



Intégration d'un centre logistique au sein d'un réseau d'entreprises forestières : impact et analyse

Thèse

François Sarrazin

**Doctorat en sciences
forestières Philosophiæ doctor
(Ph. D.)**

© François Sarrazin, 2019
Québec, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL

**Intégration d'un centre logistique au sein
d'un réseau d'entreprises forestières
Impact et analyse**

Thèse

François Sarrazin

Doctorat en sciences forestières
Philosophiæ doctor (Ph. D.)

Sous la direction de :

Luc LeBel, directeur de recherche
Nadia Lehoux, codirectrice de recherche

© François Sarrazin, 2019

Résumé

L'industrie forestière compte pour une partie importante de l'activité économique québécoise et de nombreuses communautés en dépendent. Dans les forêts naturelles, la grande diversité d'espèces d'arbres et de qualité des tiges accroît la complexité des opérations de triage et de gestion des flux. De plus, l'éloignement de la ressource forestière entraîne des coûts de transport élevés. Par ailleurs, la littérature scientifique démontre que la mutualisation du transport s'avère profitable (Epstein et al. 2007), mais qu'elle est cependant fort complexe à déployer (Frisk et al. 2010). Finalement, la transition de systèmes de production en flux poussés vers des systèmes en flux tirés et les difficultés récentes de cette industrie (déclin du secteur des pâtes et papiers, crise immobilière de 2008-09, etc.) rendent d'autant plus pertinent d'examiner des façons de mieux tirer profit de la ressource forestière. À cet égard, la création de cours de triage et de consolidation qui soient distinctes des sites en forêt et des usines offre de multiples occasions de maximisation de la valeur et de minimisation des coûts. De tels centres représentent cependant un défi important quant à leur gestion quotidienne et à leur insertion dans le réseau logistique déjà en place.

Nous posons donc l'hypothèse que certains facteurs économiques, logistiques et environnementaux, permettraient à un centre logistique forestier comprenant une cour de triage et une coordination du transport de créer des économies de coût, notamment par l'entremise de l'utilisation du transport hors norme (Chan *et al.* 2008a) et de coûts de triage plus bas (tel que nous pouvons le déduire de Favreau 1995). Nous pensons également que le fait d'effectuer des activités de triage au centre procurerait une valeur économique supplémentaire aux entreprises utilisant ses services, en limitant le taux d'erreur dans la classification des billes tel que relevé dans Sessions (2005).

Cette thèse vise donc à identifier certains facteurs clés influençant la profitabilité d'un centre logistique forestier régional comportant une cour dédiée au triage et une coordination du transport. Par la suite, nous prenons en compte ces facteurs lors du développement d'un modèle de maximisation des profits d'un réseau logistique forestier comprenant ou non une cour dédiée au triage ainsi que l'utilisation des retours en charge. Nous avons d'abord appliqué ce modèle à un cas théorique et réaliste et nous avons obtenu des gains potentiels atteignant 0,88\$ de profit supplémentaire par m³ disponible à la récolte sur l'ensemble du réseau. Nous avons par la suite utilisé ce modèle pour optimiser un cas d'étude plus complexe et analyser le fonctionnement du réseau y compris en le modifiant. Une analyse de sensibilité révéla que plusieurs facteurs tels que la distance des zones de récolte, le nombre de camions hors norme et le niveau des redevances avaient une influence significative sur la profitabilité du centre projeté. Enfin, dans le cas d'étude, nous avons décelé un effet dynamique entre l'opération d'une cour de triage et l'utilisation des retours en charge. L'ajout d'une cour de triage permet ainsi de réduire la durée moyenne des routes de livraison en scindant en deux les flux de matière entre les forêts et les usines, ce qui facilite le respect des limites de durées de conduite. Surtout, une telle cour fait en sorte qu'un même site peut servir autant comme origine que comme destination, ouvrant la porte à d'importantes réductions du transport à vide.

Abstract

The forest industry represents an important part of Quebec's economic activity and many local communities depend on this sector. In natural forests, the great diversity of tree species and quality brings an added complexity for sorting operations and the flow of resources. Furthermore, the remoteness of the resource implies high transportation costs. Scientific literature demonstrates that sharing transportation capacity can result in important cost reductions (Epstein *et al.* 2007), but is quite complex to put into place (Frisk *et al.* 2010). Finally, the transition from push systems towards pull type supply chains and the recent difficulties for this industry (decline of the pulp and paper sector, housing crisis of 2008-09, etc.) make it all the more relevant to examine how to better use the wood resource. In this regard, the creation of sort yards, distinct from both the harvesting sites and the mills, offers many opportunities for maximizing value and minimizing costs. Such centers however, represent an important challenge in regards to their daily management and their insertion in the pre-existing logistics network.

We therefore hypothesize that for certain economic, logistical and environmental factors, a logistics center comprised of a sort yard and transportation coordination, could generate cost savings, especially through the use of oversize trucks (Chan *et al.* 2008) and lower sorting costs (as can be deduced from Favreau 1995). We also sense that the sorting activities performed in such a center would also procure an added economic value for companies using its services by limiting the error rate in the classification of the logs, as presented in Sessions (2005).

The purpose of this thesis is therefore to identify key factors regarding their impact on the profitability of a regional forest logistics center, combining a specific sort yard and the use of backhauling. Following this, we consider these factors in the development of a profit maximization model for a forest logistics network with the option of using such a sort yard and/or backhauling. This model was first applied to a fictitious but realistic case using

generated data in order to estimate the magnitude of potential profit improvements which reached up to \$ 0.88 per m³ available for harvest. The model was then applied to optimize a real and complex network to analyze its performance as well as slightly modified versions. A sensitivity analysis was also conducted and revealed that many factors such as distances from the harvesting zones, the number of oversize trucks and the level of stumpage fees had a significant influence on the profitability of such a center. In addition, a dynamic effect between the operation of the yard and the use of backhauling was observed for the real case. The addition of a sort yard allows to reduce the average length of delivery routes by breaking in two the flow of material between the harvesting areas and the production mills. This makes it easier to fit delivery routes within the legal driving time limit. Most importantly, such a yard can serve both as an origin and a destination, therefore opening the door to important reductions in deadheading.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	x
Liste des figures.....	xii
Liste des acronymes.....	xiii
Remerciements	xvi
Avant-propos	xvii
Introduction	1
Contexte	1
Problématique	2
Objectifs	4
Méthodologie et analyse	4
Structure de la thèse	6
Chapitre 1	7
Revue de littérature générale	7
1.1 Chaîne d’approvisionnement	7
1.1.1 Description générale	7
1.1.2 Collaboration logistique forestière et partage des bénéfices.....	10
1.1.3 Fonctions de la chaîne logistique	11
1.1.4 Opérations de triage en foresterie	13
1.2 Planification logistique et modélisation.....	17
1.3 Opportunités de bonification de l’état du savoir et objectifs	22
Chapitre 2	26
Méthodologie générale	26
2.1 Structure générale de la thèse	26
2.3 Cas théorique	28
2.3.1 Opérations de récolte.....	30
2.3.2 Redevances	30

2.3.3	<i>Processus de triage et de transformation de la matière</i>	30
2.3.4	<i>Coûts d'installation de la cour</i>	34
2.3.5	<i>Coûts de transport</i>	34
2.3.6	<i>Densité de la matière et coûts de stockage</i>	37
2.3.7	<i>Prix et demande des produits finis</i>	38
2.3.8	<i>Définition des périodes de temps</i>	39
2.3.9	<i>Validation du modèle et de la base de données</i>	40
2.4	<i>Cas d'étude</i>	40
2.4.1	<i>Modifications de la capacité et des coûts de récolte</i>	41
2.4.2	<i>Mise à jour des redevances</i>	41
2.4.3	<i>Mise à jour des coûts de transport</i>	41
2.4.4	<i>Garanties d'approvisionnement</i>	42
2.4.5	<i>Mise à jour des coûts d'installation de la cour</i>	43
2.4.6	<i>Mise à jour des prix des produits finis</i>	43
2.4.7	<i>Mise à jour des processus de triage</i>	43
2.4.8	<i>Validation du modèle et de la base de données</i>	43
2.5	<i>Modification du cas d'étude</i>	44
2.6	<i>Résolution</i>	44
Chapitre 3		45
Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistic Center		45
	Résumé	46
	Abstract	47
3.1	Introduction	48
3.2	Literature review	50
3.2.1	<i>Forest products supply chain</i>	50
3.2.2	<i>Sorting operations</i>	51
3.2.3	<i>Planning</i>	52
3.2.4	<i>Wood transportation</i>	52
3.2.5	<i>Logistic centers and modeling</i>	53
3.3	Objective and Methodology	54
3.3.1	<i>Objective</i>	54

3.3.2 <i>Methodology</i>	55
3.4 Modeling and route generation	60
3.4.1 <i>Mathematical modeling</i>	60
3.4.2 <i>Route generation</i>	67
3.5 Experimentation and analysis	69
3.5.1 <i>Experimentation</i>	69
3.5.2 <i>Base instance</i>	70
3.5.3 <i>Sensitivity analysis</i>	73
3.5.4 <i>Statistical analysis</i>	77
3.6 Discussion and conclusion.....	80
3.6.1 <i>Discussion</i>	80
3.6.2 <i>Conclusion</i>	80
3.7 Acknowledgements.....	81
Chapitre 4	82
Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network	82
Résumé.....	83
Abstract.....	84
4.1 Introduction.....	85
4.2 Literature review	87
4.3 Methodology and Modelling	88
4.3.1 <i>Methodology</i>	88
4.3.2 <i>Case study – Mauricie region</i>	91
4.4 Modelling and route generation.....	92
4.4.1 <i>Mathematical modelling</i>	92
4.4.2. <i>Route generation</i>	98
4.5 Results.....	98
4.5.1 <i>Experimentation – Base scenario</i>	98
4.5.2 <i>Backhauling analysis</i>	102
4.5.3 <i>Sensitivity analysis</i>	103
4.5.4 <i>Statistical analysis</i>	108
4.6 Conclusion	110

4.7 Acknowledgements.....	112
Chapitre 5	113
Modifications à un réseau forestier et impacts sur sa rentabilité.....	113
5.1 Introduction.....	113
5.2 Liste des instances et résultats	114
5.3 Analyse de sensibilité	114
5.4 Nouvelles configurations du réseau	118
5.4.1 Usines enlevées du réseau.....	121
5.4.2 Nouveaux sites	126
5.4.3 Accès au transport hors norme	128
5.4.4 Pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée.....	130
5.5 Effet du centre sur les émissions de gaz à effet de serre.....	133
5.6 Répartition des gains.....	136
5.7 Conclusion	141
Conclusion.....	144
Bibliographie	150
Annexe A – Modèle de la phase 2 (chapitre 3)	156
Annexe B – Modèle de la phase 2 (chapitre 4).....	159

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Résumé des caractéristiques traitées dans la littérature.....	23
Tableau 2.1 : Catégories de billes.....	31
Tableau 2.2 : Essences et familles de bois utilisées	34
Tableau 2.3 : Composantes et types de coûts de transport	35
Tableau 3.1: Profits by scenario	70
Tableau 3.2 : Gains by scenario (in \$·avail. m ⁻³)	71
Tableau 3.3 : Variation in revenues and costs (in \$·avail. m ⁻³).....	71
Tableau 3.4 : Variations in transportation costs (in \$·avail. m ⁻³).....	72
Tableau 3.5 : Results of a linear regression.....	78
Tableau 4.1: List of all instances	99
Tableau 4.2: Network profits and profit increases by scenario (in \$·avail. m ⁻³).....	100
Tableau 4.3: Profit increase per scenario (\$·processed m ³)	101
Tableau 4.4: Increases in revenues and costs (in \$·avail. m ⁻³).....	101
Tableau 4.5: Dynamic effect for each sorting configuration.....	103
Tableau 4.6: Results of a linear regression for values of five factors over three configurations	110
Tableau 5.1: Résultats d'une régression linéaire sur deux facteurs pour trois configurations (niveau de dépréciation maximale et coût d'implantation)	118
Tableau 5.2: Liste des groupes d'instances	119
Tableau 5.3: Instances du groupe <i>G1</i> (scénario de base)	120
Tableau 5.4: Profits et gains pour le groupe <i>G1</i> (en \$/m ³ disponible).....	120
Tableau 5.5: Instances <i>G2.1</i> à <i>G2.10</i> du groupe <i>G2</i> (usine Windsor fermée).....	122
Tableau 5.6: Instances <i>G2.11</i> à <i>G2.20</i> du groupe <i>G2</i> (usine Parent fermée)	122
Tableau 5.7: Instances <i>G2.21</i> à <i>G2.30</i> du groupe <i>G2</i> (usine Saint-Roch fermée).....	122
Tableau 5.8: Profits et gains pour le groupe <i>G2</i> (en \$/m ³ disponible).....	125
Tableau 5.9: Faits saillants des résultats du groupe <i>G2</i>	125
Tableau 5.10: Instances du groupe <i>G3</i> (nouveaux sites)	127
Tableau 5.11: Profits et gains pour le groupe <i>G3</i> (en \$/m ³ disponible).....	127
Tableau 5.12: Faits saillants des résultats du groupe <i>G3</i>	127
Tableau 5.13: Instances du groupe <i>G4</i> (transport hors norme ajouté).....	128
Tableau 5.14: Profits et gains pour le groupe <i>G4</i> (en \$/m ³ disponible).....	129
Tableau 5.15: Faits saillants des résultats du groupe <i>G4</i>	129
Tableau 5.16: Instances du groupe <i>G5</i> (pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée – Shawinigan, Saint-Georges et Parent).....	130
Tableau 5.17: Instances du groupe <i>G5</i> (pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée – Rivière-aux-Rats, Saint-Adelphe et Saint-Roch)	131
Tableau 5.18: Profits et gains pour le groupe <i>G5</i> (en \$/m ³ disponible).....	132

Tableau 5.19: Faits saillants des résultats du groupe <i>G5</i>	133
Tableau 5.20: Profits et gains des meilleurs et plus importants scénarios (en \$/m ³ disponible)	133
Tableau 5.21: Instances du groupe <i>G1</i> (scénario de base)	134
Tableau 5.22: Émissions de GES et consommation de carburant par scénario.....	134
Tableau 5.23: Économies pondérées selon les routes de livraisons	139
Tableau 8.1: Correspondance des expressions (chapitre 3).....	158
Tableau 8.2: Correspondance des expressions (chapitre 4).....	160

Liste des figures

Figure 1.1: Exemple d'un réseau de création de valeur de l'industrie du bois (adapté de Carlsson <i>et al.</i> 2009).....	10
Figure 2.1: Étapes principales de la thèse	27
Figure 2.2: Étapes de la construction et de validation du modèle et de la base de données	29
Figure 2.3: Évolution et flux de la matière à travers les processus de transformation.....	33
Figure 3.1: Relationship between Phase 1 and Phase 2.....	56
Figure 3.2: Forest supply chain with potential logistic center.....	57
Figure 3.3: The Mauricie region.....	58
Figure 3.4: Forest Management Units	59
Figure 3.5: Routing generation. Numbers represent km between network	69
Figure 3.6: Evolution of profit increases relative to variations in transportation costs.....	74
Figure 3.7: Evolution of profit increases relative to variations in the distances to forests sites	75
Figure 3.8: Evolution of profit increases relative to variations in the number of oversize trucks	76
Figure 3.9: Evolution of profit increases relative to variations in sorting costs at the yard .77	
Figure 4.1: The Mauricie forest network with its 12 harvesting zones and 11 business units (mills).....	91
Figure 4.2: Effect of fuel costs on profit increases.....	104
Figure 4.3: Effect of loading and unloading costs on profit increases	105
Figure 4.4: Effect of sorting error rates (at the landing or the mills) on profit increases...	106
Figure 4.5: Effect of stumpage fees on profit increases	107
Figure 4.6: Effect of price variations on profit increases	108
Figure 5.1: Impact des variations du niveau de la dépréciation maximale sur les augmentations de profit ($\$/\text{m}^3$ disponible)	116
Figure 5.2: Impact des variations du niveau des coûts d'implantation sur les augmentations de profit ($\$/\text{m}^3$ disponible)	117
Figure 5.3: Flux des billes et des copeaux vers les usines de pâtes et papiers (feuillu)	123
Figure 5.4: Répartition de la contribution marginale aux augmentations de profit engendrées par les cours (retours à vide).....	138
Figure 5.5: Répartition de la contribution marginale aux augmentations de profit engendrées par les cours (retours en charge).....	139
Figure 5.6: Impact du nombre d'usines participantes à la cour de triage sur les augmentations de profit ($\$/\text{m}^3$ disponible)	140

Liste des acronymes

BMMB : Bureau de mise en marché des bois	28, 57
<i>CRIQ</i> : <i>Centre de recherche industrielle du Québec</i>	16, 151
CVF : Centre de valorisation de la fibre.....	16, 151
dhp : Diamètre à hauteur de poitrine	31
FTL : Full truck loads - Charges complètes	98
MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.....	30, 33, 41, 58
MIP : Mixed-Integer programming - Programmation en nombres entiers mixtes.....	17, 20, 53, 153
SEPM : Sapin, épinettes, pin gris, mélèzes	2, 31, 34, 42
UAF : Unités d'aménagement forestier.....	31, 42, 121, 153
VTM : Virtual Transportation Manager	19, 37, 153

*À ma mère et à mon beau-père sans lesquels
tout ceci n'aurait pas été possible.*

*Concern for man and his fate must always
form the chief interest of all technical
endeavors. Never forget this in the midst of
your diagrams and equations.*
- Albert Einstein

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mes directeurs, Luc LeBel et Nadia Lehoux pour leur appui, leurs conseils judicieux, leur patience, leur grande disponibilité et leur très grande rigueur tout au long de ce projet. Je remercie également les autres membres du jury d'évaluation, Messieurs Daniel Beaudoin, Jean-Paul Bourrières et Jean-François Côté pour leurs commentaires et critiques constructives qui m'ont permis d'améliorer le contenu de cette thèse. Je veux souligner la grande contribution de François Laliberté pour son aide concernant l'utilisation de la base de données MÉRIS ainsi que la compréhension des processus de triage. Philippe Marier pour sa part m'a apporté une très grande assistance quant à la maîtrise du logiciel OPL Studio et des bases de données Access alors que Marc-André Carle m'a conseillé quant à la conception du modèle utilisé. Aussi, ce projet n'aurait pu être un succès sans l'apport de Marie-Lou Gravel pour son travail sur les données de transport. Un merci particulier à Pierre-Serge Tremblay, Jean-François Audy, Luc Bouthillier, Shuva Gautam, Marta Trzcianowska, Gregory Paradis, François Morin, Pierre Cantegril, Dave Lepage, Francis Charrette de *FPIInnovations*, Carl Tremblay de *Kruger*, André Gravel de *Domtar* et Édith Brotherton du consortium de recherche FORAC pour m'avoir aidé à mieux comprendre les processus forestiers et à trouver plusieurs sources documentaires pertinentes. Pour leur part, Caroline Cloutier a effectué la correction de l'anglais alors que Julie Ferland a conçu certains symboles graphiques.

Je veux exprimer mon appréciation envers Sébastien Lemieux, Alexandre Morneau et Rémy Huot pour leur aide concernant l'utilisation des serveurs nécessaires à l'utilisation du solveur CPLEX. Je désire exprimer ma très grande appréciation envers Catherine Lévesque et Marie-Philippe Naud pour leur appui en tant qu'agentes de secrétariat chez FORAC. Je veux également remercier le consortium FORAC et ses partenaires. Ce projet fut possible grâce au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada par l'entremise de ses programmes subventionnaires ainsi que le Fonds québécois de la recherche sur la nature et ses bourses d'études. Finalement, un très grand merci à ma mère, Louise-Édith Tétreault et à mon beau-père, François Gendron, pour leur appui sans failles tout au long de ce projet qui n'aurait pu être mené à bien sans leur immense aide.

Avant-propos

Ce travail intitulé « Intégration d'un centre logistique au sein d'un réseau d'entreprises forestières – Impact et analyse » est réalisé dans le but d'obtenir le grade de Doctorat en sciences forestières (Ph. D.) de l'Université Laval. Il a été effectué sous la direction du Pr Luc LeBel et sous la codirection du Pr Nadia Lehoux au département des sciences du bois et de la forêt de la faculté de foresterie, de géographie et de géomatique et au sein du consortium de recherche FORAC.

Ce travail est une thèse par articles et inclut deux articles pour lesquels je suis l'auteur principal. Le Pr Luc LeBel et la Pr Nadia Lehoux en sont les coauteurs. Pour chacune de ces publications, j'ai agi à titre de chercheur principal dans la définition des objectifs de recherche, la rédaction des revues de littérature, le développement et la validation des modèles mathématiques proposés, la collecte de données et la construction des bases de données, la compilation et l'analyse des résultats, ainsi que la rédaction de la version originale de chacun des deux articles. Les coauteurs ont contribué à ces articles sur plusieurs plans y compris la définition des objectifs de recherche, la modélisation mathématique, le traitement des données et la rédaction des manuscrits.

Le premier article est intitulé « Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistic Center » et fut publié dans la revue *Forest Science*, 2018, 64(3), 233-245. Le texte inséré dans cette thèse est une version adaptée de celui qui fut publié dans la revue. La numérotation des tableaux et des figures fut entre autres modifiée.

Le second article est intitulé « Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network ». Il a été accepté avec par la revue *Canadian Journal of Forest Research*, 2019 49(2), 179-189. Le texte inséré dans cette thèse est une version révisée de celui qui sera publié dans la revue. Outre la numérotation des tableaux et des figures, des explications supplémentaires furent fournies concernant l'interaction entre les cours potentielles et l'utilisation des retours en charge.

Introduction

Contexte

Les secteurs forestiers québécois et canadien ont subi une crise majeure dans leur histoire depuis les années 2000 avec les conflits récurrents du bois d'œuvre, les fluctuations du dollar canadien (Marowits 2010) et la crise immobilière de 2009. Mentionnons également le déclin du secteur des pâtes et papiers en Amérique du Nord, notamment celui du papier journal (Gagnon-Paradis 2013), causé par le développement des technologies de l'information. Les entreprises ont ainsi dû fermer de nombreuses installations et font simultanément face au vieillissement de leur main-d'œuvre (*Ibid.*).

Aussi, les préoccupations croissantes concernant les questions écologiques mettent une pression de plus en plus grande sur l'industrie forestière pour revoir ses pratiques, notamment au niveau de l'optimisation de ses opérations de transport. Aussi, la sortie du documentaire *l'Erreur boréale* de Richard Desjardins en 1999 et la commission d'étude¹ qui suivit quelques années plus tard ont poussé le gouvernement québécois à transformer en profondeur les règles d'aménagement et les processus liés à la planification forestière au Québec. Le régime forestier québécois entré en vigueur en 2013 a forcé ainsi les entreprises à s'adapter à la mise en place d'enchères pour une partie du bois offert et à la diminution de la possibilité forestière (Larocque 2013).

Ces évolutions forcent l'industrie forestière à se tourner vers le développement de nouveaux produits comme la nano cellulose cristalline qui rend des matériaux comme le plastique plus résistant et offre des applications dans de nombreux domaines (Bouchard 2011). Par ailleurs, l'évolution de plus en plus rapide de la technologie fait en sorte qu'il est de plus en plus difficile de se différencier à ce chapitre sur une longue période. Les cycles de vies des produits de plus en plus courts forcent donc les chaînes logistiques des

¹ La Commission Coulombe.

entreprises à être plus agiles et capables de réagir rapidement aux besoins des clients (Baker 2008).

Problématique

L'industrie forestière représente une partie importante de l'activité économique canadienne, générant environ 24,6 milliards de dollars en retombées annuellement et jusqu'à 200 000 emplois au Canada dépendent directement de ce secteur (Ressources naturelles Canada 2018). Par ailleurs, la plus récente enquête quinquennale publiée par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2016) recense un coût de transport du bois de 16,15 \$/m³ dans le bois résineux (SEPM) et de 19,25 \$/m³ pour le feuillu. À l'échelle du Québec, en considérant qu'il s'est récolté environ 30 millions de m³ en 2016 (Ressources naturelles Canada 2016), une réduction de seulement 5% du coût de transport représenterait une économie potentielle de 26 millions de \$ annuellement², et ce, avant même de tenir compte de l'inflation survenue depuis les dernières années. Cependant, le secteur forestier québécois est aux dires même de certains observateurs, en retard sur d'autres industries quant à la gestion de ses opérations de transport (Castonguay 2015).

Ces faits indiquent que les possibilités d'économies dans le secteur forestier y sont importantes. Dans cette lignée, la documentation scientifique démontre que la mutualisation du transport s'avère profitable à la fois d'un point de vue économique et environnemental (Epstein *et al.* 2007), mais est cependant fort complexe à déployer (Frisk *et al.* 2010), y compris dans le domaine forestier canadien (Castonguay 2015). Aussi, les processus de triage de la matière échouent à capturer le plein potentiel de valeur du bois debout, compte tenu des erreurs commises dans la classification du bois lorsqu'elle est effectuée en forêt (Sessions *et al.* 2005). De même, on note un certain manque d'espace disponible pour

² En posant l'hypothèse conservatrice que 60% du bois récolté serait de type résineux et le 40% restant de type feuillu, nous obtenons un coût de transport pondéré de 17,39 \$ et un coût de transport total de 521 700 000 \$ à l'échelle du Québec seulement. $521\,700\,000\ \$ * 5\% = 26\,085\,000\ \$$.

effectuer le triage en forêt (Dramm *et al.* 2002), ce qui peut engendrer des différences de coûts en comparaison des cours spécifiquement dédiées à cette activité (Favreau 1995).

Également, la transition de systèmes de production en flux poussés vers des systèmes en flux tirés rend plus intéressant le fait de retarder le point de découplage de la matière, permettant ainsi de mieux répondre aux fluctuations de la demande. Cela rend d'autant plus pertinent d'examiner des façons de mieux tirer profit de la ressource forestière. À cet égard, la création de cours de triage et de consolidation distinctes des sites en forêt et aux usines pourrait dans certaines circonstances offrir de multiples occasions de maximisation de la valeur et de minimisation des coûts. Elles peuvent également permettre de minimiser l'empreinte écologique de cette industrie en augmentant la valeur extraite des forêts. Elles représentent cependant un défi important quant à leur gestion quotidienne et à leur insertion dans le réseau logistique déjà en place. Il serait également important de bien analyser l'interaction entre une telle cour (voire plusieurs) et l'utilisation des retours en charge au sein d'une structure commune que nous appellerons centre logistique forestier régional.

De telles installations ne sont cependant pas systématiquement utilisées par les entreprises forestières, même si elles peuvent favoriser un meilleur arrimage entre l'état réel de la ressource (répartition des essences, niveaux de qualité et quantités disponibles) et les besoins des compagnies forestières. Cela pose ainsi la question de connaître dans quelles circonstances un tel centre serait profitable aux entreprises utilisant ses services (triage, transformation en copeaux, entreposage, coordination du transport) et quels pourraient être les avantages spécifiques au niveau du contrôle des coûts, de la création de la valeur et de l'agilité opérationnelle. Aussi, il est pertinent de vérifier si une cour rend l'utilisation des retours en charge plus profitable économiquement que lorsqu'aucune installation de ce type n'est utilisée. Face à cette interrogation, nous pensons qu'il devient particulièrement important d'identifier de façon exhaustive les conditions rendant possible, voire souhaitable, la création d'un tel centre. Nous croyons également que l'implantation d'un tel projet par l'industrie passe par sa validation à travers un cas industriel.

Objectifs

Dans cette thèse, nous avons donc cherché à identifier une série de facteurs clés favorisant la profitabilité d'un centre logistique forestier régional pour un réseau forestier donné. Nous avons aussi analysé l'interaction d'un tel centre au sein d'un réseau forestier complexe ainsi que la relation entre l'utilisation d'une cour dédiée au triage et celle des retours en charge. Les techniques de la recherche opérationnelle ont pour ce faire été exploitées. Le prochain chapitre présente les étapes de la méthodologie employée pour atteindre nos objectifs.

Méthodologie et analyse

Un modèle mathématique de type linéaire en nombres entiers et de maximisation de la valeur fut d'abord élaboré. Des données furent recueillies auprès de diverses sources telles que le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs ainsi que le Bureau de mise en marché des bois du gouvernement du Québec. Un processus itératif d'essais et d'erreurs fut suivi pour valider le modèle, le modifier au besoin et ajuster la valeur de certains paramètres. Une fois la validation du modèle complétée, une première optimisation fut effectuée sur quatre scénarios de base. Nous avons aussi procédé à une analyse de sensibilité quant à un certain nombre de facteurs, et validé les résultats de celle-ci à travers une régression linéaire. Cette première contribution permet d'atteindre en partie le premier objectif de cette thèse en identifiant une première série de facteurs de succès d'un centre logistique forestier régional.

Le modèle développé fut par la suite appliqué à une situation concrète et avec des acteurs industriels opérant au sein d'une région déterminée et d'un réseau complexe, celui de la région de la Mauricie (Québec). Le modèle fut modifié pour tenir compte des particularités du cas d'étude et le processus itératif de validation du modèle fut de nouveau utilisé pour ajuster ce dernier ainsi que la valeur de certains paramètres. Cette seconde contribution permet d'analyser le fonctionnement du centre logistique au sein d'un réseau forestier (second objectif) ainsi que d'identifier de nouveaux facteurs de succès d'un centre

logistique régional (premier objectif). Il jette également les premiers éléments d'analyse concernant l'interaction entre la cour et les retours en charge (troisième objectif).

Les effets de modifications au réseau étudié dans le cas d'étude sur les résultats obtenus furent ensuite analysés. Par exemple, la fermeture d'une usine, la possibilité d'utiliser d'autres sites comme cour de triage, l'ajout de segments effectués par des camions de type hors norme, etc. Cela permet d'identifier de nouveaux facteurs de succès d'un tel centre (premier objectif), ainsi que d'approfondir notre analyse concernant l'interaction entre le centre et son réseau (second objectif) et entre une cour de triage et l'utilisation des retours en charge (troisième objectif). Nous nous sommes également penchés sur l'impact de l'utilisation du centre au niveau des émissions de gaz à effet de serre ainsi que sur la question du partage des gains entre les entités participantes au projet pour ouvrir des perspectives de recherche futures.

Notre thèse permet ainsi d'analyser le comportement d'un centre logistique régional au sein d'un réseau logistique forestier et d'identifier quels facteurs favorisent le plus la rentabilité de ce type d'installation. De plus, les analyses effectuées permettent de juger jusqu'à quel point le niveau de rentabilité du centre étudié est robuste. Aucune contribution recensée jusqu'à maintenant ne comporte une analyse quantitative aussi exhaustive des coûts et des bénéfices des cours de triage, des conditions de leur succès et de leur interaction avec les autres entités d'un réseau forestier et les opérations de transport. Finalement, le modèle d'optimisation développé pourrait être utilisé et adapté à d'autres réseaux forestiers au Canada et ailleurs dans le monde ainsi qu'à d'autres contextes industriels.

Structure de la thèse

Le reste de cette thèse est structuré ainsi. Le chapitre 1 présente la revue de littérature. Le chapitre 2 détaille la méthodologie utilisée. Le chapitre 3 détaille la première expérimentation effectuée sur un cas théorique et à travers un réseau fictif et réaliste. Les chapitres 4 et 5 présentent les différents éléments d'un cas d'étude basé sur un réseau réel et complexe, celui de la Mauricie (Province de Québec, Canada). La conclusion clôture cette thèse.

Chapitre 1

Revue de littérature générale

Nous examinerons l'état de la littérature scientifique concernant le concept de chaîne logistique ainsi que les principales fonctions logistiques. Nous terminerons en nous penchant sur la planification et la modélisation. Dans chacune de ces sections ou sous-sections, les particularités de la chaîne de valeur du bois seront mises en exergues. Nous nous pencherons particulièrement sur le concept de cour de triage et de concentration ainsi que l'offre de services de « *merchandising* » (la transformation de la matière, notamment le découpage de la bille) qu'une telle installation peut offrir. Nous définirons par la suite quelles sont les opportunités de bonification du savoir que nous pourrions combler à travers notre projet.

1.1 Chaîne d'approvisionnement

Nous croyons nécessaire de bien définir en premier lieu ce qu'est une chaîne d'approvisionnement. Nous présenterons ensuite le concept de collaboration logistique et comment il se déploie dans l'exploitation de la ressource forestière. Nous passerons ensuite en revue les différentes fonctions de la chaîne de façon à bien en comprendre le fonctionnement, notamment dans le domaine du bois.

1.1.1 Description générale

Nous retenons la définition offerte par Mentzer *et al.* (2001) pour qui la chaîne d'approvisionnement constitue un groupe de trois entités ou plus (organisations ou individus) qui sont directement impliquées dans le flux des produits, des services, des capitaux et de l'information d'un fournisseur à un client. La logistique est la fonction de la chaîne d'approvisionnement qui se concentre sur le mouvement des produits de la source jusqu'au client final ainsi que sur les flux d'informations et financiers correspondants.

Selon Audy *et al.* (2012b), les modèles d'optimisation mathématiques ont tendance à se concentrer sur un seul membre de la chaîne et décrivent les autres acteurs de façon superficielle.³ Il en résulte, notamment au niveau du partage de l'information, des phénomènes de dysfonctionnement tels que l'effet coup de fouet décrit par Lee *et al.* (1997).

Le réseau de création de valeur du bois inclut, selon Lehoux *et al.* (2012), toutes les entreprises ou unités d'affaires impliquées dans l'approvisionnement, la production et la transformation d'un produit du bois. Celle-ci a eu tendance depuis le XXe siècle, selon Stuart *et al.* (2010), à se fractionner en plusieurs entreprises indépendantes, rendant plus difficile l'optimisation de la chaîne. De plus, D'Amours *et al.* (2008) considèrent que peu d'efforts ont été faits jusqu'à maintenant pour lier la chaîne forestière aux autres industries. Il est vrai que le transport des produits du bois est effectué par des véhicules très spécifiques à ce secteur et selon qu'il s'agit de copeaux ou de billes (Epstein *et al.* 2007 et Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 2009),⁴ ce qui rend difficile les échanges avec d'autres industries.

La chaîne de valeur du bois est traditionnellement bâtie sur un mode en flux poussés (Forget *et al.* 2008) où les entreprises produisent à un rythme stable et sans égard aux fluctuations du marché. Plusieurs auteurs comme Marier *et al.* (2014a) explorent différents moyens de faire la transition vers un mode en flux tirés et donc d'avoir une attitude réactive face à l'évolution de la demande. On chercherait ainsi à s'adapter à la demande en identifiant des niches et en développant des produits à haute valeur ajoutée. Une telle transition est cependant difficile à opérer, du fait que cette industrie dépend d'une ressource naturelle (D'Amours *et al.* 2010), ce qui implique un élément d'incertitude de l'offre (Moad 2016). La présence de cours de triage et de consolidation crée un tampon qui permet

³ Largement par souci de simplification. Plus un modèle capture la complexité d'un système, plus il sera lui-même complexe et verra le nombre des solutions possibles augmenter de façon exponentielle. Ainsi, certains problèmes comportent davantage de solutions possibles que d'atomes dans l'univers (Baillargeon 2013).

⁴ Voir la page 1276 du Manuel de foresterie (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 2009).

de stabiliser le flux des matières et d'assurer un approvisionnement régulier des usines à tout moment (Chan *et al.* 2008, LeBel et Carruth 1997). Des coûts supplémentaires que nous examinerons en détail plus loin sont cependant subis.

Pour Lehoux *et al.* (2012), le classement des billes est particulièrement important et chaque classe de bille est associée à certains paniers de produits. La multiplicité des processus « many-to-many » dans le domaine forestier rend ainsi, selon D'Amours *et al.* (2008), leur intégration plus complexe du fait des nombreux arbitrages entre la production, le niveau de service et les coûts logistiques comme le transport ou l'entreposage. Il ne faut pas non plus oublier la compétition entre les trois secteurs de la chaîne pour l'accès à la ressource (Kong *et al.* 2012), soit le sciage, les pâtes et papiers, et la bioénergie, notamment (pour ces deux derniers) au niveau de l'utilisation des copeaux.

Nous pouvons examiner plus bas (Figure 1.1) une cartographie des liens complexes existant entre les différents acteurs et opérations d'une chaîne de valeur du bois (inspiré d'une figure similaire présentée par Carlsson *et al.* 2009). On peut ainsi constater une importante interaction entre les trois secteurs précédemment mentionnés. Notamment, la cour de triage située entre les blocs de récolte en forêt et les usines de première transformation peut fournir du bois aux usines de sciage, de pâtes et papiers ou de panneaux.

Généralement, les opérations de récolte comportent les étapes suivantes : 1- les arbres sont coupés et les branches sont enlevées, 2- le tronc est coupé en billes qui sont placées sur le bord de la route, 3- le bois est transporté aux usines ou dans des cours pour y être entreposé temporairement (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 2009). Souvent, on procède à un triage plus ou moins sommaire et même, à un certain degré de « *merchandising* » en forêt. Le manque d'espace limite cependant les possibilités à cet égard (Dramm *et al.* 2002) et engendre des coûts plus importants que lorsque ces opérations sont effectuées à une cour d'usine (Favreau 1995). Il peut arriver que les entreprises utilisent une cour de triage et de concentration distincte où le découpage en bille est accompli (Han *et al.* 2011).

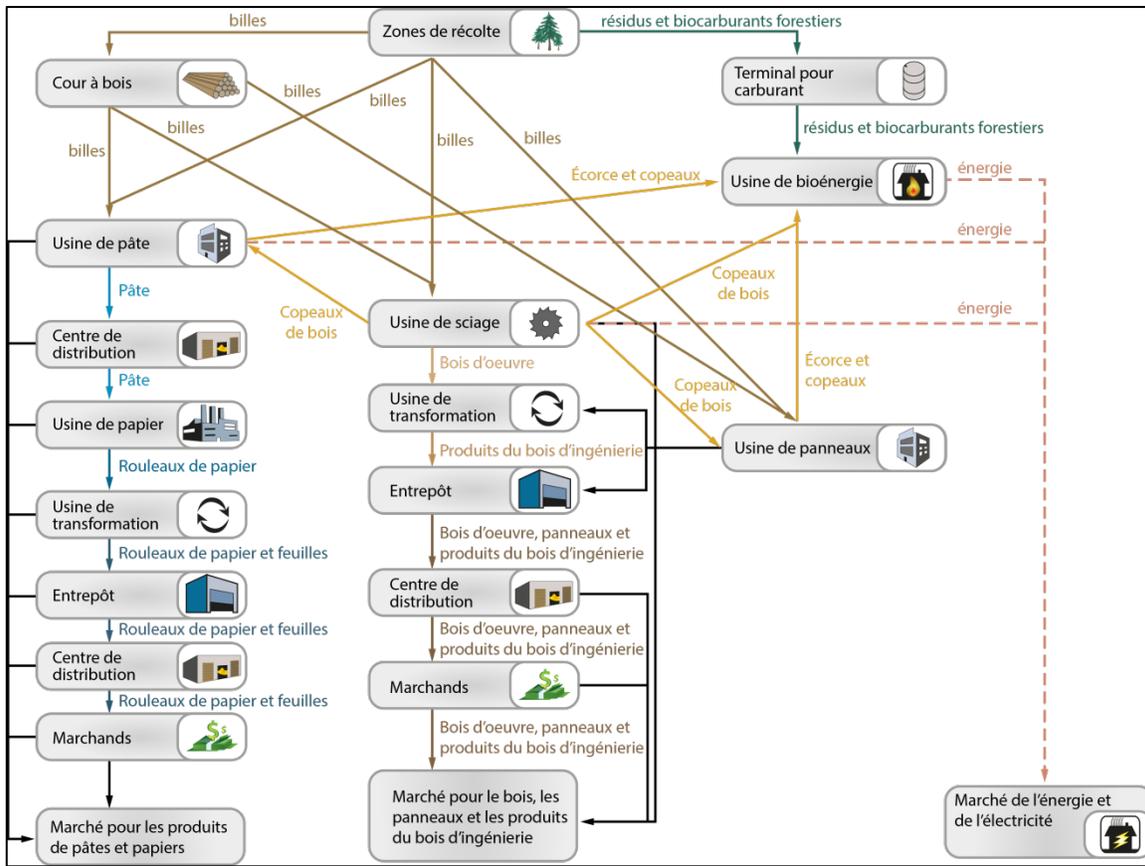


Figure 1.1: Exemple d'un réseau de création de valeur de l'industrie du bois (adapté de Carlsson *et al.* 2009).

1.1.2 Collaboration logistique forestière et partage des bénéfices

Dans le domaine forestier, les économies d'échelle, l'acquisition de nouvelles compétences et le partage des coûts et des risques font partie des principales raisons de collaborer avec d'autres entreprises (Lehoux *et al.* 2012). Très souvent, les entreprises forestières vont s'échanger mutuellement des stocks de bois pour s'assurer d'avoir accès aux essences dont elles ont besoin pour leur production (Beaudoin *et al.* 2010). La répartition des espèces selon les secteurs de récolte peut rendre ce type d'échanges nécessaires. Cela est cependant effectué le plus souvent de façon ad hoc (Epstein *et al.* 2007). Le transport est l'autre principale activité où nous retrouvons des exemples de collaboration entre entreprises dans ce secteur (Epstein *et al.* 2007 et Audy *et al.* 2012a), pour profiter de retours en charge

(*Ibid.*). Pour sa part, Moad (2016) met en relief les avantages d'une planification plus intégrée des opérations de transport à travers notamment une mutualisation de la demande.

Il est crucial, pour mettre en place un processus de collaboration entre entreprises distinctes, voire concurrentes, qu'une méthode de partage de gains efficace et équitable soit mise en place. Trois méthodes cherchant à atteindre une certaine équité et efficacité retiennent particulièrement notre attention. Les critères d'équité retenus sont la contribution marginale, le coût non séparable et le coût total. La valeur de Shapley (Shapley, 1953) est le coût marginal moyen des participants lorsque ceux-ci sont insérés (en dernier) dans une coalition au hasard. On mesure donc la différence entre le coût encouru par les membres d'une coalition lorsque tous les membres potentiels en font partie et ceux lorsque tous les membres sauf un en font partie. L'allocation basée sur les coûts séparables et non séparables (Tijs et Driessen, 1986) attribue à chaque participant son coût séparable et assigne les coûts non séparables selon un certain poids. Finalement, la méthode du profit égal (*EPM* pour «*Equal profit Method*») vise à ce que tous les participants profitent d'économies égales en proportion des coûts qu'elles auraient dû déboursier si elles avaient continué d'opérer toutes seules (Frisk *et al.* 2010). Ces méthodes cherchent toutes à accorder aux membres participants à la coalition une part de gain en proportion d'un ou de certains critères spécifiques.

1.1.3 Fonctions de la chaîne logistique

Pour bien comprendre la chaîne logistique, nous allons examiner ses différentes fonctions. Nous tâcherons de souligner à chaque fois leur rôle dans la chaîne de valeur du bois avant de traiter spécifiquement du concept de cour de triage en foresterie.

Selon Mason *et al.* (2007), la volonté croissante de diminuer le niveau des stocks oblige les entreprises à accorder de plus en plus d'importance à la ponctualité des livraisons, et donc au transport. Aussi, Carlgren *et al.* (2006) avancent que la pression pour se procurer des fibres de plus grande qualité fait en sorte que l'on aura tendance à récolter le bois dans des

secteurs plus éloignés et donc à faire augmenter les coûts de transport. Pour Audy *et al.* (2012a), les entités de la chaîne logistique peuvent optimiser le temps de voyage en charge ou l'utilisation de la capacité et des actifs de transport. Frisk *et al.* (2010) notent que la collaboration au niveau du transport entre plus de deux acteurs est malheureusement rare dans le domaine forestier. Epstein *et al.* (2007) remarquent cependant que la tendance depuis les années 2000 est à une plus grande centralisation de la planification ainsi qu'à un plus grand rayon d'opération pour les camions, entre autres à cause de l'arrivée des systèmes GPS. Ceux-ci permettent de connaître la demande et les stocks disponibles sur une base journalière aux différents sites et points de demande.

Les retours en charge, où plusieurs livraisons sont combinées, ont permis dans le passé des économies de coûts de transport allant de 2% à 20% (Epstein *et al.* 2007). Une difficulté avec les modèles mathématiques permettant les retours en charge est la multiplication du nombre de solutions possibles. Cela oblige souvent à utiliser la génération de colonnes pour les résoudre (*Ibid.*). Pour créer des possibilités de retour en charge, les entreprises s'échangent souvent du bois sur une base ad hoc et il serait pertinent d'élaborer des méthodes pour gérer ce type d'échange de façon plus structurée. Un avantage supplémentaire des retours en charge, selon Carlsson et Rönnqvist (2005), est que ceux-ci peuvent avoir pour effet de favoriser l'inclusion de plus d'essences différentes et donc l'élargissement des zones de récolte. Quant au transport par train, ce dernier permet d'économiser sur les coûts variables (selon la quantité), mais représente un coût fixe plus important (Bierwirth *et al.* 2014). Il implique également une utilisation du camionnage sur une partie de la distance à parcourir (StadieSeifi *et al.* 2014). Il faut en effet livrer la marchandise de l'origine jusqu'au mode de transport principal et plus tard, jusqu'au client final.

1.1.4 Opérations de triage en foresterie

Nous retenons la description de Lehoux *et al.* (2012), pour qui le triage est opéré selon trois axes : 1- par essence, 2- par taille, 3- selon la qualité de la bille. Pour Duchesne *et al.* (1997) cependant, le troisième critère utilisé est le type de bille (milieu et bas du tronc vs haut du tronc). Cette dernière spécification suppose un découpage préalable du bois. Ainsi, la partie la plus basse des arbres a un plus grand diamètre et donc une plus grande valeur et est envoyée aux scieries (D'Amours *et al.* 2008). La partie la plus haute pour sa part est dédiée aux pâtes et papiers (*Ibid.*). Le « *merchandising* » évite ainsi aux usines de sciage de stocker et de livrer la partie des arbres dont elles n'ont pas besoin. La classification des billes offre des opportunités de maximisation de la valeur (Gil et Frayret 2016).

Dramm *et al.* (2002) définissent cinq possibilités de base quant au triage : 1- utiliser une cour de triage, 2- trier en forêt, 3- effectuer un pré triage, 4- trier à la cour de l'usine et 5- ne pas trier. Le pré triage en forêt sera souvent suivi d'un triage plus exhaustif à une cour selon Han *et al.* (2011). Si on examine les avantages des alternatives à l'utilisation des cours de triage, le triage en forêt est justifié lorsqu'il y a peu d'intrants différents⁵ ainsi que lorsque des billes de haute valeur sont récoltées en grande proportion. Les contraintes d'espace sont un des principaux obstacles au triage en forêt (Dramm *et al.* 2002).

Avec le pré triage en forêt, on se contente de séparer les principales espèces. On a avantage à utiliser cette technique lorsque les opérations de récolte et de la cour de triage sont intégrées (un même acteur qui contrôle les deux opérations), car cela permet de réduire la manutention aux cours et aux usines. Les faibles volumes de billes de grande valeur ont tendance à être triés dans les cours d'usines, car ils ne peuvent justifier la création d'une cour de triage à eux seuls (*Ibid.*). Aussi, l'absence de triage est une option viable lorsqu'il n'y a qu'un seul marché pour les billes (Dramm *et al.* 2002). De plus, lorsque les billes sont

⁵ Non seulement au niveau des essences, mais aussi la taille et la qualité des billes.

peu diversifiées au niveau de la qualité, de la valeur ou de la taille, on aura tendance à ne pas effectuer de triage (*Ibid.*).⁶

De façon générale, les cours de triage optimisent l'allocation du bois aux usines (Alam *et al.* 2014) pour maximiser la création de valeur (Han *et al.* 2011). Pour ces auteurs, les principales fonctions d'une cour de triage sont la réception, le mesurage, le déchargement, le transport, la gradation, le «*merchandising*», le triage et le profit du réseau, le rechargement ainsi que l'entreposage comme tel. Ils considèrent qu'il y a un manque de connaissances concernant la planification des cours et que celle-ci se fait encore trop souvent selon eux de façon subjective.

L'intérêt pour les cours de triage a eu tendance à augmenter avec le déclin (quantitatif et qualitatif) de la ressource forestière ainsi que le besoin de recouvrer une plus grande portion de la valeur potentielle de celle-ci (Dramm *et al.* 2002). Il est ainsi généralement reconnu que les cours de triage centralisées, grâce à l'espace supplémentaire dont elles disposent, offrent l'opportunité d'examiner de plus près les caractéristiques des billes pour les envoyer à leur destination la plus profitable. Cela est particulièrement important dans les régions dotées d'une grande diversité de la matière dans la mesure où un espace supplémentaire est requis pour chaque assortiment supplémentaire traité par le processus (Carlgren *et al.* 2006).

Le problème du triage et de l'assignation des billes au meilleur usage possible peut être associé au problème d'assortiment avec substitution dont Pentico (2008) a fait une revue exhaustive. Le problème consiste à devoir choisir de produire et de stocker certaines tailles ou niveaux de qualité de produits alors qu'on ne peut stocker la totalité de ceux-ci et qu'ils ont une demande limitée. Il s'agit de minimiser la somme des coûts, y compris les coûts de pénuries. Huang *et al.* (2010) ont développé un modèle d'optimisation permettant la substitution de produits avec pénalités et coûts de pénurie en cas de demande non satisfaite.

⁶ Également, lorsque la valeur globale est très faible.

On cherchera à minimiser le gaspillage relatif produit par la substitution de matériaux de faible valeur par un matériau de plus grande valeur. Une telle substitution peut se produire en situation de pénurie (*Ibid.*). Une telle problématique est d'autant plus importante que les usines de produits du bois ont tendance à être de plus en plus spécialisées (Dramm *et al.* 2004). Toujours dans une perspective de maximisation de la valeur, Han *et al.* (2011) démontrent d'ailleurs que la répartition des produits traités par une cour influence grandement sa profitabilité. Dans le même esprit, pour Dramm *et al.* (2004), une cour sera profitable lorsqu'il y a suffisamment de billes de grand diamètre, et donc de plus grandes valeurs qui y transitent, les deux éléments étant fortement corrélés entre eux (Bilek 2009).

Sessions *et al.* (2005) observent que la qualité accrue du triage auquel on pourra se prêter par rapport à celui effectué en forêt permet de faire diminuer de beaucoup les erreurs qui peuvent être commises dans le classement des billes. Chung *et al.* (2012) remarquent que cela permet ainsi de réduire les coûts de transport en évitant de livrer plusieurs fois le même lot (par exemple, une usine de sciage envoyant des billes de qualité pâte mal classées vers les usines de pâtes et papiers).

Au niveau du transport, outre l'influence des erreurs de classement, les effets produits par la présence d'une telle cour sont fort complexes. Ainsi, et suivant leur localisation, elles peuvent permettre d'utiliser des camions possédant une plus forte capacité et qui n'ont pas le droit de circuler sur les routes publiques (Chan *et al.* 2008). Cependant, ce type de transport dit « hors norme » nécessite des chemins forestiers de classes supérieures (Dessureault 2010). L'ensemble des avantages potentiels des cours de triage explique que plusieurs communautés forestières locales cherchent à implanter ce type d'installation. Celles-ci sont perçues comme étant un moyen efficace d'assurer la pérennité d'un réseau d'entreprises forestières locales (Dramm *et al.* 2002).

Les cours font cependant augmenter certains coûts. Elles impliquent par exemple une manutention supplémentaire à cause du chargement et du déchargement effectué à la cour (Cloutier *et al.* 2009). De même, le bois transitant par la cour ne peut plus être livré

directement des zones de récolte aux usines, ce qui peut occasionner des détours et des coûts de transport supplémentaires (Sessions *et al.* 2005). À cela, il faut ajouter les coûts fixes associés à la mise en place du site même (Chung *et al.* 2012). Aussi, au niveau de la matière transportée, la faible densité des copeaux occasionne de plus grands coûts de transport (Volpé 2014). Cela peut rendre plus intéressante sur ce plan la transformation en copeaux aux usines.

Il nous apparaît incontournable de présenter les caractéristiques essentielles du projet de centre logistique forestier le plus ambitieux mentionné dans la littérature (Cloutier *et al.* 2009). Dans les années 2000, un projet de centre de valorisation de la fibre (CVF) dont les services seraient éventuellement utilisés par plusieurs entreprises a été étudié par le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Comme proposé, le CVF serait appelé à effectuer une dizaine de tâches pouvant être classées parmi des activités de transformation de la matière : 1- tronçonner les tiges, 2- qualifier les billes, 3-traiter les broyats (branches et houppiers), 4- produire les copeaux, 5- produire et sécher les équarris, 6- qualifier les sciures, 7- qualifier les copeaux, 8- qualifier les écorces, 9- raffiner pour la production de produits à haute valeur ajoutée, 10- produire de l'énergie.

Pour les promoteurs de ce projet, le CVF constituerait un centre de profit et une entreprise en soi, à laquelle seraient attribués des droits de coupe. Ceux-ci ont également l'ambition de faire en sorte que la provenance du bois transitant par le centre puisse être retracée jusqu'à la forêt d'origine.

La somme des opportunités et défis sus mentionnés peut expliquer que les résultats obtenus par des cours de triage ou de consolidation dans la littérature varient beaucoup d'un auteur à l'autre. Parmi les références où des cours dédiées au triage étaient profitables, Keron (2012) a développé un modèle de maximisation des profits, qui inclue les récoltes, le transport et les opérations de triage ainsi que l'implantation de la cour. L'auteur évalue que l'implantation d'une cour pourrait ajouter un profit d'un million de dollars par année. Pour leur part, Abasian *et al.* (2017) présentent un modèle de type «*Mixed-Integer*

programming » (MIP) pour optimiser la chaîne de valeur de la biomasse forestière avec la possibilité d'utiliser les retours en charge et d'installer une cour de transit (sans triage à la cour) et une usine de granules. Ils intègrent les coûts de récoltes, de triage, de production et de transport et montrent un potentiel d'augmentation de profit de 23%. Pour leur part, Shahi et Pulkki (2015) ont simulé une cour de triage dans le nord-ouest de l'Ontario visant à servir de tampon par rapport aux éléments d'incertitude de la demande. Leur cas d'application qui ne comportait que des billes de sciage et une scierie ne montrait pas de gains financiers.

De nombreuses références ont ainsi été recensées dans la documentation concernant les retours en charge et les cours de triage. Alors que la profitabilité d'une coordination du transport fait consensus, les résultats quant à la profitabilité des cours de triage sont fort contrastés. Ces dernières favorisent la maximisation de la valeur grâce à de faibles taux d'erreur dans la classification des billes et des économies de coûts de transport par la voie du transport hors norme. Cependant, elles génèrent des coûts spécifiques, notamment avec une manutention supplémentaire, des détours potentiels au niveau du transport et leurs coûts d'implantation. Nous allons maintenant examiner comment une telle infrastructure peut s'insérer au sein de la planification logistique et quels sont les outils qui permettraient de mesurer sa profitabilité.

1.2 Planification logistique et modélisation

Pour Langevin et Riopel (2005), les décisions au niveau du réseau logistique sont divisées en deux groupes : le réseau physique, sur lequel nous concentrerons notre attention, et le réseau informatique. Il faut d'abord définir la stratégie du réseau physique, le nombre d'échelons et le degré de centralisation ou de décentralisation à partir du niveau du service à la clientèle préalablement défini. Une fois la stratégie mise en place, on doit déterminer le type et le nombre d'installations ainsi que leur taille, leur localisation, les activités qui y

seront accomplies et les liens entre les différents sites. Au niveau des « opérations »⁷, les mêmes auteurs divisent ces décisions en neuf groupes dont la gestion des stocks, la production, l'approvisionnement et la gestion des achats, le transport, la manutention et l'entreposage.

La planification de la chaîne forestière implique un horizon temporel très vaste, l'anticipation de perturbations naturelles, la considération de la demande industrielle et des besoins sociétaux. L'allocation des zones de récolte aux utilisateurs et la planification de la sylviculture sont parmi les décisions stratégiques les plus importantes qui peuvent être prises au niveau de la gestion des forêts tout comme la planification des secteurs de récolte et le design des infrastructures de transport (Lehoux *et al.* 2012). Que ce soit pour les pâtes et papiers ou le bois d'œuvre, le design du réseau logistique fait également partie des décisions stratégiques du secteur forestier (Lehoux *et al.* 2012). Sur un horizon de plusieurs années, la planification du transport est intégrée avec la gestion des forêts, la construction et l'entretien des routes ainsi que la récolte (Epstein *et al.* 2007).

La planification tactique concerne le plus souvent l'allocation de tâches aux différentes ressources et concerne un horizon de planification d'un à cinq ans. Plusieurs modèles tactiques planifient la sélection et le séquençement des secteurs de récolte. La construction des routes est aussi un élément de la planification tactique (D'Amours *et al.* 2010) ainsi que la planification des opérations aux usines (Lehoux *et al.* 2012). Un problème de planification mensuel ou hebdomadaire est le choix des sites en forêt qui vont fournir un assortiment donné à telle ou telle usine (Epstein *et al.* 2007).

Au niveau des opérations forestières, plusieurs déplorent que leur planification soit effectuée manuellement (Auger 2017) ou de façon trop autonome par rapport aux entreprises de pâtes et papiers et de bois d'œuvre en ne tenant pas compte des contraintes

⁷ Terme utilisé par Langevin et Riopel (2005) ne devant pas être confondu avec « opérationnel ». Une grande partie des décisions listées sont de nature tactique.

de celles-ci (Lehoux *et al.* 2012). De même, la planification des cours de triage se fait encore trop souvent de façon subjective selon Han *et al.* (2011). Ces derniers considèrent qu'il y a un manque de connaissances concernant la planification des cours à bois avec entre autres une mauvaise prise en compte des billes disponibles. Au cours des dernières années cependant, le consortium de recherche *FORAC* de l'Université Laval a développé des outils de planification et de simulation visant à optimiser les opérations dans l'industrie forestière comme LogiLab (FORAC 2016a), SilviLab (FORAC 2016b), le modèle de planification du sciage et du séchage de Marier *et al.* (2014b) ainsi que le modèle d'optimisation du transport *Virtual Transportation Manager* ou VTM (Marier et Sarrazin, 2013).

La modélisation est souvent utilisée en appui à la planification des opérations logistiques, particulièrement au niveau des problèmes de localisation et de planification tactique. Ainsi, Langevin et Riopel (2005) font remarquer que les décisions de localisation sont parmi les plus difficiles à prendre pour mettre en place une chaîne d'approvisionnement efficace, car les conséquences se font sentir pendant de nombreuses années. Les conditions à long terme sous lesquelles les installations vont opérer pendant leur durée de vie sont très incertaines. Les problèmes combinant la sélection de sites, l'affectation de clients aux sites et les affectations à faire au niveau du transport sont difficiles à résoudre, car ils combinent des problématiques de court, de moyen et de long terme.

Les modèles d'optimisation, que ce soit en foresterie ou ailleurs, se concentrent trop souvent sur la minimisation des coûts. Le modèle d'espacement des routes de Matthews (1942), présenté par Stuart (2003), est un exemple de modèle de contrôle des coûts. Il traite d'un problème de transport du bois par chevaux dans une forêt de pins aux États-Unis. Stuart démontre que si l'on tient compte de l'aspect temporel et que l'on transforme le processus de construction de route d'un centre de coûts à un centre de profits, le modèle se transforme en problème de maximisation du profit. La solution obtenue avec cette nouvelle version est de 10% supérieure à celle obtenue avec l'ancien modèle. Cet exemple illustre à quel point les modèles de minimisation de coûts peuvent offrir une vision tronquée du

réseau étudié en n'intégrant pas les revenus. Ainsi, différentes formes de triage plus élaborées peuvent offrir des possibilités de revenus supplémentaires qui ne sont peut-être pas déjà exploitées par les entreprises concernées (Cloutier *et al.* 2009).

Un des aspects importants de tout système logistique forestier est la prise en compte du vieillissement du bois. Beaudoin *et al.* (2007) réussissent à intégrer ce facteur à leur modèle d'optimisation du réseau forestier d'approvisionnement tout en maintenant son caractère linéaire. En plus des impacts lors de la transformation, la perte d'humidité qui survient lors du séchage fait perdre du poids au bois (Wengert 2006) ce qui permet de réduire les coûts de transport. Les sites de transferts pourraient permettre de mieux gérer la gestion du taux d'humidité (Sfeir *et al.* 2016, LeBel 2018).

Au niveau des modèles d'évaluation de la profitabilité des cours de triage, nous constatons qu'ils se concentrent essentiellement sur une partie seulement des aspects pertinents. Par exemple, aucun n'intègre simultanément les coûts de transport, de triage et de stockage. Seul Chung *et al.* (2012) intègrent les revenus générés par le triage, mais de façon très simplifiée. Ils ne présentent d'ailleurs pas un modèle d'optimisation à proprement parler, mais plutôt un calcul de coût schématisé. La transformation de la matière pour sa part n'est mentionnée dans plusieurs modèles comme Kong *et al.* (2012) et Chan *et al.* (2008) qu'en rapport avec la transformation en copeaux. De plus, la majorité des contributions retracées ne procèdent pas à une véritable analyse de sensibilité. Lorsqu'elles s'y prêtent comme avec Chan *et al.* (2009) ou Kong *et al.* (2012), elles le font dans le cadre du réseau logistique étudié. Cela exclut par exemple de modifier la structure du réseau d'une itération à l'autre pour vérifier l'effet des facteurs géographiques comme les distances entre forêts et usines ou la fermeture de certaines usines. Seuls deux modèles recensés furent construits comme un MIP et un seul, où les variables binaires correspondaient à la sélection d'un site pour installer une cour (Chan *et al.* 2008). Dans l'autre cas, les variables binaires servent à sélectionner la stratégie de triage (Carlgren *et al.* 2006). Notons aussi que Beaudoin *et al.* (2007) ont développé un modèle de planification de la chaîne forestière comportant des

variables binaires de sélection des blocs de récolte. Celui-ci n'incluait cependant pas la possibilité d'une cour de triage.

Nous remarquons une contribution (Sessions *et al.* 2005) où il est recommandé de ne *pas* installer de cour de triage pour le cas étudié. Le modèle développé représentait les opérations d'une entreprise de Colombie-Britannique. Les auteurs examinent le problème sous l'angle du transport, plus précisément les coûts liés aux livraisons supplémentaires occasionnées par des erreurs de triage commises lorsque celui-ci est effectué en forêt. Ils concluent que pour celle-ci, il en coûte 1,50 \$/m³ de moins d'effectuer le triage en forêt. Le modèle ne tenait cependant pas compte de nombreux facteurs comme les coûts de traitement du bois mal classé. Les auteurs concluent d'ailleurs que la décision serait sans doute différente selon le site étudié.

Le seul modèle de sélection de sites recensé est celui de Chan *et al.* (2008). La transformation effectuée à la cour de triage proposé dans le modèle se limitait au déchiquetage en copeaux. L'économie potentielle générée était de 1 850 000 \$ pour une cour alimentant une seule usine de pâtes et papiers à Thunder Bay en Ontario, soit 6,8% de l'ensemble des coûts. Le site sélectionné était situé cependant à côté de l'usine alimentée. Les auteurs admettent par ailleurs que l'économie dégagée est une borne supérieure dans la mesure où ils ne tiennent pas compte de facteurs comme la gestion de la cour. Par ailleurs, lorsqu'ils faisaient varier certains paramètres comme le coût du carburant, la solution retenue était presque toujours maintenue. Une réduction de 15% ou plus du coût de déchiquetage en forêt était nécessaire pour qu'il devienne plus avantageux de continuer à y effectuer le déchiquetage.

1.3 Opportunités de bonification de l'état du savoir et objectifs

Les articles que nous avons présentés confirment qu'un nombre important de travaux portaient en tout ou en partie sur la conception et l'utilisation des cours de valorisation. La revue de littérature a aussi permis de définir un certain nombre de paramètres permettant de caractériser les travaux sur le sujet, que ce soit par la présence d'un modèle mathématique, d'une analyse de sensibilité, de la prise en compte des opérations de récolte, de transport, de stockage et de triage ainsi que par le recours à une approche pouvant être qualitative ou quantitative. Nous avons construit un tableau (tableau 1.1) indiquant pour chaque article consulté si celui-ci possédait l'une ou l'autre de ces caractéristiques. Si un article possédait une caractéristique mentionnée, la case correspondante était colorée en bleu foncé, sinon, elle restait blanche. Lorsqu'une caractéristique était assez présente pour que cela soit digne de mention, mais à un niveau assez limité, on utilisait un bleu plus pâle pour colorer la case correspondante.

Une analyse exhaustive de la littérature nous a permis de constater qu'en ce qui a trait à la notion de centre logistique forestier, aucun article ne répond simultanément à l'ensemble des critères identifiés, et ce, même en excluant les analyses qualitatives. Plus précisément, aucun ne comporte un modèle mathématique et une analyse en profondeur de l'impact quantitatif de l'ensemble des paramètres pertinents quant à la rentabilité d'un tel centre. Dans les contributions où l'on procède à une analyse de sensibilité de l'effet qu'ont divers paramètres, certaines de ces analyses sont d'une ampleur limitée ou encore de nature qualitative (Audy *et al.* 2012b). Par ailleurs, aucun des modèles mathématiques recensés n'intègre l'ensemble des opérations de récolte, de transport, de triage (y compris de « *merchandising* »), de stockage ainsi que les revenus associés à un réseau utilisant une cour de triage telle que celle que nous envisageons. Finalement, l'importance relative de la plupart des facteurs ou coûts que nous voulons évaluer n'a jamais été mesurée dans les contributions recensées.

Tableau 1.1: Résumé des caractéristiques traitées dans la littérature

Centre de triage et de consolidation et de « <i>merchandising</i> »								
Articles	Modèle mathématique	Analyse						
		Récolte	Transport	Stockage	Triage	Analyse de Sensibilité	Quantitative	Qualitative
Abasian <i>et al.</i> (2017)								
Alam <i>et al.</i> (2014)								
Audy <i>et al.</i> (2012b)								
Beaudoin <i>et al.</i> (2007)								
Bilek (2009)								
Carlgren <i>et al.</i> (2006)								
Chan <i>et al.</i> (2008)								
Chung <i>et al.</i> (2012)								
Cloutier <i>et al.</i> (2009)								
Dramm <i>et al.</i> (2002)								
Dramm <i>et al.</i> (2004)								
Duchesne <i>et al.</i> (1997)								
Gil et Frayret (2016)								
Han <i>et al.</i> (2011)								
Keron (2012)								
Kong <i>et al.</i> (2012)								
LeBel et Carruth (1997)								
Lehoux <i>et al.</i> (2012)								
Sessions <i>et al.</i> (2005)								
Shahi, S., et Pulkki, R. (2015).								
Stuart (2003)								

Un centre logistique forestier comportant une cour de triage et une coordination du transport offre le potentiel d'améliorer la performance du réseau de création de valeur forestier. Des études confirment les avantages attendus, dans certaines circonstances, mais pointent également vers les limites ou contraintes associées à ce type d'infrastructure. Des éléments permettant de guider son implantation sont donc nécessaires. L'étude des moyens disponibles révèle qu'il est possible d'offrir une analyse beaucoup plus vaste que ce qui a été fait à ce jour.

Ainsi, l'objectif général de notre projet de recherche est d'identifier et d'évaluer les facteurs les plus pertinents quant à la rentabilité d'un centre logistique comportant des opérations de triage ainsi qu'une coordination du transport et qui desservirait plusieurs entreprises du secteur forestier au sein d'une région donnée. Nous visons à identifier les conditions propices rendant possible, voire souhaitable la création d'un tel centre du point de vue de la maximisation des profits de l'ensemble d'un réseau logistique forestier. À partir des résultats obtenus, nous pourrions aussi analyser l'interaction entre le centre projeté et son réseau environnant ainsi que celle entre l'utilisation d'une cour de triage et celle des retours en charge.

Les objectifs spécifiques de la recherche se présentent donc ainsi :

- 1- Identifier plusieurs facteurs clés qui influencent les gains engendrés par un centre logistique forestier régional comportant une cour dédiée au triage et une coordination du transport, et ce, pour un réseau forestier donné;
- 2- Analyser le fonctionnement d'un centre logistique pour un réseau complexe et son interaction avec les autres entités du réseau;
- 3- Étudier les interactions entre la présence d'une cour de triage et l'utilisation des retours en charge au niveau du transport. Existe-t-il un effet dynamique entre les deux? Si oui, pourquoi?

L'atteinte de chacun de ces objectifs permettra de guider les gestionnaires de l'industrie dans leur prise de décision quant à l'opportunité de mettre en place l'une ou l'autre des composantes d'un centre logistique forestier régional comprenant une cour de triage et une coordination du transport. Le prochain chapitre présente les étapes de la méthodologie employée pour atteindre nos objectifs.

Chapitre 2

Méthodologie générale

2.1 Structure générale de la thèse

Pour bien camper l'état de la recherche concernant les opérations logistiques dans l'industrie forestière et la question des cours de triage dans ce domaine, une revue de littérature fut d'abord effectuée. Cela nous a permis de définir une opportunité de bonification du savoir dans la littérature et de bien cerner nos objectifs et nos questions de recherche. Nous avons alors défini deux cas d'étude, un premier théorique, et un cas d'étude basé sur un réseau forestier réel. Par la suite, nous avons conçu un modèle d'optimisation ainsi qu'une base de données pour les deux cas étudiés. Après validation du modèle et des bases de données utilisées, nous avons procédé à la résolution du problème à l'aide du modèle et de l'analyse des résultats. Le travail effectué sur le cas théorique constitue la matière du troisième chapitre, celui sur le cas d'étude celle des quatrième et cinquième chapitres. Les principales étapes de notre méthodologie sont représentées à la figure 2.1. Ce chapitre présente l'ensemble des étapes de la méthodologie, notamment la définition des deux cas, la construction du modèle ainsi que les étapes de validation du modèle et de construction de la base de données.

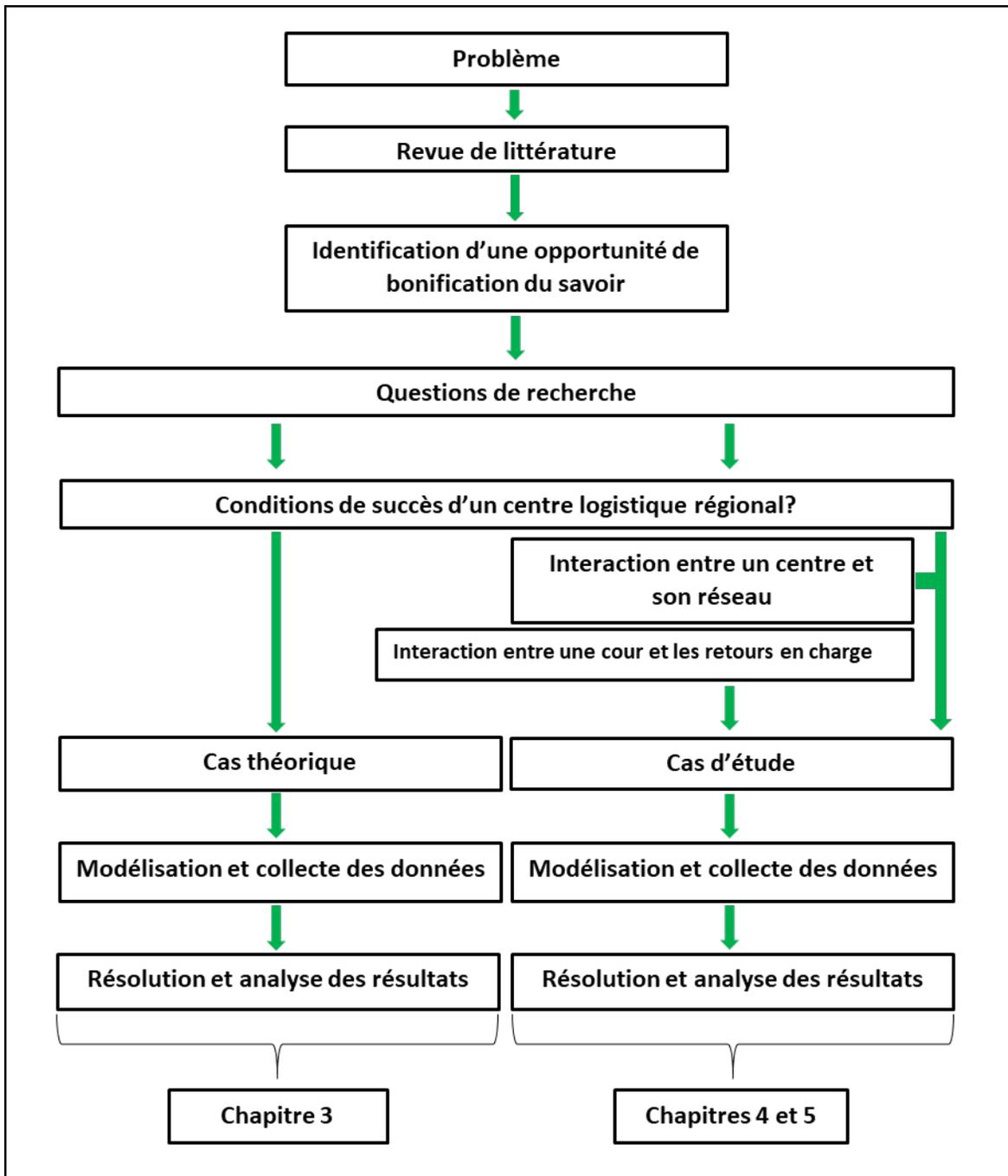


Figure 2.1: Étapes principales de la thèse

2.3 Cas théorique

La première partie de notre projet visait à identifier une première série de facteurs ayant une influence sur la profitabilité d'un centre logistique régional comportant une cour dédiée au triage et une coordination du transport. Pour ce faire, nous avons d'abord obtenu un premier résultat quant aux gains qu'apporterait un centre logistique comportant une cour dédiée au triage et une coordination du transport, et ce, à travers un cas théorique comportant un réseau logistique fictif et réaliste. Ces données étaient inspirées du réseau logistique de la Mauricie, notamment par l'entremise de la possibilité forestière fournie par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et de la base de données MÉRIS, utilisée par le Bureau de mise en marché des bois (BMMB). Le modèle et les données utilisées furent validés à travers un processus itératif. Une fois les premiers résultats obtenus, une analyse de ceux-ci a révélé que certaines données ou contraintes du modèle devaient être modifiées pour obtenir un résultat valide et réaliste. Après analyse, on a fait varier la valeur des coûts de transport, de la distance des forêts (par rapport aux usines et à la cour), des coûts de triage à une cour et de la taille de la flotte de camions hors norme. Une analyse statistique fut ensuite réalisée pour identifier lesquels de ces facteurs avaient une influence significative sur les gains engendrés par un centre. L'ensemble de ces éléments constituent la matière d'un article publié dans la revue *Forest Science* (Sarrazin *et al.* 2018) et qui représente notre troisième chapitre. La démarche suivie concernant la construction et la validation du modèle et de la base de données ainsi que les analyses de sensibilité et statistique est représentée par la figure 2.2.

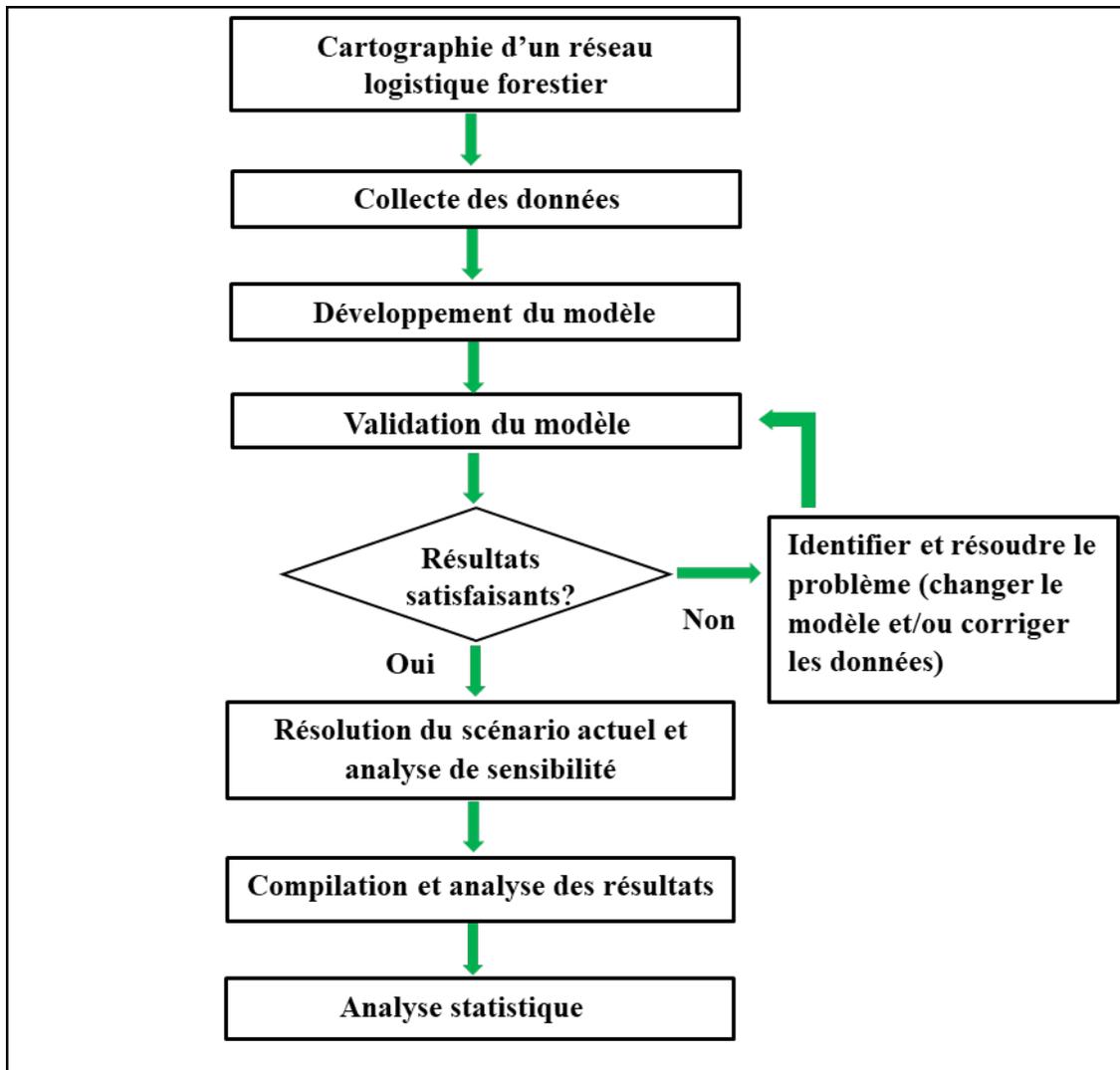


Figure 2.2: Étapes de la construction et de validation du modèle et de la base de données

Nous allons maintenant présenter comment la base de données du cas théorique fut construite. Les principaux éléments de cette première base sont les suivants : 1- les opérations de récolte, 2- les redevances, 3- les processus de triage, 4- les coûts de transport, 5- les coûts d'implantation de la cour, 6- les taux de densité et les coûts de stockage, 7- les prix des produits finis et 8- la définition des périodes de temps. Une description du processus de validation du modèle terminera cette section du chapitre.

2.3.1 Opérations de récolte

La possibilité forestière par essence de trois UAF de la région de la Mauricie fut utilisée pour définir la capacité de production des zones de récolte dans le chapitre 3. Dans le quatrième chapitre, la somme des volumes récoltés pour l'année 2016 fut utilisée pour chacune des zones de récolte. Les coûts de récolte furent définis à partir de la formule utilisée par le logiciel MÉRIS du Bureau de mise en marché des bois. Cette formule tient compte de la proportion de feuillus et de résineux à récolter ainsi que le nombre de m³ disponible à la récolte par hectare. Les données MÉRIS furent également utilisées pour calculer la densité de m³ par hectare. Les coûts obtenus pour ce premier cas variaient entre 21,15 \$ et 26,47 \$/m³ récolté. Ces coûts incluent les opérations d'abattage et de débardage.

2.3.2 Redevances

Les redevances fixées par le MFFP sont fournies par la base de données MÉRIS. Les redevances varient selon la qualité des billes ainsi que de l'éloignement de la zone de récolte en forêt (proportionnel au niveau de qualité ainsi qu'à la distance). On utilise les données MÉRIS concernant la composition des UAF de la Mauricie et les taux de conversion des processus de triage qui sont introduits et définis plus bas pour déterminer à l'avance pour chaque forêt le potentiel de billes d'un certain niveau de qualité. Les redevances utilisées dans le cas théorique variaient entre 0,50 \$ et 19,85 \$/m³ selon la qualité des billes et des essences. Mentionnons que si une bille est transformée en un produit fini de qualité inférieure à son potentiel (par exemple une bille de sciage transformée en pâtes et papiers), la redevance imposée sera la même que si elle avait été utilisée à son plein potentiel.

2.3.3 Processus de triage et de transformation de la matière

L'ensemble du bois disponible selon la capacité de récolte d'une zone de récolte constitue la matière première de celle-ci. La matière première d'une zone est appelée dans notre nomenclature un « mix », c'est-à-dire un assortiment des différentes essences et de catégories de billes composant la forêt en question. La base de données MÉRIS fournit des

estimés du nombre de m³ de bois debout pour chaque essence et diamètre à hauteur de poitrine (dhp) pour les unités d'aménagement forestier (UAF) de la Mauricie et des autres régions du Québec. Elle fournit également le rendement estimé de chaque combinaison essence-dhp exprimé en pourcentage pour chaque catégorie de billes. La liste des catégories est fournie au tableau 2.1 en ordre décroissant de valeurs. À partir des données MÉRIS, on peut ainsi projeter des volumes (m³) pour chaque assortiment (combinaison d'essence et de catégorie de bille), et ce par zone de récolte. Chaque UAF en Mauricie contient trois zones de récolte qui correspondent aux zones de tarification définies par le BMMB. La quantité totale disponible à la récolte est fixée en fonction de l'historique de récoltes de bois qui nous a été fourni par les industriels pour 2016.

Tableau 2.1 : Catégories de billes

Catégorie	Type
Déroulage	Déroulage
Sciage F1	Sciage
Sciage F2	Sciage
Sciage F3	Sciage
Sciage F4	Sciage
Pâte	Pâtes et papiers

Entre la coupe du bois et la production de produits finis, il existe plusieurs étapes intermédiaires. Premièrement, un pré triage est effectué en forêt qui sépare le bois en groupe d'essence ou famille (SEPM, érables, bouleau jaune, bouleau blanc et peupliers). Dans notre nomenclature, chaque produit est encore étiqueté selon la zone où il a été originalement récolté, car la qualité du bois, même à l'intérieur d'une même essence, variera selon les secteurs. Par la suite, les tiges peuvent être tronçonnées en ce que nous appellerons des billes partielles. Il s'agit de séparer soit le bois qualité pâte du bois de sciage et de déroulage, soit le bois de qualité déroulage, du bois de sciage et de pâtes. Dans le cas du bois qualité pâte, nous aurions un produit regroupant le bois de déroulage et le bois de sciage et qui devrait lui-même être découpé en billes. Pour le bois de déroulage, nous aurions un produit regroupant le bois de sciage et le bois de pâte avec un découpage

en billes devant être fait ultérieurement. Il est aussi possible de procéder directement au découpage en billes selon les six catégories déjà énumérées.⁸

Une fois la transformation en billes effectuée, il n'est plus nécessaire d'étiqueter les produits selon leur forêt d'origine. Le bois de sciage est alors transformé en bois d'œuvre, soit des planches. Une certaine portion de la matière devient des copeaux et peut être livrée aux usines de pâtes et papiers. Celles-ci peuvent aussi transformer directement les billes de qualité pâte en copeaux puis en produits finis. Pour le premier cas théorique, les copeaux et la sciure pouvaient également être convertis et vendus comme granules. Pour simplifier le cas théorique, il fut décidé que la transformation en granules pouvait se faire à l'une ou l'autre des usines de sciage. La figure 2.3 permet de visualiser l'évolution de la matière à travers l'ensemble des processus de transformation.

⁸ Le découpage directement en bille ainsi que les deux options de découpage en billes partielles sont toujours possibles, quel que soit le scénario testé.

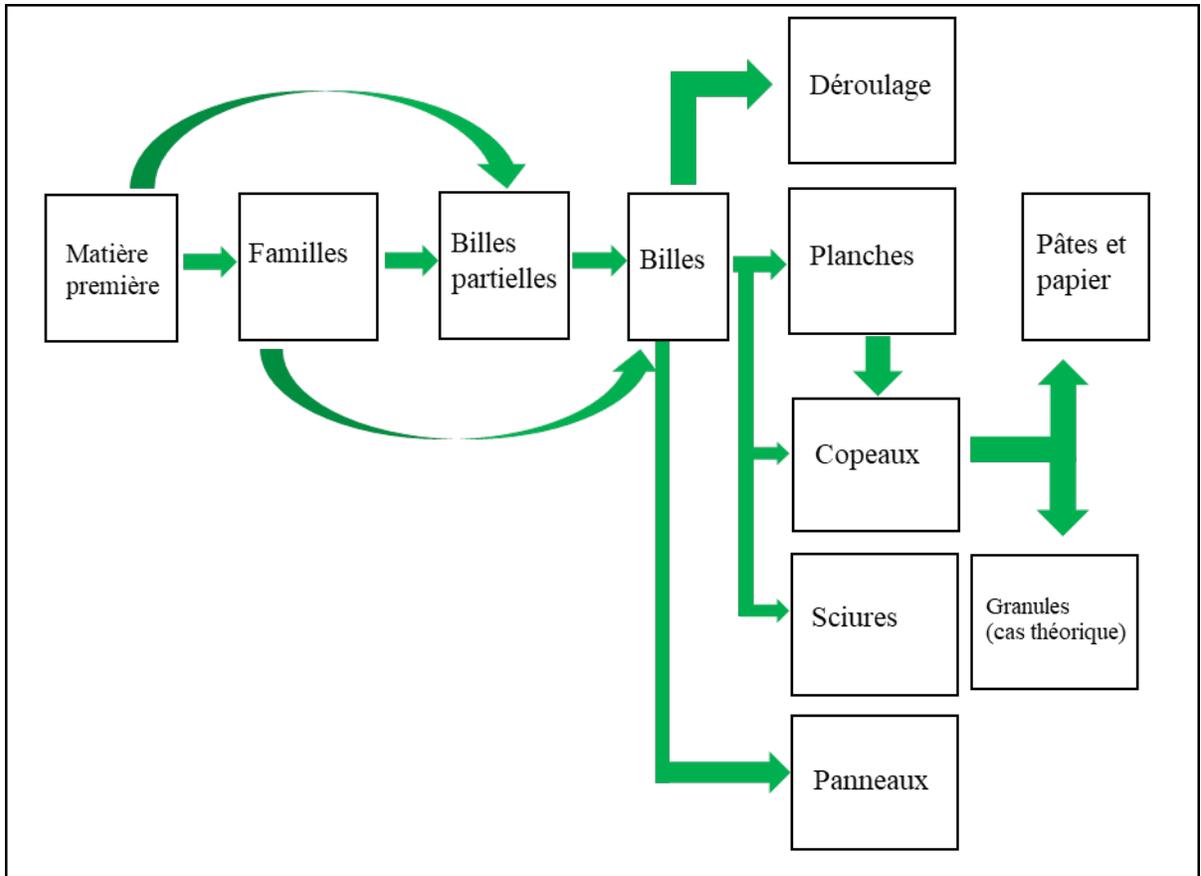


Figure 2.3: Évolution et flux de la matière à travers les processus de transformation

Quant au coût de triage, nous n'avons pas trouvé d'estimé précis dans la mesure où une partie de celui-ci est normalement assimilée au coût de récolte lorsqu'il est effectué en forêt, par exemple dans l'enquête quinquennale fournie par le groupe DDM au MFFP il y a quelques années (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016). Suite à des entretiens avec un des concepteurs du logiciel MÉRIS, nous avons effectué une estimation de ce coût aux différentes étapes de la transformation de la matière.

Nous posons l'hypothèse que les processus de triage entraînent certaines erreurs, lorsque réalisés en forêt ou aux usines, mais aucune lorsqu'ils sont effectués à une cour dédiée au triage dans le cadre du centre logistique régional. Pour le premier article, ce taux fut fixé à 5%, ce qui se rapproche du taux de 4% trouvé dans Session *et al.* (2005) pour une étude effectuée en Colombie-Britannique (Canada). Pour les billes de qualité sciage, il est possible que

l'erreur soit bidirectionnelle (par exemple, 2,5% de sur classement et 2,5% de déclassement). Dans les faits cependant, seul le déclassement est irréversible alors que si une bille est « surclassée », on finira par lui réassigner sa véritable catégorie. Le tableau 2.2 présente l'ensemble des essences utilisées dans notre base de données.

Tableau 2.2 : Essences et familles de bois utilisées

Essence	Acronyme	Famille	Type
Bouleau jaune	BOJ	Bouleau jaune	Feuille
Bouleau blanc	BOP	Bouleau blanc	Feuille
Peupliers trembles	PET	Peupliers	Feuille
Érable rouge	ERR	Érables	Feuille
Érable à sucre	ERS	Érables	Feuille
Thuya	THO	Thuya	Résineux
Sapin	SAB	SEPM	Résineux
Épinette	EPN	SEPM	Résineux
Pin gris	PIG	SEPM	Résineux
Mélèze	MEL	SEPM	Résineux

2.3.4 Coûts d'installation de la cour

Pour le premier cas, une hypothèse d'un coût d'installation de 0,60 \$/m³ transitant par la cour fut utilisée. La moitié du coût (0,30 \$/m³) était fixé en fonction de la capacité potentielle maximale de la cour (2 500 000 m³ sur l'horizon de deux ans, soit 1 250 000 m³ par année), alors que l'autre était fixée en fonction du nombre de blocs de capacité sélectionnés par le solveur (entre 0 et 10). Chaque bloc de capacité représente une capacité de 250 000 m³ sur l'horizon de deux ans.

2.3.5 Coûts de transport

À partir du logiciel *FPInterface*tm, nous pouvons calculer quatre grandes composantes du coût de transport soit le coût de chargement et de déchargement, l'amortissement des camions, le salaire des chauffeurs et le coût de carburant. Aussi, pour trois de ces coûts, il existe une composante dite « fixe » dans les chapitres 3 à 5 qui peut être considérée comme

l'ordonnée à l'origine d'une fonction. Il s'agit plus précisément du coût encouru lorsqu'un camion circule à vide, lequel s'applique sur la totalité des distances franchies par les véhicules de la flotte de transport. Pour sa part, l'autre partie appelée « variable » évolue en fonction de la quantité livrée, et ce, pour chaque combinaison origine-destination-type de camion. Il s'agit des coûts spécifiquement engendrés par le transport de marchandises et ne s'appliquant que sur les m³ de bois livrés. Il est lié au produit livré, car la densité d'un produit affectera la pente et donc le coût d'une livraison donnée.

On peut également ajouter à ces coûts le crédit au transport versé par le gouvernement du Québec pour les livraisons de bois de trituration vers les usines de pâtes et papiers du secteur feuillu et qui peut être considéré comme un coût négatif. Le tableau 2.3 présente la liste des composantes et types de coûts de transport. Les prochaines sous-sections détailleront l'ensemble de ces coûts ainsi que la construction de la matrice des distances et des routes.

Tableau 2.3 : Composantes et types de coûts de transport

Coût/Type	Ordonnée (fixe)	Pente (variable)
Chargement et déchargement		✓
Amortissement des camions	✓	✓
Salaire des chauffeurs	✓	✓
Carburant	✓	✓
Crédit transport		✓

a. Coût de chargement et de déchargement

Le coût de chargement et de déchargement représente un coût par mètre cube qui est fourni par le logiciel (ainsi que le temps requis par cette opération, qui permet de calculer le temps total d'une livraison). Un aspect important de ce coût est qu'il soit moins élevé d'environ 40% lorsqu'il s'agit de livraisons à partir d'une cour de triage ou d'une usine. Il est ainsi plus facile de planifier l'arrivée des camions lorsqu'ils proviennent des usines ou d'une cour, permettant ainsi de simplifier grandement le déchargement de la matière. Aussi, à

partir des données MÉRIS, il appert que le coût de chargement lorsqu'il est effectué en forêt est de 0,23 \$ plus élevé que celui fourni par *FPInterface*tm. Un ajustement fut ainsi effectué à notre base de données, car la base de données MÉRIS venait tout juste d'être mise à jour (été 2017).

b. Amortissement des camions et salaire des chauffeurs

Concernant l'amortissement des camions, le logiciel définit pour une série de types de camion un prix d'achat et une valeur résiduelle (à la fin de la vie utile du véhicule). En soustrayant la valeur résiduelle du prix, on obtient l'amortissement estimé du camion pour l'ensemble de son utilisation. Le logiciel fournit également le nombre d'années de vie utile, le taux d'utilisation du véhicule, le nombre d'heures par jour et de jours par années où le camion est utilisé. On peut alors calculer le nombre d'heures d'utilisation pour l'ensemble de la vie utile. Un taux est également défini pour calculer les coûts de réparation et d'entretien de chaque véhicule (par rapport au prix d'achat). On peut ainsi déduire l'amortissement du véhicule selon le temps d'utilisation.

Pour chaque véhicule et classe de chemin, le logiciel fournit des vitesses en charge et à vide ainsi que des consommations de carburant (également en charge et à vide). En comparant ces deux résultats, il est possible d'obtenir la différence de vitesse du véhicule et donc les heures supplémentaires de route occasionnées par une charge complète pour un kilomètre parcouru sur chaque classe de chemins. À partir de ces données, il est possible de calculer l'amortissement du camion ainsi que le salaire du chauffeur, et ce pour un kilomètre de chaque classe de chemin, que ce soit à vide ou en charge pleine. On peut alors ramener le coût en \$/kg-km. Ce coût peut ensuite être converti en \$/m³-km en utilisant la densité du produit en question. Pour chaque combinaison origine-destination- produit-type de camion, on calcule alors le coût fixe et variable en tenant compte du pourcentage de chaque classe de chemin par rapport à la distance totale parcourue.

c. Coûts de carburant

Pour chaque classe de chemin et type de camion, on fournit une consommation et donc un coût de carburant à vide et en charge complète. Encore une fois, pour calculer la pente, on compare la différence entre les deux coûts et on la ramène à un coût par kilogramme-kilomètre (kg-km) qui est par la suite converti en coût par m³-km. Comme pour l'amortissement des camions et le salaire du chauffeur, on tient compte de la proportion des classes de chemins d'un segment donné pour calculer le coût fixe et le coût variable du segment en question. On peut alors additionner l'ensemble des coûts fixes pour chaque combinaison origine-destination-type de camion et faire de même avec les coûts variables. Mentionnons finalement que pour calculer les émissions de gaz à effet de serre liées au transport du bois dans le chapitre 5, un taux de conversion de 2,66 kg de CO₂ par litre de diesel consommé fut utilisé (Ressources naturelles Canada 2014).

d. Construction de la matrice des distances et des routes de livraison

La matrice des distances et des temps de voyage pour le troisième chapitre fut obtenue à partir des données utilisées dans le projet VTM (Marier et Sarrazin, 2013). Les classes de chemin furent générées aléatoirement, mais à l'intérieur de certaines bornes qui furent fixées en fonction du type de paires origine-destination (forêt-usine ou usine-usine). On avait ainsi davantage de routes pavées pour une livraison d'une usine à une autre que pour une livraison provenant d'une forêt. La construction des routes pour sa part est effectuée à partir d'une procédure basée sur l'algorithme MaxTour présentée par Gingras *et al.* (2007), lui-même inspiré par Clarke et Wright (1964). La procédure est expliquée en détail dans le chapitre 3.

2.3.6 Densité de la matière et coûts de stockage

La densité des billes est déterminée à partir des données contenues dans Lemieux (2014). La densité des produits intermédiaires (avant la transformation en billes) est calculée à partir d'une moyenne pondérée de la proportion des billes dans le produit en question. On utilise également la même technique pour calculer la valeur des produits intermédiaires

ainsi que des « mix » pour établir un coût de stockage correspondant à 10% de la valeur de base des produits par année. Le coût de stockage pour une période est pondéré selon le nombre de mois de la période divisé par 12 mois. La capacité de stockage par forêt fut définie en proportion de la capacité de récolte (50% de celle-ci). Pour les usines, cette proportion fut fixée à 25% alors qu'elle baisse à 12,5% pour les cours dédiées au triage. Les hypothèses que nous avons utilisées quant à l'évolution de la densité à travers le temps sont expliquées dans le quatrième chapitre.

2.3.7 Prix et demande des produits finis

Les prix des produits finis furent obtenus à partir de la base de données MÉRIS. Un certain traitement fut effectué, car MÉRIS fournit les revenus par bille et non par produit fini. Nous avons donc ajouté au montant fourni par MÉRIS le coût de production estimé des usines de sciage ou de pâtes et papiers auxquelles étaient destinées les billes en question. Aussi, pour cerner le prix véritable du bois d'œuvre issu du sciage, il a fallu soustraire du montant de base le revenu obtenu par la partie de la bille transformée en copeaux durant le sciage. Le montant résiduel est reporté sur la partie de la bille qui est effectivement transformée en bois d'œuvre (environ 50%).

V_{bdo} : Valeur du bois d'œuvre.

$V_{bsciage}$: Valeur d'une bille de sciage.

$V_{bpâte}$: Valeur d'une bille de pâte.

P_{bdo} : Pourcentage d'une bille de sciage transformée en bois d'œuvre.

$P_{copeaux}$: Pourcentage d'une bille de sciage transformée en copeaux lors du sciage.

On peut déduire la valeur de la partie des billes de qualité sciage d'une essence donnée qui est transformée en bois d'œuvre en isolant celle-ci dans l'équation permettant de calculer la valeur globale d'une bille de sciage (voir ci-bas).

$$V_{bsciage} = V_{bdo} * P_{bdo} + V_{bpâte} * P_{copeaux} \quad \Rightarrow \quad V_{bdo} = (V_{bsciage} - V_{bpâte} * P_{copeaux}) / P_{bdo}$$

Comme pour la densité, les hypothèses quant à l'évolution de la valeur des produits à travers le temps sont expliquées dans le chapitre 4. Les prix pour le cas théorique variaient entre 40 \$ et 260 \$/m³ transformé en produit fini. Pour ce qui est des granules dans le cas théorique, leur prix fut estimé à partir des données du site de *Canadian Biomass Magazine* (2016). Il n'y avait pas de granules dans le cas d'étude. Pour ce qui est de la demande, elle fut sommairement estimée pour le cas théorique en fonction du potentiel de production des différents produits finis. Elle comportait une certaine saisonnalité pour les produits du sciage et les granules avec une plus forte demande durant l'été. Il n'y avait pas de demande dans le cas d'étude, car il fut estimé que le marché nord-américain ne contraignait pas la production des entreprises forestières de la Mauricie.

2.3.8 Définition des périodes de temps

Le modèle fut optimisé sur un horizon de deux ans pour tenir compte de l'effet de l'âge de la matière sur la valeur et la densité des produits. En tout, quatre périodes par année furent définies, pour un total de huit périodes. La période du dégel au printemps est marquée par l'arrêt des récoltes en forêt et des livraisons de bois à partir de celles-ci. Pour les livraisons effectuées sur le reste du réseau logistique (entre usines ou d'une cour à une usine), des limites de poids plus sévères que le reste de l'année sont fixées par le Ministère des Transports. Comme ces restrictions sont appliquées seulement deux mois par année, il nous a fallu travailler avec des périodes possédant un nombre inégal de mois. Ainsi, notre « été » s'étend sur quatre mois et l'« automne » et l'« hiver » sur trois mois chacun. Avoir des périodes de même durée nous aurait obligés à augmenter fortement leur nombre et donc, le nombre de variables et les temps de résolution. Mentionnons également qu'une certaine saisonnalité fut utilisée pour définir la capacité de récolte par période (pour l'ensemble du réseau) avec davantage de récoltes pouvant être effectuées durant l'hiver.

2.3.9 Validation du modèle et de la base de données

Après avoir fait fonctionner le modèle avec les données collectées, les résultats obtenus furent analysés pour valider le modèle à travers un processus itératif d'essais et d'erreurs. En premier lieu, il fut confirmé que l'ensemble des contraintes du modèle étaient respectées. Par la suite, nous avons examiné si les résultats obtenus comportaient des éléments aberrants, par exemple des coûts anormalement bas, des camions voyageant presque à vide, des produits apparaissant sans avoir été récoltés ou des usines se débarrassant de produits intermédiaires à perte. Des corrections au modèle ou à la base de données furent ainsi apportées pour éliminer ce type de phénomène.

Finalement, nous avons vérifié que les coûts engendrés étaient réalistes et ajusté la valeur de certains paramètres. Ainsi, les coûts furent comparés à ceux que l'on retrouve dans le rapport du groupe DDM (2016) concernant les coûts de l'industrie forestière québécoise pour validation. Par exemple, les coûts de transport furent augmentés de 20% pour tenir compte des données de l'enquête ainsi que d'une certaine inflation dans la mesure où les données de *FPInterface*tm datent de 2012.

2.4 Cas d'étude

Dans un second temps, le modèle développé dans le premier article fut modifié pour tenir compte des particularités d'un réseau logistique complexe. La région de la Mauricie au Québec fut choisie, car elle possède une grande diversité d'essences et de classes de billes. Un centre logistique est déjà utilisé dans cette région, proche de la ville de La Tuque. Cette cour est cependant située plutôt en périphérie de la région. Pour bien analyser l'interaction entre un tel centre et un réseau forestier, il était pertinent selon nous d'évaluer si l'installation d'une cour plus proche du centre géographique pourrait apporter des gains supplémentaires. Encore une fois, un processus itératif a permis d'apporter les modifications nécessaires au modèle et aux données. De nouvelles sources, notamment l'historique des récoltes dans la région visée et les données concernant les distances et les classes de chemin du réseau, furent ajoutées pour construire la nouvelle base de données.

Une fois avoir obtenu des résultats pour un scénario de base, une analyse de sensibilité fut effectuée sur l'influence de cinq facteurs sur la profitabilité du centre. Ce cas d'étude représente la matière de notre second article. Celui-ci fut soumis et accepté par la revue *Canadian Journal of Forest Research* et représente notre quatrième chapitre.

2.4.1 Modifications de la capacité et des coûts de récolte

Dans le quatrième chapitre, la somme des volumes récoltés pour l'année 2016 fut utilisée pour définir la capacité de chacune des zones de récolte. Les coûts de récolte pour leur part furent modifiés entre le premier et le second cas. Les coûts de récolte ainsi définis variaient entre 17,30 \$ et 21,80 \$/m³. Le Plan d'aménagement forestier intégré tactique pour la région de la Mauricie et du Centre-du-Québec (2013-2018) fut utilisé, car jugé plus fiable que les données MÉRIS (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs 2015).

2.4.2 Mise à jour des redevances

La publication de nouvelles redevances en juin 2017 nous a obligés à changer leur niveau entre le premier et le second article. Les nouvelles redevances variaient entre 0,41 \$ et 82,98 \$/m³ selon les billes et les essences et étaient nettement plus élevées que pour le premier cas.

2.4.3 Mise à jour des coûts de transport

a. Matrice des distances pour le cas d'étude

Pour ce qui est de la matrice utilisée dans le quatrième chapitre, nous avons obtenu un certain nombre de fichiers de type couche numérique des industriels de la Mauricie, de *FPInnovations* ainsi que du MFFP. Ceux-ci concernaient, les chemins forestiers de la région, la localisation des usines et celle des blocs de récolte. Par la suite, un centroïde fut généré pour chacune des zones de tarification à l'aide du logiciel ArcMap (fonction automatisée) à partir des blocs de récolte qui sont dans la zone. Chaque centroïde fut alors connecté au chemin forestier le plus proche. La matrice des distances fut alors générée à

l'aide de la plate-forme de *FPInterface*tm, qui trouve le plus court chemin pour l'ensemble des paires origine-destination à l'aide de l'algorithme de Dijkstra. À partir du chemin défini pour chaque paire origine-destination et des données disponibles, des pourcentages de classes de chemin furent définis pour chaque segment dans la matrice des distances.

b. Crédit de transport et utilisation du train

Le gouvernement du Québec offre un crédit pour compenser les entreprises quant aux livraisons de bois de trituration (qualité pâte) vers les usines de pâtes et papiers dans le secteur feuillu. Celui-ci peut être calculé grâce à une formule fournie par un document du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2017a). Nous avons ainsi établi le niveau de crédit obtenu en \$/m³ livrés à deux des usines du réseau œuvrant dans le secteur feuillu, soit l'usine de Windsor et celle de WestRock (La Tuque).

2.4.4 Garanties d'approvisionnement

Les garanties d'approvisionnement furent fournies par les industriels de la région. Elles sont compilées par UAF et non par zones de récolte et par famille de produits (SEPM, érables, bouleau jaune, bouleau blanc, peupliers). La somme des garanties fut utilisée pour calculer la capacité des usines de sciage. Pour les usines de pâtes et papiers dans le feuillu, la capacité est basée sur les garanties et une répartition des billes de qualité sciage (en tenant compte de la proportion de ces billes qui deviennent des copeaux lors du sciage). Pour l'unique usine de pâtes et papiers dans le résineux (l'usine Kruger à Trois-Rivières), il n'y a pas d'attribution. Nous avons donc utilisé la capacité totale du réseau en m³ de billes de qualité pâtes à laquelle nous avons ajouté environ 36% des billes de qualité sciage (qui deviendront des copeaux). Certaines modifications ont dû être apportées aux garanties pour que celles-ci soient cohérentes avec la possibilité de récolte par essence et secteur qui, elles, furent définies à partir de l'historique de récolte. Mentionnons que le thuya fut enlevé de la liste des essences traitées du fait que les volumes de garanties d'approvisionnement pour cette essence en Mauricie étaient négligeables. De plus, les usines possédant ces garanties étaient isolées et avaient des capacités de production relativement faibles.

2.4.5 Mise à jour des coûts d'installation de la cour

Un rapport confidentiel de *FPInnovations FERIC* (Michaelson et Tran, 2008) nous a fourni une estimation quant aux coûts d'implantation d'une cour de triage de 0,48 \$/m³ traité au site (incluant l'inflation) pour le cas d'étude. De plus, les coûts d'implantation furent appliqués entièrement aux blocs de capacité sélectionnés par le modèle, éliminant ainsi les coûts fixes d'implantation encourus dans le cas théorique.

2.4.6 Mise à jour des prix des produits finis

Les prix des produits finis furent modifiés pour le second cas, car de nouvelles données furent utilisées par la base MÉRIS à partir de juin 2017. La procédure utilisée est cependant restée la même que pour le cas théorique. Les prix pour le cas d'étude variaient entre 46 et 249 \$/m³ transformé en produit fini.

2.4.7 Mise à jour des processus de triage

Dans le cas d'étude, l'option de transformer les copeaux et la sciure en granules fut enlevée, car elle ne correspondait pas à la réalité du réseau étudié.

2.4.8 Validation du modèle et de la base de données

Le processus de validation du modèle utilisé dans le cas théorique fut répété pour le cas d'étude. Concernant la construction de la base de données, certains ajustements furent spécifiquement apportés dans le cas d'étude. Ainsi, les prix furent augmentés d'environ 2%, car ils sont basés sur des chiffres publiés sur la base de données MÉRIS en juin 2017. Aussi, dans ces premiers résultats, le site Vallières traitait sensiblement moins de bois par rapport à son niveau d'activité réel (400 000 m³ par année). Cela nous a incités à diminuer les coûts de triage lorsqu'effectué à une cour dédiée à cette activité (ils sont passés de 85% à 75% des coûts « normaux »). Aussi, le taux d'erreur de 5% utilisé dans le cas théorique était inspiré de *Session et al.* (2005) et basé sur les opérations forestières en Colombie-Britannique. Il fut augmenté à 8% dans le second, car après des conversations avec un

contremaître d'une cour de triage de la Mauricie, le taux d'erreur du bois feuillu au Québec est relativement plus élevé, les arbres récoltés en Mauricie (et plus généralement au Québec) ayant une taille plus modeste.

2.5 Modification du cas d'étude

Pour le chapitre 5, nous avons utilisé les données du cas d'étude pour tester l'effet de certaines modifications dans la structure du réseau sur les résultats. Par exemple, nous avons testé la rentabilité de nouveaux sites, situés à proximité de quelques usines du réseau. Aussi, nous avons examiné l'effet de la fermeture de l'une ou l'autre des usines présentes. Nous avons également testé ce qui arriverait si on ajoutait un accès au transport hors norme à quelques-uns des sites qui n'y ont pas actuellement accès. Aussi, nous avons généré des scénarios sans coûts de chargement ou de déchargement pour livrer du bois d'une cour lorsque celle-ci est située sur le même site qu'une usine (avec une distance d'un kilomètre ou moins). Pour l'ensemble de ces nouveaux scénarios, il s'agissait d'effectuer des ajustements à la base de données du chapitre 4. Pour ouvrir les perspectives de recherches futures, une analyse concernant les méthodes de partage des gains entre les entités participantes du centre logistique ouvre la réflexion concernant le modèle d'affaires et vient compléter notre cinquième chapitre.

2.6 Résolution

L'ensemble des données est contenu dans une base de données Access. Les différentes versions du modèle ont été codées en langage OPL et optimisées par la suite à l'aide du logiciel CPLEX (IBM 2019), version 12.6.2. Les paramètres par défaut et la procédure de « branch-and-bound » du solveur furent utilisés. Les temps de résolution varient entre quinze minutes et trois heures selon la complexité du scénario testé pour un serveur possédant 2,60 GHz et 8,00 Go de RAM. Les temps de résolution maximums diminuaient à environ une heure avec d'autres serveurs possédant 3,40 GHz et 31,8 Go de RAM. La solution finale se situe à l'intérieur de 0,1% de l'optimum.

Chapitre 3

Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistic Center

Ce chapitre présente un article intitulé « Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistic Center ». Les tableaux et des figures furent renumérotés pour tenir compte de leur insertion dans l'ensemble de cette thèse et un changement à l'un des indices du modèle fut apporté pour harmoniser les notations avec le chapitre 5. Il fut publié dans la revue *Forest Science*, 2018, 64(3), 233-245. Les auteurs sont François Sarrazin, Luc LeBel et Nadia Lehoux.

Résumé

Les préoccupations environnementales ainsi que le besoin de maximiser la valeur dans l'industrie forestière créent une plus grande pression sur ce secteur pour réviser ses pratiques, notamment au niveau de ses opérations de transport et de triage. Notre projet vise à identifier les facteurs ayant le plus d'influence sur la profitabilité d'un centre logistique régional comprenant une cour de triage et une coordination des opérations de transport. En utilisant un modèle de maximisation des profits d'un réseau logistique forestier théorique inspiré du réseau de la Mauricie (Province de Québec, Canada) comprenant six usines, nous avons testé quatre scénarios incluant ou non une cour dédiée au triage combinée avec l'utilisation de retours à vide ou de retours en charge. Les résultats montrent que la cour de triage et l'utilisation des retours en charge engendrent des profits plus élevés pour la chaîne d'approvisionnement. Une analyse de sensibilité fut par la suite effectuée sur quatre facteurs (coûts de transport, distance des forêts, nombre de camions hors norme, coûts de triage à la cour). Elle a démontré que des coûts de triage plus bas à la cour avaient l'impact le plus important sur la profitabilité du centre logistique.

Mots clés: Logistique, transport, optimisation, triage, foresterie

Abstract

Concerns about environmental issues as well as the need to maximize value in the forest industry are putting greater pressure on this sector to review its practices, especially regarding the optimization of its transportation and sorting operations. Our project aims to identify the parameters having an influence on the profitability of a regional logistic center comprising both a sorting yard and the coordination of transportation operations. Using a profit maximization model and a forest products supply chain encompassing six mills in the Mauricie region of Quebec, Canada, we tested four scenarios involving the use or not of a sort yard and the use of one delivery vs. combined deliveries at a time. Results show that both the sort yard and the use of routing bring higher profits for the supply chain. A sensitivity analysis conducted for four parameters (transportation costs, distances to forests, number of oversize trucks, and sorting costs at the yard) also highlights that lower sorting costs at the sort yard have the greatest impact on the logistic center profitability.

Key words: Logistic, transportation, optimization, sorting, forestry

3.1 Introduction

The forest industry represents an important part of Canada's economic activity with about \$ 19.8 billion in revenues annually (Natural Resources Canada). Concerns about environmental issues are putting greater pressure on this sector to review its practices, especially regarding the optimization of its transportation and sorting operations. The scientific literature emphasizes that the sharing of transportation resources can be profitable, both economically and environmentally (Epstein *et al.* 2007), through the use of backhauling and routing. Nevertheless, many authors have pointed out that this can be quite complex to implement (Frisk *et al.* 2010).

The creation of a sort and consolidation yard, distinct from the harvesting sites, can offer many opportunities for maximizing revenues and minimizing operational costs through more efficient sorting processes and the coordination of transportation. However, inserting this type of yard into an existing forest products supply chain can be challenging, especially in terms of implementation cost, changing demand, multiple sorting decisions, resources sharing, and transport route definitions.

The question of how such a center could be profitable, as well as which specific advantages it could represent in terms of cost control and value creation for the entities using it, is furthermore difficult to answer. Benefits will greatly depend on the business environment. Intuitively, one can easily perceive that the greater the level of diversity of the raw materials, the more interesting it should be to proceed to sorting in this type of strategic facility. Similarly, low handling costs would also favor a greater use of sorting. Considering trade-offs between these and other factors is essential to properly analyze and justify the decision to implement a sort and consolidation yard.

The objective of this article is to identify the parameters having the biggest influence on the profitability of a logistic center dedicated to both sorting operations and transportation management optimization. To achieve this, we propose a profit maximization model for a

forest products supply chain that can include (or not) a yard specifically dedicated to sorting while allowing forest products companies to combine different deliveries to reduce the number of empty transportation returns. The model simultaneously considers harvesting, transportation, sorting, production, and inventory costs, as well as the impact of wood aging on the value and the density of the products. This type of modeling and management of a logistic center has seldom been studied in the scientific literature up to now, even though it may represent a means to increase agility and cost efficiency. In the Province of Quebec, Canada, transportation costs represent up to 26.8%⁹ of overall forest operation costs (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016).

To test this model, we built a database using data obtained from various reliable sources such as the Quebec government's office responsible for selling wood to forest products companies. We also validated our model through an in-depth series of optimizations. In the base instance, the use of both the sort yard and routing procedures led to a gain of \$ 0.88 per available cubic metre (\$ 12.20 to \$ 13.08·available m³). We then conducted a sensitivity analysis to identify the factors influencing the profitability of the proposed center. The results of this analysis showed that lower sorting costs at a dedicated sort yard followed by higher transportation costs could contribute to increasing the positive effect of the logistic center. Higher distances to forest sites, lower sorting costs at a sort yard, and a greater number of oversized trucks also had a significant impact on either the profitability of the use of a sort yard or routing. We finally conducted a linear regression analysis, which established that a very high portion of the variations in profit increases for three different scenarios (with only a sort yard, only the use of routing, or both a sort yard and routing) could be explained through differences of the level of the four parameters already mentioned (with R² at or above 85% for each scenario).

⁹ This figure can be calculated with data extracted from the report.

The rest of this article is structured as follows: we first examine the relevant scientific literature dealing with transportation, sort yard operations, and mathematical modeling applied to the forest sector. Afterward, we describe the methodology used to develop the optimization model. The results obtained and the sensitivity analysis conducted are presented next. A discussion and conclusion end the paper.

3.2 Literature review

3.2.1 Forest products supply chain

According to Lehoux *et al.* (2012), the forest products supply chain includes all of the businesses or business units participating in the supply, production, and processing of a wood product. This supply chain is traditionally built based on a push system (D'Amours *et al.* 2010), mainly because it depends on a natural resource, which implies an element of supply uncertainty.

Generally, harvesting operations include three basic steps: (1) Trees are cut and branches are taken out. (2) Trees are cut into logs which are placed on the side of the road. (3) The wood is delivered to mills or to yards to be temporarily stocked (D'Amours *et al.* 2008). A rudimentary sorting, including a certain degree of “*merchandising*,” is conducted in the forest. Although mills have yards where sorting can be done, the lack of space typically reduces the possibilities. It is therefore possible that businesses use a yard specifically dedicated to sorting (Han *et al.* 2011).

The ageing of the wood, especially during the summer, leads to a loss of humidity (Beaudoin *et al.* 2007). On the one hand, lower humidity will lighten the weight of the wood (Wengert 2006) and make it less expensive to transport. On the other hand, wood that is too old will become more brittle, have a smaller amount of fines, and lose brightness, desirability and ultimately value (*ibid*).

3.2.2 Sorting operations

As mentioned by Lehoux *et al.* (2012), sorting is typically done according to three characteristics: (1) per species, (2) per size, and (3) per log quality. Dramm *et al.* (2002) define five basic approaches to sorting: (1) Use a sort yard. (2) Do sorting in the forest. (3) Conduct some pre-sorting at the landing. (4) Sort at a mill yard, and (5) do no sorting.

According to Dramm *et al.* (2002), sorting in the forest is justified when there are few different inputs to sort as well as when an important portion of the wood encompasses high-value logs. The argument is that sorting in the forest allows separating the main species from one another. It is then possible to reduce handling at the yards and at the mills. A low volume of high-value logs usually leads to a sorting at the mill, the volume being not sufficient to justify the creation of a sort yard.

The interest in sort yards has risen with the decline (quantitatively and qualitatively) of forest resources and the need to recover the potential value from them (Dramm *et al.* 2002). Therefore, it is generally recognized that yards dedicated to sorting facilitate the correct allocation of logs to the most profitable destinations.

Nevertheless, the impacts produced by the presence of such a yard are complex to model. Depending on its location, the yard can allow the use of trucks with oversized loads traveling on private roads (Chan *et al.* 2009) as well as b-trains. B-trains are ill adapted to forest sites, and are therefore limited to travelling from the yard to the mills and from one mill to another mill. On the other hand, the yard may lead to higher handling (Dramm *et al.* 2002) and transportation costs for the wood having to transit by this site (Sessions *et al.* 2005). The costs for setting up and operating such a yard must also be carefully estimated.

3.2.3 Planning

The allocation of harvesting sectors to the users and the planning of harvest operations (Lehoux *et al.* 2012) are among the most important decisions that can be taken regarding the management of forests. Over a horizon of several years, transportation planning can be integrated with harvesting operations (Epstein *et al.* 2007). In Canada, one of the specificities of the forest industry is the seasonal character of harvesting operations, as the weather leads to periods of inactivity. This particularity intensifies the need to do advanced planning (Lehoux *et al.* 2012).

3.2.4 Wood transportation

For Audy *et al.* (2012a), the entities of the supply chain can optimize full-load travel times or the use of capacity and transportation assets through collaboration and backhauling. Frisk *et al.* (2010) observed that despite potential benefits, collaboration in transport operations between two or more companies is rare in the forest products industry. However, Epstein *et al.* (2007) asserted that the trend in the last few years is for a greater centralization of planning as well as a greater radius of operation for trucks, partly because of the greater use of GPS systems. These instruments allow planners and dispatchers to know the daily demand for and the available inventory of a given product at different sites and demand points. The extended transportation planning problem with a warehouse or inventory site becomes a well-documented transshipment site problem.

Epstein *et al.* 2007 showed that backhauling and routing, where several deliveries are combined, could lead to cost savings within a range of 2% to 20%. According to Carlsson and Rönnqvist (2005), a further advantage of this technique is that it can allow the inclusion of more wood species and a greater number of procurement zones.

3.2.5 Logistic centers and modeling

The scientific literature tends to suggest that using a sort yard could improve the agility of the forest products supply chain while facilitating the trading of wood and the pooling of inventories between competitors. In addition, it seems relevant to link forest planning and transportation operations to production scheduling at the mills. A logistic center could also offer unique opportunities for more efficient routing. Unfortunately, most of the models designed to evaluate the profitability of sort yards usually consider an incomplete number of the parameters recognized as important. For instance, none of the models integrate transportation and sorting costs simultaneously, and “*merchandising*” is mentioned in the models only in relation to wood chips supply (Kong *et al.* 2012, Sessions and Paredes 1987, Broad 1989, and Chan *et al.* 2009). They are also not supported by a thorough sensitivity analysis (Chan *et al.* 2009, Kong *et al.* 2012). Moreover, only a few models found in the literature happened to be mixed integer linear programs (MIP). For example, Chan *et al.* (2009) dealt with a wood chip-producing yard, which allowed diminishing the network costs by 6.8%. Beaudoin *et al.* (2007) developed a model covering operations between harvesting of forest sites and mills, but without a sort yard or transportation coordination. Carlgren *et al.* (2006) presented a cost minimization model with backhauling possibilities where binary variables were used to select the sorting strategy to use.

As the forest industry is characterized by divergent and interdependent processes as well as multiple time planning horizons, it becomes relevant to use operations research (OR) techniques to better evaluate the possibilities offered by a logistic center. In the following sections, we describe the OR model developed to assess the potential profitability of this center.

3.3 Objective and Methodology

3.3.1 Objective

The main objective of this research is to identify the parameters having the highest impact on the profitability of a logistic center encompassing product sorting and transportation coordination. To achieve this goal, we have built an optimization model which maximizes the profit of a forest products supply chain encompassing multiple mills, a dedicated sort yard, and routing operations.

A preprocessing routing phase first allows the generation of all the valid routes to consider in the model. The model is then solved in a two-phase process, using the same planning horizon for each phase: In the first phase, the model is run to determine the threshold of production that both the mills and the sort yard must reach for each period, the processes that should be considered in the second phase as well as the preselected routes allowing for a transportation cost reduction. The effects of the age of the wood fiber are not considered in this phase, the purpose here being to find an initial design that considers the main constraints of the problem while limiting the increase in the size of the model. The relationship between the two phases of our model is therefore not equivalent to the dynamic that exists between a tactical and an operational model.

In Phase 2, the model decides on a final design, determining the optimal harvesting levels, the quantities needed for each raw material, and the type and volume of intermediary products going through the different sorting and production processes. We only use routes preselected in the previous phase to guarantee that only interesting routes will be available. By the same token, amongst processes that were preselected in Phase 1 the model should pick those that are the most best adapted to the network's context.

The flow of materials throughout the transportation network, levels of inventories, and the number of products sold are also determined in this phase. In both phases, variables, which concern the number of deliveries per origin-destination pairs (OD pairs), are relaxed and

expressed as continuous variables to make it easier to find a valid solution within a reasonable amount of time. Troncoso *et al.* (2015) used a somewhat similar method of model decomposition. Figure 3.1 illustrates the methodology followed to explore the profitability of a logistic center, highlighting how the two-phase process is conducted and the information transmitted from one stage to another.

3.3.2 Methodology

We first assume that wood in the forest is harvested, sorted based on different categories (sawing and pulp together and peeling or sawing together), and stored at the side of the road. Somewhere in the supply chain, there can be sites serving as logistic centers, i.e., dedicated sort yards distinct from the harvesting sites and the mills. Wood can be delivered to this yard to be sorted more accurately than at the forest sites before being delivered to one of the mills. We also assume that sorting costs are lower at a sort yard than at the forest sites because of the greater specialization of the equipment used. The raw materials sorted are then delivered to the mills. The mills process the logs into finished products before selling them to different clients. Coproducts, such as wood chips generated when processing wood, are delivered to other mills (especially pulp and paper mills). Figure 3.2 illustrates the forest products supply chain optimized by the model.

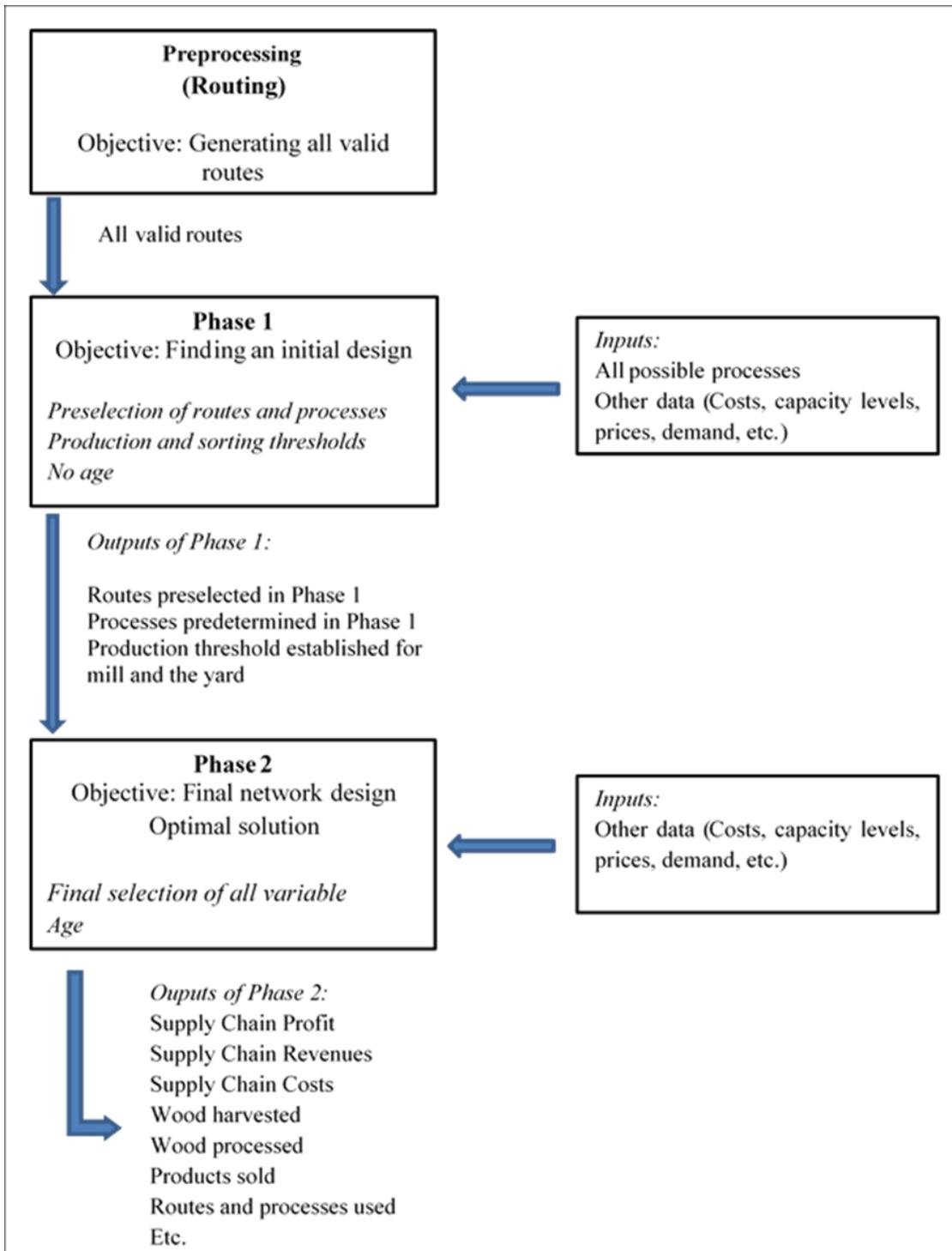


Figure 3.1: Relationship between Phase 1 and Phase 2

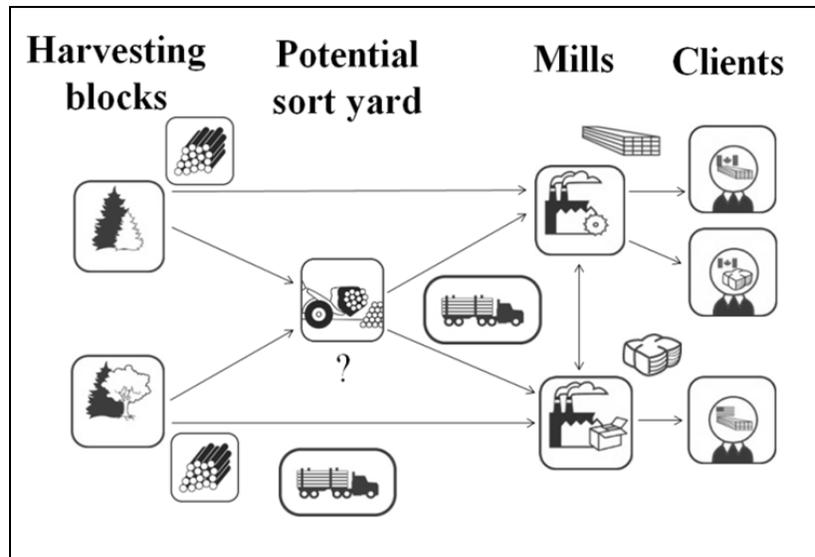


Figure 3.2: Forest supply chain with potential logistic center

The fictitious forest products supply chain considered is based on a real one located in the Mauricie region in the Province of Quebec, Canada (See Figure 3.3). The supply chain includes one peeler mill, three sawmills (one processing hardwood and two others processing softwood) and two pulp and paper mills (see Figure 3.4). The volume available for harvesting is based on annual planning over a two-year horizon. The conversion rates for the sorting processes, which represent the number of units of “out products” exiting a sorting process for one unit of the “in product”, were deduced from data obtained from the *MÉRIS* software used by the *Bureau de mise en marché des bois (BMMB)*. This tool contains estimates of the allowable cut per wood species and diameter for different forest management units (FMUs) of the Mauricie region, as well as the conversion rates between the raw materials and different log grades per species. Different FMUs have different conversion rates as they have different yield levels, i.e., level of wood quality as well as different percentages of each species. For instance, white birch wood from one forest site might have a greater percentage of high value logs than the same wood from another one, depending on the FMU to which the forest site corresponds. The reason for this is that to simplify our model, we presume that wood is harvested in clear cuts. This means that whenever the wood is harvested in each forest site, it must be representative of all wood

species and log grades of this site. Decisions about which units to harvest (and how to process the logs) will therefore partly depend on the level of wood quality at each forest site as well as the processes available at each site in the network (forest, mill or the yard). Demand seasonality for the different products was also introduced to mimic what can be observed in practice.

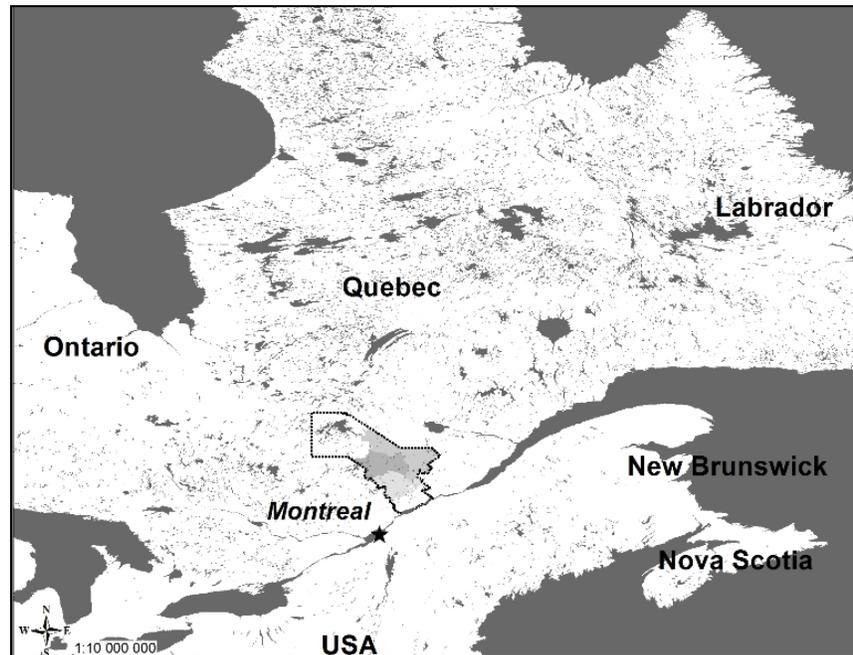


Figure 3.3: The Mauricie region (Sources: © Gouvernement du Québec and Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs).

The FMUs used for our series of optimization are the ones situated in the south of that region (042-51, 043-52, and 041-51, see Figure 3.4). Transportation costs have been obtained through data coming from the software *FPInterface* used by the forest research center *FPInnovations*. The revenues for the finished products were also calculated using this software. The level of stumpage fees for different grades of logs was established based on documents obtained from the *Ministère des forêts, de la faune et des pêches du Québec (MFFP)*. The distances between the nodes of the supply chain were obtained from a road database.

A total of 3,788,268 cubic metres (avail. m³) of wood was considered for harvesting over the two-year period. Seventeen different wood species are present, spruce and fir being the dominant ones. The site available to build a sort yard is located next to one of the paper mills. Nine harvesting areas (which represent an aggregation of different harvesting sites) are available to supply six mills. They were defined by dividing the FMUs into three areas each. Each mill and the sort yard can be used as a vehicle terminal, which means that trucks start and finish their delivery routes at a mill or at the sort yard.

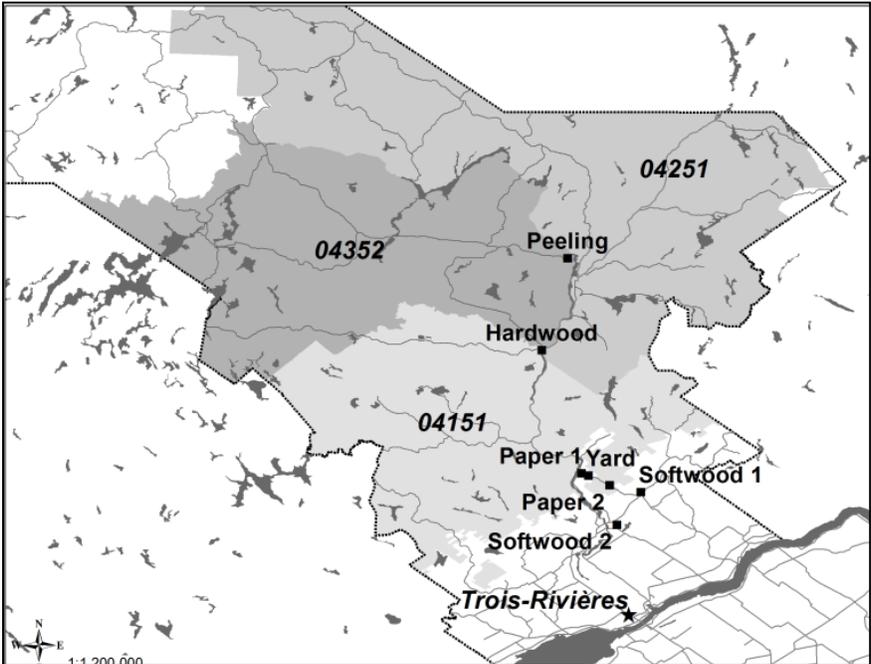


Figure 3.4: Forest Management Units (Sources: © Gouvernement du Québec and Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs).

The following section describes the mathematical model developed to optimize the forest products supply chain considered in the study.

3.4 Modeling and route generation

3.4.1 Mathematical modeling

The main elements included in the model are as follows:

Sets

Products and processes

PDV : Set of finished products available for sale.

MP : Set of raw materials.

PEC : Set of intermediary products.

PE : Set of products entering a process s , such as $PE=MP \cup PEC$.

PS : Set of products exiting a process s , such as $PS=PEC \cup PDV$.

PR : Set of products over which mills must pay a stumpage fee to the government.

P : Set of all products p , such as $P=MP \cup PEC \cup PDV$.

SPE : Set of sorting processes.

$SPDV$: Set of production processes.

S : Set of all transformation processes s such as $S=SPE \cup SPDV$.

Sites, truck types, routes, time periods, and clients

F : Set of forest harvesting sites $f \in F$.

Y : Set of potential sites for a sort yard $y \in Y$.

M : Set of mills $m \in M$.

N : Set of all sites i and $j \in N$ such as $N=F \cup Y \cup M$.

D : Set of all i or $j \in D$ destination nodes such as $D=Y \cup M$.

B : Set of vehicle terminals (or bases) $b \in B$.

O : Set of all $i \in O$ origin nodes such as $O=N$.

T : Set of truck types $t \in T$.

L : Set of time periods $l \in L$ for the time horizon (including $l = 0$, to define a starting inventory).

L^+ : Set of time periods other than zero ($l \geq 1$). l^{max} is the last period of the horizon.

C : Set of all clients $c \in C$.

C^+ : Set of all clients minus the virtual client called “Loss” which “buys” product at a price of \$ 0 to evacuate products which are not profitable.

R : Set of r routes $r \in R$.

Parameters

Transportation operations

E^t : Volume capacity of type t vehicles.

Q_{ij}^t : Weight limit for a delivery with transportation mode t between sites i and $j \in N$ during period l .

Ω^t : Maximum fleet size of type t vehicles.

β^t :Maximum time on the road for one month for a type t vehicle.
 μ^r :Number of hours required for route r .
 W^r : Parameter, which equals to 1 if route r is done by a type t vehicle, 0 otherwise.
 W_b^r : Parameter, which equals to 1 if route r is done by a vehicle based at terminal b , 0 otherwise.
 η_{ij}^r : Number of times that the combination of sites i and j and type t vehicles is en route r .

Capacity levels for the processes

H_f^{pl} : Level of harvesting capacity of product p at forest site f during period l .
 Q^l : Harvesting capacity per period for the entire network in m^3 .
 Q_f : Harvesting capacity for the time horizon in m^3 at forest site f .
 Q_f^p : Available quantity of product $p \in PR$ at forest site f . Built by using the conversion rates between raw materials and intermediary products.

Costs and revenues

c_f^p : Amount of royalty that must be paid for product $p \in PR$ and harvested at forest site f to the government.
 c_f^{pl} : Harvesting cost of product p at forest site f and during period l .
 c_y^+ : Installation cost for a capacity block of 250 000 m^3 at yard y for the entire time horizon.
 c_y : Fixed cost for setting up site y as a sorting yard for the entire time horizon.
 c_{ij}^{plt} : Variable transportation cost (in $\$ \cdot m^{-3}$) of product p from site i to j during period l with truck type t : Supplementary cost for a vehicle t to travel from sites i to j loaded rather than empty.
 c_i^{sp} : Sorting cost of product p entering sorting process s at site i .
 c_i^p : Inventory cost per month (in $\$ \cdot m^{-3}$) of product p at site i .
 c^r : Fixed cost of route r .
 V^p : Value (in $\$$) of product p .

Sorting and production capacity

Q_m^l : Production capacity for mill m for period l . It only applies for finished products.
 Q_y^l : Sorting capacity for sort yard y for period l . It only applies for intermediary products.
 Q_m : Production capacity for mill m for the entire time horizon.
 $Threshold_i$: Minimal amount of production or sorting that must be performed per month for site i (either the yard or a mill). It is used only in Phase 2 and is based on the results of Phase 1.
 Q_y : Sorting capacity for sort yard y for the entire time horizon.
 E_i : Volume capacity or space limit for inventory at site i for a given period.
 max_y : Maximum number of capacity blocks that can be installed at site y .

Others

d_c^{pl} : Demand level of product p at demand point or client c during period l .

v^l : Number of months for period l . The periods used in the model may represent different numbers of month, e.g. one period may involve two months while another may include four months. We made that modelling choice to reduce the resolution time while taking into account the two-month period for which no transportation and harvesting at forest sites can take place (i.e. the spring thaw). This parameter makes it possible to adjust inventory costs as well as capacities depending on the number of months included in the period considered.

l^{\max} : Last period of the time horizon.

g^{spp} : Conversion rate between the quantity of products p' and p obtained in the sorting process s .

σ^p : Metric tons per m^3 for product p .

Variables

Transportation operations

x_b^t : Number of types t of vehicles that operate from terminal b during period l .

x^r : Number of times that route r is done during period l .

x_{ij}^{pl} : Number of deliveries of product p from site i to site j during period l with a type t vehicle.

q_{ij}^{pl} : Quantity of product p delivered from site i to site j during period l with a type t vehicle.

Products

x_f^{pl} : Quantity of product p harvested at forest site f during period l .

x_f^{pl} : Quantity of product p over which a royalty must be paid to the government for logs made of wood harvested from forest site f .

x_{jj}^{pl} : Quantity of product p over which a royalty must be paid to the government for logs made of wood harvested from forest site f and assigned to site j .

x_i^{spl} : Quantity of product p treated by sorting/production process s at site i during period l .

\mathfrak{S}_i^{spl} : Quantity extracted of product p for the sorting or production process s during period l at site i .

x_{ic}^{pl} : Quantity of product p sold from site i to client c during period l .

Others

I_i^{pl} : Level of inventory of product p and at site i during period l .

z_y : Binary variable which equals 1 if site y is selected to become a sorting yard, 0 otherwise.

n_y : Number of capacity blocks (each representing 250,000 m^3) of sorting processes installed at yard y .

The objective function and the different constraints of the model used in Phase I are now described.

Objective function: *Maximize*

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{c \in C^+} \sum_p \sum_l V^p x_{ic}^{pl} - \sum_f \sum_{p \in MP} \sum_l c_f^{pl} x_f^{pl} - \sum_{p \in PR} \sum_f \sum_{j \in D} c_f^p x_{fj}^p - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_i c_i^{sp} x_i^{spl} - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_t c_{ij}^{plt} q_{ij}^{plt} \\ & - \sum_r \sum_l \sum_t c^r x^{rl} - \sum_y c_y z_y - \sum_y c_y^+ n_y - \sum_i \sum_p \sum_l c_i^p v^l I_i^{pl} \end{aligned} \quad (1)$$

The objective function (1) maximizes profit, i.e., the sum of revenues from the sale of finished products minus harvesting costs, stumpage fee, sorting and mill processing costs, transportation costs, sort yard implementation costs, and inventory costs.

Subject to:

$$x_f^{pl} \leq H_f^{+pl} \quad \forall f \in F, p \in MP, l \in L^+ \quad (2)$$

$$\sum_p \sum_l x_f^{pl} \leq Q_f \quad \forall f \in F \quad (3)$$

$$\sum_p \sum_l x_f^{pl} \geq 0.9 * Q_f \quad \forall f \in F \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_p x_f^{pl} \leq Q^l \quad \forall l \in L^+ \quad (5)$$

Constraints of group (2) specify a maximum level of harvesting in the forest sites per period. Constraints of group (3) establish a harvesting capacity for the entire planning horizon. Those of group (4) force the system to harvest a minimal amount of wood for each site (currently 90% of the wood available). There is also a harvest limit for the entire supply chain for each period (5).

$$\sum_p I_i^{pl} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L^+ \quad (6)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + x_i^{pl} - \sum_t \sum_{j \in D} q_{ij}^{plt} - \sum_s x_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in F, p \in MP, l \in L^+ \quad (7)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_s x_i^{spl} - \sum_t \sum_{j \in D} q_{ij}^{plt} - \sum_s x_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in F, p \in PEC, l \in L^+ \quad (8)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in F, p \in PDV, l \in L^+ \quad (9)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plt} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plt} - \sum_s x_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in D, p \in MP, l \in L^+ \quad (10)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_t \sum_{j \neq i} q_{ji}^{plt} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plt} - \sum_s x_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in D, p \in PEC, l \in L^+ \quad (11)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} - \sum_c x_{ic}^{pl} \quad \forall i \in D, p \in PDV, l \in L^+ \quad (12)$$

$$I_i^{pl^{\max}} \geq I_i^{pl} \quad \forall i \in N, p \in P | l = 0 \quad (13)$$

We establish an inventory capacity for each site with constraints from group (6). Constraints from groups (7) to (12) guarantee flow conservations for sites and for each product traveling through them. Constraints from group (13) specify that the inventory level for a given product will always be equal to or higher than what it was at the beginning (for the same site), to avoid consuming “free” products (i.e. products in stock at the beginning of the planning horizon that would be sold during the same planning horizon without involving any production cost).

$$\mathfrak{S}_i^{spl} = \sum_{p' \in PE} g^{sp'p} x_i^{sp'l} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L^+, s \in S \quad (14)$$

$$n_y \leq \max_y \quad \forall y \in Y \quad (15)$$

Constraints from group (14) establish the relationship between the quantities of products entering and exiting any given sorting or production process. Constraints from group (15) establish a maximum number of capacity blocks that can be added to the yard (for this experimentation, 10 blocks of 250,000 m³ each were defined). The number of blocks was defined arbitrarily at 10 for all scenarios, a number neither too small nor too big, to reflect the procurement areas capacity in the region that inspired our study.

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_l x_y^{spl} \leq n_y Q_y \quad \forall y \in Y \quad (16)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p x_y^{spl} \leq n_y v^l Q_y^l \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (17)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p x_y^{spl} \geq \frac{v^l}{2 * \sum_l v^l} * \sum_{s \in SPE} \sum_p x_y^{spl} \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (18)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_l x_m^{spl} \leq Q_m \quad \forall m \in M \quad (19)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p x_m^{spl} \leq v^l Q_m^l \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (20)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p x_m^{spl} \geq \frac{v^l}{2 * \sum_l v^l} * \sum_{s \in SPDV} \sum_p x_m^{spl} \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (21)$$

Constraints (16) and (17) establish sorting capacity limits for the entire horizon and per period for the sort yard while constraints from group (18) establish a minimum threshold of sorting to reach at the yard to ensure a certain level of activity throughout the horizon. Constraints (19) to (21) do the same for production at the mills.

$$\sum_r (W_b^r \mu^r W^{rt} x^{rl}) \leq v^l \beta^l x_b^{lt} \quad \forall b \in B, l \in L^+, t \in T \quad (22)$$

$$\sum_b x_b^{lt} \leq \Omega^l \quad \forall l \in L^+, t \in T \quad (23)$$

$$q_{ij}^{plt} \leq x_{ij}^{plt} E^t \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (24)$$

$$o^p q_{ij}^{plt} \leq x_{ij}^{plt} Q_{ij}^{lt} \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (25)$$

$$o^p q_{ij}^{plt} \geq \frac{x_{ij}^{plt} Q_{ij}^{lt}}{2} \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_p x_{ij}^{plt} = \sum_r \eta_{ij}^{rt} x^{rl} \quad \forall i \in O, j \in D, l \in L^+, t \in T \quad (27)$$

$$\sum_i x_{ic}^{pl} \leq d_c^{pl} \quad \forall c \in C^+, p \in PDV, l \in L^+ \quad (28)$$

Constraints from group (22) ensure that the fleet of vehicles of each type has the time to achieve all the routes that were selected. Constraints from group (23) guarantee that the sum of trucks of type t assigned to different bases is smaller than or equal to the fleet size of this same truck type. Constraints from group (24) guarantee that there will be enough space for each truck fleet to deliver the quantities that have been assigned to them.

Constraints from group (25) do the same regarding the weight capacity of the vehicles. Constraints from group (26) ensure that trucks being selected for deliveries will always be at least half full. Constraints from group (27) ensure that the number of deliveries per combinations of origin-destination pairs and truck type (ODT combinations) is equal to the number of times these combinations are present in the selected routes. Constraints from group (28) specify that we cannot sell more units of a product than the market demand for a given period.

$$\frac{x_f^p}{Q_f^p} = \frac{\sum_{p \in MP} \sum_l x_f^{pl}}{Q_f} \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (29)$$

$$\sum_{j \in D} x_{fj}^p = x_f^p \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (30)$$

$$\sum_f x_{fj}^p \geq \sum_c \sum_t x_{jc}^{pl} + \sum_s \sum_t x_j^{spl} \quad \forall j \in D, p \in PR \quad (31)$$

Constraints from group (29) ensure that there is consistency between the level of harvesting of each forest site and the sum of logs originating from a given forest site that is assigned to each mill. Constraints from group (30) ensure that the sum of logs from a forest site assigned to different mills is equal to the number of such logs that are available, considering the level of harvesting. Constraints from group (31) specify that the sum of logs assigned to a site must be higher than or equal to the sum of logs that was “sold” (at a loss) or transformed at that same site.

$$z_y \in \{0;1\} \quad \forall y \in Y, f \in F \quad (32)$$

$$I_i^{pl}, x_f^p, x_i^{spl}, q_{ij}^{pl}, x_{ij}^{pl}, x^{rl}, x_{fj}^p, x_{ic}^{pl}, x_f^p, x_b^{lt}, n_y, \bar{\mathfrak{S}}_i^{spl} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, m \in M, f \in F, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T, y \in Y, c \in C \quad (33)$$

Constraints from group (32) ensure that the variables related to the opening and use of a potential sort yard site are defined as binaries. For this article, we have decided to compare scenarios with one or no site selected. Finally, the group of constraints (33) ensures that all variables and invariants are non-negative.

In Phase 2, the same objective function as well as the same constraints are once again used, except that constraints from groups (18) to (21) are replaced with constraints (34) and (35).

Specific constraints for Phase 2

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_a x_y^{spla} \geq v^l Threshold_y \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (34)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_a x_m^{spla} \geq v^l Threshold_m \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (35)$$

The right-hand side of the equations has been replaced by the parameter $Threshold_y$, which was obtained from results of Phase 1. For each mill as well as for the yard, the total amount of production (or sorting for the yard) was divided by the total number of months for the time horizon (2 years = 24 months). This number was then divided by two to obtain the minimum amount of production or sorting that each mill or yard must reach for a given month.

3.4.2 Route generation

In the model, we assumed that trucks carry only one product at a time. Routes must be generated before the optimization takes place. This is done through a procedure based on the MaxTour algorithm presented by Gingras *et al.* (2007), itself inspired by the heuristic developed by Clarke and Wright (1964). We consider an origin (O) as a business unit delivering a product and a destination (D) as the point of delivery. The OD pair links the origin to the destination. Four different types of trucks are considered, three carrying regular-sized loads and one carrying over-sized loads. Trucks for over-sized loads are limited to forest-to-sort-yard roads, while b-trains travel only from yard-to-mill and from

mill-to-mill. First, each OD pair is combined with valid truck types to create ODT combinations. Then, each ODT combination is associated to every terminal to find the best ODT-terminal combinations. This becomes a series of one-delivery routes. Only routes with one delivery can be “merged” with other deliveries to form routes with two deliveries. This is done progressively to reduce the time and distance travelled. For each generated route, we compare the cost of the route with the sum of the costs for the two deliveries of that route if they were made separately. This process is done in an Excel file before the optimization itself takes place (Routing preprocessing, see Figure 3.1). Once routes are generated, they are copied into an Access file. The OPL Studio software reads into this file to extract the model’s inputs (amongst them are the valid routes) which are then submitted to CPLEX for resolution.

Every route leading to a certain saving while not exceeding a maximum driving time (i.e., 14 hours in Quebec) is selected. After running the model numerous times, it was found that routes containing three or four delivery routes were almost never selected by the solver. It was therefore decided to generate routes with only one or two deliveries to limit the resolution time. We specified that no OD pair can be used more than once in a route to avoid cycling patterns. As mentioned earlier, each route has a predetermined base or vehicle terminal b , as well as a vehicle of type t . This information is used by the OPL software to determine the value of the parameters W^t and W_b^t . Depending on the complexity of the scenario being tested, we were able to generate between 2400 and 3600 different routes with backhauling (and between 82 and 150 routes with empty returns).

Figure 3.5 illustrates how we calculated the gain obtained when a segment was merged with a pre-existing route. Route A starts from one of the pulp and paper mills. The truck then goes to the forest site to pick up wood that is then delivered to the mill, travelling 106 km twice for a total of 212 km. Route B starts at the yard. The truck travels 34 km and delivers wood to the sawmill. There, it picks up wood chips and delivers them to the pulp and paper mill, traveling 50 km. It then travels back empty 16 km to its base (the yard). The distance for route B is 100 km, for a total of 312 km for both routes. The merged route

follows the same path as route B, up to the point where it reaches the pulp and paper mill. It then travels empty 98 km to the forest site, to pick up the wood that was harvested there. The wood is delivered to the other pulp and paper mill, 106 km to the south. It then goes to the sort yard, which is only 2 km away. The total distance traveled is 290 km for a gain of $312 - 290 = 22$ km. The saving is 7.1% ($22/312$).

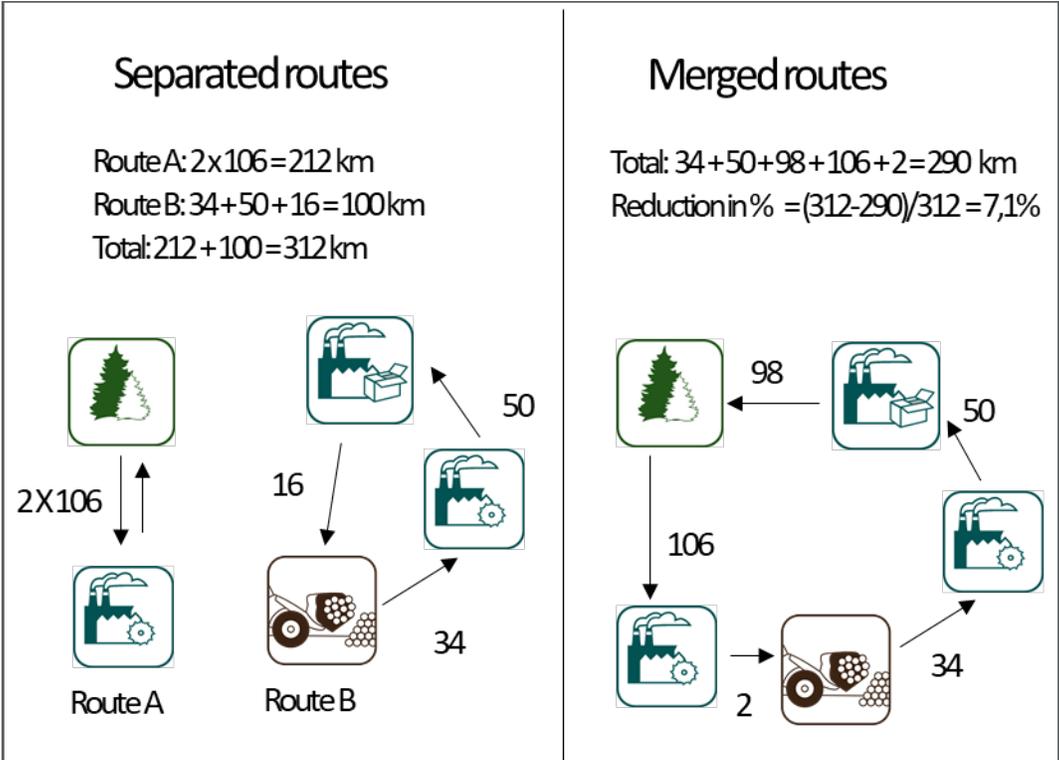


Figure 3.5: Routing generation. Numbers represent km between network nodes

3.5 Experimentation and analysis

3.5.1 Experimentation

When solving complex problems, it is considered very important to do a thorough validation of the model developed (Tardif *et al.* 2010; Landry *et al.* 1983). We therefore validated the model by making sure that all the constraints considered were respected for multiple instances. We also verified that all the costs as well as the revenues included in the

model were compiled accurately. An Excel file encompassing the results of each resolution was built for that purpose.

Once the model was validated, we tested four scenarios based on the presence or absence of a sort yard as well as the use of routing (combining multiple deliveries vs one delivery at a time). After obtaining results for a base instance, 56 other instances were tested. They involved different modifications regarding transportation costs, distances to forest sites, the number of trucks delivering oversized loads, and the sorting costs. A sensitivity analysis was conducted to identify the parameters that had the greatest impact on the profitability of the logistic center.

3.5.2 Base instance

The model has been modeled via the OPL Studio software and solved using the CPLEX solver (version 12.6.2) with default parameters. A standard PC with a 2.6 GHz and 8.0 GB of RAM was used. The total resolution times vary between 30 and 45 minutes for the scenario with no sort yard or routing, and around 90 minutes to 3 hours for the scenario with both a yard and routing. Resolution times are significantly longer for the second phase than for the first (by a ratio of around 4 to 1).

Table 3.1: Profits by scenario

Sorting	Transportation	
	<i>No Routing</i>	<i>Routing</i>
<i>No Yard</i>	\$ 46,209,995	\$ 47,917,187
<i>Sort Yard</i>	\$ 48,098,832	\$ 49,536,769

The results of the base instance (Table 3.1) show a continuing profit growth from one scenario to another. The total profit for the forest products supply chain is \$ 46,209,995 in the base scenario (neither sort yard nor routing). The profit increases to \$ 47,917,187 when routing is used alone. The profit rises to \$ 48,098,832 when a sort yard is introduced

without the use of routing. The highest profit value, i.e. \$ 49,536,769, is obtained when both a sort yard and routing are used at the same time. All amounts presented are in Canadian dollars. Since, profits represent a difference rather than a sum, they tend to be an improper point of comparison when they are presented in relations to total costs. This also applies to the amount of wood transiting by the sort yard. Therefore, we chose to use the amount of wood available for harvest in the entire forest network to ensure a stable point of reference. Hence, all comparisons are written in \$·available m⁻³.

Table 3.2 : Gains by scenario (in \$·avail. m⁻³)

Sorting	Transportation	
	<i>No Routing</i>	<i>Routing</i>
<i>No Sort Yard</i>	-	+ \$ 0.45
<i>Sort Yard</i>	+ \$ 0.50	+ \$ 0.88

If the gains are divided by the 3,788,268 m³ of wood available for harvesting (Table 3.2), it becomes possible to see that performing routing increases profits by \$ 0.45 per m³. Adding a sort yard raises profit by \$ 0.50·available m⁻³. Combining both the sort yard and routing leads to a gain of \$ 0.88·available m⁻³.

Table 3.3 : Variation in revenues and costs (in \$·avail. m⁻³)

Revenues/Costs	Routing	Sort Yard	Sort Yard & Routing
<i>Revenues</i>	\$ 0.03	\$-0.13	\$-0.11
<i>Harvesting/Fees</i>	\$ 0.01	\$-0.10	\$-0.07
<i>Sorting/Production</i>	\$ 0.00	\$-0.71	\$-0.49
<i>Transportation</i>	\$-0.44	\$-0.13	\$-0.71
<i>Yard Operations</i>	\$ -.--	\$ 0.32	\$ 0.28
<i>Inventory</i>	\$ 0.00	\$-0.01	\$-0.01
PROFITS	\$ 0.45	\$ 0.50	\$ 0.88

If we look more closely at how the gains occurred (Table 3.3), we can see that lower transportation costs account for almost all the variations taking place when routing is used alone (\$ -0.44·avail. m⁻³), followed by higher revenues (\$ 0.03\$·avail. m⁻³). Because these

numbers are rounded, they may not add up exactly to variations in profits. Lower sorting costs represent most of the variations in the scenario with a sort yard only (\$ 0.71·avail. m⁻³), followed by a decrease in transportation costs as well as lower revenues (both at \$ -0.13·avail. m⁻³). We also note lower harvesting costs and royalties (\$ -0.10·avail. m⁻³). This is essentially because of slight differences in the harvesting level for two forest sectors (stumpage fees almost stay the same). The sort yard costs (\$ 0.32·avail. m⁻³) to be put in place. In the scenario with both a sort yard and routing, transportation costs go down by \$ 0.71·avail. m⁻³ while sorting costs diminish by \$ 0.49·avail. m⁻³. There is also a small decrease in revenues (\$ 0.11·avail. m⁻³) while the yard itself generates extra costs of about \$ 0.28·avail. m⁻³. Harvesting costs also diminish by \$ 0.07·avail. m⁻³. Inventory costs stay basically the same for all scenarios.

**Table 3.4 : Variations in transportation costs
(in \$·avail. m⁻³)**

Transportation cost type	Routing	Sort Yard	Sort Yard & Routing
<i>Variable</i>	\$ 0.01	\$ 0.92	\$ 0.53
<i>Fixed</i>	\$ -0.45	\$ -1.05	\$ -1.24

In terms of transportation costs, we see in Table 3.4 that variable costs (which relate to the weight transported) are higher in all the scenarios with either routing or the sort yard, or both simultaneously. Fixed transportation costs, on the other hand, go down, especially when the sort yard is used. In fact, with the use of a yard, an important part of the volume is no longer delivered directly from the forest sites to the mills. As a result, the wood has to be transported over longer total distances, since the sum of the distances between forest sites and the yard and between the yard and the mills will likely exceed the distances between the forest sites and the mills.

If we look at the reductions in revenue when using a yard, they reveal that wood which was previously transformed and sold by sawmills is now shipped to one of the pulp and paper mills situated very near to the sort yard. This allows the model to reduce transportation

costs by using trucks transporting oversized loads. Once the wood is sorted, it is shipped to the adjacent mill at a negligible cost (within 2 km between the yard and the mill). This leads to an increase in the revenues generated through the sales of paper but an even greater reduction in the sales of sawmills. Because there is a greater reduction in transportation costs, there is an overall increase in total profits for the supply chain. Results obtained for the base instance show that the concept of a logistic center can be profitable for the modeled forest products supply chain by increasing profits by \$ 0.88·avail. m⁻³. This could represent up to \$ 1,663,774 in extra profit each year for the entire network.

In the next sub-section, we describe the results of a sensitivity analysis conducted on key parameters such as transportation costs, sorting costs, distances from the mills and the yard to forest sites, and the number of trucks carrying oversized loads.

3.5.3 Sensitivity analysis

Transportation and sorting costs appear to be the factors that most greatly influence the logistic center's profitability. To confirm these findings, we decided to isolate (1) transport and (2) sorting costs at the yard, (3) distances from the forest sites, and (4) the number of oversized trucks, and then to test the impact their variation may have on profits. We use the values of these parameters in the base instance and modify them to observe the effect such variations may have on total profits. Transportation costs and distances to forests vary from -50% to +50% of their values in the base instance with intervals of 10%. Sorting costs at the yard in the base instance represent 85% of sorting costs at forest sites. We observe the effects of making them vary between 50% and 100% of sorting at forest sites (at intervals of 5%). As for trucks transporting oversize loads, we verify the results when their fleet size varies between 0 and 25.

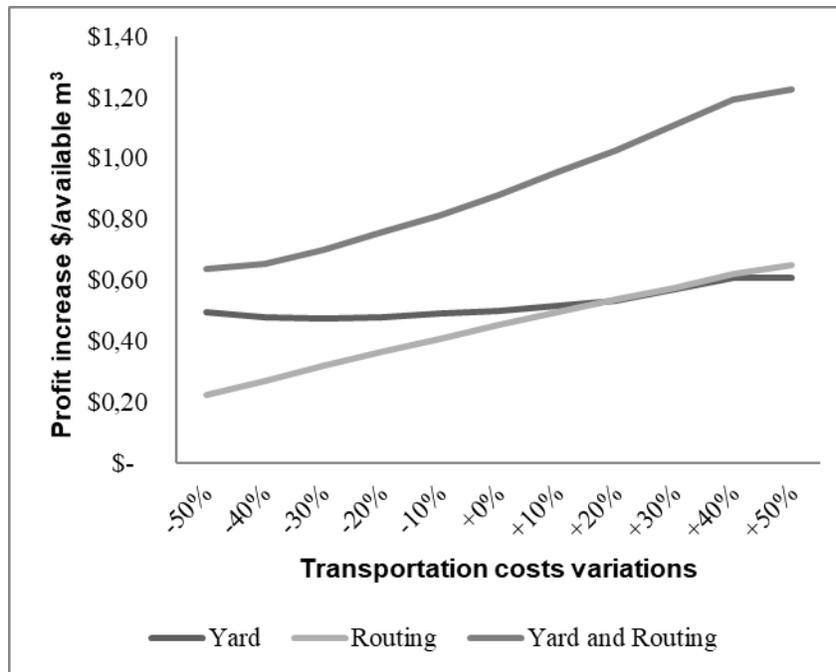


Figure 3.6: Evolution of profit increases relative to variations in transportation costs

In regards to transportation costs variations, higher transportation costs bring smaller profits for all four scenarios. However, as we can see in Figure 3.6 an increase of this cost seems to have a positive impact on the gains that the sort yard brings when it is coupled with the use of routing. The reason for this counterintuitive result is that the presence of the yard allows a greater use of oversized trucks, which coupled with the use of routing partially compensates for the rise in transportation costs. This ultimately leads to a bigger gap between the profit obtained in the base scenario and the scenario where only a yard is used, as profits for this scenario fall less rapidly. The same pattern can be observed when the sort yard is used alone, although variations are much smaller. The gains when only routing is used are more constant, as the use of routing alone becomes more profitable than the use of only the yard when transportation costs are increased by 20% or more.

Another explanation for these results is the evolution of revenues for the different scenarios in relation to higher transportation costs. As these costs rise, revenues tend to fall in all scenarios, but more sharply when neither a yard nor routing are used. The reason is that

some forest sectors become relatively less profitable and see their harvesting level decline. Again, the use of a yard and/or routing can partially mitigate this pattern.

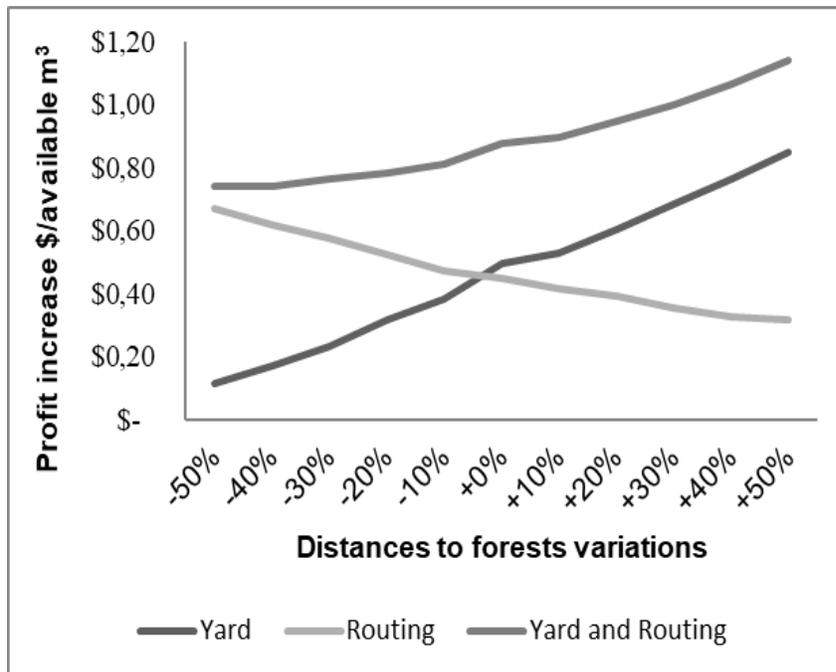


Figure 3.7: Evolution of profit increases relative to variations in the distances to forests sites

If we look at Figure 3.7, which presents the variations of distances between the forest sites and the rest of the supply chain, we can see that higher distances tend to make the use of a yard more profitable when coupled with routing. This trend is even more pronounced when it is used alone. The same pattern that we observed when transportation costs rise is also at play here. The use of routing alone is, however, progressively less interesting with higher distances to forest sites. As distances increase, it becomes more and more difficult to combine different deliveries together while respecting the legal driving time limit imposed in the Province of Quebec (14 hours). For instance, we could generate 2,483 routes when distances to forests sites were decreased by 50%, but only 896 when they were increased by the same percentage. This represents a decline of 64% in the number of routes generated for the scenario where routing is used alone. The same pattern can be observed in the scenario with both a sort yard and the use of routing (4,954 to 2,075 routes for a decline of 58%).

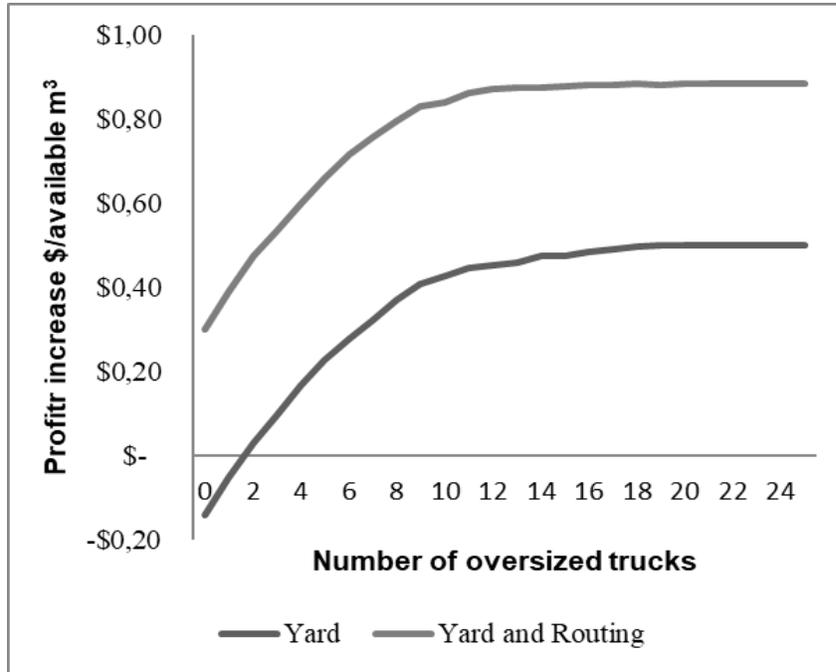


Figure 3.8: Evolution of profit increases relative to variations in the number of oversize trucks

Figure 3.8 shows the effect of using an increasing number of oversized trucks. This parameter seems to have an important effect on the scenario with a sort yard and the use of routing, up to approximately 14 trucks (with a peak in profit increase of $\$ 0.88 \cdot m^{-3}$). When only a sort yard is considered, the effect reaches a plateau at 18 trucks (with a gain of $\$ 0.50$, as shown in Figure 3.8). Since oversized trucks cannot be used without the presence of the sort yard, we did not include the scenario where only routing is used in the graph.

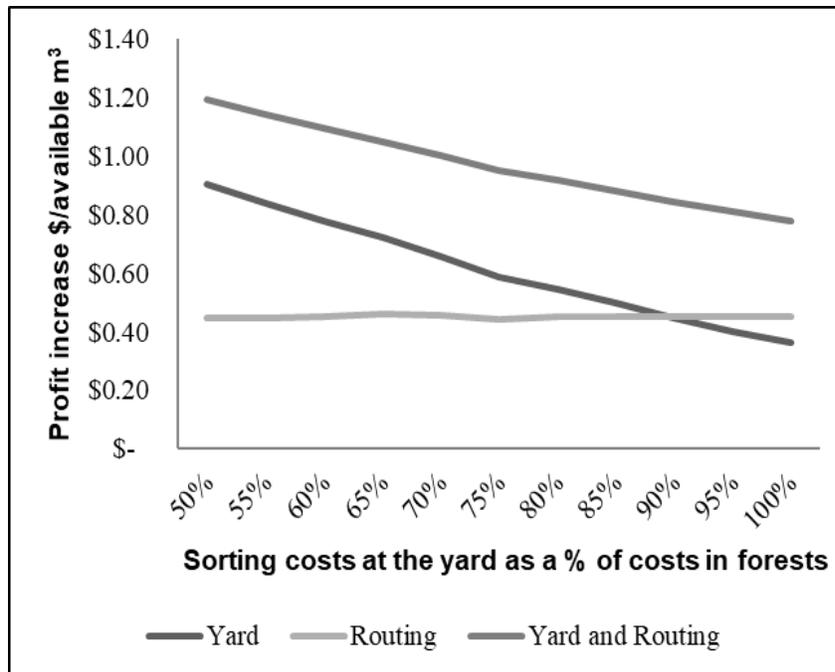


Figure 3.9: Evolution of profit increases relative to variations in sorting costs at the yard

Figure 3.9 highlights the influence of sorting costs. Even when sorting costs at the yard are the same as at the forest sites, the yard remains profitable. Furthermore, the gains generated when both a sort yard and routing are used simultaneously tend to decrease more moderately with an increase of sorting costs at the yard. The proportion of sorting costs at the yard in comparison to sorting costs at forest sites has been fixed at 85% for the base instance. This approximation was calculated based on data found in Favreau (1995).

3.5.4 Statistical analysis

We also conducted a linear regression with Minitab 18 to establish whether there is a significant correlation between the profit improvement of the scenarios with a sorting and/or the use of routing and the four parameters introduced in the previous section.

In the regression formula below, y_i represents the variation of profits obtained in scenario i and β_{ni} represents the regression coefficients for the independent variables. The independent variables refer to the parameters tested in the sensitivity analysis, namely:

x_{1i} : Variation of distances to forest sites in scenario i .

x_{2i} : Variation of transportation costs in scenario i .

x_{3i} : Variation of sorting costs at the yard in scenario i .

x_{4i} : Variation in the number of oversized trucks in scenario i .

The regression formula is formulated as follows:

$$y_i = \beta_{0i} + \beta_{1i}x_{1i} + \beta_{2i}x_{2i} + \beta_{3i}x_{3i} + \beta_{4i}x_{4i}$$

Results obtained from the regression are shown in Table 3.5. They reveal that the R^2 is around 85% when the yard is used alone or combined with routing, while it goes up to 98% when only routing is used. All the p-value for the parameters are below 0.05, except for transportation costs in the scenario with a sort yard and the use of routing (p-value of 0.109) as well as for sorting costs at the yard in the scenario with routing only (p-value of 0.300). Two of the three constants (the value of the regression when all the variables take a value of 0) also have a p-value above 0.05 (for the scenario with a yard only and both a yard and routing).

Table 3.5 : Results of a linear regression
Coefficients represent profit increases relative to 1% variations in comparison to the base scenario

Parameter/Scenario	Yard		Routing		Yard and Routing	
	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
Constant	0.0015 \$	0.407	0.0036 \$	0.000	0.0017 \$	0.3150
Distances to forests (x_{1i})	0.0074 \$	0.000	-0.0036 \$	0.000	0.0040 \$	0.0000
Transportation costs (x_{2i})	0.0014 \$	0.109	0.0043 \$	0.000	0.0064 \$	0.0000
Sorting costs at the yard (x_{3i})	-0.0104 \$	0.000	0.0003 \$	0.300	-0.0076 \$	0.0000
Number of oversized trucks (x_{4i})	0.0027 \$	0.000			0.0019 \$	0.0000
R^2	85.49%		98.25%		84.97%	

Every coefficient is measured in relation to a 1% increase in the value of the parameters in the base instance. When the influence of the number of oversized trucks was measured, the coefficient obtained was corrected by dividing it by $100/n$, n being the maximum number of oversized trucks in the scenario. The regression for the scenario with only a sort yard was conducted with 0 to 18 oversized trucks, since using supplementary trucks produces no more profit in this scenario. For the scenario with both the yard and routing, instances with up to 14 trucks were included. Since there are no oversized trucks or sort yard when routing is used alone, we did not include these factors in the linear regression for that scenario.

Sorting cost variations is the factor that has the greatest impact on profit variations. It has a coefficient of \$ -0.0104 in the scenario with only a sort yard. It goes up to \$ -0.0076 when both a yard and routing are used. This confirms the findings presented earlier. Transportation costs have the impact when both a yard and routing are considered (+ \$ 0.0064), followed by the scenario with routing (+ \$ 0.043). Distances to forest sites when a sort yard is used, with or without the use of routing, also have an important impact (with coefficients of + \$ 0.0074 and + \$ 0.0040). The number of oversized trucks has a more moderate influence when only a sort yard is used (+ \$ 0.0027), and an even smaller impact when both the yard and routing are deployed (+ \$ 0.0019). P-values for both coefficients are nevertheless equal to 0.00. Profit variations tend to be smaller in the scenario with only the use of routing.

For two of the four parameters, the most important coefficient was in the scenario with the use of a sort yard only. Nevertheless, the scenario with both a yard and the use of routing is the only one where the p-value of each parameter was equal to 0. Since routing implies longer consecutive driving time as deliveries are merged together, longer distances make it less advantageous, as many routes will exceed the driving time limit of 14 hours. The other exception is sorting costs at the yard. Since this parameter is strictly related to yard operations, it naturally has a greater impact on the profitability of using a yard alone.

3.6 Discussion and conclusion

3.6.1 Discussion

Using dedicated sort yards is not generalized in the industry, which raises the question of the necessary conditions for its profitability. Results found in this study highlighted that lower sorting costs at the yard were the most important factor in making a sort yard more profitable. As transportation costs and distances to forest sites increase, the use of a yard can also lead to higher revenues, as it makes the exploitation of some of the forest sites less costly and therefore more profitable. Another important benefit of such a center could be the reduction of transportation costs, by using oversized trucks and b-trains as well as routing procedures.

Regarding the influence of the number of oversize trucks available, each vehicle in the fleet considered has 325 hours available each month to deliver the wood. This explains why adding trucks transporting oversized loads contributes to increasing the profitability of using the yard and routing. However, once a fleet is big enough to have sufficient time to make deliveries optimally, supplementary vehicles no longer add new possibilities for extra profits. From Figure 3.8, we can see that profit increases level out with 14 trucks when both the yard and routing are used, while they peak at 18 trucks when the yard is used alone

3.6.2 Conclusion

The main objective of this paper was to identify the parameters having the greatest influence on the profitability of a logistic center comprising both a dedicated sort yard and the use of routing procedures. Results showed that a logistic center could procure a profit increase of \$ 0.88·avail. m⁻³ to the forest products supply chain considered. Moreover, we have demonstrated through a linear regression that there exists a significant correlation between all the parameters considered in the analysis and the increase in profit obtained for all the scenarios where both a sort yard and routing are used. We have established that for the supply chain under investigation, sorting costs at the yard and distances to forests have the greatest influence on the profitability of the logistic center, followed by transportation

costs. The model could also be used to compare other alternatives, for example the expansion of one of the mills, the influence of spatial factors or other elements such as the error rates in the sorting processes. These scenarios, however, are beyond the scope of this paper aiming at identifying the parameters having the highest impact on the profitability of a logistic center.

Our results have been obtained for a specific supply chain. It would be interesting to measure the profitability of this type of logistic center with other sort yard locations and other supply chain configurations. Such research, combined with the results of this study, would be a very valuable tool to guide forest products companies considering the possibility of building such a logistic center.

3.7 Acknowledgements

The authors would like to thank the FORAC Research Consortium and its partners. Our gratitude goes as well to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) who provided funding for this research through the Discovery grant (RGPIN/203193-2013) and the Collaborative Research and Development grant (RGPIN/105511-2013).

Chapitre 4

Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network

Ce chapitre présente un article intitulé « Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network ». Il fut soumis et accepté à la revue *Canadian Journal of Forest Research*. Les tableaux, les figures ainsi que les expressions mathématiques du modèle furent renumérotés pour tenir compte de leur insertion dans l'ensemble de cette thèse. Certaines précisions furent apportées, notamment concernant l'interaction entre le centre et le réseau environnant. Les auteurs sont François Sarrazin, Luc LeBel et Nadia Lehoux.

Résumé

Les défis récents auxquels a fait face l'industrie forestière en Amérique du Nord l'ont amenée à revoir plusieurs opérations majeures. Dans un tel contexte, la mise en place de centres logistiques pourrait donc aider à assurer une allocation plus efficace de la matière ligneuse et à réduire les coûts de triage et de transport. Cet article vise à mieux comprendre l'interaction entre les centres logistiques forestiers et un réseau forestier complexe tout en explorant l'environnement d'affaires favorisant l'utilisation d'une telle structure. Un modèle de maximisation des profits est proposé et appliqué pour un cas d'étude dans la région de la Mauricie au Québec, Canada. Au total, 18 groupes de scénarios ont été testés, fondés sur l'utilisation d'une cour de triage et d'un transport de retour. Les résultats démontrent que le centre logistique déjà en activité fait augmenter le profit de 0,52 \$ pour chaque mètre cube de bois disponible pour la récolte (plus de 2 580 411 m³ par an) dans le réseau à l'étude (1,4 M\$ par an). Une analyse de sensibilité a aussi mis en évidence que des prix et des taux d'erreur de triage plus élevés ont un impact important sur la rentabilité des centres logistiques.

Mots clés : centres logistiques, réseau forestier, retours en charge, cours de triage, gestion et design de chaînes d'approvisionnement.

Abstract

The challenges faced recently by the North American forest products industry have forced it to review many of its key operations. Implementing logistics centers for such a context may therefore help in allocating the wood fibre more efficiently and in reducing sorting and transportation costs. This paper aims to better understand the interaction between a forest logistics center and a complex forest network while exploring the business environment favoring the use of such a structure. A profit maximization model is proposed and applied to case study in the Mauricie region in Quebec, Canada. A total of 18 groups of scenarios are tested, based on the use of a sort yard and of backhauling. Results show that a logistics center already in operation adds \$ 0.52 in profits for each cubic metre of wood available for harvest (over 2 580 411 m³ per year) for the network under study (\$ 1.4 million annually). A sensitivity analysis also highlights that higher prices and sorting error rates have the greatest impact on the logistics center's profitability.

Key words: logistics centers, forest network, backhauling, sorting yards, supply chain management and design.

4.1 Introduction

The forest products industry in North America has been facing important challenges in the past few years with the housing crisis of 2008-2009 and the decline of the pulp and paper sector (Turkel 2017, Marowits 2010). Demand for certain products, such as lumber, has recovered but for others, the decline continues. Maximizing value from mixed-natural forest stands is important, as the logs harvested from these areas have a large range of values and are transformed by mills with very different processing capacities. In addition, in Canada, harvesting sites can be a long distance from the plant and distributed over different areas. Hence, it is hypothesized that logistics centers in the forest sector could help in allocating efficiently the wood fibre to the right users while reducing sorting and transportation costs. For the rest of this article, we shall refer to logistics centers as the simultaneous use of specific log sorting yards and transportation coordination.

Some of the conditions for the success of a forest logistics center are low sorting errors (Sessions *et al.* 2005) and access to specific truck configurations (Chan *et al.* 2009). Nevertheless, there exists no consensus regarding the profitability of such structures or a clear indication of the key factors defining their benefits. In addition, the interaction between forest logistics centers and their business environment are not often studied for a complex network. The goals of this paper are therefore to better understand the interaction between a logistics center and a forest network encompassing different mills and to identify the business environment that would favor the use of such a structure.

Data furnished by companies located in the Mauricie region in the Province of Quebec (Canada) are considered in this study. This network processes a large diversity of wood species. A sort yard is already in operation within the network, but it has a limited capacity and it only sorts hardwood. Furthermore, the location of this yard seems to be on the periphery of the network's center of gravity. This leads us to postulate that increased benefits are possible if a proper logistics center was optimally positioned in relation to the species and locations of mills in that network. This paper therefore also aims to identify the factors that have the greatest impact on the profitability of such a center in this context.

Eight network configurations with four different potential sort yards were tested, along with a scenario without a sort yard to establish a comparison point and measure their profitability.

In the current scenario, the existing yard in operation in the northeastern part of the region was found to provide an increase in profit of \$ 0.52 m⁻³ (Canadian dollars throughout chapter) over all of the wood available for harvest in the region (2 580 411 m³ annually) when compared with a scenario with no yard being used. The addition of a second sort yard more to the south and next to a softwood sawmill led to a profit improvement of \$ 0.22 m⁻³ for a total of \$ 0.74 m⁻³. The use of backhauling brings an extra gain of between \$ 0.12 and \$ 0.20 m⁻³, depending on the network configuration. The effect of five factors on the profitability of the proposed center was also explored: fuel costs, loading and unloading costs, sorting error rates, level of stumpage fees (royalties paid for wood use), and prices. Three network configurations, each with or without the possibility of backhauling, were selected to conduct a sensitivity analysis. Results showed that higher prices followed by higher sorting error rates (for sorting done at the landing or the mills), and lower levels of loading costs and stumpage fees can increase the positive effect of sort yards. This result can help members of the forest industry to make better decisions regarding the implementation of a logistics center in a given region. This paper also contributes to the academic research by describing the dynamics of such a center in a complex network while proposing a profit maximization model that takes into consideration an extensive number of costs and factors as well as the effect of age on the value and density of wood.

The rest of this paper is structured as follows: First, a look at the scientific literature pertaining to logistics centers and how they are used as sort yards in the forest industry is presented. Afterwards, a description of the methodology and the model are provided. The next section presents the results obtained, for both the base scenario and the sensitivity analysis. A conclusion ends the paper.

4.2 Literature review

Most papers dealing with the concept of a logistics or a cross-docking center are actually exploring the effects of consolidation/distribution centers located in the downstream part of a value-creation network. These centers are based largely on the principle of a transportation hub (Langevin and Riopel, 2005), which allows savings on transportation costs and delivery times by consolidating shipments (for an overview of distribution problems in logistics, see Yang (2013) and Olhager *et al.* (2014)).

Logistics centers in the forest sector take the form of sort yards. While products are consolidated in a typical distribution center, wood in a sort yard is separated into logs of different qualities, as the forest industry uses divergent processes (which produce sub or co-products). Sort yards are therefore used in the upstream part of the supply chain, contrary to logistics centers observed in other industries. They reduce sorting errors (Sessions *et al.* 2005) and optimize wood allocated to mills (Alam *et al.* 2014) to maximize value creation (Han *et al.* 2011) and allow for the use of oversized trucks (Sarrazin *et al.* 2018).

There are however three main drawbacks to using a dedicated sort yard : a rise in handling costs (Dramm *et al.* 2002), fewer direct deliveries to the mills (Sessions *et al.* 2005) and yard implementation costs (Chung *et al.* 2012). These can explain why sort yards are not always profitable. For instance, Sessions *et al.* (2005) found that using a sort yard was not advantageous in the region of British Columbia (Canada) where their study took place because of implementation costs and higher transportation and handling costs: however, they did not consider the cost of processing mis-sorted wood. For their parts, Shahi and Pulkki (2015) simulated a sort yard in northwestern Ontario that proved to be unprofitable in a network that had one product and one sawmill.

Among the studies in which the concept of a dedicated sort yard was found to be profitable, Keron (2012) developed a profit maximization model, that included harvesting, transportation, and sorting operations as well as the implementation of a sort yard. The author evaluated that implementing a yard would add around \$ 1 million in profits

annually. For their part, Abasian *et al.* (2017) presented a mixed-integer programming model to optimize a forest biomass value chain with the possibility of using backhauling and installing an in-transit log yard (with no sorting at the log yard) as well as a pellet mill. They integrated harvesting, sorting, production and transportation costs and showed a potential 23% profit improvement. Finally, Sarrazin *et al.* (2018) developed an optimization model encompassing all costs up to the transformation mill as well as the revenues while allowing for the use of backhauling. A sort yard brought a profit increase of \$ 0.50 per cubic metre of available wood. Through a sensitivity analysis, they established that four factors (transportation costs, distance to forest, number of oversized trucks, and the cost of sorting in the forests and at the mills), all had a significant influence on profit improvement: however, the fictitious network that they generated for experimentations could not measure the impact of many elements related to the real forest industry, such as the amount of wood that each mill can receive from individual forest management units.

To test the concept of a forest logistics center on a complex case and business environment, an optimization model representative of how the forest products industry operates in the Mauricie region of the province of Quebec was developed. This type of problem is a form of the multiple-commodity facilities location problem, which “involves the routing of several commodities to the sort yard locations and (...) transformation of the commodity” (Sessions and Paredes 1987). Because sort yards allow a greater value from the resource to be captured, a profit maximization model is utilized. The next section presents the methodology used and the model proposed to attain the objectives of this paper.

4.3 Methodology and Modelling

4.3.1 Methodology

As this paper aims to better understand the interaction between a forest logistics center and multiple differentiated mills using the same resource and to explore the business environment that would favor the use of such a structure, an optimization model was developed based on the one proposed by Sarrazin *et al.* (2018). This model integrates

harvesting, transportation, mill and yard capacity, and mill assignment constraints and was adapted to manage the complexity of a region-wide forest network. Most of the data required for the model (including potential sites) were collected from different forest products companies in the Mauricie region in the province of Quebec, Canada, as well as from scientific sources. The remaining data were estimated based on various hypotheses. The model was then run to identify the amount of profit generated by each scenario (addition of a single or several sorting sites). The model validation included a feedback loop in which the data and/or the model were modified until both admissible and realistic solutions were obtained. The methodology is presented in the following sequence of steps:

- mapping the forest network of the Mauricie region
- data collection
- model development
- model validation
- running the current scenario and the sensitivity analysis
- compiling and analyzing results
- statistical analysis

The effect of five factors on the profitability of different network configurations was tested in order to identify which ones have the most influence. The following configurations were tested: no yard (to establish a point of comparison), the current Vallières yard (which is the status quo scenario), and a combination of the Vallières yard and a new yard in Rivière-aux-Rats (the optimal configuration). The factors tested were fuel costs, the cost of loading and unloading trucks, sorting error rates (for sorting in the forest or the mills), stumpage fees and price levels. Error rates tested ranged between 1% and 10% for hardwood (a rate of 8% was used in the base scenario). Other factors varied from -50% to +50% of their base scenario value. A statistical analysis was later performed. Once again, each configuration was tested with and without backhauling.

Specifically, the forest products companies in the area provided distances, harvested volume, and government wood allocation to each of their mills for 2016. With these data, the harvesting capacity and the wood composition for each forest management unit (FMU) was defined, with a total of 5 160 822 m³ available for harvest over a 2 year horizon (twice the annual amount). The database includes nine wood species. The production capacity for each mill was determined using the sum of wood assignments from all forest zones. Four FMUs were included in our database (4151, 4251, 4351, and 4352). There are 11 mills in the network, including five sawmills, three pulp and paper mills, two veneer mills, and one panel mill. A map of the region, including possible sort yard locations, can be seen in Figure 4.1. Softwood dominates in the north, while hardwood and mixed stands are concentrated in the south. Wood is allocated to different business entities, which are quite differentiated in the hardwood sector. They nevertheless collaborate with one another, especially in the La Tuque area where several mills use the services of a sort yard (Vallières site). Forest companies in the region are searching for solutions to operate in a context of interdependence when procuring from mixed forest stands and to better coordinate value creation in their territory.

A confidential report from *FPInnovations FERIC* (Michaelsen and Tran, 2008) provided projections for the implementation costs of a sort yard at \$ 0.48 for each cubic metre processed at the site (with inflation). Wood chipping costs were deduced from Constantineau and Lacroix (2012). Conversion rates between products entering and exiting sorting processes, the most recent stumpage fees, harvesting costs, product prices, and harvesting capacities were calculated with the MÉRIS software used by the *Bureau de mise en marché des bois* (2018) of the government of Quebec, Canada. Wood density levels by species were obtained from Lemieux (2014) while their development over time was deduced by comparing the density for green and dry wood (Engineering Toolbox, 2018) and estimating the speed at which wood loses moisture (Partenariat Innovation-Forêt, 2015). Transportation costs were gathered from the *FPInterface*tm software developed by *FPInnovations* (*FPInnovations*, 2018). Finally, industry experts, including one of the

original developers of MÉRIS, were consulted to understand and organize the data, as well as to validate that the model adequately represented forest operations in the region.

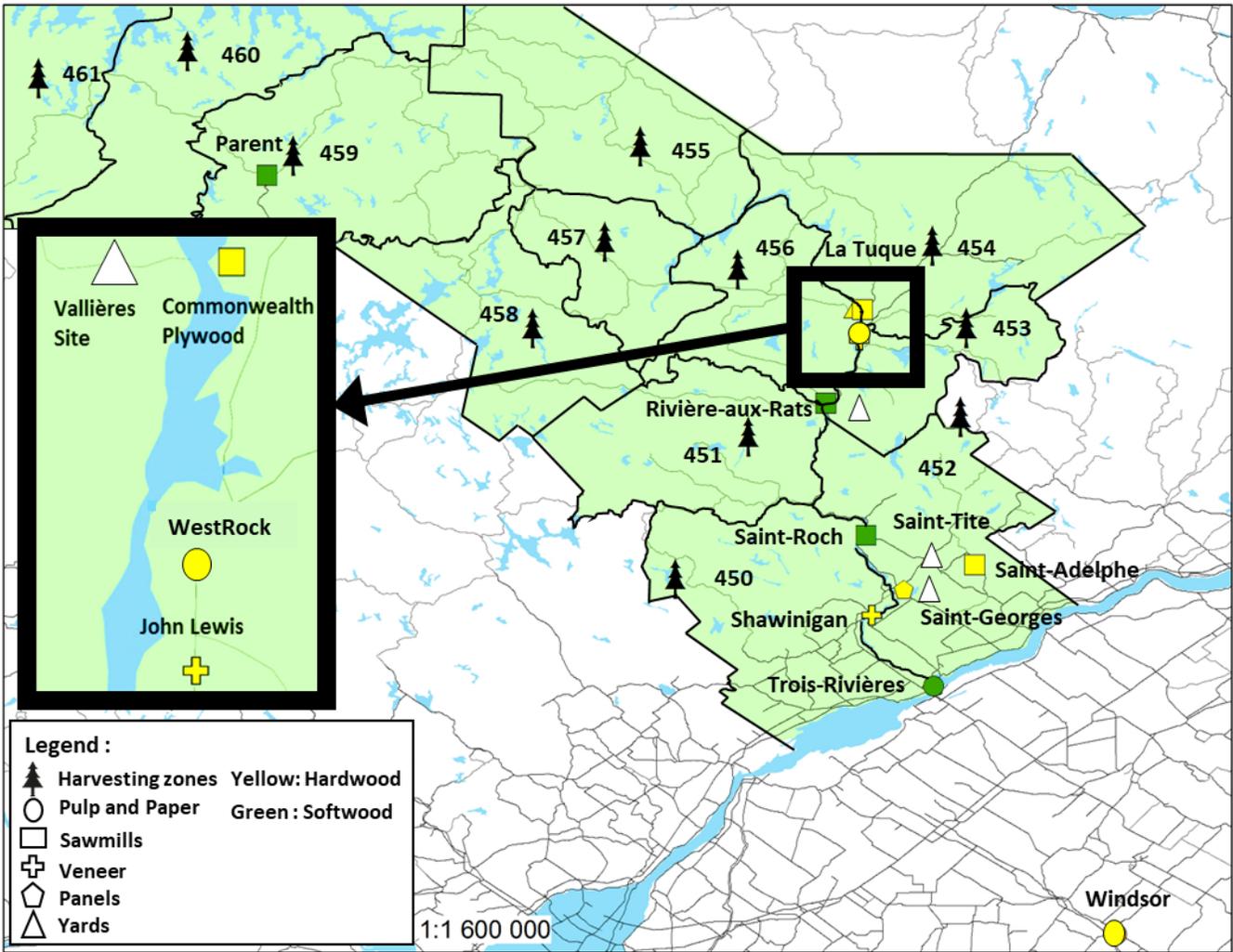


Figure 4.1: The Mauricie forest network with its 12 harvesting zones and 11 business units (mills) (Sources: © Gouvernement du Québec and Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs).

4.3.2 Case study – Mauricie region

The Mauricie region is located midway between Montreal and Québec City in the province of Quebec, Canada. It has some mixed forest stands, especially in the southern part of the region. It also has a functioning sort yard, called “Vallières” in the north, near La Tuque (Ville de La Tuque, 2017). It has an annual sorting capacity of 400 000 m³ and only

processes hardwood. Two of the softwood sawmills in the region (i.e. Parent and Rivière-aux-Rats) have access to oversized trucks, by being connected to the forest road network. According to industry managers in the region, B-Train trucks, which have lower costs than tractors with four-axle semi-trailers, are not adequate for hauling directly from harvesting sites. Therefore, sort yards also open the door to a wider use of B-Trains.

4.4 Modelling and route generation

To analyze the interaction of a logistics center with a complex forest network, and how its profitability is influenced by its business environment, we built a mathematical model adapted from the one proposed by Sarrazin *et al.* (2018). The model maximizes network profits, i.e., revenues minus harvesting, stumpage, transportation, sorting, production, inventory, and yard implementation costs. Decision variables concern quantities harvested transported, sorted, produced, inventoried, and sold for each raw material or product, site, truck type, time period, and client. A 2 year time horizon of eight periods was used.

4.4.1 Mathematical modelling

The following main elements are included in the model:

Sets

P^0 : set of products $p \in P^0$ comprising wood chips and waste.

PE, PS : set of products p entering ($p \in PE$), or exiting a process ($p \in PS$).

P : set of all products $p \in P$.

S : set of all transformation processes $s \in S$.

S_i^+ : set of all transformation processes $s \in S_i^+$ in which the site i is specialized (sorting for a yard, production for a mill).

F : set of forest harvesting sites $f \in F$.

Y : set of potential sites for a sort yard $y \in Y$.

M : set of mills $m \in M$.

N : set of all sites i and $j \in N$ such as $N = F \cup Y \cup M$.

O : set of all $i \in O$ origin nodes such as $O = N$.

D : set of all sites $j \in N$ where products can be delivered such as $D = Y \cup M$.

T : set of truck types $t \in T$.

L : set of time periods $l \in L$ for the time horizon (including $l = 0$, to define a starting inventory).

C : set of all clients $c \in C$.

R : set of $r \in R$ routes.

G : set of $g \in G$ wood families which can include several species (for instance maple, birch, and softwood).

U : set of $u \in U$ forest management units (FMU); each FMU includes three or four forest zones.

A : set of possible ages $a \in A$. (age can range from 0 to 8 periods, which is the length of the horizon).

Log, log^+, log^- : set of logs ($p \in log^+$), or wood that will later be sorted into logs ($p \in log^-$). $Log = log^+ \cup log^-$.

Parameters

E^t : volume capacity (in m^3) for a type t vehicle.

Q_{ij}^l : weight limit (in tons) for a delivery with a type t vehicle between origin i and destination j ($both \in N$) during period l .

Ω^t : fleet size of available type t vehicles.

β^t : available time (in hours) on the road per month for a type t vehicle during period l .

η_{ij}^{rt} : number of times that origin i , and destination j ($both \in N$) as well as a type t vehicle is en route r .

W^r : number of hours required to travel on route r with a type t vehicle.

σ^p, σ^{pa} : Metric tons per m^3 for product p without or with the age a respectively.

δ^{pl} : binary parameter determining if the weight limit applies to product p in period l or not.

c_{ij}^p : stumpage fee (in $\$ \cdot m^{-3}$) to be paid for product $p \in log^+$, harvested at forest site $i \in F$ and consumed by mill $j \in M$.

c_i^p : harvesting cost (in $\$ \cdot m^{-3}$) of product p at forest site $i \in F$.

c_i, c_i^+ : fixed cost (in $\$$) for setting up yard i (c_i) and installation cost for a sorting capacity block at yard i (c_i^+).

c_{ij}^{plt} : variable transportation cost (in $\$ \cdot m^{-3}$) of product p from site i to destination j ($both \in N$) during period l with truck type t .

c_i^s : sorting or production cost (in $\$ \cdot m^{-3}$) of using process s at site $i \in N$.

c_i^{pl} : inventory cost (in $\$ \cdot m^{-3}$) of product p at site $i \in N$ during period l .

c^r : fixed cost of route r .

V_{pc}, V_{pca} : value (in $\$$) of product p when sold to client c with or without the age a . As products age, they tend to lose value.

Q_i, Q_i^l : harvesting or process capacity for a capacity block at site i for the horizon (Q_i) or a period l (Q_i^l).

Q_i^+, Q_i^{l+} : extra capacity for the horizon (Q_i^+), or for a period (Q_i^{l+}), and independent of capacity blocks.

Q^l : harvesting capacity (in m^3) for period l for the entire network.

Q_i^p : estimated quantity (in m^3) of log p at forest site i . Used for the accounting of stumpage fees.

W_{ij}^g : amount of wood (in m^3) of group g , from FMU u guaranteed to mill j .

E^i : volume capacity or space limit for inventory (in m^3) during a given period for site $i \in N$.

\min_i, \max_i : Minimum or maximum number, respectively of capacity blocks that should be installed at yard or mill i (also serves as the minimal percentage of wood to be harvested at forest site). Buying a capacity block gives the right to sort or process a certain amount of wood (typically 250 000 m^3 for a sort yard).

g^{spp} : conversion rate between the quantity of products p and p' obtained in the sorting process s .

I^{\max} : last period of the time horizon.

v^{il} : parameter expressing the minimal amount of production or sorting that has to take place at a given site $i \in YUM$ during period l (represents a percentage of its own average production).

z_i : binary parameter equals to 1 if sort yard or production site $i \in YUM$ is active, 0 otherwise.
 θ_j^p : binary parameter equals to 1 if product p enters a process used at mill $j \in M$, 0 otherwise.

Variables

x_i^t : number of type t vehicles that operate from site $i \in YUM$ during period l .
 x^r : number of times that route r is used during period l .
 x_{ij}^{pl} : number of deliveries of product p from origin i to destination j (both $\in N$) during period l with a type t vehicle.
 $q_{ij}^{plt}, q_{ij}^{plat}$: quantity of products p delivered from origin i to destination j (both $\in N$) during period l with a type t vehicle without or with the age a respectively.
 $\mathfrak{S}_i^{spl}, \mathfrak{S}_i^{spla}$: quantity of products p extracted from process s at site $i \in N$ during period l without or with the age a respectively.
 x_i^{pl} : quantity of products p harvested at forest site $i \in N$ during period l .
 x_{ij}^p : quantity of product $p \in \log^+$ made of wood from forest $i \in F$ and assigned to mill j .
 x_i^{spl}, x_i^{spla} : quantity of products p treated by process s at site $i \in N$ during period l without or with the age a respectively.
 $x_{ic}^{pl}, x_{ic}^{p la}$: quantity of products p sold from site $i \in N$ to client c during period l without or with the age a respectively; to allow the system to eliminate nonprofitable wood, products can be sold virtually and for no revenue (under certain conditions).
 $I_i^{pl}, I_i^{p la}$: level of inventory of product p and at site $i \in N$ during period l without or with the age a respectively.
 n_i : number of capacity blocks of sorting or production processes installed at site $i \in YUM$.
 $Threshold_{il}$: Minimal amount of production or sorting that must be performed during period l at site $i \in YUM$.

Objective function and the different model constraints

Objective function: *Maximize*

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{c \in C} \sum_p \sum_l V^{pc} x_{ic}^{pl} - \sum_{i \in F} \sum_p \sum_l c_i^p x_i^{pl} - \sum_{i \in F} \sum_{j \in M} \sum_p c_{ij}^p x_{ij}^p - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_i c_i^s x_i^{spl} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_t c_{ij}^{plt} q_{ij}^{plt} - \sum_r \sum_l \sum_t c^r x^r - \sum_{i \in Y} c_i z_i - \sum_i c_i^+ n_i - \sum_i \sum_p \sum_l c_i^{pl} I_i^{pl} \end{aligned} \quad (36)$$

The objective function (36) maximizes profit, i.e., the sum of revenues from the sale of products minus costs related to harvesting, stumpage fees, sorting, production, transportation, yard implementation and inventory, subject to the following constraints:

Subject to:

$$Q_i * \min_i \leq \sum_p \sum_l x_i^{pl} \leq Q_i \quad \forall i \in F \quad (37)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p x_i^{pl} \leq Q^l \quad \forall l \in L | l \geq 1 \quad (38)$$

$$\sum_p I_i^{pl} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L | l \geq 1 \quad (39)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + x_i^{pl} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plt} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plt} - \sum_s x_i^{spl} - \sum_u x_{iu}^{pl} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L | l \geq 1 \quad (40)$$

$$I_i^{pl} \geq I_i^{pl'} \quad \forall i \in N, p \in P | l = l^{\max} \& l' = 0 \quad (41)$$

$$\mathfrak{S}_i^{spl} = \sum_{p' \in PE} g^{sp'p} x_i^{sp'l} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L^+, s \in S \quad (42)$$

$$\min_i \leq n_i \leq z_i \max_i \quad \forall i \in YUM \quad (43)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_l x_i^{spl} \leq n_i Q_i + Q_i^+ \quad \forall i \in YUM \quad (44)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{spl} \leq n_i Q_i^l + Q_i^{l+} \quad \forall l \in L, i \in YUM | l \geq 1 \quad (45)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{spl} \geq v^{il} \frac{Q_i^l}{\sum_l Q_i^l} * \sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{spl} \quad \forall i \in YUM, l \in L | l \geq 1 \quad (46)$$

$$Threshold_{il} = v^{il} \frac{Q_i^l}{\sum_l Q_i^l} * \sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{spl} \quad \forall i \in YUM, l \in L | l \geq 1 \quad (47)$$

$$\sum_r (W^r x^{rl}) \leq \beta^l x_i^{rl} \quad \forall i \in YUM, l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (48)$$

$$\sum_{i \in YUM} x_i^{lt} \leq \Omega^t \quad \forall l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (49)$$

$$\alpha^p q_{ij}^{plt} \leq \delta^{pl} x_{ij}^{plt} Q_{ij}^l + (1 - \delta^{pl}) x_{ij}^{plt} E^t \quad \forall i \in N, j \in YUM, p \in P, l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (50)$$

$$\sum_p x_{ij}^{plt} = \sum_r \eta_{ij}^r x^{rl} \quad \forall i \in N, j \in YUM, l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (51)$$

$$\frac{\sum_{j \in M} x_{ij}^p}{Q_i^p} = \frac{\sum_l \sum_p x_i^{pl}}{Q_i} \quad \forall i \in F, p \in P \quad (52)$$

$$\sum_{i \in F} x_{ij}^p \geq \sum_c \sum_l x_{jc}^{pl} + \sum_s \sum_l x_j^{spl} \quad \forall j \in YUM, p \in P \quad (53)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p \sum_l \sum_t q_{ij}^{plt} - \sum_s \sum_{p \setminus p \neq p} \sum_l \mathfrak{S}_i^{sp'l} - \sum_{j \setminus j \neq j} \sum_{p \setminus p \neq p} \sum_l \sum_t q_{jj}^{p'lt} \leq W_{ij}^g \quad \forall g \in G, j \in M, u \in U, p \in Log | \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& g_p = g \& u_f = u \& Q_j > 0 \& \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& \theta_j^{p'} = 0 \quad (54)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_l \sum_t q_{ij}^{plt} - \sum_s \sum_{p \setminus p \neq p} \sum_l \mathfrak{S}_j^{sp'l} - \sum_{j \setminus j \neq j} \sum_{p \setminus p \neq p} \sum_l \sum_t q_{jj}^{p'lt} \leq \sum_u W_{uj}^g \quad \forall g \in G, j \in M, p \in Log | \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& g_p = g \& u_f = u \& Q_j > 0 \& \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& \theta_j^{p'} = 0 \quad (55)$$

$$\sum_i x_{ic}^{pl} = 0 \quad \forall i \in YUM, l \in L | V^{pc} = 0 \& p \notin P^0 \& l \geq 1 \quad (56)$$

$$I_i^{pl}, x_i^{pl}, x_i^{spl}, q_{ij}^{pl}, x_{ij}^{pl}, x^{rl}, x_{ij}^p, x_{ic}^{pl}, x_i^p, x_i^l, n_i, \mathfrak{S}_i^{spl} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T \quad (57)$$

Constraint (37) establishes a harvesting capacity for the planning horizon and forces the system to harvest a minimal percentage of wood for each site (in this case, 90%). There is also a harvest limit for the whole network for each period (constraint 38). Constraint (39) represents an inventory capacity constraints for each site. Constraint (40) represents a flow conservation constraint for each site and product. In order to guarantee that products can always exit the network, raw materials and intermediary products can always be “sold” for no revenue to a virtual client. This can be justified for some intermediary products that have low value. Constraint (41) makes sure that the inventory for a product at a given site in the last period will always be equal to or higher than at the beginning of the horizon. This avoids having a starting inventory that could be sold without involving costs. Constraint (42) establishes the relationship between the quantities of products entering and exiting any given sorting or production process. Constraint (43) establishes a minimum and maximum number of capacity blocks that can be used by a site (in the case study, 10 blocks of 250 000 m³ were defined for each sort yard). Capacity blocks should not be confused with harvesting blocks which are geographical areas with a certain harvesting capacity. Constraint (44) establishes global sorting or production capacity limits for each yard and mill. Constraint (45) does the same for each period. Constraint (46) establishes a threshold of sorting or production to reach at the yards or mills to limit variations over time. Constraint (47) defines $Threshold_{it}$, which will be used later as a parameter to resolve the model again.

Constraint (48) ensures that the fleet of vehicles has sufficient time to achieve the routes being selected. Constraint (49) guarantees that the sum of trucks assigned to different bases is within the fleet size. Constraint (50) ensures that there will be enough volume or mass capacity for each truck to deliver the wood it was assigned to carry. Constraint (51) ensures that the number of deliveries per combinations of origin, destination, and truck type matches the number of times that these combinations are in the selected routes. Constraint (52) ensures that there is consistency between the level of harvesting and the sum of logs

originating from a forest site assigned to a mill. Constraint (53) specifies that the sum of logs assigned to a site must be higher than or equal to the sum of logs that was “sold” (for no revenue) or transformed at that same site. Constraints (54) and (55) guarantee that mills do not receive more than what they are entitled from each FMU and each product. Constraint (56) ensures that sort yards and mills will not eliminate intermediary products (only forest sites can do this). Variables are defined in constraint (57).

To limit the size of the problem, the model was first solved without considering the effect of age on the value and the density of the products. Groups of processes that did not have at least one process used in this first solution, were next removed from the model. The model was then solved again, this time considering the impact of age on the network. Constraint (39) concerning inventory capacity was replaced by constraint (58). Constraint (40) concerning flow conservation was replaced by constraints (59) and (60). Constraint (47) was also replaced with constraint (61) to use a predetermined level of production or sorting and limit resolution time. Finally, the objective function as well as constraints (41), (42), (44), (45), (46), (50), (53), (54), (55), (56) and (57) were modified with the age factor being added to the following parameters or variables : o^{pa} , V^{pca} , q_{ij}^{plat} , x_i^{spla} , x_{ic}^{pla} , \mathfrak{S}_i^{spla} , and I_i^{pla} . Constraints (41), (42) and (56) were defined for $\forall a \in A$, while a summation over the age factor was added to all of these other constraints. There is also an age summation over the revenue, stumpage fee, variable transportation, sorting and inventory costs in the objective function.

$$E_i \geq \sum_a I_i^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L | l \geq 1 \quad (58)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A | l \& a \geq 1 \quad (59)$$

$$I_i^{pla} = x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A | l \geq 1, a = 0 \quad (60)$$

$$\sum_{s \in S_i^*} \sum_p \sum_a x_i^{spla} \geq Threshold_{il} \quad \forall i \in YUM, l \in L | l \geq 1 \quad (61)$$

4.4.2. Route generation

The general rule in the forest industry is to use full truck loads (FTL) with only one product being delivered at a time. As a result, a technique inspired by the MaxTour algorithm developed by Gingras *et al.* (2007) was applied to generate routes before the optimization takes place. This technique was itself an adaptation to FTL operations of the heuristic designed for less-than-truckload operations by Clarke and Wright (1964), where deliveries were merged together and where the most performing combinations were fed to the solver. In this way, a sizable number of delivery routes were generated. These routes respected the driving time limit of 14 hours while offering a certain cost saving as well as covering the entire network. We define a route as a sequence of one or more deliveries (from forest to yard, forest to mill or mill to mill). Each route starts from and ends at a vehicle depot or base.

4.5 Results

4.5.1 Experimentation – Base scenario

Each forest zone considered in the model represents an aggregation of harvesting sites. Mills with at least 10 000 m³ of annual capacity and a significant level of interaction with the rest of the network were included in the database. Four different sites were identified as potential locations for a sort yard. One of them, the Vallières site, is already in operation. The other sites are Rivière-aux-Rats, near a softwood sawmill, Saint-Georges, which is close to a hardwood panel mill, and Saint-Tite (where no mill is located). Oversize trucks have access to both Vallières and Rivière-aux-Rats. The possibility of enlarging the current Vallières yard (and allowing it to process softwood) was considered. The behavior of the network with no sort yard was analyzed. Profit improvement using backhauling was also measured for each configuration. Hence, 18 scenarios were tested. The model was implemented via the OPL Studio software. The total resolution time vary from 30 minutes to 1h, depending on the scenario with the CPLEX solver, version 12.6.2 (IBM 2019). We used a standard PC with a 3.4 GHz processor and 31.8 GB of RAM. Table 4.1 presents all base scenarios.

As expected, the scenario with no yard or backhauling posted the worst results with a profit of about \$ 1.8 million (Table 4.2). The configuration with two sort yards: one at the Vallières site and one in Rivière-aux-Rats gave the best results, with a profit of \$ 5.6 million (without backhauling). The amount of wood processed when the two sort yards were operated reached 1 291 485 m³. About 80% of the wood processed in the yards was hardwood (down to 50% in Rivière-aux-Rats). To have a stable point of comparison, the units used are dollars per available cubic metre, i.e., wood available for harvesting in the region over a two-year period.

Table 4.1: List of all instances

<i>Instance/Site/Backhauling</i>	<i>Vallières</i>	<i>Vallières with extra capacity</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Saint-Georges</i>	<i>Saint-Tite</i>	<i>Backhauling</i>
<i>No yard</i>						
<i>No yard & Backhauling</i>						✓
<i>Vallières</i>	✓					
<i>Vallières & Backhauling</i>	✓					✓
<i>Enlarged Vallières</i>		✓				
<i>Enlarged Vallières & Backhauling</i>		✓				✓
<i>Saint-Georges</i>				✓		
<i>Saint-Georges & Backhauling</i>				✓		✓
<i>Vallières & Saint-Georges</i>	✓			✓		
<i>Vallières & Saint-Georges & Backhauling</i>	✓			✓		✓
<i>Saint-Tite</i>					✓	
<i>Saint-Tite & Backhauling</i>					✓	✓
<i>Vallières & Saint-Tite</i>	✓				✓	
<i>Vallières & Saint-Tite & Backhauling</i>	✓				✓	✓
<i>Rivière-aux-Rats</i>			✓			
<i>Rivière-aux-Rats & Backhauling</i>			✓			✓
<i>Vallières & Rivière-aux-Rats</i>	✓		✓			
<i>Vallières & Rivière-aux-Rats & Backhauling</i>	✓		✓			✓

Table 4.2: Network profits and profit increases by scenario (in \$·avail. m⁻³)

<i>Sorting facility</i>	<i>Transportation</i>			
	<i>No Backhauling</i>		<i>Backhauling</i>	
	<i>Profit</i>	<i>Increase</i> <i>(\$·m⁻³)</i>	<i>Profit</i>	<i>Increase</i> <i>(\$·m⁻³)</i>
<i>No Yard</i>	\$ 1 836 091	-	\$ 2 449 736	+ \$ 0.12
<i>Saint-Georges only</i>	\$ 2 269 116	+ \$ 0.08	\$ 2 972 035	+ \$ 0.22
<i>Saint-Tite only</i>	\$ 2 293 304	+ \$ 0.09	\$ 3 020 082	+ \$ 0.23
<i>Current Vallières Yard</i>	\$ 4 496 029	+ \$ 0.52	\$ 5 526 066	+ \$ 0.71
<i>Vallières + Saint-Georges</i>	\$ 4 610 793	+ \$ 0.54	\$ 5 651 127	+ \$ 0.74
<i>Vallières + Saint-Tite</i>	\$ 4 611 193	+ \$ 0.54	\$ 5 659 824	+ \$ 0.74
<i>Rivières-aux-Rats only</i>	\$ 4 706 859	+ \$ 0.56	\$ 5 742 880	+ \$ 0.76
<i>Enlarged Vallières</i>	\$ 4 814 867	+ \$ 0.58	\$ 5 756 075	+ \$ 0.76
<i>Vallières + Rivière-aux-Rats</i>	\$ 5 646 198	+ \$ 0.74	\$ 6 457 161	+ \$ 0.90

Profit increases (measured in \$·m⁻³ processed at the yards without backhauling, see Table 4.3) stand between \$ 2.15 (Saint-Georges only) and \$ 3.32·m⁻³ with the current Vallières yard. It reaches \$ 2.95·m⁻³ when both Vallières and Rivière-aux-Rats are used. In that scenario, the two yards process fewer cubic metres (1 291 485) than when they were operated separately and not simultaneously (800 000 + 1 000 000 = 1 800 000 m³). This is because some of the wood is transferred from one yard to another as a new site is opened.

The Vallières site is performing better than Rivière-aux-Rats when it is allowed to process both softwood and hardwood and when both sites are allowed to have the same processing capacity. One reason for this is that Vallières is located near three hardwood mills while Rivière-aux-Rats is located near a softwood sawmill. Softwood has no sorting error rates. Since the three mills close to Vallières consume most of the wood it processes, they thereby largely cancel the “detour” effect brought by a sort yard (i.e. the fact that wood transiting through a yard is no longer shipped directly to the mills). These three hardwood mills also have no direct access to oversize trucks, while the Rivière-aux-Rats mill does¹⁰. For Rivière-aux-Rats, all of the wood processed is actually shipped to other mills (even the softwood), therefore making the “detour” more important. Also, in terms of Vallières’

¹⁰ Therefore, the Rivière-aux-Rats mill does not need its wood to transit by the sort yard to benefit from oversize truck deliveries, while the hardwood mills near the Vallières site do.

performance in $\$ \cdot m^{-3}$ actually processed at the yard when it is not expanded, its smaller capacity allows it to capture the most profitable wood to process.

Table 4.3: Profit increase per scenario ($\$ \cdot$ processed m^3)

Sorting	$\$ \cdot m^{-3}$	m^3 processed
<i>No Yard</i>	-	-
<i>Saint-Georges only</i>	\$ 2.15	201 403
<i>Saint-Tite only</i>	\$ 2.21	207 141
<i>Current Vallières Yard</i>	\$ 3.32	800 000
<i>Vallières + Saint-Georges</i>	\$ 2.79	993 565
<i>Vallières + Saint-Tite</i>	\$ 2.76	1 005 716
<i>Rivières-aux-Rats only</i>	\$ 2.87	1 000 000
<i>Enlarged Vallières</i>	\$ 2.29	1 300 000
<i>Vallières + Rivière-aux-Rats</i>	\$ 2.95	1 291 485

A closer look at the results of the base scenario (no backhauling, see Table 4.4) shows that the current Vallières yard brings both higher revenues ($\$ 2.10 \cdot \text{avail. } m^{-3}$) and higher costs ($\$ 1.58 \cdot m^{-3}$). As harvesting levels go up, this leads to more operations across the network (harvesting, stumpage, transportation, sorting, etc.). When a yard is added in Rivière-aux-Rats, revenues increase by $\$ 0.30 \cdot m^{-3}$ ($\$ 2.40 - \$ 2.10 = \$ 0.30 \cdot m^{-3}$) and sorting costs decrease by about $\$ 0.06 \cdot m^{-3}$ ($\$ 0.46 - \$ 0.40$).

Table 4.4: Increases in revenues and costs (in $\$ \cdot$ avail. m^{-3})

Revenues & Costs/Scenarios	Vallières	Vallières & Rivières-aux-Rats
Revenues	\$ 2.10	\$ 2.40
Cost	\$ 1.58	\$ 1.66
Harvesting/Stumpage	\$ 0.40	\$ 0.53
Sorting/Production	\$ 0.46	\$ 0.40
Transportation	\$ 0.66	\$ 0.63
Yard Implementation	\$ 0.07	\$ 0.12
Inventory	\$(0.01)	\$(0.01)
PROFITS	\$ 0.52	\$ 0.74

4.5.2 Backhauling analysis

The backhauling procedure allows combining two deliveries to reduce empty travel. It is seldom used in the Canadian forest industry, which means that trucks typically return to their point of origin empty. This raises the question of how much the use of backhauling could make the studied network more profitable. Increases in profit brought by backhauling are between \$ 0.12 and \$ 0.20 per available cubic metre. The most interesting options for backhauling tend to involve the Parent sawmill, located far from the others. In the most profitable route (used with an enlarged Vallières yard), the truck leaves the Vallières yard and goes to the 457-forest zone to pick up wood to be delivered to the Parent sawmill. The truck then picks up pulp and paper logs to be delivered to Trois-Rivières in the south. Around 35% of the costs (\$ 493 per trip) are saved by combining these deliveries for total savings of \$ 551 302 a year. Another good combination is to pair a delivery from the 457-forest zone to the Parent sawmill with a delivery from the nearby 459-forest zone to Vallières.

A dynamic effect was noted where the increase in profit obtained using backhauling was greater when a sort yard was used (by about 9-13%¹¹ - see Table 4.5). This is true to a lesser degree when the Rivière-aux-Rats site is combined with Vallières (down to 4% - see explanation below). We have identified two causes for this. First, the use of a sort yard allows the reduction of the average length of delivery routes by breaking down the flow of material between the harvesting areas and the production mills into several parts. This makes it easier for a given delivery route to respect the legal driving time limit of 14 hours in the Province of Quebec.¹² Most importantly, such a yard can serve both as an origin or a destination, therefore making it easier to reach important reductions in empty returns.

¹¹ The effect is calculated by dividing the profit improvement brought by the simultaneous use of sort yard(s) added to the network and the use of backhauling by the sum of the gain brought separately by the sort yard(s) and backhauling. The excess difference gives us a result above or below a ratio of 1. We then subtract 1 to the ratio to obtain a certain % representing the dynamic effect.

¹² For instance, in the scenario with the current Vallières yard, just for tractors with 4-axle semi-trailers, a total of 696 routes that could have allowed profit improvement were eliminated because they were too long.

Table 4.5: Dynamic effect for each sorting configuration

Sorting	No Backhauling Increase (\$·m⁻³)	Backhauling Increase (\$·m⁻³)	Dynamic effect
<i>No Yard</i>	-	+ \$ 0.12	-
<i>Saint-Georges only</i>	+ \$ 0.08	+ \$ 0.22	9%
<i>Saint-Tite only</i>	+ \$ 0.09	+ \$ 0.23	11%
<i>Current Vallières Yard</i>	+ \$ 0.52	+ \$ 0.71	13%
<i>Vallières + Saint-Georges</i>	+ \$ 0.54	+ \$ 0.74	13%
<i>Vallières + Saint-Tite</i>	+ \$ 0.54	+ \$ 0.74	13%
<i>Rivières-aux-Rats only</i>	+ \$ 0.56	+ \$ 0.76	12%
<i>Enlarged Vallières</i>	+ \$ 0.58	+ \$ 0.76	9%
<i>Vallières + Rivière-aux-Rats</i>	+ \$ 0.74	+ \$ 0.90	4%

In regards to backhauling, we can also observe that an enlarged Vallières site brings a slightly lower profit improvement than the one brought by Rivière-aux-Rats (without Vallières). Deliveries toward Rivière-aux-Rats are however more difficult to combine because it is located more to the south. For the harvesting zones which can use oversize trucks, distances to Rivière-aux-Rats are greater than those to Vallières. It is therefore more difficult to combine oversize deliveries to Rivière-aux-Rats than to Vallières. This effect is less obvious when the Rivière-aux-Rats site is the only one in operation than when it is operated in tandem with Vallières. The reason is that the majority of the wood which transits by Rivière-aux-Rats (without the Vallières site) is hardwood (71%). It tends to come more from the south of the region, which leads to lower average delivery distances. When Vallières is open at the same time as Rivière-aux-Rats, a big part of this hardwood is then transiting by Vallières and the major part of the wood processed at Rivière-aux-Rats is then softwood (65%), which comes from the north of the region mainly.

4.5.3 Sensitivity analysis

Higher fuel costs make the scenarios involving a yard less interesting while making the use of backhauling more profitable (Figure 4.2) because of the greater use of oversized trucks when a sort yard is used, which are quite economical for other transportation costs (loading and unloading costs, trucker salary and truck usage). This advantage is lessened by higher fuel costs as more direct routes tend to be used by regular trucks. This effect is less

pronounced when a yard is operated in Rivière-aux-Rats, especially when backhauling is also used. The fuel cost in the base scenario was \$ 1.20·L⁻¹ for oversized and regular trucks.

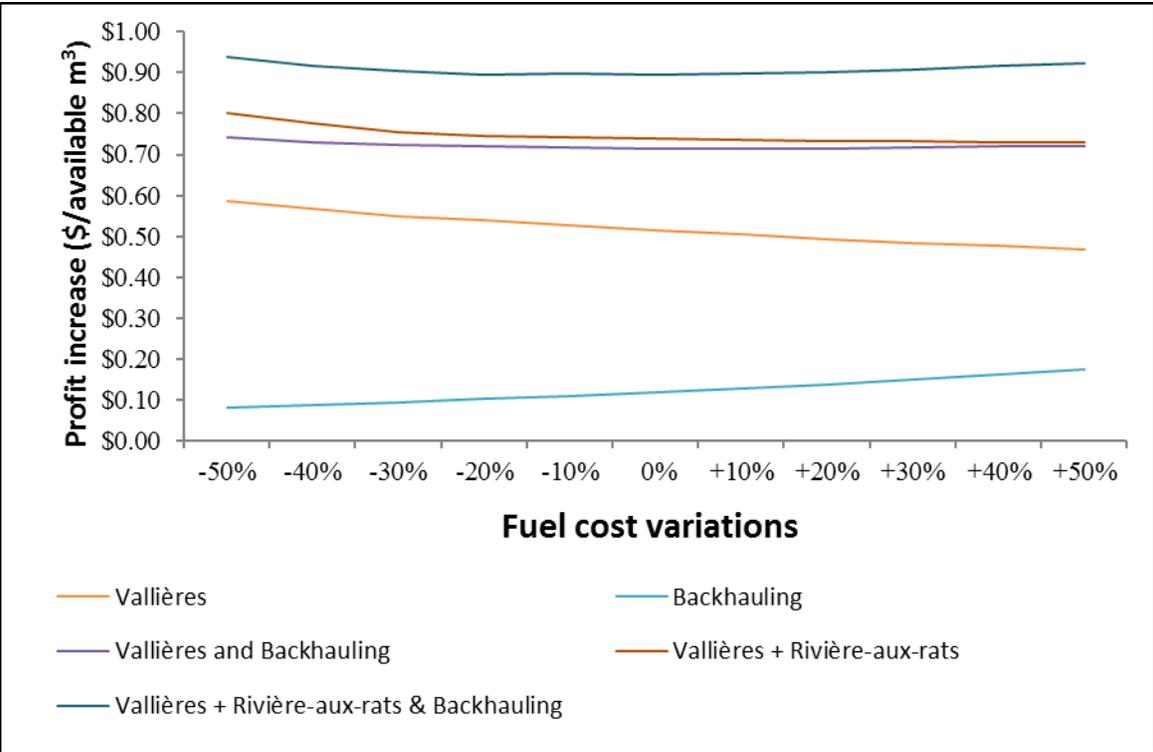


Figure 4.2: Effect of fuel costs on profit increases

Increasing loading and unloading costs lowers the profit increases of all scenarios involving a sort yard (Figure 4.3). This is especially true in the scenario involving Rivière-aux-Rats, which, becomes comparatively less profitable than the current configuration as loading costs increase. Indeed, when this cost increases by 20% or more, it becomes more profitable to use backhauling with the current Vallières yard than to add a yard in Rivières-aux-Rats with empty returns. Loading/unloading costs are \$ 3.00·m⁻³ for roundwood (both oversized and regular trucks) and \$ 1.80·m⁻³ for wood chips.

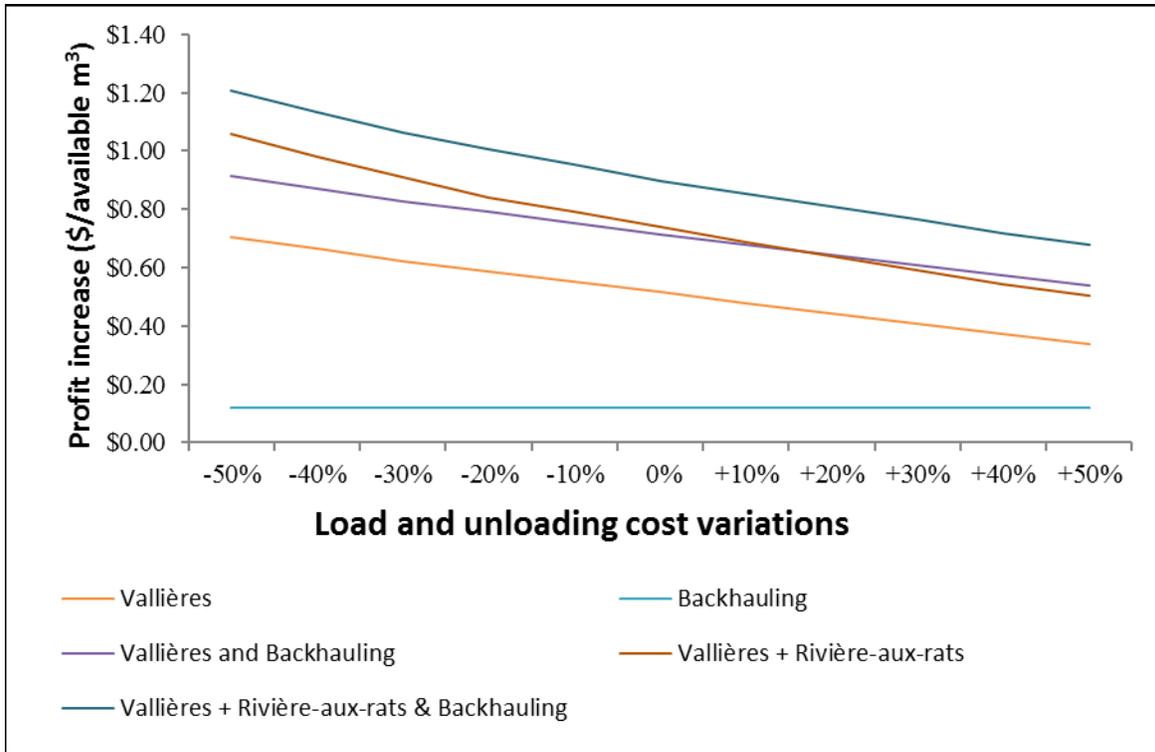


Figure 4.3: Effect of loading and unloading costs on profit increases

Higher error rates (for sorting done at the landing or a mill) bring smaller profits for all network configurations, as more logs are misclassified; however, as can be seen in Figure 4.4, an increase of this factor has a positive impact on the gains that the sort yard brings (with or without the use of backhauling). A dedicated sort yard can sort wood with fewer errors, which offsets the negative effect of rising error rates. Hence, profits obtained in scenarios where a yard is used decrease less rapidly. Error rates have no impact however, on the profitability of backhauling. It was assumed that the error rate was the same at the landing and at the mills and that there were no errors when sorting was done at a sort yard.

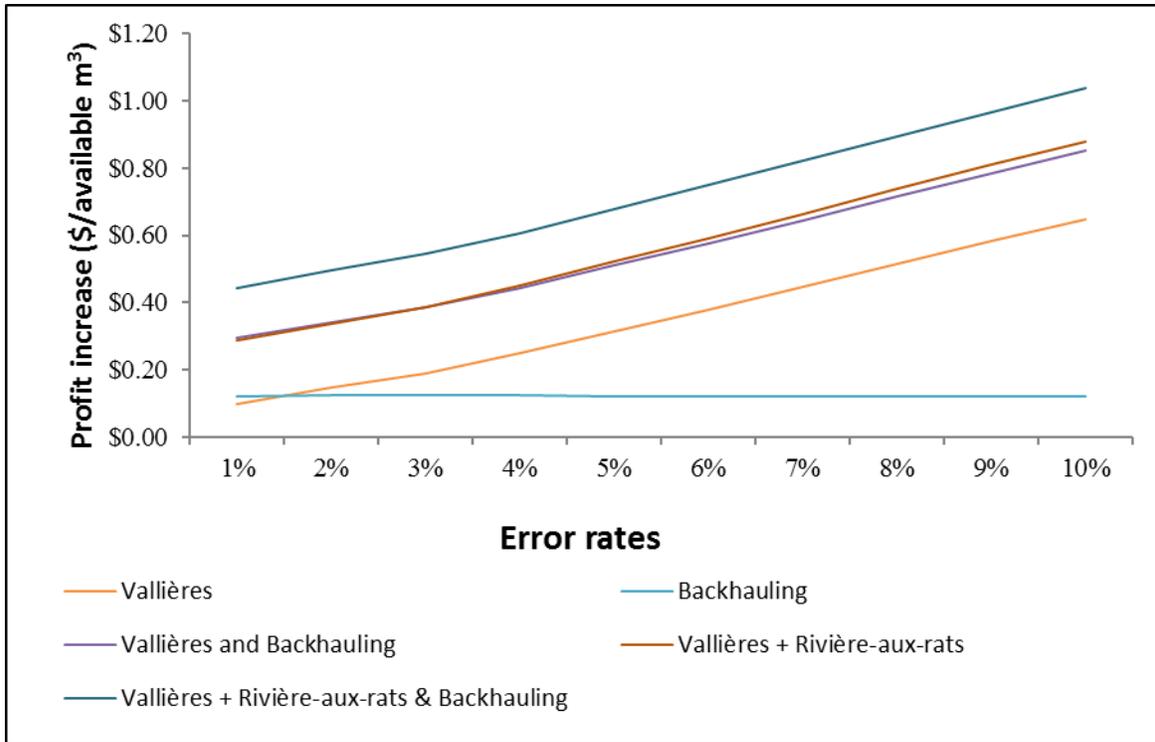


Figure 4.4: Effect of sorting error rates (at the landing or the mills) on profit increases

A rise in stumpage fees has a negative effect on the gains brought on by the different yards (Figure 4.5). As stumpage fees rise, logs that are more valuable become less profitable as a greater share of their value goes to the government. The Quebec government collects the fees because it owns most the forestlands (*Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs* 2017b), as opposed to private companies having ownership. This offsets one of the advantages of using a sort yard: reducing sorting errors and capturing the full potential of the available wood. This trend, however, slows down as stumpage fees increase beyond their level in the base scenario. At that point, harvesting levels tend to decrease especially in harvesting sites located in the south of the region, which do not have access to oversized trucks. This makes the use of a sort yard comparatively more profitable as both the Vallières and Rivière-aux-Rats sites have access to oversized trucks. They also make the use of B-Trains easier. In addition, as the share of wood being processed at the yards increases, sorting costs tend to diminish because sort yards have lower sorting costs. Together, these two factors partially mitigate the negative effect of higher stumpage fees.

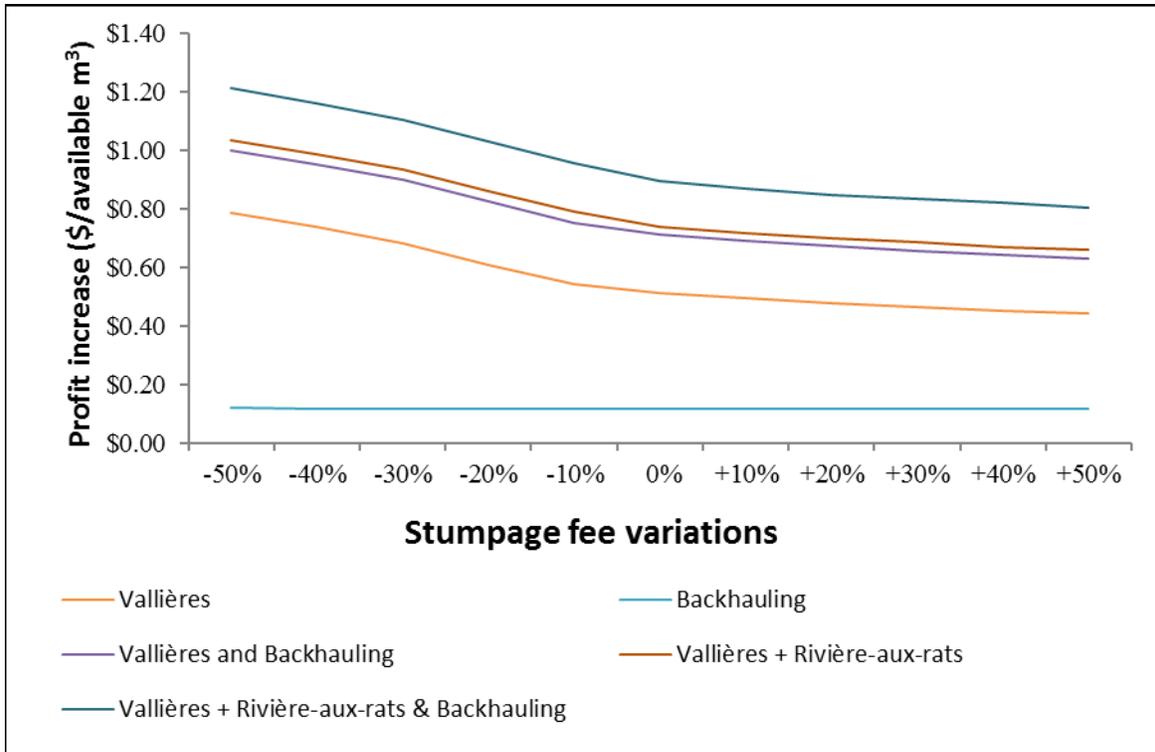


Figure 4.5: Effect of stumpage fees on profit increases

Obviously, higher prices paid for the final products make all scenarios involving a sort yard more profitable (Figure 4.6). The increase is especially important when a yard is operated at Rivière-aux-Rats. For both configurations involving a sort yard, profit increases accelerate for sales prices above their normal values in the current scenario. From this point, as prices increase, harvesting levels start to increase beyond the minimum for all scenarios (90%), especially when a yard is operated. Therefore, the higher prices apply to a larger volume of finished products, which creates this steeper rise of profit. Finally, backhauling does not have an impact on the results, because as prices increase, more and more origin-destination and truck-type combinations tend to involve longer distances as well as oversized trucks, which makes them more difficult to match with other deliveries and fit into the legal time limit.

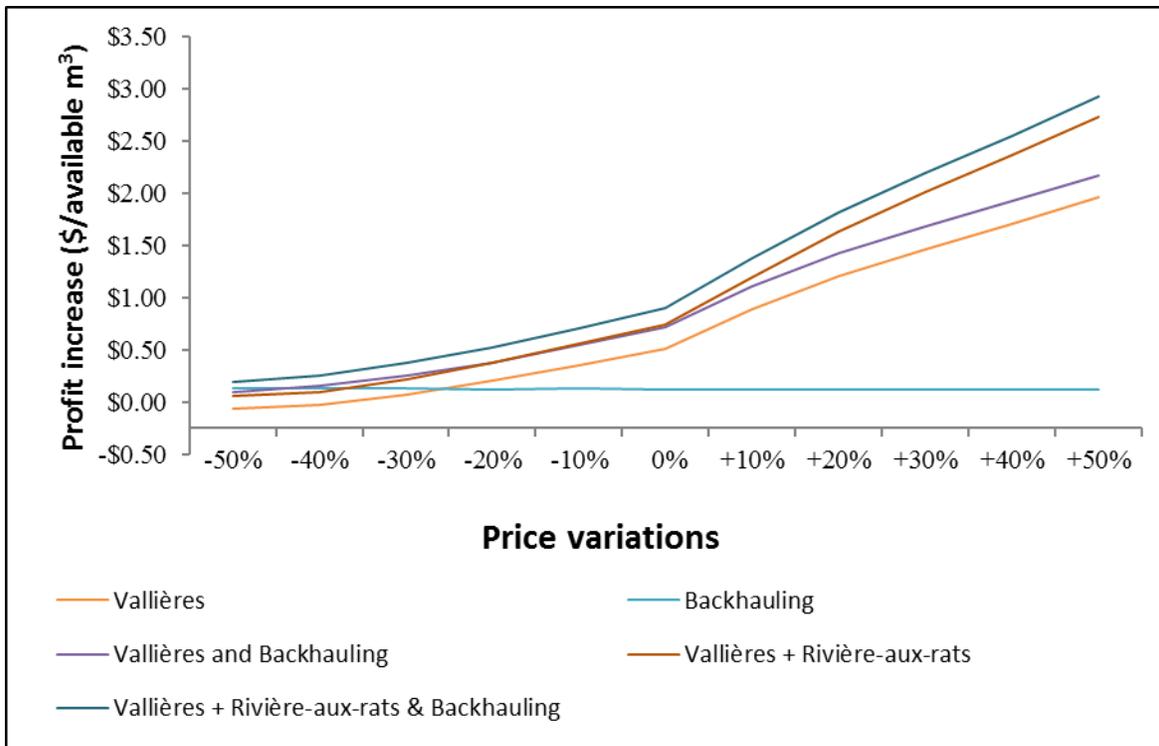


Figure 4.6: Effect of price variations on profit increases

4.5.4 Statistical analysis

A multiple linear regression was performed using Minitab 18 to establish whether there is a significant correlation between profit improvement of each scenario and the five factors introduced in the previous section. In the regression formula below, y_i represents the variation of profits obtained in scenario i , and β_{ni} represents the regression coefficients for the independent variables. The independent variables refer to the factors tested in the sensitivity analysis, namely:

- x_{1i} : variation of fuel costs in scenario i .
- x_{2i} : variation of loading and unloading costs in scenario i .
- x_{3i} : variation of error rates at the yard in scenario i .
- x_{4i} : variation of stumpage fees in scenario i .
- x_{5i} : variation of prices in scenario i .

The regression formula is formulated as follows:

$$y_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} x_{1i} + \beta_{2i} x_{2i} + \beta_{3i} x_{3i} + \beta_{4i} x_{4i} + \beta_{5i} x_{5i}$$

Results obtained from the regression are shown in Table 4.6. All coefficients are in relation to a 1% variation in the value of the factor (as measured in the base scenario). When backhauling was used alone, i.e., fuel costs were the only factor to have both a meaningful coefficient and a p-value below 0.05. A single linear regression analysis was done to check the effect of one of the key parameters, fuel costs. The R^2 was still very high at 92,6%, confirming the results already obtained. For almost all of the other scenarios and factors tested, the p-values were below 5% (0.05). Another single linear regression analysis was done concerning the price factor and gave this factor a p-value of well over 0.05 at 0.37. The low p-value in the multiple linear regression was probably the result of overfitting. Prices have the highest coefficients in all scenarios involving a sort yard, followed by error rates. Loading and unloading costs, as well as stumpage fees, also have significantly negative impact whenever a sort yard is operated. For all factors, the difference between their coefficients when backhauling is used or not used is quite small. The p-values for the level of the fuel costs are all above 0.05, except for the scenario with only backhauling. It should be mentioned however that a single linear regression was conducted specifically for fuel cost which led to p-values well below 0.05 for all scenarios, except when the Rivières-aux-Rats yard was operated with the use of backhauling. The R^2 is also quite high for all scenarios, hovering between 86% and 94%.

Four of the five tested factors have a clear and significant impact on the profitability of a logistics center for the two most interesting sites, fuel cost being the only exception. Moreover, results show that sort yards can be quite profitable regardless of the level of variations. In addition, the coefficients for stumpage fees in the scenarios involving one or two sort yards are quite similar to one another. This leaves price levels and loading and unloading costs as the two most *critical* factors for both the profitability of the forest network and the concept of a new sort yard specifically in Rivière-aux-Rats.

Table 4.6: Results of a linear regression for values of five factors over three configurations

Configuration	Factor/R ²	Empty Returns		Backhauling	
		Coefficient	p-value	Coefficient*	p-value
<i>No yard</i>	<i>Constant</i>	-	-	\$ 0.0434	0.000
	<i>Fuel costs</i>	-	-	\$ 0.0009	0.000
	<i>Load & Unloading costs</i>	-	-	\$ 0.0000	0.935
	<i>Error rates</i>	-	-	\$ 0.0000	0.185
	<i>Stumpage fees</i>	-	-	\$ 0.0000	0.820
	<i>Prices</i>	-	-	-\$-0.0001	0.001
	<i>Adjusted R²</i>		-		94.0%
Configuration	Factor/R ²	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
<i>Vallières</i>	<i>Constant</i>	\$-1.3400	0.000	\$-1.2650	0.000
	<i>Fuel costs</i>	\$-0.0012	0.319 [†]	\$-0.0002	0.883 [†]
	<i>Load & Unloading costs</i>	\$-0.0036	0.003	\$-0.0037	0.002
	<i>Error rates</i>	\$ 0.0060	0.000	\$ 0.0060	0.000
	<i>Stumpage fees</i>	\$-0.0035	0.004	\$-0.0038	0.001
	<i>Prices</i>	\$ 0.0216	0.000	\$ 0.0222	0.000
	<i>Adjusted R²</i>		89.3%		90.2%
Configuration	Factor/R ²	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
<i>Vallières & Rivière-aux-Rats</i>	<i>Constant</i>	\$-1.6640	0.000	\$-1.6150	0.000
	<i>Fuel costs</i>	\$-0.0006	0.733 [†]	\$-0.0000	0.984
	<i>Load & Unloading costs</i>	\$-0.0054	0.002	\$-0.0052	0.004
	<i>Error rates</i>	\$ 0.0068	0.000	\$ 0.0069	0.000
	<i>Stumpage fees</i>	\$-0.0039	0.026	\$-0.0042	0.017
	<i>Prices</i>	\$ 0.0281	0.000	\$ 0.0287	0.000
	<i>Adjusted R²</i>		86.5%		86.7%

* Coefficients represent profit increases relative to 1% variations in comparison to the base scenario

† Results of a simple linear regression show that fuel costs have a significant impact for this instance

4.6 Conclusion

The main objective of this paper was to understand the impact that the introduction of a forest logistics center in a complex and diversified forest network can have. No paper found in the literature included a mathematical model with a complete set of costs and a real forest network. This contribution includes a profit maximization model covering all relevant costs and a sensitivity analysis conducted over a complex forest network. Our

experiment, using data from a real forest industry network, led to the identification of the optimal sites to install a sort yard in the Mauricie region. The interaction between a yard and the use of backhauling were quantified, and a sensitivity analysis regarding the effect of five environmental factors was performed. It was found that the existing yard (Vallières site) already contributes to around \$ 0.52·available m⁻³ in profits, which amounts to about \$ 1.4 million annually. The addition of a new sort yard in Rivière-aux-Rats would add another \$ 0.22·m⁻³ (around \$ 0.55 million per year). Contrary to what might have been assumed, the Vallières site is actually performing better than Rivière-aux-Rats when it is allowed to process both softwood and hardwood and when both sites are allowed to have the same processing capacity. The main reason for this is that Vallières' location helps to largely cancel out the “detour” effect often associated with this type of installation (wood no longer being shipped directly to the mills).

Higher sorting error rates and a favorable market (with higher selling prices) tend to make the use of a logistics center in the Mauricie region more profitable. On the other hand, loading costs and stumpage fees make the use of a logistics center less interesting. While the factors that we tested tended to have a significant impact on profitability, the overall profit was quite robust. The model presented in this paper takes into consideration an extensive number of costs and contextual factors that should prove useful for further research in forest logistics and could be used in many other networks.

The results of our sensitivity analysis can be generalized to other forest networks. Fuel costs however, have a complex relationship with the presence of a sort yard; they are influenced by the configuration of a specific network. In comparison, factors such as error rates, loading costs and price levels for final products have a clearer effect on the center's profitability.

The results presented in this paper relate to a specific forest network and use a deterministic model, which does not integrate the stochasticity of supply or demand. It would be relevant to test the model on different geographical settings to verify how it would influence the

profitability of a logistics center. The effect of factors, such as the level of implementation costs, the seasonality of demand and prices or the level of depreciation caused by the aging of the wood should also be studied. Finally, for such a structure to be put in place, the issue of how to manage it would need to be explored (business model, profit sharing, etc.).

4.7 Acknowledgements

We would like to thank the FORAC Research Consortium and its partners. We also thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for providing funding for this research through Discovery (RGPIN/203193-2013) and Collaborative Research and Development (RGPIN/105511-2013). Moreover, we extend special thanks to François Laliberté, ing.f., M.Sc. as well Francis Charette of *FPIInnovations*. We also acknowledge the help of the *Groupe Initiative Mauricie* organization and its members, especially Carl Tremblay of *Kruger* and André Gravel of *Domtar*.

Chapitre 5

Modifications à un réseau forestier et impacts sur sa rentabilité

5.1 Introduction

Dans le chapitre 3, nous avons testé un modèle de maximisation des profits sur une série de données fictives et réalistes pour évaluer les augmentations de profit qui peuvent être obtenues par l'utilisation d'un centre logistique comportant une cour dédiée au triage ainsi qu'une coordination du transport. Des gains de l'ordre de 0,50 \$/m³, 0,45 \$/m³ et 0,88 \$/m³ ont été mesurés quant à la présence d'une cour, l'utilisation des retours en charge et la combinaison de ces deux éléments. Une analyse de sensibilité a établi que pour le réseau étudié, les coûts de transport, les coûts de triage, les distances des forêts et la taille de la flotte de camions hors normes avaient tous une influence significative sur la profitabilité d'un tel centre.

Dans le chapitre 4, nous avons voulu analyser l'interaction d'un tel centre logistique avec un réseau logistique existant et complexe (réseau de la Mauricie au Québec). Les résultats démontrèrent que la cour actuellement utilisée dans la région (le site Vallières proche de La Tuque) procurait un gain de l'ordre de 0,52 \$/m³. Une nouvelle cour à Rivière-aux-Rats plus au sud procurait un gain supplémentaire de 0,22 \$. Les retours en charge procuraient des gains fluctuant entre 0,12 \$ et 0,20 \$/m³. Un certain effet dynamique entre la présence d'une cour et l'utilisation des retours en charge fut observé. Une analyse de sensibilité a démontré que les prix des produits, les coûts de chargement et de déchargement, le taux d'erreur dans la classification des billes et le niveau des redevances avaient tous un effet significatif sur la profitabilité d'un centre.

Dans ce chapitre, nous continuerons notre analyse de sensibilité effectuée dans le chapitre 4 en testant l'effet de nouveaux facteurs. Nous testerons également l'impact d'un certain nombre de modifications au réseau actuel, entre autres la fermeture de certaines usines.

5.2 Liste des instances et résultats

Nous avons procédé d'abord à une nouvelle analyse de sensibilité sur deux nouveaux facteurs sur lesquels nous ne possédons que peu ou pas d'information ou qui peuvent servir à définir le meilleur fonctionnement du centre. Les facteurs en question sont 1- la dépréciation maximale, soit la perte de valeur des produits finis causée par le vieillissement de la matière, 2- les coûts d'implantation encourus par la mise en place d'une cour de triage (exprimés en \$/m³ traités à la cour). Par la suite, nous avons testé l'effet d'un certain nombre de changements à la structure même du réseau (fermeture d'usines, ajout d'un accès au transport hors norme pour certains sites, nouveaux sites testés et absence de coûts de chargement vers les usines). Les résultats permettront de guider les décideurs quant à d'éventuels changements au réseau ainsi que pour la façon de bien aménager la cour de triage. Ils permettront également d'analyser certains comportements du réseau qui pourront jusqu'à un certain point être généralisés à d'autres réseaux forestiers. Le scénario de base qui sert de comparatif pour l'ensemble de ces nouvelles analyses est le même que pour le quatrième chapitre soit le réseau logistique de la Mauricie sans aucune cour de triage et sans retour en charge.

5.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité fut d'abord effectuée sur deux facteurs supplémentaires qui nous apparaissent pertinents. Le premier facteur testé est le taux maximal de dépréciation, car nous ne possédons pas de données concernant ce phénomène. De même, nous n'avons trouvé qu'une seule référence concernant les coûts d'implantation. Le taux de dépréciation utilisé lors du scénario de base était de 20%. Les taux testés dans cette analyse varient donc entre 0% et 50% avec des intervalles de 5%. Pour les coûts d'implantation, les taux testés

varient entre -50% et +50% de leur valeur dans le scénario de base, et ce, avec des intervalles de 10%. Cela signifie qu'une variation de 0% de ce coût correspond au scénario de base. Une analyse statistique sur ces deux facteurs¹³ fut par la suite effectuée et ces résultats sont présentés au Tableau 5.1. Étant donné le faible nombre de facteurs testés, une régression linéaire simple fut utilisée.

Si on regarde d'abord l'impact des variations quant au niveau de dépréciation maximale sur les augmentations de profit (mesurés en \$/m³ disponible), on constate qu'ils sont négligeables au point d'être pratiquement invisibles à l'œil nu (Figure 5.1). Il existe en fait une très légère tendance à la baisse pour les scénarios comportant une cour (diminution d'environ 0,01 \$ ou 0,02 \$/m³ disponible sur l'ensemble des valeurs testées). Rappelons que la valeur de base des produits dans la fonction objectif de notre modèle est modifiée selon l'âge du produit en question. Dans la construction de la base de données, la valeur de base est multipliée par un facteur d'une valeur de 0 à 1 exprimant la valeur résiduelle selon l'âge du produit. L'essentiel des différences entre les scénarios se situe au niveau de l'évolution des revenus, lesquels baissent à mesure que le taux de dépréciation augmente. Les coûts pour leur part restent pratiquement identiques pour l'ensemble des scénarios.

¹³ Le nombre d'usines participantes fut exclu de l'analyse statistique, car il s'agit d'un facteur dont l'effet nous apparaît très peu généralisable. Il est entre autres trop peu linéaire dans son effet.

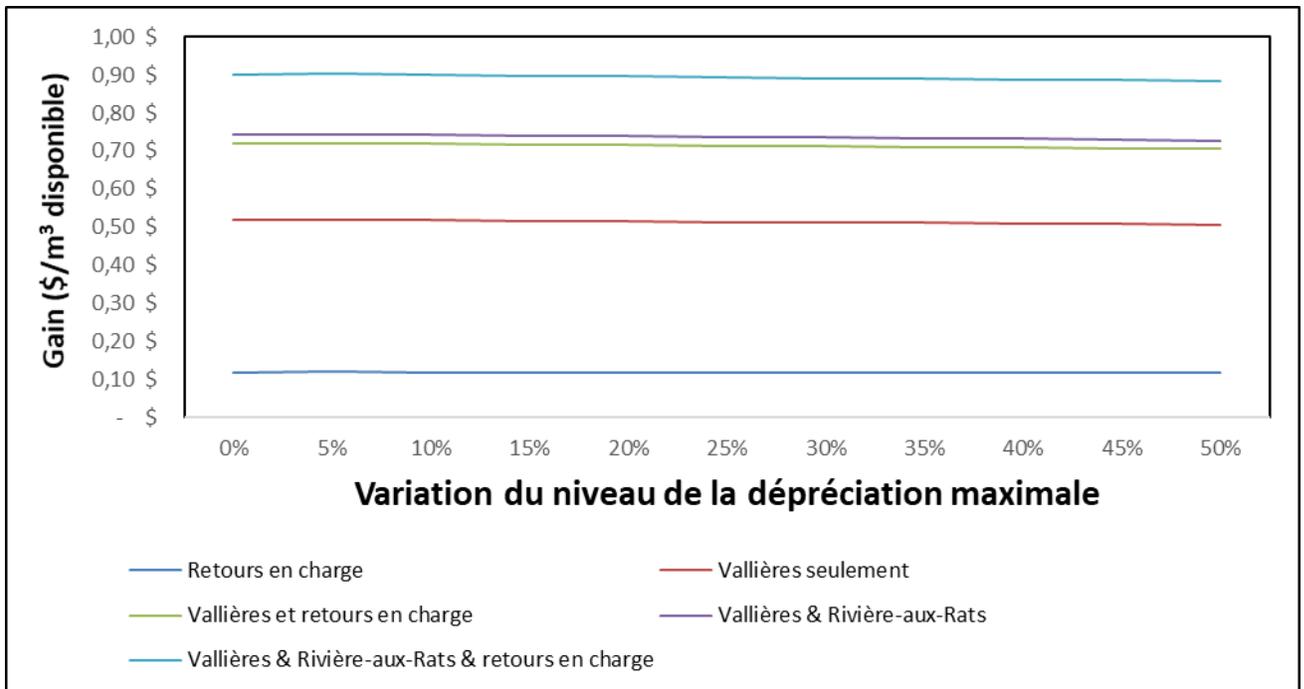


Figure 5.1: Impact des variations du niveau de la dépréciation maximale sur les augmentations de profit (\$/m³ disponible)

Si on se penche ensuite sur les variations des coûts d'implantation (Figure 5.2), nous pouvons observer une légère tendance à la baisse des augmentations de profit à mesure que ces coûts augmentent. Cette diminution est cependant très constante, ce qui semble indiquer qu'une augmentation de ce coût est trop négligeable pour avoir un impact sur les quantités récoltées et traitées. Ce type de phénomène peut se produire dans la mesure où une variation de coût peut rendre l'exploitation de zones de récolte plus ou moins profitable. Pour l'ensemble des scénarios, seuls les coûts d'implantation varient véritablement.

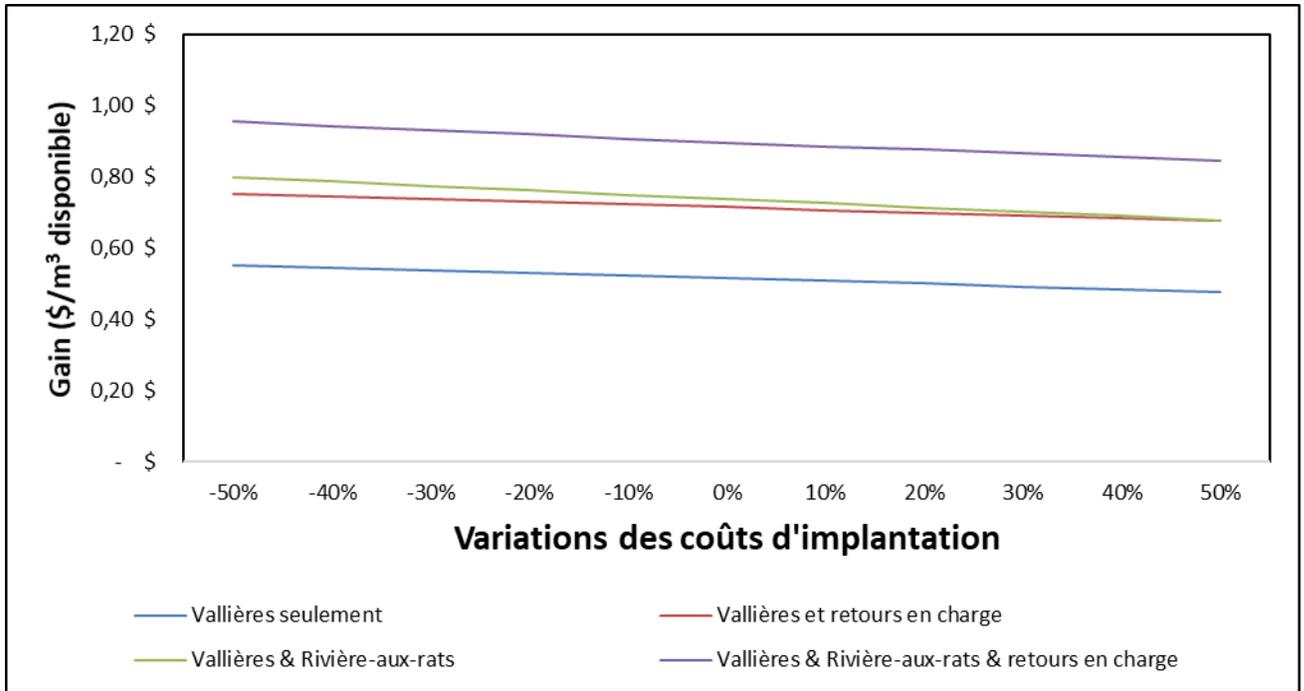


Figure 5.2: Impact des variations du niveau des coûts d'implantation sur les augmentations de profit (\$/m³ disponible)

Une analyse de régression linéaire simple (voir tableau 5.1) démontre cependant qu'il existe une relation significative entre les deux facteurs testés et l'évolution des augmentations de profits engendrés par l'utilisation d'une cour de triage (Vallières et Rivière-aux-Rats). Ainsi, la p-valeur est égale à zéro pour les deux coefficients et les deux scénarios comprenant une ou deux cour(s) de triage. Comme ce fut déjà constaté, les coûts d'implantation ont davantage d'impact que le niveau de dépréciation maximale, mais dans les deux cas, les coefficients sont très modestes (entre -0.0003 et -0.0012). L'effet des coûts d'implantation est plus limité lorsque le site Vallières est utilisé seul (coefficient de -0.0007).

Tableau 5.1: Résultats d'une régression linéaire sur deux facteurs pour trois configurations (niveau de dépréciation maximale et coût d'implantation)

Configuration	Facteur /R ²	Retours à vide		Retours en charge	
		Coefficient	p-valeur	Coefficient*	p-valeur
<i>Aucune cour</i>	<i>Constante</i>	-	-	\$ 0.1188	0.000
	<i>Dépréciation</i>	-	-	\$-0.0000	0.171
	<i>R² ajusté</i>	-	-	10,8%	-
	<i>Constante</i>	-	-	-	-
	<i>Implantation</i>	-	-	-	-
	<i>R² ajusté</i>	-	-	-	-
Configuration	Facteur /R ²	Coefficient	p-valeur	Coefficient	p-valeur
<i>Vallières</i>	<i>Constante</i>	\$ 0.5201	0.000	\$ 0.7215	0.000
	<i>Dépréciation</i>	\$-0.0003	0.000	\$-0.0003	0.000
	<i>R² ajusté</i>	97,6%	-	99,3%	-
	<i>Constante</i>	\$ 0.5898	0.000	\$ 0.7893	0.000
	<i>Implantation</i>	\$-0.0007	0.000	\$-0.0007	0.000
	<i>R² ajusté</i>	100,0%	-	100,0%	-
Configuration	Facteur/R ²	Coefficient	p-valeur	Coefficient	p-valeur
<i>Vallières & Rivière-aux-Rats</i>	<i>Constante</i>	\$ 0.7437	0.000	\$ 0.9030	0.000
	<i>Dépréciation</i>	\$-0.0003	0.000	\$-0.0004	0.000
	<i>R² ajusté</i>	96,6%	-	98,7%	-
	<i>Constante</i>	\$ 0.8592	0.000	\$ 1.0068	0.000
	<i>Implantation</i>	\$-0.0012	0.000	\$-0.0011	0.000
	<i>R² ajusté</i>	100,0%	-	99,7%	-

* Les coefficients représentent des augmentations de profit relatives à une variation de 1% par rapport au scénario de base

5.4 Nouvelles configurations du réseau

Un grand nombre de nouveaux scénarios répartis sur cinq groupes distincts (voir tableau 5.2) ont été générés puis comparés, dans le but de guider les gestionnaires forestiers de la région dans leurs décisions stratégiques, d'analyser certains comportements du réseau et de dégager des enseignements qui pourront être généralisés à d'autres réseaux forestiers. Le premier groupe (groupe *G1*, voir tableau 5.3 pour une description des configurations) constitue le scénario de base, déjà utilisé dans le quatrième chapitre, avec neuf configurations et 18 instances différentes (avec ou sans retours en charge). Le scénario de base ne comporte pas de cour ni de retours en charge et les sites testés sont Vallières,

Rivière-aux-Rats, Saint-Georges et Saint-Tite. Les résultats sont les mêmes que pour le chapitre 4, soient des gains de 0,52 \$/m³ disponibles pour le site Vallières actuel et de 0,74 \$/m³ si on ajoute une cour à Rivière-aux-Rats (voir tableau 5.4). Pour sa part, les retours en charge apportent des gains se situant entre 0,12 \$ et 0,20 \$/m³ avec des gains plus importants lorsqu'une cour de triage est utilisée¹⁴. Les numéros des scénarios ayant les meilleurs et les pires résultats de chaque groupe sont colorés en rouge (pires) ou en bleu (meilleurs) tout au long de ce chapitre. Le scénario représentant le statu quo (*G1.7* avec le site Vallières en activité et sans retours en charge) est coloré en vert dans les tableaux 5.3 et 5.4.

Tableau 5.2: Liste des groupes d'instances

Groupe	Description
<i>G1</i>	Scénarios de base (chapitre 4)
<i>G2</i>	Usines enlevées du réseau
<i>G3</i>	Nouveaux sites
<i>G4</i>	Accès au transport hors norme
<i>G5</i>	Contiguïté avec l'usine associée

¹⁴ Ce résultat de 0,20 \$/m³ ne se trouve pas directement dans le tableau et est obtenu en soustrayant 0,56 \$ de 0,76 \$ (scénarios *G1.13* et *G1.14* avec une cour à Rivière-aux-Rats) de façon à isoler l'effet des retours en charge. De telles soustractions sont utilisées dans l'analyse des résultats des autres groupes pour isoler l'effet de tel ou tel facteur.

Tableau 5.3: Instances du groupe G1 (scénario de base)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Vallières élargit</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Saint-Georges</i>	<i>Saint-Tite</i>	<i>Retours en charge</i>
G1.1 (Pas de cour)						
G1.2						✓
G1.3				✓		
G1.4				✓		✓
G1.5					✓	
G1.6					✓	✓
G1.7 (Statu quo)	✓					
G1.8	✓					✓
G1.9	✓			✓		
G1.10	✓			✓		✓
G1.11					✓	
G1.12					✓	✓
G1.13			✓			
G1.14			✓			✓
G1.15		✓				
G1.16		✓				✓
G1.17	✓		✓			
G1.18	✓		✓			✓

Tableau 5.4: Profits et gains pour le groupe G1 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
G1.1	1 836 091 \$	-	G1.2	2 449 736 \$	+ 0,12 \$
G1.3	2 269 116 \$	+ 0,08 \$	G1.4	2 972 035 \$	+ 0,22 \$
G1.5	2 293 304 \$	+ 0,09 \$	G1.6	3 020 082 \$	+ 0,23 \$
G1.7	4 496 029 \$	+ 0,52 \$	G1.8	5 526 066 \$	+ 0,71 \$
G1.9	4 610 793 \$	+ 0,54 \$	G1.10	5 651 127 \$	+ 0,74 \$
G1.11	4 611 193 \$	+ 0,54 \$	G1.12	5 659 824 \$	+ 0,74 \$
G1.13	4 706 859 \$	+ 0,56 \$	G1.14	5 742 880 \$	+ 0,76 \$
G1.15	4 814 867 \$	+ 0,58 \$	G1.16	5 756 075 \$	+ 0,76 \$
G1.17	5 646 198 \$	+ 0,74 \$	G1.18	6 457 161 \$	+ 0,90 \$

Le second (groupe G2) représente le fait d'enlever une usine du réseau. Le troisième groupe (G3) représente la possibilité d'utiliser des sites qui n'ont pas encore été testés. Le quatrième groupe (G4) consiste à ajouter la possibilité d'un accès au transport hors norme à des sites potentiels qui n'y ont pas déjà accès. Finalement, le cinquième groupe (G5) regroupe des scénarios où il fut pris pour acquis que les cours de triage seraient contiguës

aux sites auxquels elles sont associées. Nous allons maintenant décrire chacun de ces groupes plus en détail.

5.4.1 Usines enlevées du réseau

Le groupe de scénarios *G2* repose sur la fermeture de l'une ou l'autre des trois usines suivantes : Windsor (voir tableau 5.5), Parent (voir tableau 5.6) et Saint-Roch (voir tableau 5.7). Ces usines ont été choisies, car d'autres usines ont une production similaire à la leur et pourraient donc prendre le relais en cas de fermeture. L'usine de Windsor est localisée en dehors du réseau de la Mauricie sur la Rive-Sud du Saint-Laurent et ses garanties de bois furent réassignées à l'usine de WestRock, proche du site Vallières. Avant la résolution de ces instances, il fut décidé que l'usine de WestRock pouvait produire des copeaux de bois, même quand une cour était opérée au site Vallières (qui livre normalement le bois à WestRock). La figure 5.3 permet d'observer les flux actuels de billes et de copeaux vers les deux usines de pâtes et papiers de bois feuillu. Par souci de réalisme, quand les usines de Parent ou de Saint-Roch furent éliminées, leurs attributions furent transférées aux usines de sciage de résineux restantes. Cette redistribution fut faite proportionnellement pour chacune des Unités d'aménagement forestier (UAF) et selon la quantité déjà assignée aux autres usines. Si pour une UAF, aucun bois n'était assigné aux usines restantes, la somme des attributions des usines sur l'ensemble du réseau était utilisée pour fixer les pourcentages respectifs de répartition. Pour ce groupe, les seules instances testées furent celles n'impliquant aucune cour, le site Vallières (actuel et élargi) ainsi que Rivière-aux-Rats (avec et sans le site Vallières).

Tableau 5.5: Instances G2.1 à G2.10 du groupe G2 (usine Windsor fermée)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Vallières élargi</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Windsor enlevé</i>	<i>Retours en charge</i>
G2.1				✓	
G2.2				✓	✓
G2.3	✓			✓	
G2.4	✓			✓	✓
G2.5		✓		✓	
G2.6		✓		✓	✓
G2.7			✓	✓	
G2.8			✓	✓	✓
G2.9	✓		✓	✓	
G2.10	✓		✓	✓	✓

Tableau 5.6: Instances G2.11 à G2.20 du groupe G2 (usine Parent fermée)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Vallières élargi</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Parent enlevé</i>	<i>Retours en charge</i>
G2.11				✓	
G2.12				✓	✓
G2.13	✓			✓	
G2.14	✓			✓	✓
G2.15		✓		✓	
G2.16		✓		✓	✓
G2.17			✓	✓	
G2.18			✓	✓	✓
G2.19	✓		✓	✓	
G2.20	✓		✓	✓	✓

Tableau 5.7: Instances G2.21 à G2.30 du groupe G2 (usine Saint-Roch fermée)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Vallières élargi</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Saint-Roch enlevé</i>	<i>Retours en charge</i>
G2.21				✓	
G2.22				✓	✓
G2.23	✓			✓	
G2.24	✓			✓	✓
G2.25		✓		✓	
G2.26		✓		✓	✓
G2.27			✓	✓	
G2.28			✓	✓	✓
G2.29	✓		✓	✓	
G2.30	✓		✓	✓	✓

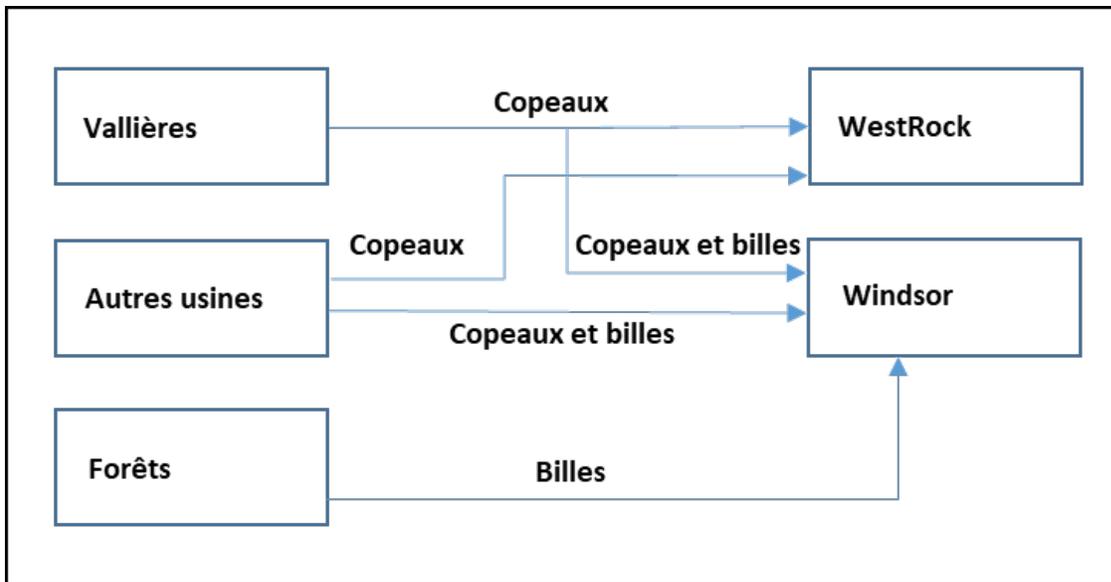


Figure 5.3: Flux des billes et des copeaux vers les usines de pâtes et papiers (feuillu)

L'exclusion de l'usine de Windsor (scénarios *G2.1* à *G2.10* – tableau 5.8) et la réassignation de ses garanties d'approvisionnement à l'usine de WestRock (la seule autre usine pâtes et papiers traitants du feuillu dans le réseau) ont un impact positif sur la profitabilité de chaque scénario, particulièrement quand une cour est utilisée, essentiellement à cause d'une baisse des coûts de transport. Comme l'usine de Windsor est très éloignée du reste du réseau (que ce soit les sites de récolte, les cours et les autres usines), cela tend à réduire les distances à parcourir de façon significative (avec une économie de transport de 0,13 \$/m³ quand aucune cour n'est utilisée) et à faciliter l'utilisation des retours en charge dans la mesure où des livraisons plus courtes sont plus faciles à combiner.

Si on compare les résultats de ces scénarios entre eux seulement, on constate que les gains associés à la présence d'une cour au site Vallières sont plus élevés qu'ils ne l'étaient dans le scénario de base et ce, dans une proportion de 0,17 \$ à 0,25 \$/m³. Cela est dû au fait que ce site est situé à proximité de WestRock. Les plus courtes distances font en sorte d'annuler en partie un des principaux désavantages d'utiliser une cour qui est l'absence de livraisons directes des forêts vers les usines. Pour la même raison, les gains qu'apportent les retours

en charge augmentent pour toutes les configurations (entre 0,04 \$ et 0,06 \$/m³). Les gains relatifs des scénarios comportant une seule cour à Rivière-aux-Rats ne sont pas affectés pour leur part par l'exclusion de l'usine de Windsor.

L'exclusion de l'usine de Parent (*G2.11* à *G2.20* – tableau 5.8) a un effet très négatif sur les profits de toutes les instances, puisque cela force le système à transporter le bois récolté à proximité sur de plus longues distances avant d'être transformé (entre 1,10 \$ et 1,26 \$/m³). L'impact est quelque peu moins prononcé dans trois des quatre instances impliquant une cour (l'instance avec site Vallières actuel est la seule exception). Puisqu'une portion significative du bois déjà assigné à Parent est redirigée à Saint-Roch, l'utilisation d'une cour à Rivière-aux-Rats à quelques kilomètres de là ouvre la porte à une plus grande utilisation des camions hors norme. On doit aussi noter que l'utilisation des retours en charge emmène de plus petits gains, surtout quand fait en tandem avec une cour (entre 0,02 \$ et 0,06 \$/m³), ce qui indique que malgré son éloignement, la présence de cette usine permet l'utilisation de certaines routes intéressantes, du fait qu'elle est entourée de plusieurs zones de récolte, ce qui n'est pas le cas par exemple de l'usine de Windsor. Aussi, parce que Rivière-aux-Rats traite du résineux, cela permet de mitiger (très légèrement, entre 0,02 \$ et 0,04 \$) l'effet négatif de la fermeture de Parent (la majeure partie du bois est redirigé vers le sud de la région).

Pour les scénarios comportant la fermeture de l'usine à Saint-Roch (*G2.21* à *G2.30* – tableau 5.8), les garanties d'approvisionnement furent redirigées aux usines de Parent et de Rivière-aux-Rats. Des augmentations de profits furent constatées pour tous ces scénarios (entre 0,20 \$ et 0,36 \$/m³). Si l'on isole ces seuls scénarios, on constate que tous les centres logistiques proposés qui peuvent traiter du bois résineux deviennent plus profitables (de 0,11 \$ à 0,13 \$/m³). Les retours en charge deviennent également plus rentables, surtout quand aucune cour n'est opérée ou quand le site Vallières actuel (qui peut seulement traiter du bois feuillu) est utilisé (jusqu'à 0,14 \$/m³). Les deux autres usines de sciage de résineux (Parent et Rivière-aux-Rats) ont ainsi un positionnement qui facilite la combinaison de

multiples livraisons. Le tableau 5.9 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe G2.

Tableau 5.8: Profits et gains pour le groupe G2 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
G2.1	2 508 238 \$	+ 0,13 \$	G2.2	3 419 904 \$	+ 0,31 \$
G2.3	6 461 296 \$	+ 0,90 \$	G2.4	7 725 874 \$	+ 1,14 \$
G2.5	6 647 914 \$	+ 0,93 \$	G2.6	7 855 760 \$	+ 1,17 \$
G2.7	5 367 145 \$	+ 0,68 \$	G2.8	6 587 230 \$	+ 0,92 \$
G2.9	7 181 871 \$	+ 1,04 \$	G2.10	9 291 092 \$	+ 1,25 \$
G2.11	-4 089 193 \$	- 1,15 \$	G2.12	-3 594 396 \$	- 1,05 \$
G2.13	-1 429 823 \$	- 0,63 \$	G2.14	-691 534 \$	- 0,49 \$
G2.15	-973 410 \$	- 0,54 \$	G2.16	-267 028 \$	- 0,41 \$
G2.17	-990 590 \$	- 0,55 \$	G2.18	-262 955 \$	- 0,41 \$
G2.19	-65 388 \$	- 0,37 \$	G2.20	514 315 \$	- 0,26 \$
G2.21	2 844 992 \$	+ 0,20 \$	G2.22	4 179 541 \$	+ 0,45 \$
G2.23	5 565 786 \$	+ 0,72 \$	G2.24	7 292 919 \$	+ 1,06 \$
G2.25	6 490 696 \$	+ 0,90 \$	G2.26	7 637 140 \$	+ 1,12 \$
G2.27	6 257 961 \$	+ 0,86 \$	G2.28	7 507 060 \$	+ 1,10 \$
G2.29	7 244 656 \$	+ 1,05 \$	G2.30	8 315 282 \$	+ 1,26 \$

Tableau 5.9: Faits saillants des résultats du groupe G2

Exclusion de Windsor	<ul style="list-style-type: none"> 1- Réseau plus rentable pour tous les scénarios 2- Économie importante au niveau des coûts de transport 3- Site Vallières plus rentable
Exclusion de Parent	<ul style="list-style-type: none"> 1- Fait reculer les profits pour tous les scénarios 2- Scénarios avec une cour marginalement plus rentable (sauf Vallières seulement - stable) 3- Retours en charge comparativement moins intéressants
Exclusion de Saint-Roch	<ul style="list-style-type: none"> 1- Réseau plus rentable pour tous les scénarios 2- Scénarios avec une cour relativement plus rentable sans exception 3- Retours en charge relativement plus intéressants

5.4.2 Nouveaux sites

De façon à identifier d'autres sites potentiels pour servir de cour de triage en Mauricie, le groupe de scénarios *G3* (voir tableau 5.10) consistait à tester la possibilité d'installer des cours de triage proche d'une des usines de sciage existantes (à Shawinigan, Parent, Saint-Adelphe et Saint-Roch). Chacun de ces nouveaux sites est testé seul et avec le site Vallières. Les distances et temps de voyage des segments impliquant les usines correspondant à ces nouveaux sites furent utilisés pour les paires origine-destination impliquant ces derniers.

Si nous examinons les résultats dans ce groupe (*G3.1* à *G3.16* - voir tableau 5.11), nous pouvons observer que seul le site de Parent performe bien (gain de 0,20 \$/m³ sans retours en charge). Ce n'est pas une coïncidence puisque seul ce site dans ce groupe de scénarios a accès au transport hors norme. Des trois autres sites, Saint-Roch performe le mieux, mais avec un gain de seulement 0,09 \$/m³ (lorsqu'utilisé seul et sans retour en charge). Il y a de légères améliorations quant à la performance relative des retours en charge (jusqu'à 0,04 \$/m³) sauf quand Saint-Roch est opéré en même temps que le site Vallières (- 0,01 \$/m³). Les autres configurations procurent un gain supplémentaire se situant entre 0,01 \$ et 0,07 \$/m³. Le tableau 5.12 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe *G3*.

Tableau 5.10: Instances du groupe G3 (nouveaux sites)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Shawinigan</i>	<i>Parent</i>	<i>Saint-Adelphe</i>	<i>Saint-Roch</i>	<i>Retours en charge</i>
<i>G3.1</i>	✓	✓				
<i>G3.2</i>	✓	✓				✓
<i>G3.3</i>		✓				
<i>G3.4</i>		✓				✓
<i>G3.5</i>	✓		✓			
<i>G3.6</i>	✓		✓			✓
<i>G3.7</i>			✓			
<i>G3.8</i>			✓			✓
<i>G3.9</i>	✓			✓		
<i>G3.10</i>	✓			✓		✓
<i>G3.11</i>				✓		
<i>G3.12</i>				✓		✓
<i>G3.13</i>	✓				✓	
<i>G3.14</i>	✓				✓	✓
<i>G3.15</i>					✓	
<i>G3.16</i>					✓	✓

Tableau 5.11: Profits et gains pour le groupe G3 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
<i>G3.1</i>	4 700 637 \$	+ 0,56 \$	<i>G3.2</i>	5 747 584 \$	+ 0,76 \$
<i>G3.3</i>	2 221 030 \$	+ 0,07 \$	<i>G3.4</i>	3 011 579 \$	+ 0,23 \$
<i>G3.5</i>	4 825 551 \$	+ 0,58 \$	<i>G3.6</i>	6 063 923 \$	+ 0,82 \$
<i>G3.7</i>	2 893 486 \$	+ 0,20 \$	<i>G3.8</i>	3 635 906 \$	+ 0,35 \$
<i>G3.9</i>	4 537 394 \$	+ 0,52 \$	<i>G3.10</i>	5 641 129 \$	+ 0,74 \$
<i>G3.11</i>	2 094 916 \$	+ 0,05 \$	<i>G3.12</i>	2 842 809 \$	+ 0,20 \$
<i>G3.13</i>	4 741 689 \$	+ 0,56 \$	<i>G3.14</i>	5 725 797 \$	+ 0,75 \$
<i>G3.15</i>	2 294 852 \$	+ 0,09 \$	<i>G3.16</i>	3 086 041 \$	+ 0,24 \$

Tableau 5.12: Faits saillants des résultats du groupe G3

Nouveaux sites	<ol style="list-style-type: none"> 1- Parent apporte les plus fortes augmentations de profit 2- Saint-Roch suit avec 0,09 \$/m³ d'augmentation de profit 3- Les autres gains relatifs se situent entre 0,01 \$ et 0,07 \$/m³ 4- Légères améliorations de la performance des retours en charge (par rapport au scénario de base)
----------------	---

5.4.3 Accès au transport hors norme

Pour le quatrième groupe de scénarios (groupe *G4*, voir tableau 5.13), un accès vers le transport hors norme fut ajouté aux sites potentiels n’y ayant pas déjà accès (Saint-Georges, Saint-Tite, Shawinigan, Saint-Adelphe et Saint-Roch). Les distances actuellement définies pour les paires origines-destination en question (sans le hors-norme) furent utilisées. Cependant, les pourcentages de classe de chemins furent modifiés par souci de réalisme. Pour chaque site, les pourcentages moyens de chaque classe pour l’ensemble des segments impliquant le site en question furent utilisés. Pour le troisième et le quatrième groupe, de nouvelles configurations furent testées avec et sans une cour opérée au site Vallières (pour vérifier ce que ces changements pouvaient apporter seul ou en sus de la configuration actuelle).

Tableau 5.13: Instances du groupe *G4* (transport hors norme ajouté)

<i>Instance/ Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Shawinigan</i>	<i>Saint-Tite</i>	<i>Saint-Georges</i>	<i>Saint-Adelphe</i>	<i>Saint-Roch</i>	<i>Transport hors norme</i>	<i>Retours en charge</i>
<i>G4.1</i>	✓	✓					✓	
<i>G4.2</i>	✓	✓					✓	✓
<i>G4.3</i>		✓					✓	
<i>G4.4</i>		✓					✓	✓
<i>G4.5</i>	✓		✓				✓	
<i>G4.6</i>	✓		✓				✓	✓
<i>G4.7</i>			✓				✓	
<i>G4.8</i>			✓				✓	✓
<i>G4.9</i>	✓			✓			✓	
<i>G4.10</i>	✓			✓			✓	✓
<i>G4.11</i>				✓			✓	
<i>G4.12</i>				✓			✓	✓
<i>G4.13</i>	✓				✓		✓	
<i>G4.14</i>	✓				✓		✓	✓
<i>G4.15</i>					✓		✓	
<i>G4.16</i>					✓		✓	✓
<i>G4.17</i>	✓					✓	✓	
<i>G4.18</i>	✓					✓	✓	✓
<i>G4.19</i>						✓	✓	
<i>G4.20</i>						✓	✓	✓

Si nous examinons l'impact d'ajouter un accès au transport hors norme aux sites pouvant servir de cour (G4.1 à G4.20 – voir tableau 5.14), nos résultats démontrent que l'impact le plus positif serait à Saint-Tite et à Saint-Georges (avec un gain supplémentaire de 0,10 \$ lorsqu'utilisé avec le site Vallières et si on compare au scénario équivalent sans accès hors norme). Saint-Adelphe et Shawinigan sont les deux sites qui bénéficient le moins de cet accès (entre seulement 0,02 \$ et \$ 0,04 \$/m³). Pour ce qui est de l'impact sur les retours en charge, il est faible (entre une baisse de 0,03 \$ et une augmentation de 0,04 \$/m³). Il doit être précisé que lorsque nous avons testé la possibilité d'ajouter un accès au transport hors norme, nous avons également ajouté un accès hors norme à la zone de récolte où la cour était localisée, de façon à assurer le réalisme du scénario. Le tableau 5.15 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe G4.

Tableau 5.14: Profits et gains pour le groupe G4 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
G4.1	4 895 509 \$	+ 0,59 \$	G4.2	5 825 616 \$	+ 0,77 \$
G4.3	2 363 731 \$	+ 0,10 \$	G4.4	3 168 037 \$	+ 0,26 \$
G4.5	5 149 576 \$	+ 0,64 \$	G4.6	6 144 557 \$	+ 0,83 \$
G4.7	2 905 296 \$	+ 0,21 \$	G4.8	3 847 812 \$	+ 0,39 \$
G4.9	5 139 106 \$	+ 0,64 \$	G4.10	6 039 837 \$	+ 0,81 \$
G4.11	2 722 409 \$	+ 0,17 \$	G4.12	3 622 293 \$	+ 0,35 \$
G4.13	4 686 063 \$	+ 0,55 \$	G4.14	5 652 203 \$	+ 0,74 \$
G4.15	2 175 904 \$	+ 0,07 \$	G4.16	2 878 403 \$	+ 0,20 \$
G4.17	5 055 283 \$	+ 0,62 \$	G4.18	6 039 329 \$	+ 0,81 \$
G4.19	2 733 482 \$	+ 0,17 \$	G4.20	3 716 030 \$	+ 0,36 \$

Tableau 5.15: Faits saillants des résultats du groupe G4

Ajout du hors-norme	<ul style="list-style-type: none"> 1- Impact le plus positif à Saint-Roch et à Saint-Georges 2- Peu d'impact aux autres sites 3- Peu d'impact sur les retours en charge
---------------------	--

5.4.4 Pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée

Dans le cinquième groupe de scénarios (groupe G5, voir tableaux 5.16 et 5.17), il fut présumé que la distance entre une cour et l'usine qui lui est associée était nulle et qu'il n'était donc plus nécessaire d'effectuer un chargement ou un déchargement de camions supplémentaires. Dans les autres scénarios, on présumait une distance de 0,5 km. On suppose qu'on fait entrer le bois à l'usine de la même façon que pour une cour d'usine normale. Les coûts associés font partie des coûts de production des usines. Les sites concernés sont Shawinigan et Saint-Georges ainsi que Rivière-aux-Rats, Parent, Saint-Roch et Saint-Adelphe.

Tableau 5.16: Instances du groupe G5 (pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée – Shawinigan, Saint-Georges et Parent)

<i>Instance/ Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Shawinigan</i>	<i>Saint- Georges</i>	<i>Parent</i>	<i>Pas de chargement</i>	<i>Transport hors norme</i>	<i>Retours en charge</i>
G5.1	✓	✓			✓		
G5.2	✓	✓			✓		✓
G5.3		✓			✓		
G5.4		✓			✓		✓
G5.5	✓	✓			✓	✓	
G5.6	✓	✓			✓	✓	✓
G5.7		✓			✓	✓	
G5.8		✓			✓	✓	✓
G5.9	✓		✓		✓		
G5.10	✓		✓		✓		✓
G5.11			✓		✓		
G5.12			✓		✓		✓
G5.13	✓		✓		✓	✓	
G5.14	✓		✓		✓	✓	✓
G5.15			✓		✓	✓	
G5.16			✓		✓	✓	✓
G5.17	✓			✓	✓		
G5.18	✓			✓	✓		✓
G5.19				✓	✓		
G5.20				✓	✓		✓

Tableau 5.17: Instances du groupe G5 (pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée – Rivière-aux-Rats, Saint-Adelphe et Saint-Roch)

Instance/ Site	Vallières	Rivière- aux-Rats	Saint- Adelphe	Saint- Roch	Pas de chargement	Transport hors norme	Retours en charge
G5.21	✓	✓			✓		
G5.22	✓	✓			✓		✓
G5.23		✓			✓		
G5.24		✓			✓		✓
G5.25	✓		✓		✓		
G5.26	✓		✓		✓		✓
G5.27			✓		✓		
G5.28			✓		✓		✓
G5.29	✓		✓		✓		
G5.30	✓		✓		✓		✓
G5.31			✓		✓		
G5.32			✓		✓		✓
G5.33	✓			✓	✓		
G5.34	✓			✓	✓		✓
G5.35				✓	✓		
G5.36				✓	✓		✓
G5.37	✓			✓	✓	✓	
G5.38	✓			✓	✓	✓	✓
G5.39				✓	✓	✓	
G5.40				✓	✓	✓	✓

Si nous examinons les résultats du groupe G5 (tableau 5.18), nous constatons que les cours situées à proximité des usines de sciage de bois résineux bénéficient beaucoup plus du changement d'hypothèse que celles qui traitent du feuillu. Si on isole l'impact qu'apporte l'absence des coûts de chargement, les gains supplémentaires pour ces scénarios varient entre 0,30 \$/m³ (Rivière-aux-Rats seulement) et 0,47 \$/m³ (Parent avec et sans Vallières). Pour les usines de feuillu, les gains supplémentaires fluctuent entre 0,13 \$/m³ (Shawinigan seulement et accès hors norme) et 0,21 \$/m³ (Saint-Georges seulement). Il semble donc y avoir un lien entre le volume traité à l'usine située à proximité des différents sites (les usines de feuillu ont des capacités beaucoup plus faibles). Pour ce qui est de l'impact sur les gains obtenus grâce aux retours en charge, ceux-ci sont généralement stables. Ces gains augmentent de 0,06 \$/m³ pour le scénario G5.18 (Parent et Vallières) pour un gain total de 1,35 \$/m³. Il s'agit du scénario le plus profitable parmi tous ceux qui furent testés. Cela

peut s'expliquer du fait que l'usine de Parent possède une plus forte capacité qui est relativement sous-exploitée en comparaison de l'usine de Rivière-aux-Rats, laquelle fonctionne au maximum de sa capacité dans tous les scénarios l'impliquant. Par comparaison, dans le scénario *G1.17* (cour à Rivière-aux-Rat et au site Vallières), l'usine de Parent fonctionne à seulement 68% de sa capacité. Ce taux augmente jusqu'à 81% dans le scénario optimal (*G5.18*).

Les scénarios *G5.22* (Rivière-aux-Rats et Vallières avec retours en charge) et *G5.38* (Saint-Roch et Vallières avec retours en charge et accès au hors-norme ajouté) performant également très bien (1,21 \$ et 1,18/m³ respectivement). Le tableau 5.19 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe *G5*. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 5.20 en ordre croissant d'augmentations de profit.

Tableau 5.18: Profits et gains pour le groupe *G5* (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
<i>G5.1</i>	5 399 198 \$	+ 0,69 \$	<i>G5.2</i>	6 450 692 \$	+ 0,89 \$
<i>G5.3</i>	2 889 970 \$	+ 0,20 \$	<i>G5.4</i>	3 687 535 \$	+ 0,36 \$
<i>G5.5</i>	5 592 656 \$	+ 0,73 \$	<i>G5.6</i>	6 528 734 \$	+ 0,91 \$
<i>G5.7</i>	3 033 748 \$	+ 0,23 \$	<i>G5.8</i>	3 848 026 \$	+ 0,39 \$
<i>G5.9</i>	5 624 050 \$	+ 0,73 \$	<i>G5.10</i>	6 687 124 \$	+ 0,94 \$
<i>G5.11</i>	3 336 153 \$	+ 0,29 \$	<i>G5.12</i>	4 015 390 \$	+ 0,42 \$
<i>G5.13</i>	6 147 642 \$	+ 0,84 \$	<i>G5.14</i>	7 084 023 \$	+ 1,02 \$
<i>G5.15</i>	3 812 244 \$	+ 0,38 \$	<i>G5.16</i>	4 572 201 \$	+ 0,53 \$
<i>G5.17</i>	7 227 841 \$	+ 1,04 \$	<i>G5.18</i>	8 796 583 \$	+ 1,35 \$
<i>G5.19</i>	5 334 127 \$	+ 0,68 \$	<i>G5.20</i>	6 010 127 \$	+ 0,81 \$
<i>G5.21</i>	7 257 789 \$	+ 1,05 \$	<i>G5.22</i>	8 095 484 \$	+ 1,21 \$
<i>G5.23</i>	6 274 613 \$	+ 0,86 \$	<i>G5.24</i>	7 282 710 \$	+ 1,06 \$
<i>G5.25</i>	5 265 384 \$	+ 0,66 \$	<i>G5.26</i>	6 379 506 \$	+ 0,88 \$
<i>G5.27</i>	2 802 367 \$	+ 0,19 \$	<i>G5.28</i>	3 556 094 \$	+ 0,33 \$
<i>G5.29</i>	5 414 317 \$	+ 0,69 \$	<i>G5.30</i>	6 392 300 \$	+ 0,88 \$
<i>G5.31</i>	2 885 326 \$	+ 0,20 \$	<i>G5.32</i>	3 593 242 \$	+ 0,34 \$
<i>G5.33</i>	5 748 125 \$	+ 0,76 \$	<i>G5.34</i>	6 700 880 \$	+ 0,94 \$
<i>G5.35</i>	3 232 749 \$	+ 0,27 \$	<i>G5.36</i>	3 970 699 \$	+ 0,41 \$
<i>G5.37</i>	7 150 816 \$	+ 1,03 \$	<i>G5.38</i>	7 938 298 \$	+ 1,18 \$
<i>G5.39</i>	4 749 031 \$	+ 0,56 \$	<i>G5.40</i>	5 533 015 \$	+ 0,72 \$

Tableau 5.19: Faits saillants des résultats du groupe G5

Pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée	<ul style="list-style-type: none"> 1- Amélioration de profits pour tous les scénarios comportant une cour 2- Plus grandes améliorations pour les cours associées à des usines de résineux 3- Peu d'impact sur les retours en charge 4- Scénario avec une cour à Parent et Vallières + retours en charge est le plus performant de tous les scénarios testés dans ce chapitre
--	--

Tableau 5.20: Profits et gains des meilleurs et plus importants scénarios (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain (\$/m³)</i>
G2.11	-4 089 193 \$	- 1,15 \$	G2.12	-3 594 396 \$	- 1,05 \$
G2.19	-65 388 \$	- 0,37 \$	G2.20	514 315 \$	- 0,26 \$
G1.1	1 836 091 \$	-	G1.2	2 449 736 \$	+ 0,12 \$
G1.3	2 269 116 \$	+ 0,08 \$	<i>G1.4</i>	<i>2 972 035 \$</i>	<i>+ 0,22 \$</i>
<i>G1.7</i>	<i>4 496 029 \$</i>	<i>+ 0,52 \$</i>	<i>G1.8</i>	<i>5 526 066 \$</i>	<i>+ 0,71 \$</i>
<i>G4.9</i>	<i>5 139 106 \$</i>	<i>+ 0,64 \$</i>	<i>G4.10</i>	<i>6 039 837 \$</i>	<i>+ 0,81 \$</i>
<i>G3.5</i>	<i>4 825 551 \$</i>	<i>+ 0,58 \$</i>	<i>G3.6</i>	<i>6 063 923 \$</i>	<i>+ 0,82 \$</i>
<i>G4.5</i>	<i>5 149 576 \$</i>	<i>+ 0,64 \$</i>	<i>G4.6</i>	<i>6 144 557 \$</i>	<i>+ 0,83 \$</i>
<i>G1.17</i>	<i>5 646 198 \$</i>	<i>+ 0,74 \$</i>	<i>G1.18</i>	<i>6 457 161 \$</i>	<i>+ 0,90 \$</i>
G5.37	7 150 816 \$	+ 1,03 \$	G5.38	7 938 298 \$	+ 1,18 \$
G5.21	7 257 789 \$	+ 1,05 \$	G5.22	8 095 484 \$	+ 1,21 \$
G2.9	7 181 871 \$	+ 1,04 \$	G2.10	9 291 092 \$	+ 1,25 \$
G2.29	7 244 656 \$	+ 1,05 \$	G2.30	8 315 282 \$	+ 1,26 \$
G5.17	7 227 841 \$	+ 1,04 \$	G5.18	8 796 583 \$	+ 1,35 \$

5.5 Effet du centre sur les émissions de gaz à effet de serre

Voulant ouvrir des perspectives de recherche futures concernant les effets écologiques de l'utilisation du centre, nous avons mesuré les résultats de chacun des scénarios testés sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau du transport. Les configurations pour lesquelles ces données ont été compilées sont les suivantes : 1- aucun site, 2- Vallières seulement, 3- Vallières + Rivière-aux-Rats. Pour chacune d'entre elles, nous avons vérifié les résultats avec et sans retours en charge, ce qui nous donne un total de six scénarios. Les scénarios sont présentés avec le numéro qu'on leur a déjà assigné plus tôt dans le chapitre.

Pour pouvoir facilement retrouver les résultats selon les scénarios, nous présentons de nouveau les caractéristiques de chacun d'entre eux (voir tableau 5.21). Les résultats sont présentés au tableau 5.22.

Tableau 5.21: Instances du groupe G1 (scénario de base)

<i>Instance/Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Rivières-aux-Rats</i>	<i>Retours en charge</i>
<i>G1.1 (Pas de cour)</i>			
<i>G1.2</i>			✓
<i>G1.7</i>	✓		
<i>G1.8</i>	✓		✓
<i>G1.17</i>	✓	✓	
<i>G1.18</i>	✓	✓	✓

Tableau 5.22: Émissions de GES et consommation de carburant par scénario

Donnée/Scénario	<i>G1.1</i>	<i>G1.2</i>	<i>G1.7</i>	<i>G1.8</i>	<i>G1.17</i>	<i>G1.18</i>
Consommation de carburant (litres)	16 410 636	15 973 257	16 881 908	16 463 370	16 530 021	16 967 044
Émissions de tonnes de CO ₂ eq	43 576	42 413	44 796	43 621	44 298	44 700
m ³ récoltés	4 644 739	4 644 739	4 694 469	4 706 215	4 716 803	4 709 283
m ³ livrés	4 061 705	4 061 705	4 322 320	4 338 980	4 370 183	4 423 128
m ³ vendus	3 653 063	3 653 063	3 722 915	3 733 132	3 738 466	3 801 197
1000 km-m ³	705 950	715 906	750 890	765 882	746 123	789 521
L/m ³ récoltés	3,53	3,44	3,60	3,50	3,50	3,60
L/m ³ vendus	4,51	4,39	4,53	4,41	4,42	4,46
L/100 km-m ³ transportés	2,32	2,23	2,25	2,15	2,22	2,15
L/\$ de ventes	0,046	0,045	0,046	0,045	0,045	0,045
L/m ³ disponibles	3,18	3,10	3,27	3,19	3,20	3,29

Les résultats obtenus démontrent que la présence d'une cour de triage au site Vallières ne mène pas à une réduction des émissions de GES, calculées en émission de tonnes de CO₂eq (avec un taux de conversion de 2,66 kg de CO₂ par litre de diesel selon Ressources naturelles Canada 2014). L'augmentation est particulièrement marquée lorsque celle-ci est calculée en chiffres absolus, du fait de l'augmentation du niveau de récolte et de transformation en produits finis (+2,9%). Cette augmentation est moins forte, mais toujours présente si on la ramène au nombre de m³ récoltés ou transformés en produits finis (+1,8%

et + 0,4%). Le seul critère pour lequel il y a une certaine amélioration est celui du nombre de litres par 100 km-m³ parcouru (diminution de 3,3%). Le solveur tire ainsi avantage des possibilités qu'offre la présence du site Vallières en termes de réduction des coûts de triage et d'augmentation de la valeur extraite des forêts, quitte à faire franchir de plus longues distances au bois récolté (augmentation de 5,2% une fois que l'on tient compte de la légère augmentation du volume de récolte).

La présence simultanée d'une cour au site de Rivière-aux-Rats en sus du site Vallières (avec retours à vide) permet de faire diminuer les émissions de GES dans des proportions de 1,5% à 2,5% selon les indicateurs retenus. On remarque une baisse du nombre de m³-km parcourus, et ce, malgré une légère augmentation du nombre de m³ récoltés et transformés en produits finis. Une plus grande efficacité dans le triage a comme résultat une baisse de 0,5% des quantités livrées aux usines sans baisse de la production. Ce résultat confirme ceux de l'analyse de sensibilité du chapitre 4 concernant l'effet de variations de prix du carburant. On peut y constater que les écarts entre les scénarios comportant une cour à Rivière-aux-Rats et ceux avec seulement une cour au site Vallières ont tendance à augmenter à mesure que les coûts de carburant augmentent.

L'utilisation des retours en charge procure des gains en chiffres relatifs et absolus pour le scénario sans cour et celui avec l'utilisation du site Vallières. La baisse de consommation de carburant atteint 2,5%-2,7% en chiffres absolus et monte jusqu'à 4,0%-4,4% si on rapporte celle-ci au nombre de m³-km parcourus. Cependant, les résultats les plus contre-intuitifs sont constatés pour la meilleure configuration du chapitre 4, combinant des cours aux sites Vallières et Rivière-aux-Rats ainsi que les retours en charge. L'utilisation des retours en charge avec cette configuration a pour effet paradoxal de faire augmenter les distances parcourues encore plus que le nombre de m³ récoltés ou transformés. Ainsi, la route la plus utilisée est une combinaison de livraisons de la cour de Rivière-aux-Rats vers l'usine de WestRock, puis de l'usine de Parent vers celle de Trois-Rivières. Il s'agit dans les deux cas de transporter des billes de qualité pâte à des usines de pâtes et papiers avec un véhicule de type B-train. L'économie de coûts est fort importante, mais cela encourage le

solveur à sélectionner plus des livraisons en question de façon à augmenter la production à l'usine de Kruger (qui est en hausse de 70 000 m³ entre les deux scénarios pour cette usine, plus que la hausse globale qui est de 62 500 m³). Il est à noter que la consommation de carburant par m³-km est bel et bien en baisse, mais comme les distances et les quantités transformées sont en hausse sensible, nous constatons des augmentations sur tous les autres plans.

Les résultats illustrent la tendance d'un système de profiter des économies de coûts provoqués par des améliorations de performance pour accroître toujours plus la production avec autant (voir plus) de ressources, plutôt que produire autant (mesuré de façon financière ou matérielle) avec moins de ressources. Cette tendance fut décelée dès le XIXe siècle par l'économiste anglais Stanley Jevons (Sorrell 2009). Celui-ci avait effectivement identifié que les gains de productivité obtenus au niveau des techniques utilisant le charbon avaient menés à une augmentation de l'utilisation du charbon, celui-ci devenant plus économique à utiliser par rapport à d'autres sources d'énergie (*Ibid.*).

La recherche opérationnelle propose des techniques, que ce soit l'ajout d'un facteur dans la fonction objectif ou la modification (voire l'ajout) de certaines contraintes qui permettraient de mitiger voire d'annuler le phénomène observé. On peut ainsi définir une série de solutions pratiquement équivalentes sur le plan de l'objectif originalement optimisé (pour cette thèse, les profits), tout en améliorant significativement la performance du système sur un élément dont on ne tenait pas compte originalement.

5.6 Répartition des gains

Une question importante soulevée par la mise en place d'un centre tel que celui qui est proposé dans notre projet est celle de la répartition des gains qu'apporte le centre en question. Un certain nombre de techniques de répartition des gains sont recensées dans la littérature. Parmi celles qui pourraient être utilisées dans le cadre du centre logistique projeté, une en particulier retient particulièrement notre attention, soit la valeur de Shapley

(Shapley, 1953).¹⁵ Il s'agit du coût marginal moyen des participants lorsque ceux-ci sont insérés (en dernier) dans une coalition au hasard. On mesure donc la différence entre le coût encouru par les membres d'une coalition lorsque tous les membres potentiels en font partie et ceux lorsque tous les membres sauf un en font partie. Le modèle utilisé optimisant les profits, soit la différence entre les coûts et les revenus, il devient alors nécessaire de réfléchir à la meilleure façon de répartir les profits supplémentaires générés de l'utilisation du centre logistique. Il faut ainsi veiller à définir les revenus et les coûts spécifiques de chaque entité participante tout en identifiant les revenus ou coûts qui pourraient être définis comme « non séparables ».

Pour utiliser cette technique, nous avons décidé de procéder à une série d'optimisations supplémentaires pour calculer la différence de gains qu'apporte le centre logistique lorsqu'une ou l'autre des usines participantes est exclue de celui-ci. Ainsi, une usine exclue n'a pas le droit de recevoir du bois des deux cours utilisées (Vallières et Rivière-aux-Rats). Si on examine la répartition des gains marginaux qu'apporte chacune des usines, nous constatons que celle de l'entreprise John Lewis à La Tuque, située très proche du site Vallières actuel, apporte la contribution marginale la plus importante avec un gain de 3 810 107 \$ (sans retours en charge). Cela représente 33% de la somme des contributions marginales. Les usines de WestRock et de Commonwealth Plywood (aussi à La Tuque) viennent respectivement au second et au troisième rang avec 23% et 19% des gains totaux. En quatrième place, nous retrouvons l'usine de Saint-Georges avec 14% du total. Les quatre premières usines apportent donc un gain cumulé représentant 89% de l'ensemble des gains marginaux. L'usine de pâtes et papiers de Domtar à Windsor apporte une contribution représentant 4% du total suivi de l'usine de Savco à Saint-Adelphe (3%). Les usines de Trois-Rivières (2%), de Saint-Roch et de Shawinigan (1% chacune) ferment la marche. Les usines de Parent et de Rivière-aux-Rats n'apportent aucun gain marginal. Nous remarquons par ailleurs que les gains marginaux liés à l'usine de John Lewis et de WestRock sont plus importants lorsque les retours en charge sont utilisés (36% et 24%), et ce, aux dépens des

¹⁵ Cette méthode est plus simple à appliquer à un modèle de maximisation des profits alors que d'autres méthodes ont été spécifiquement conçues pour des modèles de minimisation des coûts.

usines de Commonwealth Plywood, de Saint-Georges et de Trois-Rivières (baisse de 1% pour chacune d'entre elles). On peut examiner les résultats avec les figures 5.4 et 5.5.

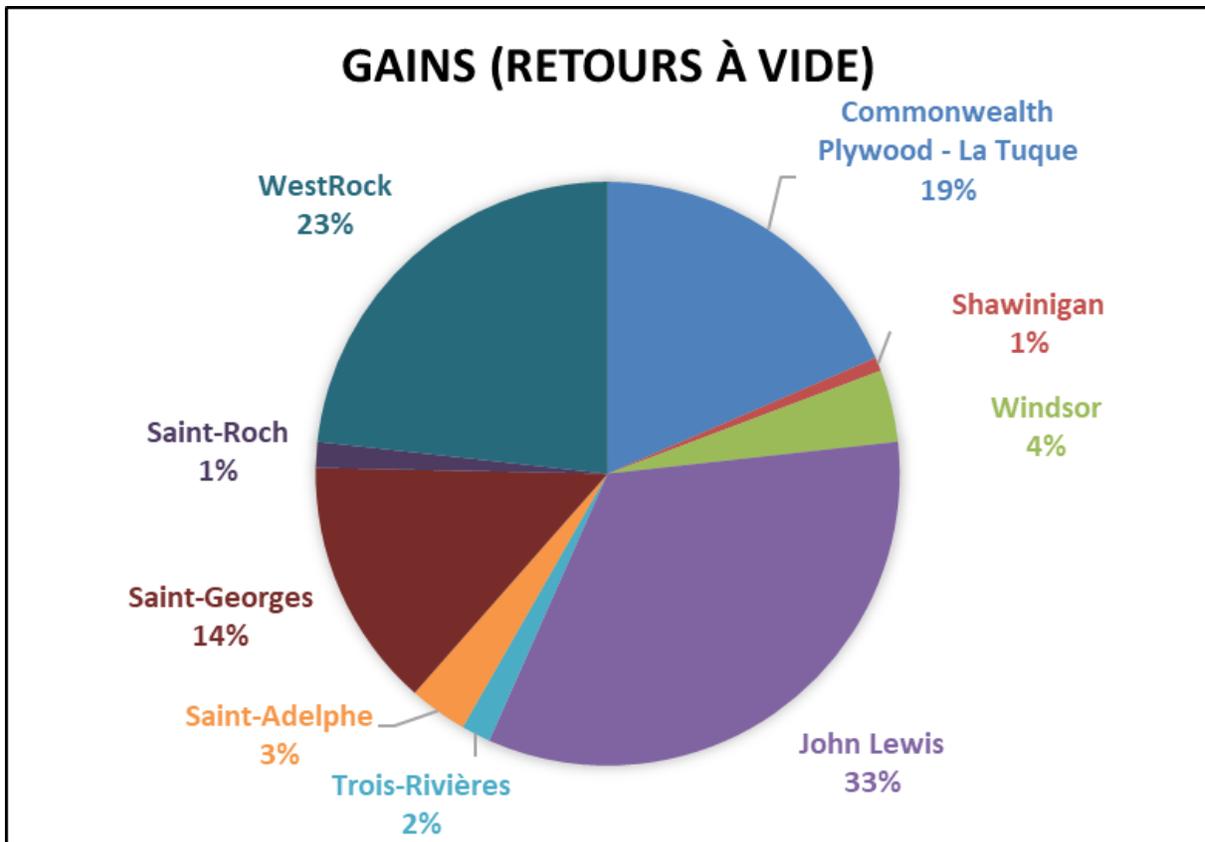


Figure 5.4: Répartition de la contribution marginale aux augmentations de profit engendrées par les cours (retours à vide)

À cette liste, il faudrait ajouter le site de Rivière-aux-Rats, l'usine de Parent et celle de Trois-Rivières (Kruger – Pâtes et papiers) qui contribue de façon majeure aux économies de transport par l'entremise des retours en charge (à hauteur de 57% lorsque le site Vallières et celui de Rivière-aux-Rats sont simultanément utilisés). De façon simplifiée, on peut affirmer que les usines de feuillu apportent l'essentiel des gains au niveau de l'utilisation de la cour comme telle, alors que les usines de résineux contribuent à la majeure partie des gains au niveau du transport, comme on peut le constater à la lecture du Tableau 5.23. Les chiffres présentent les économies de transport générées par l'utilisation des retours en charge selon que l'on avait transporté du bois feuillu, résineux, ou une

combinaison des types (par exemple, une première livraison de bois feuillu suivie d'une livraison de bois résineux, ou vice versa). Les gains de transport sont cependant moins importants et sont encore plus « concentrés » sur quelques sites.

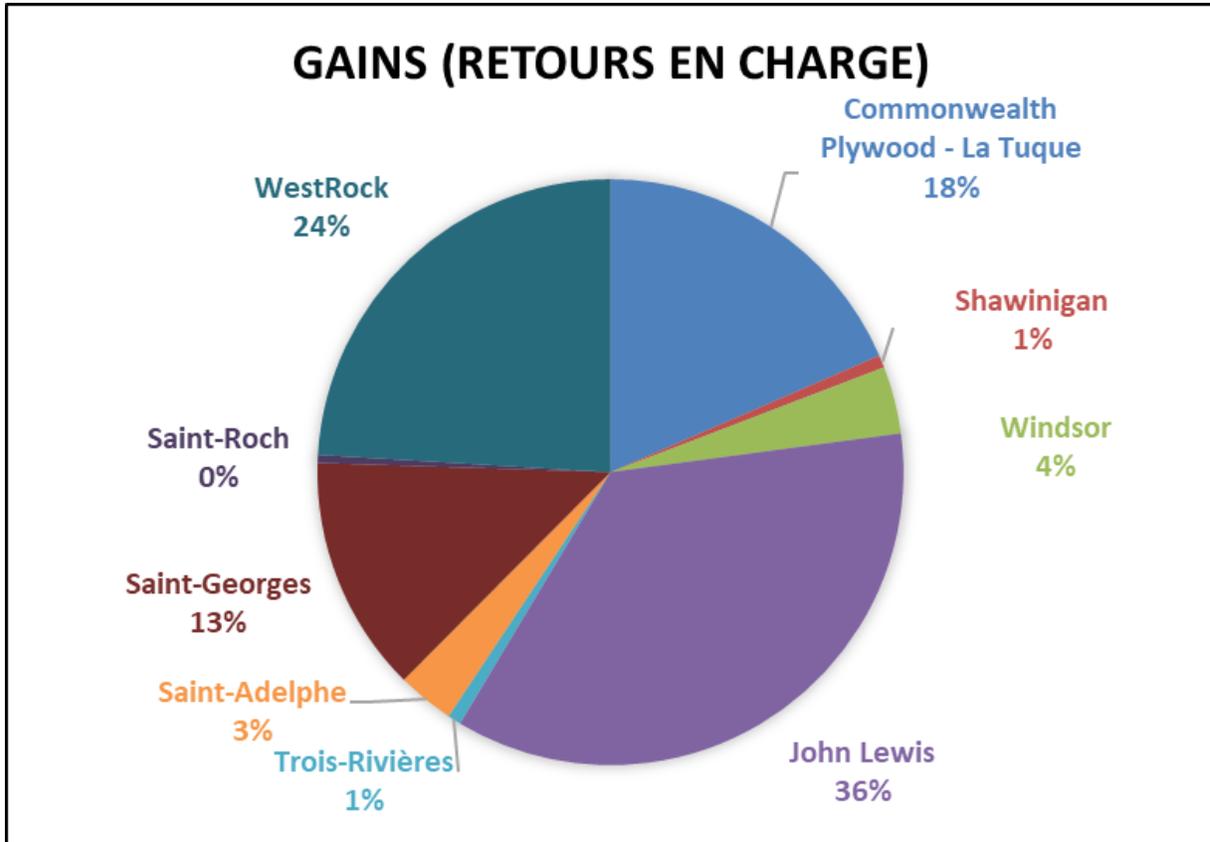


Figure 5.5: Répartition de la contribution marginale aux augmentations de profit engendrées par les cours (retours en charge)

Tableau 5.23: Économies pondérées selon les routes de livraisons

Matière transportée/ Configuration du réseau	Aucun site	Vallières	Vallières + Rivière-aux-Rats
Feuillu seulement	4,3%	10,1%	7,5%
Résineux	13,1%	7,2%	49,3%
Les deux	82,6%	82,7%	43,1%
Présence de résineux	95,7%	89,9%	92,4%

Pour approfondir cette analyse, nous avons également testé l'effet de faire varier le nombre d'usines pouvant recevoir du bois de la cour de triage sur les augmentations de profit générées par le centre. Les résultats démontrent que les quatre premières usines

participantes génèrent l'essentiel des gains potentiels lorsque le site Vallières est utilisé tout seul (environ 96-97%). Une telle proportion est atteinte avec six usines lorsque la cour de Rivière-aux-Rats est utilisée en tandem avec celle de Vallières. Cela confirme que dans l'éventualité où la création d'une structure de gestion commune à toutes les usines de la région serait trop difficile et/ou coûteuse à gérer, il serait possible d'obtenir l'essentiel des gains avec seulement quelques-uns des acteurs potentiels. Les résultats peuvent être observés à la figure 5.6.

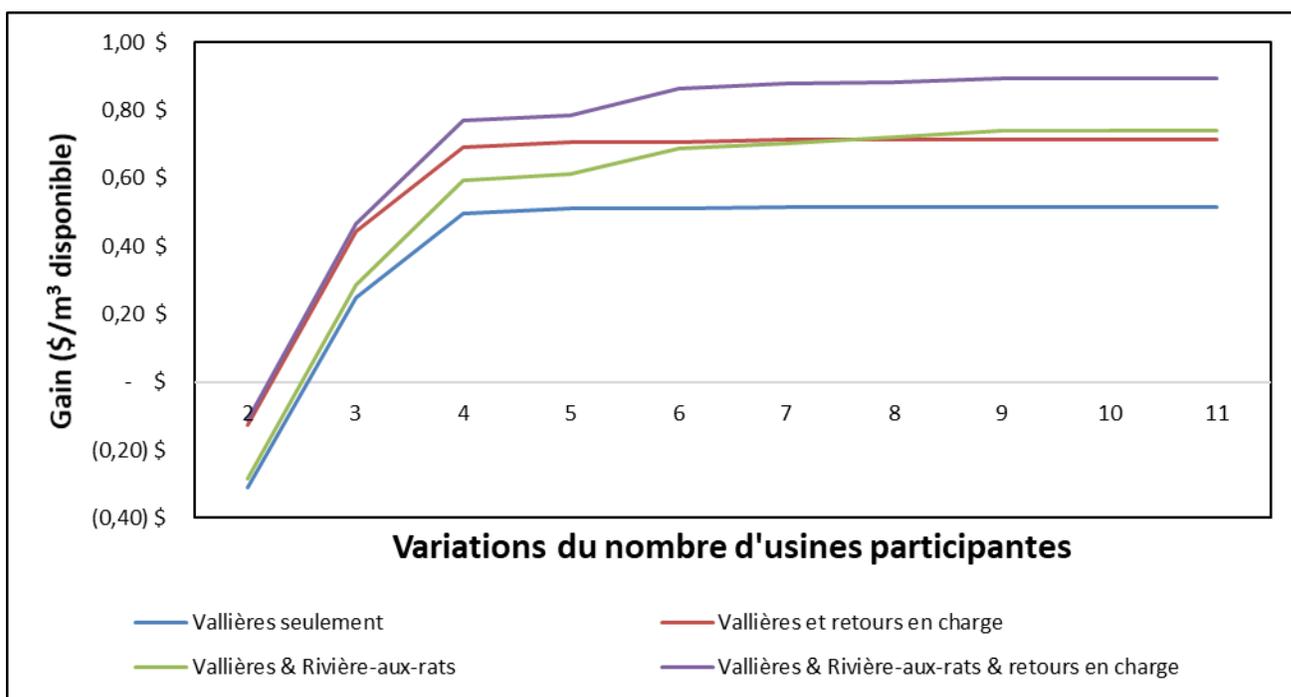


Figure 5.6: Impact du nombre d'usines participantes à la cour de triage sur les augmentations de profit (\$/m³ disponible)

Nous avons aussi effectué un travail de séparation des revenus et des coûts pour les résultats du scénario de base. Il appert que quatre usines du réseau semblent perdre de l'argent (Trois-Rivières, Saint-Roch, Saint-Georges et dans une moindre mesure Rivière-aux-Rats). Ce constat indique que la question du profit par usine mériterait d'être examinée plus en profondeur avant de définir une méthode de partage de gains qui soit juste et efficace.

5.7 Conclusion

Le premier objectif de ce chapitre était d'identifier de nouveaux facteurs influençant la rentabilité d'un centre logistique pour le réseau de la Mauricie, y compris l'effet de facteurs géoéconomiques. L'effet de ces facteurs fut testé à travers des modifications à la structure du réseau sur la rentabilité de celui-ci ainsi que sur les gains engendrés par le centre logistique. La question du partage des profits supplémentaires et du nombre idéal d'usines participantes au projet fut également abordée.

L'analyse de sensibilité effectuée indique clairement que le niveau de dépréciation maximale causée par l'âge ainsi que les coûts d'implantation de la cour ont une très faible influence (négative) sur les gains engendrés par la cour. Une relation significative fut cependant constatée après avoir effectué une analyse de régression linéaire simple.

Il appert par ailleurs que la possibilité d'assurer que les cours soient situées à proximité des usines ajoute des améliorations substantielles aux augmentations de profit associées au centre logistique régional. Il s'agit du changement le plus réaliste parmi ceux qui furent testés et celui qui pourrait le plus facilement être implanté dans la mesure où il ne concerne que la configuration interne de la cour. L'ajout d'un accès hors norme apporte des gains beaucoup plus modestes et est plus difficile et coûteux à mettre en place. Le transfert des garanties de l'usine de Windsor vers celle de WestRock apporterait également des gains intéressants, mais implique une augmentation de la capacité de cette dernière usine pour bien mettre en valeur le bois de trituration. La fermeture de l'usine de Saint-Roch apporterait des augmentations de profit et une amélioration de la performance de la cour de moindre ampleur alors que la fermeture de l'usine de Parent rendrait le réseau non rentable. Les seuls autres sites qui apporteraient des gains substantiels s'ils étaient utilisés comme cour de triage seraient Saint-Roch et Parent.

La concentration du réseau favorise également des coûts de transport plus bas, notamment à travers une plus grande utilisation des retours en charge. Cela a également pour effet de limiter un des désavantages potentiels de l'utilisation d'une cour qui est de provoquer un

détour au niveau du transport. Les autres modifications ont peu d'effet sur les gains engendrés par les retours en charge.

Par ailleurs, une analyse fut effectuée pour définir les usines qui devraient participer en priorité au centre logistique projeté. Il semble que l'essentiel des gains marginaux obtenus peut être engendré avec les usines traitant du bois feuillu. Celles-ci sont au nombre de sept, ce qui tend à confirmer les résultats de l'analyse de sensibilité présentés plus tôt. Notons cependant qu'il faudrait ajouter les sites de Rivière-aux-Rats et de Vallières ainsi que l'usine de Parent et celle de Trois-Rivières pour bien profiter des gains associés à l'utilisation des retours en charge. Ainsi l'essentiel des gains associés à la cour passe par les usines traitant du feuillu, alors que l'implication des usines traitant du résineux permet de chercher la part du lion dans les gains associés aux retours en charge. Les usines de Saint-Roch, de Shawinigan et de Saint-Adelphe apportent les contributions les plus modestes et il pourrait être raisonnable de faire fonctionner le centre sans leur participation selon l'importance des coûts de transaction associés à leur présence.

Au niveau des limites de ce chapitre, une partie des résultats obtenus doivent être relativisés. Outre les coûts importants qu'il y aurait à déboursier pour augmenter de façon significative la capacité de certaines usines ou d'ajouter un accès au transport hors norme à des sites qui n'y ont pas déjà accès, il serait pertinent de procéder à d'autres modifications de réseau pour mesurer pleinement l'effet des facteurs géographiques sur la profitabilité d'un tel centre. Par exemple, quel serait l'impact si des usines étaient déplacées ? Quel serait l'effet de modifier la composition des forêts ? D'autres analyses de sensibilité pourraient être effectuées telle l'évolution de la densité de la matière à travers le temps. L'interaction du réseau avec ceux des régions voisines gagnerait à être examinée. De plus, des analyses supplémentaires devraient être effectuées pour pouvoir répartir les augmentations de profits entre usines participantes d'une façon qui soit juste et équitable envers les différents joueurs. À cela, il faut ajouter les limites déjà identifiées dans le chapitre précédent (modèle déterministe, absence de la saisonnalité de plusieurs éléments).

Aussi, les résultats obtenus ne sont que partiellement généralisables à d'autres réseaux forestiers.

Conclusion

L'objectif général de cette thèse était d'identifier et d'évaluer les facteurs les plus pertinents quant à la rentabilité d'un centre logistique comportant des opérations de triage ainsi qu'une coordination du transport afin de desservir plusieurs entreprises du secteur forestier au sein d'une région donnée. Les objectifs spécifiques du projet étaient les suivants : 1- identifier plusieurs facteurs clés qui influencent la rentabilité d'un centre logistique forestier régional comportant une cour dédiée au triage et une coordination du transport, 2- analyser le fonctionnement d'un centre logistique pour un réseau complexe, 3- étudier les interactions entre la présence d'une cour de triage et l'utilisation des retours en charge au niveau du transport.

De façon à satisfaire chacun de ces objectifs, un modèle de maximisation des profits d'un réseau forestier fut d'abord développé et testé avec des données fictives, inspirées d'un vrai réseau. Le modèle développé comprend les coûts de récolte, les redevances, les coûts de transport, les coûts de triage et de production, les coûts de stockage et les coûts d'implantation d'une cour. Les données furent obtenues d'une multiplicité de bases de données gouvernementales telles que MÉRIS (Bureau de mise en marché des bois) et de rapports de recherche (notamment de *FPIinnovations*). Les résultats obtenus démontrent que l'implantation d'une cour à proximité d'une des usines de pâtes et papiers du réseau apporterait un gain de 0,50 \$/m³ disponible à la récolte. L'utilisation des retours en charge apporterait des gains de l'ordre de 0,45 \$/m³ disponible. L'utilisation combinée de ces deux éléments apportait un gain de 0,88 \$/m³ ce qui signifie qu'aucune synergie ne fut constatée pour le cas théorique. Une analyse de sensibilité fut ensuite effectuée concernant quatre facteurs, soient les coûts de transport, la distance des territoires de récolte, le nombre de camions hors norme disponibles et les coûts de triage au centre logistique. Les résultats de cette analyse montrent qu'au moins trois des quatre facteurs testés ont une influence significative sur les gains qu'engendre un tel centre (le coût de transport n'a pas d'influence significative lorsqu'une cour est utilisée sans les retours en charge).

Le modèle développé fut par la suite testé sur un cas d'étude. Le réseau industriel forestier de la Mauricie (Province de Québec, Canada) fut choisi. Des données concernant la composition des forêts ainsi que le réseau de transport furent recueillies, entre autres auprès des industriels de la région. Certaines données comme l'évolution de la densité, les prix, les coûts de mise en place d'une cour de triage, les redevances ou les taux d'erreur furent ajustés à partir de calculs plus affinés ou de données plus récentes. Le réseau étudié comporte déjà une cour de triage au site Vallières au nord de La Tuque. Trois autres sites furent testés ainsi que la possibilité d'élargir le site Vallières ou de n'opérer aucun site (pour obtenir une base de comparaison).

Selon les résultats obtenus, le site Vallières actuel apporte un gain de 0,52 \$/m³ disponible en profit pour le réseau. Ce gain augmentait à 0,74 \$/m³ si un site est installé à Rivière-aux-Rats. Les autres sites apportaient des gains beaucoup plus faibles. Les retours en charge génèrent des gains se situant entre 0,12 \$ et 0,20 \$/m³ disponible avec un certain effet dynamique, c'est-à-dire des gains sensiblement plus grands lorsqu'une cour est utilisée. Il est à noter qu'un tel effet dynamique était absent dans le cas théorique. De même, le coût de transport avait un effet positif sur l'utilisation d'un centre dans le chapitre 3 alors que le coût de carburant avait un effet légèrement négatif dans le cas d'étude. Cela s'explique par quelques différences clés entre les deux cas comme une plus forte concentration des usines autour du centre logistique dans le cas théorique. Aussi, l'accès au transport hors norme est systématiquement lié à la présence d'une cour dans la première contribution, contrairement à la seconde. L'effet dynamique décelé dans le cas d'étude entre les gains engendrés par la présence d'une cour et par l'utilisation des retours en charge peut s'expliquer par trois facteurs. Premièrement, une telle cour peut servir autant comme origine que comme destination, ouvrant ainsi la porte à d'importantes réductions du transport à vide. Elle permet aussi de réduire la durée moyenne des livraisons, permettant de générer davantage de routes respectant les limites d'heures de conduite. Finalement, la présence de contraintes concernant les garanties d'approvisionnement dans le cas d'étude rend plus intéressant d'utiliser la cour pour contourner en partie la limite engendrée par ces contraintes quant aux combinaisons possibles de paires origines-destinations.

Les résultats respectifs des sites Vallières ainsi que de Parent en comparaison de Rivière-aux-Rats dans le chapitre 5, sont largement contrintuitifs quant à ce qu'on aurait pu attendre compte tenu de la localisation en apparence plus « centrale » de ce dernier site. Cela nous oblige à nous questionner sur la notion même de « périphérie » d'un réseau logistique. La forte proportion de bois disponible à la récolte dans les zones situées plus au nord rend cette région beaucoup moins périphérique qu'il pourrait paraître à première vue.¹⁶ Il appert également que nous sommes en face non pas d'un, mais de quatre réseaux de transport par camion (sans compter le train) qui coexistent et interagissent entre eux et dont les centres de gravité diffèrent. Cette spécialisation des véhicules par type de chemin (et donc de livraison) offre des opportunités d'économies importantes, mais enlève cependant des options au niveau des retours en charge.¹⁷

Une analyse de sensibilité fut de nouveau effectuée, cette fois-ci sur cinq facteurs : les prix des produits, les coûts de chargement et de déchargement, le niveau des redevances, les taux d'erreur de triage et les coûts de carburant. Tous les facteurs testés à l'exception du carburant avaient un impact significatif sur les gains associés à une cour de triage. Seul le carburant a un effet significatif sur l'utilisation des retours en charge (pris isolément).

Le dernier volet de la recherche s'appuie sur une nouvelle analyse de sensibilité concernant trois facteurs : la dépréciation maximale des produits, les coûts de chargement et de déchargement ainsi que le nombre d'usines dans le réseau pouvant recevoir du bois provenant du centre logistique. Nous avons aussi testé des modifications du réseau avec de nouvelles configurations. L'analyse de sensibilité démontre que le niveau de dépréciation maximale et les coûts d'implantation de la cour ont un effet modeste, mais statistiquement significatif sur la profitabilité d'une cour de triage avec de légères variations dans les différences de profits entre les scénarios. En ce qui concerne la taille du réseau, il appert

¹⁶ Un parallèle pourrait être fait au niveau démographique et socio-économique. Ainsi, une lecture superficielle d'une carte géographique nous montre que les États de Californie et de New York sont tous deux situés en « périphérie » des États-Unis continentaux, alors que le Kansas lui, est très « central ».

¹⁷ Sans compter l'effet de devoir effectuer les livraisons de copeaux dans des camions spécifiques à cette matière, limitant encore plus les possibilités de retours en charge.

que l'essentiel des augmentations de profit que peut apporter la cour est atteint grâce à six usines participantes, voir seulement quatre lorsque le seul site Vallières, actuellement en activité, est utilisé. La proximité d'une cour par rapport à l'usine la plus proche est un facteur important de succès si celle-ci peut éviter de payer des frais de transport supplémentaires, y compris de chargement et de déchargement supplémentaires.

Il est important de préciser que plusieurs données utilisées durant ce projet comportaient un certain degré d'incertitude, comme les coûts d'implantation d'une cour dédiée au triage ou encore les coûts de récolte selon les périodes de l'année (été ou hiver). Le modèle utilisé pour notre projet était déterministe. Les réseaux forestiers comportent une dose d'incertitude, que ce soit au niveau de la demande, de la capacité de récolte (qualité de la matière, feux de forêt, épidémies d'insecte), des prix de la matière et de la durée de la période de dégel. De même, les experts consultés ignorent la proportion de bois carié et non utilisable qui est séparée du reste de la matière lors d'un triage en forêt (ce qui évite de le transporter aux usines).¹⁸ Le modèle suppose également une prise de décision centralisée, ce qui signifie que les réseaux forestiers étudiés sont considérés comme des entreprises uniques. Mentionnons aussi que l'analyse de l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) se concentrait exclusivement sur les opérations de transport et ne tenait pas compte des autres activités du réseau, notamment les opérations de chargement et de déchargement.

Un certain nombre de pistes de recherche pourraient être développées comme suite au projet. Il serait par exemple intéressant de créer et de faire rouler une version stochastique du modèle. Cela permettrait d'évaluer comment la capacité de stockage supplémentaire que représente le centre aide à faire face à certains éléments d'incertitude comme les feux de forêt et les épidémies d'insecte. Cette question du stockage peut également être liée avec la saisonnalité de certains phénomènes tels que la demande. Il serait également pertinent d'intégrer les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les coûts du modèle, que ce soit

¹⁸ Notre base de données tenait pour acquis que la totalité du bois en question était séparé du reste de la matière lors d'un triage en forêt.

pour les opérations de transport (y compris le chargement et le déchargement), de triage et de production. Il serait de plus pertinent d'étendre l'horizon de planification au-delà de deux ans pour mieux mesurer l'effet d'un tel centre sur une longue période. Dans une telle éventualité, il serait possible de tester la possibilité de fermer une cour (et de la rouvrir ailleurs et/ou plus tard).

À l'opposé d'un horizon temporel plus long, il serait intéressant de créer une version plus opérationnelle du modèle de façon à avoir une idée plus précise quant aux meilleures façons d'implanter un tel centre. Dans ce même esprit, il faudrait tester différentes méthodes de partage des gains et faire rouler le modèle avec plusieurs acteurs visant à maximiser leur profit (et non un seul profit global) en utilisant un modèle multi-agents, une technique parfois utilisée dans des simulations de marché ou des diagnostics de système (Xie et Liu 2017). Finalement, on gagnerait à explorer l'effet de permettre la création d'une usine de biomasse ou encore une interaction avec les régions voisines sur la rentabilité du centre.

Parmi les contributions de notre projet, celui a permis tout d'abord de procéder à une analyse de sensibilité exhaustive portant sur une large série de facteurs et démontrant la robustesse de la rentabilité du centre proposé. Aussi, un modèle mathématique original. Celui comportait une gamme étendue de coûts, l'ensemble de contraintes d'un réseau forestier. Le modèle d'optimisation développé pourrait être utilisé et adapté à d'autres réseaux forestiers au Canada et ailleurs dans le monde. Il a également permis de procéder à une analyse de l'interaction entre le centre et un réseau environnant ainsi que des effets de l'utilisation d'une cour dédiée au triage sur celle des retours en charge.

Dans cette thèse, nous avons présenté les résultats d'une série d'expérimentations visant à mesurer les gains engendrés par un centre logistique forestier régional comprenant une cour dédiée au triage ainsi qu'une coordination du transport. Nous concluons que le centre projeté engendrerait (et engendre déjà, sous sa forme actuelle) des gains significatifs de profits pour les réseaux étudiés et que la plupart des facteurs testés lors des analyses de

sensibilité effectuées ont une influence significative sur la rentabilité de celui-ci. Nous souhaitons que le travail contenu dans cette thèse incite le monde de la recherche forestière à mener une réflexion plus vaste quant à la pertinence et à l'implantation d'une telle structure ainsi qu'à leur mode de fonctionnement.

Bibliographie

- Abasian, Foroogh., Mikael Rönnqvist, Mustapha Ouhimmou. (2017). Forest fibre network design with multiple assortments : A case study in Newfoundland. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(9), 1232–1243. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0504>
- Alam, Md Bedarul, Chander Shahi, Reino Pulkki. (2014). Economic impact of enhanced forest inventory information and merchandizing yards in the forest product industry supply Chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.06.002>
- Audy, Jean-François, Nadia Lehoux, Sophie D’Amours, Mikael Rönnqvist. (2012a). A Framework for an Efficient Implementation of Logistics Collaborations. *International Transactions in Operational Research*, 19(5): 633–57.
- Audy, Jean-François, Matheus Pinotti Moreira, Karin Westlund, Sophie D’Amours, Luc LeBel, Mikael Rönnqvist. (2012b). *Alternative Logistics Concepts Fitting Different Wood Supply Situations and Markets*. Québec: Rapport CIRRELT, 347 pages
- Auger, Maxime. (2017). *Bénéfices et exigences de l’optimisation mathématique pour la planification de l’allocation du bois aux usines de produits forestiers*. Mémoire de M.Sc., Université Laval, Québec, Québec, 126 pages.
- Baillargeon, Stéphane. (2013). « Transport de marchandises - Mille milliards de milliards de solutions. » *Le Devoir*, Montréal, Québec, page B6,
- Baker, Peter. (2008). The Design and Operation of Distribution Centres within Agile Supply Chains. *International Journal of Production Economics*, 111(1): 27–41.
- Beaudoin, Daniel, Luc LeBel, Jean-Marc Frayret. (2007). Tactical Supply Chain Planning in the Forest Products Industry through Optimization and Scenario-Based Analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1): 128–40.
- Beaudoin, Daniel, Jean-Marc Frayret, Luc LeBel. (2010). Negotiation-Based Distributed Wood Procurement Planning within a Multi-Firm Environment. *Forest Policy and Economics* 12(2): 79–93.
- Bierwirth, Christian, Thomas Kirschstein, Frank Meisel. (2014). On Transport Service Selection in Intermodal Rail/Road Distribution Networks. *BuR - Business Research*, 5(2): 198–219.
- Bilek, E M Ted. (2009). *LSY : Documentation for a Spreadsheet Tool to Evaluate Log-Sort Yard Economics*, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 38 pages.
- Bouchard, Caroline. (2011). « Nanocellulose cristalline : Une force de la nature. » *La Tribune*: page X37.
- Broad, L. R. (1989). Note on Log Sort Yard Location Problems. *Forest Science*, 35(2), 640–645.
- Bureau de mise en marché des bois : <https://bmmb.gouv.qc.ca/>
(dernière consultation en mai 2018).
- Canadian Biomass Magazine : <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/>
(dernière consultation en octobre 2018).

- Carlgren, Carl-Gustaf, Dick Carlsson, Mikael Rönnqvist. (2006). Log Sorting in Forest Harvest Areas Integrated with Transportation Planning Using Backhauling. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(3): 260–71.
- Carlsson, Dick, Mikael Rönnqvist. (2005). Supply Chain Management in Forestry—case Studies at Södra Cell AB. *European Journal of Operational Research*, 163(3): 589–616.
- Carlsson, Dick, Sophie D’Amours, Alain Martel, Mikael Rönnqvist. (2009). Supply Chain Planning Models in the Pulp and Paper Industry. *INFOR*, 47(3): 167–83.
- Castonguay (2015), Logistique du transport, une nécessité en forêt et à l’usine. *Opérations forestière et de scierie*, jeudi le 28 mai : <https://www.operationsforestieres.ca/recolte/logistique-du-transport-une-necessite-en-foret-et-a-lusine> (dernière consultation en janvier 2019).
- Chan, Tuyva, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2008). *Locating Satellite Yards in Forestry Operations* (Rapport). CIRRELT, Montreal, Québec, 38 pages.
- Chan, Tuyva, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2009). Locating Satellite Yards in Forestry Operations. *INFOR*, 47(3), 223–234.
- Chung, Woodam, Tyron J Venn, Dan Loeffler, Greg Jones, Han-Sup Han, Dave E Calkin. (2012). Assessing the Potential for Log Sort Yards to Improve Financial Viability of Forest Restoration Treatments. *Forest Science*, 58(6): 641–51.
- Clarke, G., Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581.
- Cloutier, Martin, Yves Dessureault, Riadh Azouzi, Denis Hotte, Sylvain Savard, Vincent Vallée. (2009). *Le Centre de valorisation de la fibre*, Rapport CRIQ, 326 pages.
- Constantineau, Serge, Sébastien Lacroix. (2012), Opportunités de valorisation des bois de trituration des forêts privées, *FPIInnovation*, PowerPoint Presentation : <http://www.foretprivee.ca/wp-content/uploads/2012/06/FPI-AGA-2012.pdf> (dernière consultation en août 2018).
- D’Amours, Sophie, Mikael Rönnqvist, Andres Weintraub. (2008). Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR*, 46(4): 265–81.
- D’Amours, Sophie, Rafael Epstein, Andres Weintraub, Mikael Rönnqvist. (2010). Operations Research in Forestry and Forest Products Industry. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*: 1–19.
- Dessureault, Yves. (2010). Une autre façon de voyager - Centre de valorisation de la fibre CVF, Présentation PowerPoint du CRIQ, 49 pages. <https://www.afat.qc.ca/images/file/UneautrefaondevoyagerYDessureault.pdf>
- Dramm, J. R., Jackson, G. L., Wong, J. (2002). *Review of Log Sort Yards*. USDA Forest Service General Technical Report, FPL-GTR-132., Forest Products Laboratory, Madison, WI, 39 pages.
- Dramm, John Rusty, Robert Govett, E M Ted Bilek, Gerry L Jackson. (2004). *Log Sort Yard Economics , Planning and Feasibility*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, 31 pages.
- Duchesne, I, L Wilhelmsson, K Spångberg. (1997). Effects of in-Forest Sorting of Norway Spruce (Picea Abies) and Scots Pine (Pinus Sylvestris) on Wood and Fibre Properties 1. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 790–95.

- Enginnering Toolbox (The)* : https://www.engineeringtoolbox.com/weigt-wood-d_821.html
(dernière consultation en juillet 2018).
- Epstein, Rafael, Mikael Rönnqvist, Sophie D'Amours, Andres Weintraub. (2007). Chapter 20 : Forest Transportation. *Handbook of Operations Research in Natural Resources, Springer US* : 391-403
- Favreau, Jean. (1995). La production de copeaux et de billes de sciage en usines satellites dans l'est du Canada. *Institut canadien de recherches en génie forestier*, 31 pages
- FORAC (2016a) : <https://www.forac.ulaval.ca/transfert/plateformes/logilab/>
(dernière consultation en octobre 2018).
- FORAC (2016b) : <https://www.forac.ulaval.ca/transfert/plateformes/silvilab/>
(dernière consultation en octobre 2018).
- Forget, Pascal, Sophie D'Amours, Jean-Marc Frayret. (2008). Multi-Behavior Agent Model for Planning in Supply Chains: An Application to the Lumber Industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(5): 664–79.
- FPInnovations* : http://fpsuite.ca/1_fr/fpinterface.html (dernière consultation en juin 2018).
- Frisk, Mikael, Maud Göthe-Lundgren, Kurt Jörnsten, Mikael Rönnqvist. 2010. Cost Allocation in Collaborative Forest Transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2): 448–58.
- Gagnon-Paradis, Iris. (2013). « Le secteur se réinvente, mais la relève manque à l'appel. » *La Presse*: page 7.
- Gingras, Catherine, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2007). Un algorithme de minimisation du transport a vide appliqué à l'industrie forestière. *INFOR*, 45(1), 41–47.
- Gil, Alvaro, Jean-Marc Frayret. (2016). Log classification in the hardwood timber industry: method and value analysis. *International Journal of Production research*, 54(15): 4669–4688.
- Han, Han-Sup, E M Ted Bilek, John Rusty Dramm, Dan Loeffler, Dave Calkin. (2011). Financial Feasibility of a Log Sort Yard Handling Small-Diameter Logs: A Preliminary Study. *Western Journal of Applied Forestry*, 26(4): 174–82.
- Huang, Di, Qiu Hong Zhao, Cheng Cheng Fan. (2010). Innovative Quick Response Programs in Logistics and Supply Chain Management. eds. T. C. Edwin Cheng and Tsan-Ming Choi. *International Handbook on Information Systems*: 297–312.
- IBM (2019): <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer> (dernière consultation en janvier 2019).
- Keron, Robert. S. (2012). *Integrating a tactical harvest - scheduling model with a log short- yard location model*. Mémoire de M.Sc., Lakehead University, Thunder bay, Ontario, 69 pages.
- Kong, Jiehong, Mikael Rönnqvist, Mikael Frisk. (2012). Modeling an Integrated Market for Sawlogs , Pulpwood , and Forest Bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(2): 315–32.
- Landry, Maurice, Jean-Louis Malouin, Muhittin Oral. (1983). Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, 14(3), 207–220.
- Langevin, André. Diane Riopel. (2005). *Logistics Systems Design and Optimization*, Springer, New York, New York, 388 pages.
- Larocque, Sylvain. (2013). « Le PDG tire à boulets rouges sur Québec » *La Presse*: 2–4.

- LeBel, Luc, J. Steven Carruth. (1997). Simulation of Woodyard Inventory. *Forest Products Journal*, 47(3): 52–57.
- LeBel, Luc, Edith Brotherton, Marie-Lou Gravel, (2018). When taking your time is the best approach for improving logistic performance, Présentation PowerPoint, 6th International Forest Engineering Conference (FEC 2018). http://www.foresteng.canterbury.ac.nz/documents/FEC2018%20presentations%20PDFs/FEC%201A/FEC2018_1A_5_LeBel_logistic_performance_woodyard.pdf
- Lee, Hau L., V. Padmanabhan, Seungjin Whang. (1997). Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science* 43(4): 546–58.
- Lehoux, Nadia, Philippe Marier, Sophie D’Amours, Denis Ouellet, Jean Beaulieu. (2012). *Le réseau de création de valeur de la fibre de bois canadienne*, Rapport CIRRELT, 228 pages.
- Lemieux, René. (2014). Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l’État. *Bureau de mise en marché des bois*, Québec, Québec, 133 pages.
- Marier, Philippe, François Sarrazin. (2013). *Simulation du modèle VTM avec des données d’entreprises forestières de la région de la Mauricie*. Québec, 11 pages.
- Marier Philippe, Stéphane Bolduc, Maha Ben Ali, Jonathan Gaudreault. (2014a). S&OP Network model for commodity lumber products. 10th International Conference of Modelling and Simulation- MOSIM'14. Nancy, France, 5-7 novembre), 9 pages
- Marier Philippe, Jonathan Gaudreault, Benoit Robichaud. (2014b). Implementing a MIP Model to Plan and Schedule Wood Finishing Operations in a Sawmill: Lessons Learned. 10th International Conference of Modelling and Simulation- MOSIM'14. Nancy, France, 5-7 novembre.), 7 pages
- Mason, Robert, Chandra Lalwani, Roger Boughton. (2007). Combining Vertical and Horizontal Collaboration for Transport Optimisation. *Supply Chain Management: An International Journal* 12(3): 187–99.
- Matthews, Donald Maxwell. (1942). *Cost Control in the Logging Industry*. ed. McGraw-Hil. New York, 374 pages.
- Mentzer, John T, James S Keebler, Nancy W Nix, Carlo D Smith, Zach G Zacharia. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics* 22(2): 1–25.
- Michaelsen, Jan, Emmanuel Tran. (2008). Analyse du flux de bois pour la scierie St-Roch de Kruger avec l'utilisation de parc de transfert et de camion hors normes, *FPInnovations Feric*, Pointe-Claire, Québec, Rapport de contract (confidentiel) RC-0387-1, 68 pages.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, (2015) :
- Plan d’aménagement forestier intégré tactique pour l’UAF 041-51 (2013-2018) : https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/consultation/mauricie/PAFIT_UA_041_51_2015.pdf
- Plan d’aménagement forestier intégré tactique pour l’UAF 042-51 (2013-2018) : https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/consultation/mauricie/PAFIT_UA_042_51_2015.pdf
- Plan d’aménagement forestier intégré tactique pour l’UAF 043-51 (2013-2018) : https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/consultation/mauricie/PAFIT_UA_043_51_2015.pdf
- Plan d’aménagement forestier intégré tactique pour l’UAF 043-52 (2013-2018) :

- https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/consultation/mauricie/PAFIT_UA_043_52_2015.pdf
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, (2016) : Enquête 2013-2014 sur les coûts d'opération et les revenus liés au bois d'œuvre, Mars 2016, Groupe DDM, Québec, Québec, 95 pages :
https://bmmb.gouv.qc.ca/media/34825/enqu_te_quinquennale_2014_rapp_final_vol_ets_i_et_ii_2016-03-18.pdf
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, (2017a) : Programme d'investissement dans les forêts traitées en coupes partielles - Aide supplémentaire à l'aménagement des forêts feuillues et mixtes 2017-2018, 4 pages :
https://bmmb.gouv.qc.ca/media/40303/aide_am_nagement_for_t_feuillue_modalit_s_2017-18.pdf
- Ministère des forêts, de la faune et des parcs, (2017b), *Chiffres clés du développement forestier. Édition 2017*, 7 pages : <http://snapqc.org/uploads/chiffres-cles.pdf>
- Moad, Kamel. (2016) : Modélisation et optimisation multi-niveaux du transport forestier. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, Bordeaux, France, 123 pages.
- Olhager, Jan, Sebastian Pashaei, Henrik Sternberg. (2014). Design of global production and distribution networks A literature review and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(1–2), 138–158.
<https://doi.org/10.1108/IJPDLM-05-2013-0131>
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, (2009), *Manuel de foresterie*, Québec, Multimondes, 1574 pages.
- Marowits, Ross. (20 mai 2010). Kruger supprimera 440 postes à Trois-Rivières. *La Tribune*, Sherbrooke, Québec, p. 27.
- Partenariat Innovation-Forêt*, (2015). Tests de conditionnement de la biomasse, Québec, Québec : http://partenariat.qc.ca/wp-content/uploads/2015/12/OT-221_entreposage_sechage_biomasse.pdf (dernière consultation en juillet 2018).
- Pentico, David W. (2008). The Assortment Problem: A Survey. *European Journal of Operational Research*, 190(2): 295–309.
- Ressources naturelles Canada (2014) :
https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oec/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_f.pdf (dernière consultation en octobre 2018).
- Ressources naturelles Canada (2016) : <http://www.nrcan.gc.ca/forests> (dernière consultation en octobre 2018).
- Ressources naturelles Canada (2018) : L'état des forêts au Canada – Rapport annuel 2018, <http://cfs.nrcan.gc.ca/entrepotpubl/pdfs/39337.pdf> (dernière consultation en décembre 2018).
- Sarrazin, François, Luc LeBel, Nadia Lehoux. (2018). Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistics Center. *Forest Science*, 64(3), 233-245.
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxy001>
- Sarrazin, François, Luc LeBel, Nadia Lehoux. (2019). Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(2), 179-189.

- Sessions, John, Gonzalo Paredes. (1987). A Solution Procedure for the Sort Yard Location Problem in Forest Operations. *Forest Science*, 33(3), 750–762.
- Sessions, John, Kevin Boston, Roger Stewart. (2005). Log sorting location decisions under uncertainty. *Forest Products Journal*, 55(12), 53–57.
- Sfeir, Tamires De Almeida, José Edourado Pecora, Angel Ruiz, Luc LeBel. (2016). Procurement Planning of Forestry Industry Supply Chain – A Canadian Application. *ILS 2016 - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, 2016, 8 pages.
- Shahi, Shashi, Reino Pulkki. (2015). A simulation-based optimization approach to integrated inventory management of a sawlog supply chain with demand uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(May), 1313–1326. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0373>
- Shapley, Loyd S. (1953). A Value for N-Person Games. *Annals of Mathematics Studies* 28: 307–17.
- Sorrell, Steve. (2009). Jevon’s Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy* 37: 1456-1469.
- StadieSeifi, Maryam, Nico P. Dellaert, Wim Nuijten, Tom Van Woensel, Rasa Raoufi. (2014). Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 233(1): 1–15.
- Stuart, William B. (2003). Checking Our Foundations : Matthews’ Least Cost Models Revisited. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(1): 30–35.
- Stuart, William B., Laura A. Grace, Robert K. Grala. (2010). Returns to Scale in the Eastern United States Logging Industry. *Forest Policy and Economics*, 12(6): 451–56.
- Tardif, Valérie, Sridhar Tayur, James Reardon, Reid Stines, Pete Zimmerman. (2010). Implementing Seasonal Logistics Tactics for Finished Goods Distribution at Deere & Company’s C & CE Division. *Operations Research*, 58(1), 1–15.
- Tijs, Stef, Theo S.H. Driessen. (1986). Game Theory and Cost Allocation Problems. *Management Research Review* 32(8): 1015–28.
- Troncoso, Juan., Sophie D'Amours, Patrick Flisberg, Mikael Rönnqvist, Andres Weintraub, (2015). A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain — a case study in the Chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(Avril), 937–949.
- Turkel, Tux. (3 septembre 2017). « Stung by setbacks, wood suppliers seek new markets and products to survive ». *Portland Press Herald*, Portland ME, 1–5.
- Ville de La Tuque : <http://www.ville.latuque.qc.ca/fr/affaires/parcs-industriels/> (dernière consultation en septembre 2017).
- Volpé, Sylvain. (2014). Biomasse forestière : L’enjeu de la qualité, Présentation PowerPoint *FPInnovations*, 63 pages. http://www.partenariat.qc.ca/videoconferences/presentation_s.volpe_6%20fevrier.pdf
- Wengert, Eugene M. (2006). *Principles and Practices of Drying Lumber*, Rapport *Lignomat USA Ltd.*, Blacksburg, Virginie, 59 pages.
- Yang, Xu. (2013). A Review of Distribution Related Problems in Logistics and Supply Chain Research. *International Journal of Supply Chain Management*, 2(4), 1–8.
- Xie, Jing, Chen-Ching Liu. (2017). Multi-Agents Systems and their applications. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 7(1), 188–197.

Annexe A – Modèle de la phase 2 (chapitre 3)

Nous présentons ici le modèle de la phase 2 utilisé dans le chapitre 3. Les contraintes (2) à (5), (15), (22), (23), (27), (29), (30) et (32) sont également utilisées dans la phase 1 de l'optimisation. Les contraintes (34) et (35) sont utilisées dans la phase 2 et ont été présentées dans le chapitre 2. Les contraintes (61) à (78) remplacent la fonction objectif et les contraintes (7) à (14), (16) à (21), (24) à (26), (28), (31) et (33) dans la phase 2. Le tableau 8.1 établit les correspondances entre ces différentes expressions selon leurs phases respectives et fournit une brève description de leur rôle. La contrainte (32) (définition de la variable binaire de sélection de la cour) fut placée juste avant la contrainte (79) représentant les autres définitions de variables.

Les ensembles, paramètres et variables utilisés spécifiquement durant la phase 2 du modèle sont les suivants:

Ensemble

A : Ensemble des âges $a \in A$.

Paramètres

V^{pa} : Valeur (en \$) du produit p à l'âge a .

o^{pa} : Tonnes métriques par m^3 du produit p à l'âge a .

Variables

q_{ij}^{plat} : Quantité du produit p livré du site i au site j , durant la période l et avec un véhicule de type t .

x_i^{spla} : Quantité du produit p , d'un âge a , traité avec le processus de triage ou de production s au site i et durant la période l .

\mathfrak{S}_i^{spla} : Quantité du produit p , d'un âge a , extraite du processus de triage ou de production s durant la période l et au site i .

x_{ic}^{pla} : Quantité du produit p , d'un âge a , vendue par le site i , au client c et durant la période l .

I_i^{pla} : Niveau de stockage du produit p d'un âge a , durant la période l et au site i .

Fonction objectif: *Maximiser*

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{c \in C^+} \sum_p \sum_l V^p x_{ic}^{pl} - \sum_f \sum_{p \in MP} \sum_l c_f^p x_f^{pl} - \sum_{p \in PR} \sum_f \sum_{j \in D} c_f^p x_{fj}^p - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_a \sum_i c_i^{sp} x_i^{spla} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t c_{ij}^{plt} q_{ij}^{plat} - \sum_r \sum_l \sum_t c^r x^{rt} - \sum_y c_y z_y - \sum_y c_y^+ n_y - \sum_i \sum_p \sum_l \sum_a c_i^p v^l I_i^{pla} \end{aligned} \quad (62)$$

Sujet à:

$$x_f^{pl} \leq H_f^{+pl} \quad \forall f \in F, p \in MP, l \in L^+ \quad (2)$$

$$\sum_p \sum_l x_f^{pl} \leq Q_f \quad \forall f \in F \quad (3)$$

$$\sum_p \sum_l x_f^{pl} \geq 0.9 * Q_f \quad \forall f \in F \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_p x_f^{pl} \leq Q^l \quad \forall l \in L^+ \quad (5)$$

$$n_y \leq \max_y \quad \forall y \in Y \quad (15)$$

$$\sum_r (W_b^r \mu^r W^{rt} x^{rl}) \leq v^l \beta^t x_b^{lt} \quad \forall b \in B, l \in L^+, t \in T \quad (22)$$

$$\sum_b x_b^{lt} \leq \Omega^t \quad \forall l \in L^+, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_p x_{ij}^{plt} = \sum_r \eta_{ij}^{rt} x^{rl} \quad \forall i \in O, j \in D, l \in L^+, t \in T \quad (27)$$

$$\frac{x_f^p}{Q_f^p} = \frac{\sum_{p \in MP} \sum_l x_f^{pl}}{Q_f} \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (29)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ff}^p = x_f^p \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (30)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p x_y^{spl} \geq v^l \text{Threshold}_y \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (34)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p x_m^{spl} \geq v^l \text{Threshold}_m \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (35)$$

$$\sum_p \sum_a I_i^{pla} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L^+ \quad (63)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A | l \& a \geq 1 \quad (64)$$

$$I_i^{pla} = x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A | l \geq 1, a = 0 \quad (65)$$

$$I_i^{pl^{\max} a} \geq I_i^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, a \in A | l = 0 \quad (66)$$

$$\mathfrak{S}_i^{spla} = \sum_{p' \in PE} g^{sp'p} x_i^{sp'la} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L^+, s \in S, a \in A \quad (67)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_l \sum_a x_y^{spla} \leq n_y Q_y \quad \forall y \in Y \quad (68)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_a x_y^{spla} \leq n_y v^l Q_y^l \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (69)$$

$$\sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_a x_y^{spla} \geq \frac{v^l}{2 * \sum_l v^l} * \sum_{s \in SPE} \sum_p \sum_a x_y^{spla} \quad \forall y \in Y, l \in L^+ \quad (70)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_l \sum_a x_m^{spla} \leq Q_m \quad \forall m \in M \quad (71)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_a x_m^{spla} \leq v^l Q_m^l \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (72)$$

$$\sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_a x_m^{spla} \geq \frac{v^l}{2 * \sum_l v^l} * \sum_{s \in SPDV} \sum_p \sum_a x_m^{spla} \quad \forall m \in M, l \in L^+ \quad (73)$$

$$\sum_a q_{ij}^{plt} \leq x_{ij}^{plt} E^t \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (74)$$

$$\sum_a o^{pa} q_{ij}^{plat} \leq x_{ij}^{plt} Q_{ij}^{lt} \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (75)$$

$$\sum_a o^{pa} q_{ij}^{plat} \geq \frac{x_{ij}^{plt} Q_{ij}^{lt}}{2} \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (76)$$

$$\sum_i \sum_a x_{ic}^{pla} \leq d_c^{pl} \quad \forall c \in C^+, p \in PDV, l \in L^+ \quad (77)$$

$$\sum_f x_{ff}^p \geq \sum_a \sum_c \sum_t x_{jc}^{pla} + \sum_a \sum_s \sum_l x_j^{spla} \quad \forall j \in D, p \in PR \quad (78)$$

$$z_y \in \{0;1\} \quad \forall y \in Y, f \in F \quad (32)$$

$$I_i^{pla}, x_f^{pl}, x_i^{spla}, q_{ij}^{plat}, x_{ij}^{plt}, x^{rl}, x_{ff}^p, x_{ic}^{pla}, x_f^p, x_b^{lt}, n_y, \mathfrak{S}_i^{spla} \geq 0 \quad (79)$$

$$\forall i, j \in N, m \in M, f \in F, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T, y \in Y, c \in C, a \in A$$

Tableau 8.1: Correspondance des expressions (chapitre 3)

Phase 1	Phase 2	Description
(1)	(62)	Fonction objectif
(7)-(12)	(64)-(65)	Conservation de flux (stockage)
(13)	(66)	Conservation de flux (stockage)
(14)	(67)	Conservation de flux (trilage)
(16)	(68)	Capacité globale de la cour
(17)	(69)	Capacité de la cour par période
(18)	(70)	La cour fonctionne au minimum à 50% de sa capacité
(19)	(71)	Capacité globale des usines
(20)	(72)	Capacité des usines par période
(21)	(73)	Usines fonctionnent au minimum à 50% de leur capacité
(24)	(74)	Capacité des camions (volume)
(25)	(75)	Capacité des camions (poids)
(26)	(76)	Camions remplis au minimum à 50% de leur capacité
(28)	(77)	Pas de dépassement de la demande
(31)	(78)	Pas de matière abandonnée à perte aux usines
(33)	(79)	Non-négativité des variables

Annexe B – Modèle de la phase 2 (chapitre 4)

Nous présentons ici le modèle de la phase 2 utilisé dans le chapitre 4. Les contraintes (37), (38), (43), (48), (49), (51) et (52) sont également utilisées dans la phase 1 de l'optimisation. Les contraintes (58) à (61) sont utilisées dans la phase 2 et ont été présentées dans le chapitre 4. Les contraintes (80) à (91) ont été décrites dans le texte à la fin de la section du chapitre 4 portant sur la modélisation et remplacent la fonction objectif et les contraintes (41), (42), (44), (45), (46), (50) ainsi que (53) à (57) dans la phase 2. Le tableau 8.2 permet d'établir les correspondances entre ces expressions dans leurs phases respectives et fournit une brève description de leur rôle.

Fonction objectif: *Maximiser*

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{c \in C} \sum_p \sum_l \sum_a V^{pca} x_{ic}^{pla} - \sum_{i \in F} \sum_p \sum_l c_i^p x_i^{pl} - \sum_{i \in F} \sum_{j \in M} \sum_p c_{ij}^p x_{ij}^p - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_t \sum_a c_i^s x_i^{spla} \\ & - \sum_l \sum_j \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t c_{ij}^{plat} q_{ij}^{plat} - \sum_r \sum_l \sum_t c^r x^{rl} - \sum_{i \in Y} c_i z_i - \sum_t c_i^+ n_i - \sum_t \sum_p \sum_l \sum_a c_i^{pl} I_i^{pla} \end{aligned} \quad (80)$$

Sujet à:

$$Q_i^* \min_i \leq \sum_p \sum_l x_i^{pl} \leq Q_i \quad \forall i \in F \quad (37)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p x_i^{pl} \leq Q^l \quad \forall l \in L^+ \quad (38)$$

$$\min_i \leq n_i \leq z_i \max_i \quad \forall i \in D \quad (43)$$

$$\sum_r (W^r x^{rl}) \leq \beta^l x_i^{lt} \quad \forall i \in D, l \in L^+, t \in T \quad (48)$$

$$\sum_{i \in Y \cup M} x_i^{lt} \leq \Omega^t \quad \forall l \in L^+, t \in T \quad (49)$$

$$\sum_p x_{ij}^{plt} = \sum_r \eta_{ij}^r x^{rl} \quad \forall i \in N, j \in D, l \in L^+, t \in T \quad (51)$$

$$\frac{\sum_{j \in M} x_{ij}^p}{Q_i^p} = \frac{\sum_l \sum_a x_i^{pla}}{Q_i} \quad \forall i \in F, p \in P \quad (52)$$

$$\sum_p \sum_a I_i^{pla} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L^+ \quad (58)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L^+, a \in A | a \geq 1 \quad (59)$$

$$I_i^{pla} = x_i^{pla} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L^+, a \in A | a = 0 \quad (60)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_a x_i^{spla} \geq \text{Threshold}_{il} \quad \forall i \in D, l \in L^+ \quad (61)$$

$$I_i^{pla} \geq I_i^{pl'a} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A | l = l^{\max} \ \& \ l' = 0 \quad (81)$$

$$\mathfrak{S}_i^{spla} = \sum_{p' \in PE} g^{sp'p} x_i^{sp'la} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L^+, s \in S, a \in A \quad (82)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_l \sum_a x_i^{spla} \leq n_i Q_i + Q_i^+ \quad \forall i \in D \quad (83)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_a x_i^{spla} \leq n_i Q_i^l + Q_i^{l+} \quad \forall i \in D, l \in L^+ \quad (84)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_a x_i^{spla} \geq \nu^{il} \frac{Q_i^l}{\sum_l Q_i^l} * \sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_a \bar{x}_i^{spla} \quad \forall i \in D, l \in L^+ \quad (85)$$

$$\sum_a o^{pa} q_{ij}^{plat} \leq \delta^{pl} x_{ij}^{plt} Q_{ij}^l + (1 - \delta^{pl}) x_{ij}^{plt} E^t \quad \forall i \in N, j \in D, p \in P, l \in L^+, t \in T \quad (86)$$

$$\sum_{i \in F} x_{ij}^p \geq \sum_c \sum_l \sum_a x_{jc}^{pla} + \sum_s \sum_l \sum_a x_j^{spla} \quad \forall j \in D, p \in P \quad (87)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t q_{ij}^{plat} - \sum_s \sum_{p \setminus p' \neq p} \sum_l \sum_a \sum_t \mathfrak{S}_i^{sp'la} - \sum_{j \setminus j' \neq j} \sum_{p \setminus p' \neq p} \sum_l \sum_a \sum_t q_{ij'}^{p'lat} \leq W_{uj}^g$$

$\forall g \in G, j \in M, u \in U, p \in \text{Log} \mid \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& g_p = g \& u_f = u \& Q_j > 0 \& \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& \theta_j^{p'} = 0 \quad (88)$

$$\sum_i \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t q_{ij}^{plat} - \sum_s \sum_{p \setminus p' \neq p} \sum_l \sum_a \sum_t \mathfrak{S}_j^{sp'l} - \sum_{j \setminus j' \neq j} \sum_{p \setminus p' \neq p} \sum_l \sum_a \sum_t q_{ij'}^{p'lat} \leq \sum_u W_{uj}^g$$

$\forall g \in G, j \in M, p \in \text{Log} \mid \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& g_p = g \& u_f = u \& Q_j > 0 \& \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \& \theta_j^{p'} = 0 \quad (89)$

$$\sum_i x_{ic}^{pla} = 0 \quad \forall i \in D, l \in L^+, a \in A \mid V^{pca} = 0 \& p \notin P^0 \quad (90)$$

$$I_i^{pla}, x_i^{pl}, x_i^{spla}, q_{ij}^{plat}, x_{ij}^{plt}, x^{pl}, x_{ij}^p, x_{ic}^{pla}, x_i^p, x_i^l, n_i, \mathfrak{S}_i^{spla} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T, a \in A \quad (91)$$

Tableau 8.2: Correspondance des expressions (chapitre 4)

Phase 1	Phase 2	Description
(1)	(80)	Fonction objectif
(41)	(81)	Conservation de flux (stockage)
(42)	(82)	Conservation de flux (triage)
(44)	(83)	Capacité globale de triage/production des sites
(45)	(84)	Capacité de triage/production des sites par période
(46)	(85)	Contrainte de lissage
(50)	(86)	Capacité de transport
(53)	(87)	Cohérence entre les récoltes et les redevances
(54)	(88)	Respect des garanties (par essence et UAF)
(55)	(89)	Respect des garanties (par essence)
(56)	(90)	Pas de matière abandonnée aux usines
(57)	(91)	Non-négativité des variables