormais des activités de récupération et de valorisation. Des suggestions émanant des différents intervenants consultés et des constats du groupe de recherche ont été consignées dans ces deux rapports. Le contenu des rapports a été validé par la direction de l'IRDPQ et les différents intervenants impliqués dans les processus ciblés. Des actions spécifiques ont ensuite été entreprises afin d'ajuster les façons de faire des intervenants (magasiniers, mécaniciens, personnel administratif, etc.) et de réaménager les espaces d'entreposage des produits valorisés.

Une analyse des opérations de maintenance et de valorisation des fauteuils roulants a été complétée avec la participation de l'IRDPQ et de la RAMQ (Zwingmann, 2006). Des durées moyennes d'assemblage, de désassemblage et de réparation ont été obtenues de cette démarche. Elles serviront aux centres mandataires pour la planification et la gestion des activités et permettront à la RAMQ de mieux maîtriser les dépenses liées au programme d'aide à la mobilité, particulièrement à l'égard des fauteuils roulants, pour ainsi maintenir ou améliorer le service aux bénéficiaires.



Sur le plan technique, certaines études ont été menées de sorte à mieux connaître la structure des fauteuils roulants, comprendre les technologies utilisées, caractériser le comportement des produits dans le temps et définir les fonctions requises à la réponse exacte aux besoins des utilisateurs finaux. Pour chaque type d'appareil (FMA, FMO, BP) une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leur criticité (AMDEC) a d'abord été réalisée en collaboration avec le personnel technique de l'IRDPQ. Des plans génériques détaillés de fauteuil roulant ont également été produits avec le logiciel Pro-Engineer. Les plans peuvent facilement et rapidement être adaptés en regard de différentes technologies à l'aide d'un formulaire électronique. Les fauteuils ainsi obtenus servent à procéder à des analyses de comportement, notamment par évaluation de contraintes, à l'aide d'un programme de simulation mis au point sous l'environnement ADAMS. La fiabilité et la maintenabilité des fauteuils peuvent alors être facilement évalués et à coûts moindres que par le biais de tests physiques (Zwingmann, 2006). Une analyse fonctionnelle a aussi été effectuée pour identifier l'ensemble des besoins pouvant se présenter chez les utilisateurs finaux et établir leur priorité relative (Zwingmann et Gagnon, 2002). Le point de vue des utilisateurs finaux et des cliniciens de l'IRDPQ a été sondé lors de focus groupe. La méthode triage a été retenue pour recueillir et analyser les résultats. L'objectif de ces deux dernières démarches est d'identifier les moyens qui permettraient de réduire la variété de fauteuils et de composants, sans compromettre la mobilité des utilisateurs.

Différents outils d'aide à la décision devant servir à une utilisation intelligente des ressources du réseau ont aussi été développés et validés. Ces outils ciblent autant les processus d'attribution, de maintenance, de récupération que de valorisation.

Au niveau de l'attribution, un outil d'aide à l'attribution servant au pairage des besoins de mobilité aux technologies et aux ajustements appropriés est en élaboration. Il s'agit d'un support informatique qui guidera les ergothérapeutes lors de la prescription de fauteuils.

En ce qui a trait à la maintenance, un modèle analytique (Jamali, 2004) a été mis au point pour déterminer la fréquence des remplacements préventifs de certains composants critiques des fauteuils (identifiés à partir de l'AMDEC), ainsi que l'âge optimal des composants valorisés devant servir lors des remplacements à la panne.

Un modèle de programmation mathématique a été proposé pour établir la séquence optimale de désassemblage dans un contexte de maintenabilité (Zwingmann *et al.*, 2006).

Pour ce qui est de la récupération et de la valorisation, trois outils d'aide au tri ont été développés (Diallo, 2006; Diallo et Aït-Kadi, 2005). Un arbre de décision et un modèle basé sur une approche multicritère ont été conçus. Les critères utilisés par ces outils, pour la sélection d'une alternative de traitement pour les fauteuils récupérés (réparation, désassemblage et reconditionnement des composants, disposition), ont été identifiés avec le personnel technique de l'IRDPQ et le personnel de la RAMQ. Un modèle de programmation mathématique a été développé pour procéder à une analyse économique des opportunités liées à la valorisation d'un appareil, notamment en s'appuyant des coûts de traitement et des capacités d'entreposage. Des démarches sont entreprises par l'équipe de recherche, avec la collaboration de la RAMQ et des centres mandataires impliqués à ce jour, pour procéder à l'implantation et à l'évaluation à plus grande échelle de cet outil. Un support informatique visant une gestion provinciale des produits valorisés est actuellement en élaboration.

Les travaux ont mené à la proposition d'une nouvelle structure organisationnelle et d'une architecture de support à l'information (Chouinard, 2003; Chouinard *et al.*, 2005), devant servir à saisir et à partager toutes les informations pertinentes à une gestion intelligente des produits sur tout leur cycle de vie. Une stratégie d'implantation est en cours d'élaboration.

Une stratégie de déploiement de réseau logistique a été élaborée pour une première exploration de la prise en charge des activités de récupération, de traitement et de redistribution de fauteuils roulants par les centres mandataires (Cloutier, 2004). Différents scénarios envisagés par la RAMQ ont été analysés avec un modèle de programmation déterministe. Des pistes ont ainsi été émises sur la manière d'aborder le réseau de valorisation dans la province de Québec.

Une méthodologie est proposée dans cette thèse pour la conception de boucles d'approvisionnement dans un contexte stochastique. Elle est validée avec le contexte des fauteuils roulants. Elle est abordée de sorte à constituer un réseau provincial de valorisation, en considérant maintenant les fauteuils roulants et les pièces de rechange, tout en améliorant ou en maintenant le niveau de service offert aux utilisateurs finaux et en réduisant les coûts de fonctionnement de la boucle d'approvisionnement. Le réseau est abordé suivant une stratégie

de déploiement envisagée par la RAMQ. Dans cette stratégie, tous les centres mandataires en place procèdent à la récupération des fauteuils roulants. Seulement certains d'entre eux sont considérés pour effectuer le traitement et la redistribution des produits. Des tiers partis sont envisagés plus spécifiquement à l'égard de la disposition. La flotte privée de véhicules des centres mandataires et les prestataires de services logistiques impliqués à ce jour peuvent se voir impliqués dans la récupération des produits auprès des utilisateurs finaux. Les données recueillies par la RAMQ et les centres mandataires ainsi que celles fournies par les tiers parties sont utilisées pour définir les paramètres du modèle de programmation mathématique obtenu de cette méthodologie. Ils visent à caractériser les niveaux de performance atteignables du réseau, en termes de capacités, de coût et de niveaux de service, et à définir conséquemment les familles de produits et leur nomenclature, les conditions de traitement suivant l'état des produits récupérés ainsi qu'à localiser, caractériser et estimer les volumes de récupération et de demande de la boucle. Les facteurs aléatoires sur les volumes de récupération, de traitement et de redistribution sont identifiés et caractérisés au cours de cette étape. Une heuristique basée sur l'approche de résolution basée sur l'approximation de la moyenne d'échantillonnages (« *Sample Average Approximation - SAA* ») est utilisée pour résoudre le modèle stochastique développé.

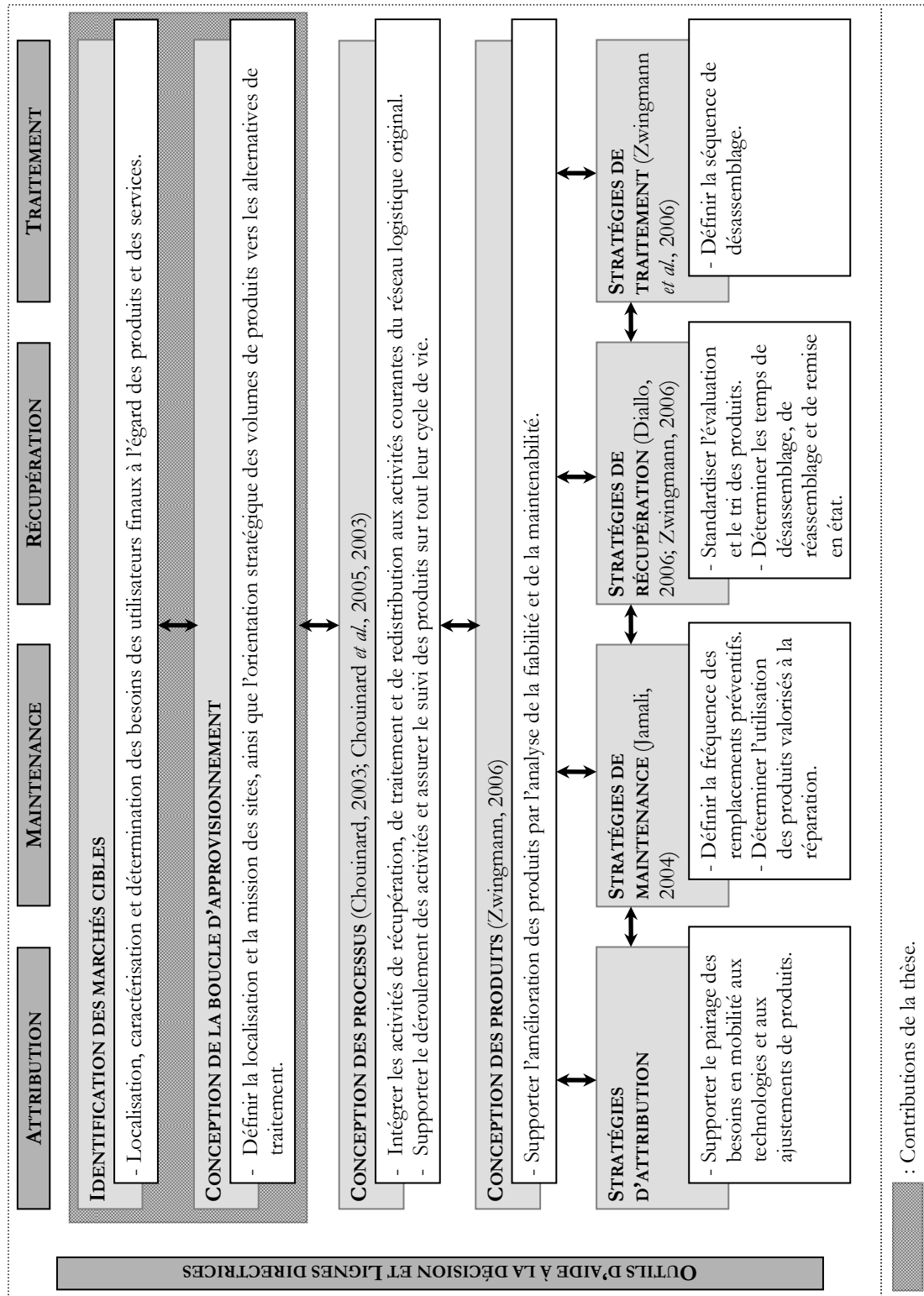


Figure 33 : Résumé des travaux de recherche réalisés dans le cadre du projet de valorisation des aides à la mobilité.