



Bénéfices et exigences de l'optimisation mathématique pour la planification de l'allocation du bois aux usines de produits forestiers

Mémoire

Maxime Auger

Maîtrise en sciences forestières
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Maxime Auger, 2017

**Bénéfices et exigences de l'optimisation
mathématique pour la planification de l'allocation
du bois aux usines de produits forestiers**

Mémoire

Maxime Auger

Sous la direction de :

Luc Lebel, directeur de recherche
Jonathan Gaudreault, codirecteur de recherche

Résumé

La planification des approvisionnements représente un grand défi pour l'industrie forestière, surtout dans le contexte où la forêt naturelle est caractérisée par une grande hétérogénéité de la matière première servant à générer différents produits. Ainsi, l'élaboration de plans pour répondre à la demande des usines devient un problème complexe pour les planificateurs forestiers. La planification automatisée faisant usage d'outils d'optimisation permet de tenir compte de plusieurs facteurs importants pour la planification. Dans la littérature, plusieurs modèles théoriques ont été proposés, mais il semble que très peu de ces modèles soient actuellement utilisés par les entreprises. On suppose que la complexité du problème, l'environnement naturel en constante évolution, de même que l'expertise nécessaire pour utiliser ces modèles limitent leur application dans un contexte industriel. Néanmoins, la mise en œuvre de ces outils pourrait améliorer significativement le bénéfice des entreprises forestières.

Les objectifs de l'étude sont (i) évaluer le potentiel d'implantation de l'optimisation mathématique en entreprise, notamment en identifiant les ressources supplémentaires nécessaires à l'adoption d'une telle approche (ii) estimer les bénéfices et avantages d'utiliser l'optimisation mathématique pour soutenir les décisions de planification dans un contexte industriel (iii) analyser l'effet d'une variation dans les informations utilisées pour la confection des plans.

Le logiciel d'optimisation LogiLab, développé par le consortium de recherche FORAC, a été utilisé en support à cette étude. L'outil permet de maximiser le profit généré dans la chaîne d'approvisionnement grâce à une allocation optimale de la matière première vers les usines du réseau. Le modèle considère simultanément la récolte, le transport, l'hétérogénéité de la forêt et la performance des usines. Dans ce projet, nous avons adapté LogiLab pour permettre son application dans une étude de cas visant une entreprise de produits forestiers canadienne. Nous avons ensuite analysé les bénéfices générés et évalué le potentiel de mise en œuvre. Pour réaliser le deuxième objectif, nous avons étudié la méthode de planification actuelle de l'entreprise partenaire, pour ensuite la comparer à l'approche d'optimisation utilisée pour générer le plan optimal. Finalement, nous avons

ajusté les données d'inventaires de départ en utilisant des données réelles provenant du mesurage pour tester l'effet de la variabilité des informations utilisées dans le développement des plans.

L'approche de planification optimisée a permis de générer un bénéfice net plus élevé que la méthode de planification actuelle en entreprise. Cette différence est en partie due à une allocation plus efficace de la matière première aux usines. En ce qui concerne le deuxième objectif, plusieurs avantages ont été identifiés, notamment la réduction du temps nécessaire pour produire un plan. En outre, même si le coût de la mise en œuvre est élevé, ces dépenses supplémentaires sont récupérées en moins de deux ans dus à l'économie de temps associée à la réalisation de la planification. De plus, les gains générés suite à l'utilisation des plans optimisés dépassent largement les coûts initiaux liés à la mise en place du système.

Abstract

Supply planning is a significant challenge for the forest industry, particularly in natural forests characterized by great heterogeneity. Such forests produce raw material suitable for different final products. Thus, developing plans to match supply with demand becomes a complex problem for forest planners. The automatization of the planning approach using an optimization tool allows many important factors to be taken into consideration during planning. In the literature, several theoretical models have been proposed, but it appears that very few of these are currently used by companies. It is assumed that the complexity of the problem, the ever changing nature of the planning environment, and the expertise required to use these models limit their application in industrial context. Nevertheless, the implementation of such tools could bring significant improvements in profits for the forest companies.

The aims of the study are threefold : (i) to evaluate the potential for the implementation of mathematical optimization in companies, in particular by identifying the additional resources needed to adopt such an approach, (ii) to estimate the potential gains associated with utilization of optimization model in formulating wood procurement planning in an industrial case, and (iii) to analyze the effect of variation in the information used could have on the plans.

An optimization software (LogiLab) developed by the FORAC research consortium was used. The tool allows to maximize the profit generated on the entire supply chain through optimal allocation of raw materials to mills in the network. The model simultaneously considers both harvesting and transportation cost, the heterogeneity of the forest and mill performances. The planning done now in companies visually focuses on lower transportation distance. We adapted LogiLab to a case study involving a Canadian forest products company, to analyze the generated profits, and assess its potential for implementation. To realize the second objective, we studied the planning method of our Partner Company and compared it to the optimization approach that we used for generating the optimal plan. Finally, we adjusted the baseline inventory data using actual data from

the measurement to test the effect of the variability of the information used in developing the plans.

A higher net profit was generated when using our planning approach in comparison to the plan prepared by the company. This difference is due, in part, to a more efficient allocation of raw materials to the mills. With regards to the second objective, we found several advantages such as a reduction in the time needed to produce a plan. Moreover, even if the cost of implementation is high they are recovered in less than two years by savings in planning time. The gains generated following the optimized plans exceed by several orders of magnitude the initial costs of the system to be set up.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT	V
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures	X
REMERCIEMENTS	XII
CHAPITRE 1.....	1
1 INTRODUCTION	1
1.1 <i>Mise en contexte</i>	1
1.2 <i>Problématique</i>	2
1.3 <i>Objectifs de l'étude</i>	3
1.4 <i>Présentation du document</i>	4
CHAPITRE 2.....	6
2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 <i>La planification d'un réseau d'approvisionnement</i>	6
2.1.1 Le réseau d'approvisionnement forestier (RAF).....	7
2.1.2 Les approches de planification centralisée et distribuée.....	8
2.2 <i>Les niveaux décisionnels de planification</i>	8
2.2.1 Niveau décisionnel stratégique.....	9
2.2.2 Niveau décisionnel tactique	10
2.2.3 Niveau décisionnel opérationnel	10
2.3 <i>Planification forestière au Québec</i>	11
2.3.1 Évolution récente du contexte forestier au Québec	11
2.3.2 La planification aux mains du Ministère	13
2.3.2.1 Le plan tactique	13
2.3.2.2 Le plan opérationnel.....	14
2.4 <i>Le système de planification actuel</i>	14
2.5 <i>Les modèles d'optimisation-simulation développés récemment pour l'élaboration des plans tactiques et opérationnels en foresterie</i>	15
2.5.1 Analyse des modèles d'optimisation-simulation récemment développés.....	16
2.5.2 Les exigences de la mise en œuvre d'une nouvelle méthode de planification.....	20
2.6 <i>Pertinence de l'étude</i>	21
CHAPITRE 3.....	23
3 MÉTHODOLOGIE.....	23
3.1 <i>Approche comparative entre la planification actuelle et optimisée</i>	23
3.2 <i>Étude de cas</i>	24
3.2.1 Explication du choix de l'entreprise.....	26
3.2.2 Documentation du processus de planification fait en entreprise.....	26
3.2.3 Les besoins de l'entreprise partenaire	27
3.3 <i>Sélection du modèle d'optimisation</i>	28
3.3.1 Les données entrantes	29
3.3.1.1 Les coûts de transport.....	30
3.3.1.2 Les coûts de récolte	31
3.3.1.3 Les fichiers d'entrées.....	32
3.3.1.4 Le processus de planification avec LogiLab.....	34
3.3.2 Contraintes générales ajoutées à l'ensemble des scénarios	37

3.3.2.1	Contraintes des lignes de sciages.....	37
3.3.2.2	Contrainte de récolte	38
3.3.2.3	Contraintes de piles	40
3.4	<i>Les scénarios développés</i>	41
3.4.1	Le scénario optimal de référence (s1)	42
3.4.2	Le scénario optimal avec piles au nord (s2)	42
3.4.3	Le scénario optimal avec façonnage de 16' (s3)	42
3.4.4	Scénario optimal avec piles nord et 16' (combiné) (s4)	43
3.4.5	Le scénario manuel (s5)	43
3.4.6	Les scénarios optimal et manuel avec inventaire ajusté (s6 et s7).....	43
CHAPITRE 4.....		46
4	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	46
4.1	<i>Processus de planification original de l'entreprise</i>	46
4.1.1	Processus de planification réalisé en entreprise.....	47
4.1.1.1	Cartographie du processus de planification réalisé en entreprise	47
4.1.1.2	Ressources nécessaires et coût de planification.....	50
4.1.2	Processus de planification proposé utilisant l'optimisation (LogiLab).....	53
4.1.3	Discussion	57
4.2	<i>Comparaison des scénarios de planification</i>	58
4.2.1	Manuel vs optimisé à l'aide de Logilab.....	58
4.2.2	Allocations des blocs de récolte aux usines.....	66
4.2.3	Discussion	69
4.3	<i>Effet d'une variation dans les données d'inventaire forestier</i>	72
4.3.1	Portrait des différences entre les données d'inventaire	73
4.3.2	Discussion	77
CHAPITRE 5.....		78
5	CONCLUSION.....	78
5.1	<i>Le potentiel d'implantation de l'optimisation de la planification en entreprise</i>	79
5.2	<i>Les bénéfices de l'approche d'optimisation de la planification</i>	80
5.3	<i>L'effet d'une variation dans les informations utilisées pour le développement des plans</i>	81
5.4	<i>Retombées possibles pour le secteur forestier</i>	83
	RÉFÉRENCES	85
	ANNEXE A – QUESTIONS AUX PLANIFICATEURS.....	90
	ANNEXE B – CARTE DES ZONES LOGILAB.....	91
	ANNEXE C – MODÈLE D'OPTIMISATION MATHÉMATIQUE	92
	ANNEXE D – VALEUR MARCHANDE DES BOIS SUR PIED ÉTABLIE PAR LE BMMB (1 ^{ER} AVRIL AU 30 JUN 2016).....	95
	ANNEXE E – CARTE REPRÉSENTANT LA DISPERSION DES SECTEURS DE RÉCOLTE	106
	ANNEXE F - TÂCHES DES TRAVAILLEURS POUR L'ÉLABORATION DE LA PRAN	107
	ANNEXE G – SALAIRE ANNUEL DES INGÉNIEURS FORESTIERS	109
	ANNEXE H – ALLOCATION DES BLOCS DE RÉCOLTE AUX USINES DE TRANSFORMATION	111

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Résumé des éléments considérés et des bénéfices escomptés dans les modèles récemment développés.....	20
Tableau 3.1	Coûts de récolte.....	32
Tableau 3.2	Plan de traitement pour la comparaison des scénarios développés	45
Tableau 4.5	Comparaison entre le coût du processus de planification optimisé pour les deux premières années de mise en œuvre et le coût annuel du processus de planification réalisé en entreprise.....	56

Liste des figures

Figure 2.1	Exemple du réseau d’approvisionnement forestier selon Mosconi (2014).....	7
Figure 3.1	Exemple de blocs de récolte avant et après l’agrégation par secteur d’intervention (SI) avec l’outil d’agrégation FPIInterface ^{MD}	33
Figure 3.2	Logigramme du processus d’optimisation des approvisionnements utilisé dans le cadre du projet.....	36
Figure 4.2	Nombre de diplômes par niveau de formation scolaire détenu par l’équipe attirée à la PRAN dans l’entreprise	51
Figure 4.3	Nombre de jours ouvrables minimum et maximum consacré à l’élaboration de la PRAN par chacun des travailleurs.	52
Figure 4.6	Ratio correspondant à la valeur monétaire escomptée dans chacun des scénarios pour : a) la valeur nette, b) les revenus du sciage et c) les revenus de copeaux et de sciure.....	60
Figure 4.7	Comparaison entre les ratios relatifs aux coûts de : a) récolte, b) transport et c) de transformation.	62
Figure 4.8	Comparatif des volumes : a) total récolté, b) de sciage produit c) de copeaux produits et d) de sciures produites.	64
Figure 4.9	Moyenne pondérée des performances de transformation des usines pour chaque scénario.....	65
Figure 4.10	Proportion du bois transporté par les camions hors-normes pour chaque scénario.	66
Figure 4.11	Exemple de l’allocation du bois provenant des blocs de récolte, à une des usines de transformation du réseau.....	68
Figure 4.12	Différence entre les données d’inventaire ajustées et les données d’inventaire initiales	74
Figure 4.13	Effet d’une variation dans les données d’inventaire sur le plan manuel et le plan optimal de référence.	75

Figure 4.14 Écart entre le plan manuel avec inventaire ajusté et le
plan optimal avec inventaire ajusté. 76

Remerciements

Mon expérience à la maîtrise m'a permis d'apprendre énormément, tant sur le plan éducatif et professionnel que sur le plan personnel. En fait, je dois en grande partie cet apprentissage aux gens qui ont collaboré de près ou de loin à ce projet, ainsi qu'à mon entourage qui a été pour moi une grande source de soutien et d'encouragement sans quoi ce projet n'aurait pas été possible.

Tout d'abord, je tiens à remercier le grand responsable de mon cheminement universitaire de deuxième cycle, et sans qui, ce projet n'aurait pas eu lieu. Celui qui a, non seulement cru en moi, mais également soutenu, encouragé, fait confiance et jamais douté de mes capacités, un homme pour qui j'ai un grand respect et beaucoup d'admiration, mon directeur de recherche, monsieur Luc Lebel. Je tiens à te remercier sincèrement de m'avoir donné cette opportunité de travailler avec toi et de m'avoir permis de réaliser un projet d'une grande envergure, qui me passionne, un projet qui m'a permis d'évoluer sur le plan professionnel et pour lequel j'ai travaillé avec une équipe formidable, merci encore Luc. Je te remercie également pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe de recherche d'étudiants gradués du laboratoire d'opérations forestières, de même qu'au sein de l'équipe du consortium de recherche FORAC, un consortium qui m'a soutenu financièrement. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à monsieur Jonathan Gaudreault, mon codirecteur de maîtrise, qui a cru en mon projet dès le départ et qui a toujours pris le temps de réviser mes travaux avec rigueur. Il a contribué à ce que ce document final soit à la hauteur des attentes, merci Jonathan.

J'aimerais également remercier toute l'équipe du consortium de recherche FORAC. Vous avez tous grandement contribué à ce projet, je pense notamment à monsieur Alexandre Morneau, qui a toujours trouvé des solutions à nos problèmes, il a été un acteur clé dans le développement et l'adaptation de LogiLab pour ce projet, merci beaucoup Alexandre. Je pense également à madame Édith Brotherton, qui fut d'une grande aide de par ses analyses, ses idées, mais également pour avoir partagé son expertise. Sa

collaboration fut essentielle au bon déroulement de ce projet, merci Édith. Je tiens à souligner la participation de l'équipe de FPInnovations, qui nous a notamment soutenus dans l'utilisation des logiciels FPInterface^{MD} et Optitek^{MD}, particulièrement monsieur Dave Lepage, qui a fourni son soutien, son expertise et qui a contribué au développement d'une procédure pour adapter LogiLab au contexte de l'entreprise partenaire. Je tiens à remercier les membres de l'entreprise partenaire qui ont collaboré à cette étude, plus particulièrement à messieurs Michel B., Julien P. et Jean-François M., votre implication a été essentielle à l'aboutissement de ce travail, merci.

Je dois également souligner la contribution de tous les étudiants gradués faisant partie du laboratoire d'opérations forestières qui m'ont m'aidé, à un moment ou à un autre, et qui ont contribué à rendre l'atmosphère paisible et propice à la réalisation de nos projets respectifs. Je pense notamment à monsieur Shuva Hari Gautam, qui m'a grandement aidé dans la traduction de mes documents. Je tiens à souligner le soutien de toute ma famille, ma belle-famille et de mes amis. Merci, votre soutien a été sincèrement apprécié. Finalement, je dois remercier une femme extraordinaire, à mes côtés depuis presque 10 ans maintenant, et qui m'a fait le plus beau des cadeaux cette année en donnant naissance à notre fils Ali. Merci, tu as toujours cru en moi et c'est toi qui as dû composer avec mes hauts et mes bas pendant toute cette période, j'ai vraiment de la chance de t'avoir à mes côtés, merci infiniment.

*À l'arrivée de notre fils Ali,
le plus beau des cadeaux qui clôt ce chapitre de ma vie et souligne,
le début d'une nouvelle aventure*

Chapitre 1

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Avec une superficie productive de plus de 418 000 km², la forêt occupe une place importante dans l'économie du Québec (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015). En fait, en 2014 on comptait plus de 61 000 emplois directs dans le secteur forestier, pour une proportion d'environ 2% de l'économie de la province, ce qui en fait un secteur économiquement plus important que le secteur des mines et de l'énergie (Conseil du patronat du Québec, 2015). Cependant, l'industrie forestière est aux prises avec un grand nombre de problèmes associés aux caractères variables (dimension de la ressource, forme, espèce et qualité) et imprévisibles (épidémie d'insecte, chablis, feu ou autres perturbations) propre aux forêts naturelles. Cette dynamique complexifie la planification des approvisionnements en bois. Dans un contexte où les marchés sont de plus en plus compétitifs et où l'approvisionnement en bois aux caractéristiques recherchées est complexe, les entreprises de produits forestiers favorisent l'utilisation optimale des ressources disponibles. Le contexte actuel de compétitivité des marchés amplifie l'importance d'optimiser le système d'approvisionnement d'une entreprise.

La planification des approvisionnements est un réel défi pour l'industrie forestière. L'augmentation du nombre de facteurs à considérer lors de l'élaboration des plans selon les besoins propres de chaque usine, tels que les caractéristiques de la matière première, les secteurs de récoltes de plus en plus dispersés, les types de produits finaux à générer, les modes de récolte des bois, le type de transport, les différents intervenants à considérer sur le territoire, les contraintes environnementales et la grande variété des prescriptions sylvicoles à appliquer, alourdit la tâche des planificateurs forestiers. Or, dans la littérature, différentes études se sont intéressées à la planification du réseau d'approvisionnement en

bois et plusieurs modèles d'optimisation aux effets bénéfiques sur la profitabilité d'un réseau ont été développés.

1.2 Problématique

Actuellement dans le secteur forestier, la planification des approvisionnements est effectuée par des gestionnaires qui utilisent une méthode d'essai-erreur basée sur leurs expériences et intuitions (Morneau-Pereira *et al.*, 2014). Pour arriver à planifier efficacement les interventions en forêt, une multitude de critères doivent être considérés et plusieurs décisions doivent être prises. Par exemple, les gestionnaires affectés à cette tâche doivent considérer les exigences environnementales, les appréhensions sociales, les infrastructures actuelles et à prévoir, les caractéristiques de la matière première, etc. Ils doivent également choisir le type de transport à utiliser et le mode de récolte, déterminer les endroits où il y aura de la récolte et quand la récolte aura lieu, vers quelles usines sera acheminé le bois récolté, etc. Tous ces éléments complexifient la tâche du planificateur. Même si l'utilisation de l'optimisation pour résoudre les problèmes de planification en foresterie date de plus de 30 ans, la nature des problèmes a continué d'évoluer, rendant ainsi la tâche de plus en plus complexe et comportant un nombre plus important de contraintes à considérer (Rönnqvist, 2003). Malgré ce fait, nous croyons que l'utilisation de l'optimisation en contexte industriel permettrait d'augmenter l'efficacité du réseau en ayant un effet direct sur le niveau de profitabilité de l'entreprise qui l'utilise. Ainsi, on s'intéresse aux bénéfices apportés par l'implantation d'un système d'optimisation informatisé en entreprise utilisé afin de planifier les interventions forêt-usine. Dans la littérature, plusieurs modèles théoriques ont été proposés (Karlsson *et al.* (2004), Beaudoin *et al.* (2007), Marques *et al.* (2014), Gautam *et al.* (2014), Eyvindson et Kangas (2014) et Morneau-Pereira *et al.* (2014)), mais il semble que très peu de ces modèles soient actuellement utilisés. On suppose que la complexité du problème, l'environnement naturel en constante évolution et l'expertise nécessaire pour utiliser ces modèles limitent leur application dans un contexte industriel. Néanmoins, la mise en œuvre de ces outils pourrait améliorer significativement le bénéfice découlant de la planification réalisée par les entreprises de produits forestiers.

1.3 Objectifs de l'étude

Malgré la complexité des modèles d'optimisation qui ont été développés récemment, il est supposé que leur utilisation pour la planification des approvisionnements en bois dans un contexte industriel réel est possible. En supposant que l'utilisation d'une approche de planification par optimisation serait avantageuse pour les entreprises et en supposant que le caractère variable de l'information utilisée est susceptible d'affecter considérablement les plans développés, nous émettons trois hypothèses :

- H₁ : L'implantation d'une approche de planification par optimisation en entreprise est possible ;
- H₂ : L'approche de planification par optimisation génère des bénéfices économiques plus importants que l'approche de planification faite actuellement ;
- H₃ : Le plan optimal développé est davantage affecté par une variation dans les informations utilisées pour le développement des plans que le plan fait manuellement en entreprise.

Afin de vérifier ces hypothèses, l'objectif principal de la recherche est d'*analyser le potentiel d'utilisation de l'optimisation mathématique pour améliorer la planification des approvisionnements en bois aux usines de produits forestiers*. Pour y arriver, il faut développer ou adapter un modèle d'optimisation mathématique pour correspondre le plus exactement possible au processus de prise de décision en entreprise. De plus, les avantages que procure le modèle par rapport à la situation actuelle (valeur du panier de produits et coûts du processus de planification) devront être estimés. L'effet d'un changement dans les informations utilisées pour développer les plans sera analysé. Pour ce faire, une évaluation des écarts entre la planification actuelle en entreprise et celle réalisée par l'entremise d'un modèle d'optimisation sera effectuée. Puisque les deux approches de planifications n'impliquent pas nécessairement les mêmes ressources et compétences (logiciel, main-d'œuvre, temps de réalisation, formation ou connaissance), celles-ci devront être préalablement identifiées et décrites. En résumé, les trois objectifs secondaires qui appuient l'objectif principal de l'étude sont:

1. Évaluer le potentiel d'implantation de l'optimisation mathématique en entreprise, notamment en identifiant les ressources supplémentaires nécessaires à l'adoption d'une telle approche ;
2. Estimer les bénéfices et avantages d'utiliser l'optimisation mathématique pour soutenir les décisions de planification dans un contexte industriel, et ;
3. Analyser l'effet d'une variation dans les informations utilisées pour la confection des plans.

Pour évaluer le potentiel d'implantation, les ressources essentielles à l'adoption d'une approche de planification par optimisation en entreprise seront identifiées et ensuite comparées à celles liées à la méthode de planification actuelle. Pour estimer les bénéfices et avantages associés à l'optimisation mathématique, un modèle d'optimisation récemment développé devra être sélectionné, pour ensuite être adapté conformément à l'étude de cas d'une grande entreprise de produits forestiers. Ce modèle sera utilisé pour la confection d'un plan optimal des approvisionnements en bois, de la forêt jusqu'aux usines de produits forestiers. Les gains potentiels associés à l'utilisation de l'optimisation pour la planification des approvisionnements en bois seront quantifiés et comparés aux gains traditionnellement obtenus avec la méthode de planification actuellement utilisée en entreprise. Finalement, afin d'évaluer l'effet d'une variation dans les informations utilisées pour la confection des plans, les données d'inventaire forestier qui seront utilisées pour développer les plans de base, seront raffinées puis réintégrées aux plans initiaux pour générer de nouveaux résultats. Finalement, les résultats des plans de départ et des plans dont les données d'inventaires ont été ajustées seront comparés et analysés.

1.4 Présentation du document

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre est une revue de littérature qui présente l'état actuel des connaissances concernant la planification d'un réseau d'approvisionnement, la planification forestière au Québec, les différents modèles qui ont été développés pour la planification forestière et il se termine par un bref retour sur les objectifs et la pertinence de l'étude. Le deuxième chapitre comprend la méthodologie

utilisée pour atteindre les objectifs secondaires. Ce chapitre présente donc l'approche méthodologique, une étude de cas, l'outil d'aide à la décision et le mode d'analyse des résultats. Les résultats, incluant le processus de planification réalisé en entreprise, celui réalisé par optimisation et l'analyse des écarts entre les différents scénarios de planifications élaborés sont présentés et analysés dans le troisième chapitre. On y présente également les ressources essentielles et les efforts nécessaires liés à la mise en œuvre de l'une ou l'autre des méthodes de planification. Le mémoire se termine avec une conclusion qui fait un bref retour sur les éléments importants qui ont été abordés dans la recherche.

Chapitre 2

2 Revue de littérature

Ce chapitre a pour objet de dresser un portrait de l'état des connaissances actuelles en lien avec le processus de planification des approvisionnements. La première section est consacrée au concept de la planification d'un réseau d'approvisionnement. La seconde section vise à approfondir les notions du système de planification lié au secteur forestier au Québec, notamment par une mise en contexte de l'évolution récente du secteur. La section suivante explore quant à elle divers modèles développés pour la planification en foresterie et en conclusion, un rapprochement entre les travaux antérieurs et les objectifs de la présente étude sera fait.

2.1 La planification d'un réseau d'approvisionnement

L'approvisionnement est un concept élaboré pour décrire le système « d'acquisition de biens et services » (Lehoux *et al.*, 2012). Un réseau d'approvisionnement est constitué de plusieurs entités ayant des rôles distincts de production, de distribution et de transformation allant de l'exploitation de la ressource jusqu'à la livraison aux unités de transformation. Dans l'étude de Mosconi (2014), on décrit le réseau d'approvisionnement forestier (RAF) comme un regroupement de « l'ensemble des intervenants et des activités forestières qui contribuent à l'exploitation de la forêt jusqu'à la livraison du bois aux usines de transformation ». L'approvisionnement servirait de point de départ au réseau de création de valeurs. Selon Lehoux *et al.* (2012), la performance d'un tel réseau dépend essentiellement de l'harmonisation des étapes d'approvisionnement et de production, jusqu'à la mise en vente des produits finaux. Ainsi, il est important de bien comprendre les opérations d'exploitation, de production et de transport, car l'élaboration du plan d'approvisionnement nécessite des informations précises sur le niveau de variation de la demande, de la quantité en inventaire et des contraintes de capacités (Lehoux *et al.*, 2012).

La planification du réseau d'approvisionnement dépend donc, notamment, de son système de fonctionnement.

2.1.1 Le réseau d'approvisionnement forestier (RAF)

Le réseau d'approvisionnement forestier (RAF), présenté par Mosconi (2014), se divise en quatre activités principales (Figure 2.1) qui contribuent à l'approvisionnement des usines de transformations au moindre coût possible. La première section du réseau est l'aménagement forestier, dont l'objectif est d'assurer l'approvisionnement et la pérennité de la ressource sur une longue période. S'ensuivent les opérations de récolte, qui consistent à prélever la matière première, les activités de voirie et du transport, qui concernent davantage la distribution du bois aux usines de transformation. Au Québec, la majorité des activités d'approvisionnement sur terres publiques sont réalisées par des entrepreneurs forestiers sous contractants. Ainsi, il est possible de distinguer deux cas : (1) le réseau est composé de plusieurs sous-réseaux rattachés à une seule usine qui représente le client final, et les entrepreneurs, qui sont les fournisseurs, sont considérés comme étant indépendants (approche de planification distribuée). Dans ce cas, chaque entité des sous-réseaux vise à maximiser ses propres bénéfices. (2) Le réseau est composé de plusieurs usines et les activités des entrepreneurs sont coordonnées de façon à maximiser les bénéfices de l'ensemble du réseau (approche de planification centralisée).

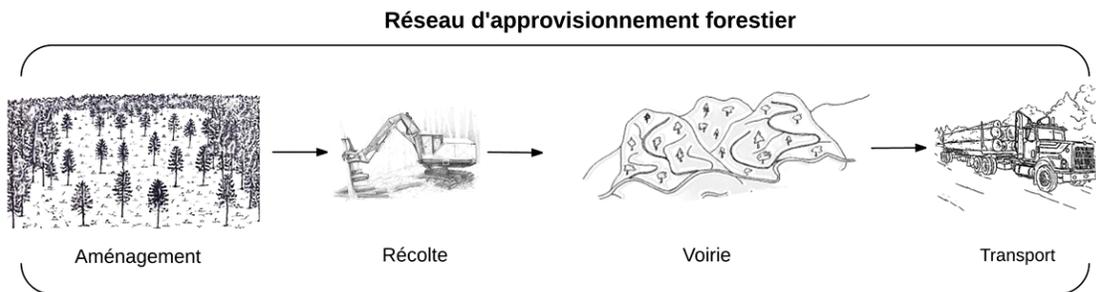


Figure 2.1 Exemple du réseau d'approvisionnement forestier selon Mosconi (2014)

2.1.2 Les approches de planification centralisée et distribuée

Les méthodes de planification centralisée et distribuée sont les principales approches utilisées dans la planification de réseau (Somers, 1996). L'approche de planification centralisée est basée sur la vision globale de la chaîne d'approvisionnement, dont la gestion est coordonnée par une seule entreprise mère qui doit tenir compte de l'ensemble des flux qui circulent (François, 2007). Les données utilisées par l'entreprise mère doivent être très précises, ce qui nécessite la collaboration de tous les acteurs de la chaîne pour s'assurer que chacun fournit l'information nécessaire au bon fonctionnement du réseau (Gharbi, 2012). La planification centralisée permet d'orienter les décisions de planification sur toute la chaîne en coordonnant les activités des acteurs pour maximiser les bénéfices globaux (Gharbi, 2012). Les principaux avantages de l'utilisation de l'approche centralisée sont la simplicité du système de contrôle, la responsabilité de la gestion gouvernée par une seule entité et le potentiel d'utilisation de l'optimisation (Somers, 1996). Lorsqu'on utilise une approche de planification distribuée plutôt que centralisée, on doit considérer chaque entreprise indépendamment lors de la prise de décision (Gharbi, 2012). Les interactions entre les différents maillons de la chaîne sont basées sur des relations directes de type client-fournisseur (Gharbi, 2012). Ainsi les informations circulent du client final jusqu'au fournisseur primaire alors que le flux de production circule dans le sens inverse. Cela pousse chaque entreprise à tisser des liens étroits avec les entreprises en aval et en amont dans la chaîne, de façon à ce que le fournisseur (en amont) soit en mesure de répondre à la demande du client (en aval) (Gharbi, 2012). Les principaux avantages de l'approche distribuée sont le faible coût de communication, la rapidité des opérations de contrôle, l'efficacité de la gestion évolutive et la performance de résolution des problèmes de gestion (Somers, 1996).

2.2 Les niveaux décisionnels de planification

Il y a plusieurs paramètres à considérer lors de la prise de décision en contexte de planification. Parmi ces paramètres, le temps est un facteur important, car on doit savoir sur quelle période de temps la décision aura un impact. En fait, la planification permet de supporter la prise de décision par l'élaboration de plusieurs scénarios analysés par le

gestionnaire, qui est en mesure de retenir un de ces scénarios, celui qu'il considère le meilleur (Savard, 2011). Pour réduire l'incertitude et la complexité de cette tâche, il est courant d'utiliser la planification hiérarchique, qui consiste à regrouper l'information nécessaire aux décisions à différents niveaux décisionnels. On agrège d'abord l'information sur un horizon de planification à long terme et plus l'horizon de planification diminue, plus on raffine l'information (Bettinger *et al.*, 2010). Cette méthode permet de réduire la complexité d'un problème en le divisant en sous-problème d'un niveau de planification à l'autre (Hax et Meal, 1975). Il est courant d'utiliser trois niveaux d'agrégation : (1) le niveau stratégique (2) le niveau tactique et (3) le niveau opérationnel. Cependant, les termes stratégique, tactique et opérationnel peuvent avoir des significations différentes selon les problèmes de planification ou le contexte dans lequel ils sont utilisés (Rönnqvist, 2003). En foresterie, la planification des approvisionnements doit tenir compte de l'ensemble de la chaîne de création de valeurs, de la récolte jusqu'à la transformation en usine, et ce, dans l'optique de générer un maximum de bénéfice.

2.2.1 Niveau décisionnel stratégique

Le niveau décisionnel stratégique présente les objectifs de planification globaux et à long terme (Jerbi, 2014). À ce niveau, les choix découlent des orientations et politiques que désire prendre l'entreprise et ils sont basés sur de l'information inhérente (Gharbi, 2012). Par exemple, les décisions relatives à l'aménagement forestier, telles que la sylviculture ou la conservation, de même que les décisions d'investissement en usine ou les décisions liées au développement de nouveaux produits, font partie du niveau stratégique (Lehoux *et al.*, 2012). Par contre, puisque les décisions stratégiques s'étalent sur une longue période de temps, il est difficile d'établir l'allocation de la matière première aux multiples clients potentiels qui varient dans le temps (Lehoux *et al.*, 2012). Dû à ce fait, les décisions stratégiques sont utilisées comme les orientations à suivre au niveau décisionnel tactique, qui deviendront à leurs tours les orientations à suivre pour la planification opérationnelle (Meyr *et al.*, 2008).

2.2.2 Niveau décisionnel tactique

Les décisions prises au niveau tactique s'étalent sur une période de temps à moyen terme. Les décisions de planification sont toujours basées sur de l'information agrégée, mais plus raffinée qu'au niveau stratégique, et s'attardent surtout à la circulation des flots de matières et aux prévisions de la production (Gharbi, 2012). Pour l'industrie forestière, la planification tactique décrit les activités d'aménagement à réaliser dans les secteurs de coupe identifiés, le moment où elles seront réalisées, les méthodes de coupe ainsi que les traitements sylvicoles, et ce, pour l'année à venir (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 2009). Le plan tactique sert de lien entre les orientations établies au niveau stratégique et les décisions prises au niveau opérationnel. Les choix tactiques définissent les contraintes opérationnelles, établissant, de façon agrégée, les directives à suivre lors de l'exécution des travaux au niveau opérationnel (Jerbi, 2014). Généralement, les plans au niveau tactique sont établis pour un horizon de cinq ans et traitent des problématiques de production-distribution, tels que l'attribution des contrats d'exécution, les ressources à utiliser, l'allocation des clients aux usines, la prévision des approvisionnements, la saisonnalité, les décisions budgétaires, etc. (Lehoux *et al.*, 2012). Ainsi, on retrouve dans le plan tactique les politiques de gestion, les plans de production, les niveaux d'inventaire, la dimension des lots, le plan des ventes et les types de produits (Henri, 2014).

2.2.3 Niveau décisionnel opérationnel

Les décisions prises au niveau opérationnel concernent le très court terme, allant d'un horizon d'une semaine jusqu'à une période de seulement quelques heures (Lehoux *et al.*, 2012). Étant donné l'horizon, il est important d'avoir de l'information précise qui représente bien la réalité des opérations sur le terrain. Ainsi, l'échéancier des opérations est très important et idéalement, on devrait savoir quelles actions ont lieu à un moment et à un endroit donné, et ce, en termes de jour, voire même d'heure (D'Amours *et al.*, 2008). De façon générale, la planification opérationnelle est répartie sur différentes unités d'affaires en raison de la grande quantité d'informations utilisées (D'Amours *et al.*, 2008). Les problèmes relatifs à la planification opérationnelle impliquent souvent des décisions de planification en temps réel, entre autres l'approvisionnement (type d'essence à récolter

et dimension de la bille), la transformation à l'usine, le transport de la forêt vers les usines et des usines de première transformation vers les usines de deuxième ou troisième transformation (D'Amours *et al.*, 2008).

2.3 Planification forestière au Québec

La planification des travaux forestiers au Québec est balisée par divers normes et règlements qui s'assurent que les pratiques forestières respectent les besoins et les intérêts de l'ensemble des intervenants du milieu dans le respect des critères du développement durable. Dans cette section, le système de planification forestière au Québec est présenté.

2.3.1 Évolution récente du contexte forestier au Québec

Dans la dernière décennie, on a assisté à une crise du secteur forestier. À titre d'exemple, le marché du papier journal a subi une diminution de l'ordre de 60% sur une période de près de dix ans (Barré et Rioux, 2012). En fait, cette situation fut provoquée en partie par l'augmentation de la capacité de production des papetières au cours des années 1970 et la diminution graduelle de la demande pour ce produit aux États-Unis (Barré et Rioux, 2012). Pour demeurer, le secteur papetier a pu compter sur l'émergence de la filière du bois de sciage dans les années 1980. Cette filière a contribué à l'approvisionnement des usines de pâte et papier par les résidus du sciage qu'elle produit, ce qui constitue une approche intégrée d'optimisation de la ressource (Barré et Rioux, 2012). Cependant, la situation actuelle fait état d'une diminution de la compétitivité du secteur forestier québécois, ce qui force l'industrie à reconsidérer le fonctionnement du secteur en entier (Barré et Rioux, 2012). Enfin, les changements associés au régime forestier maintenant encadré par la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier ont ajouté certaines contraintes au niveau de l'approvisionnement en bois (Barré et Rioux, 2012).

Les changements apportés au régime forestier en 2013 proviennent, entre autres, des recommandations de la Commission d'étude sur la gestion de forêt publique québécoise, communément appelée la Commission Coulombe, en 2004, des préoccupations sociales et de la volonté d'orienter l'aménagement forestier vers le

développement durable (Provencher, 2014). En fait, le concept d'aménagement durable des forêts est à la base du nouveau régime forestier. Ce concept est au cœur de la Loi sur l'aménagement durable des forêts, en vigueur depuis le 1^{er} avril 2013 et succédant ainsi à la Loi sur les forêts adoptée en 1986 (Ministère des Ressources naturelles, 2013a). Le concept de l'aménagement durable des forêts intègre plusieurs critères écologiques, dont le maintien de la diversité biologique, des écosystèmes fonctionnels et productifs ainsi que la protection du sol et de l'eau (Ministère des Ressources naturelles, 2013a). Ces critères doivent donc être pris en considération par les entreprises de produits forestiers dans la planification de leurs interventions. Au nombre des changements importants figurant dans le nouveau régime forestier, il y a la planification forestière maintenant sous la responsabilité du Ministère, l'aménagement forestier régi par le concept d'aménagement écosystémique, les garanties d'approvisionnement (GA) succédant aux contrats d'approvisionnement et d'aménagement forestier (CAAF), la mise aux enchères de secteurs forestiers et la création du Bureau de mise en marché des bois (BMMB), le concept de forêts de proximité, la certification forestière et les droits des autochtones (Provencher, 2014). Ces changements n'ont pas tous le même niveau d'impact sur les entreprises forestières. La prise en charge de la planification par le ministère, les GA qui remplacent les CAAF et le système de mise en marché du bois sont des changements qui sont susceptibles d'influencer de façon plus importante les activités de planification au sein des entreprises de produits forestiers.

Depuis le 1^{er} avril 2013, il est possible de se procurer du bois sur terre publique pour approvisionner une usine à condition d'être détenteur d'une GA. Le détenteur doit procéder lui-même à la récolte du bois sur pied (Ministère des Ressources naturelles, 2013b). La GA garantit aux usines un volume inférieur à ce qui leur était attribué anciennement par l'entremise des CAAF, ce qui permet de mettre en marché l'équivalent des volumes correspondant à la réduction par le BMMB (Ministère des Ressources naturelles, 2013b). Le gouvernement du Québec cherche à déterminer la juste valeur marchande du bois, ainsi que de promouvoir l'innovation, renforcer la compétitivité et l'efficacité des entreprises par la mise aux enchères d'un certain volume de bois réservé à cette fin par la réduction du volume garanti aux entreprises forestières (Ministère des

Ressources naturelles, 2013d). Le BMMB a donc été créé pour encadrer le concept de marché libre du bois. Il y a maintenant 25 % du volume disponible sur terre publique qui est réservé à la mise aux enchères sous forme d'appel d'offres où tout le monde (compagnie ou personne physique) peut soumissionner pour acquérir le volume ainsi offert (Ministère des Ressources naturelles, 2013d).

2.3.2 La planification aux mains du Ministère

Dans le régime forestier adopté en 2013, le ministère devient responsable de la planification forestière, auparavant sous la responsabilité des industriels (Ministère des Ressources naturelles, 2013c). Les plans d'aménagement forestier intégré tactique (PAFIT), qui contiennent les objectifs à atteindre pour une période de cinq ans, et les plans d'aménagement forestier intégré opérationnel (PAFIO), qui contiennent les secteurs de récoltes, les opérations d'aménagement et de voiries forestières, remplacent le plan général d'aménagement forestier (PGAF) et le plan annuel d'intervention forestière (PAIF) (Ministère des Ressources naturelles, 2013c). Les plans sont faits en collaboration avec les acteurs concernés par l'aménagement forestier d'une unité d'aménagement forestier (UAF) selon le processus des tables locales de gestion intégrée des ressources et du territoire (TLGIRT) dirigées par le ministère (Ministère des Ressources naturelles, 2013c). Également, pour s'assurer de la bonne planification des activités de récolte et du respect des mesures de certification, des tables opérationnelles, composées du ministère et des entreprises forestières présentes sur l'UAF ont été créés. Elles visent principalement à faire connaître les besoins des entreprises pour l'élaboration des plans (Ministère des Ressources naturelles, 2013c).

2.3.2.1 Le plan tactique

Le PAFIT couvre une période de cinq ans et vise principalement à établir la stratégie d'aménagement propre à l'UAF concernée (Ministère des Ressources naturelles, 2013c). Il contient une description de l'unité d'aménagement et les enjeux écologiques qui y sont rattachés, alors que les préoccupations économiques, environnementales, sociales et concernant la certification forestière composent les enjeux locaux et régionaux (Ministère

des Ressources naturelles, 2013c). Les traitements sylvicoles prévus aux différentes superficies de l'UAF sont ensuite établis de façon à répondre aux objectifs d'aménagement durable présentés dans le plan, tout en respectant les enjeux préalablement établis (Ministère des Ressources naturelles, 2013c).

2.3.2.2 Le plan opérationnel

Le PAFIO contient les activités d'aménagement et de récolte du bois à appliquer dans les secteurs d'intervention, conformément au PAFIT, auxquelles s'ajoute la localisation des infrastructures pour accéder aux différents secteurs d'intervention, et ce, pour une période d'une durée de moins de trois ans (Ministère des Ressources naturelles, 2013c).

Une fois les plans réalisés, le ministère est en mesure d'établir les secteurs potentiels d'intervention pour la mise en marché libre du bois. Une entente de récolte avec les détenteurs de GA stipule que ceux-ci doivent préparer la programmation annuelle (PRAN) des opérations de récolte conformément aux secteurs d'intervention définis préalablement (Ministère des Ressources naturelles, 2013c). Ainsi, la PRAN devient la seule portion de la planification forestière sous la responsabilité des industriels.

2.4 Le système de planification actuel

Dans le rapport final de Lebel *et al.* (2015), on décrit le processus actuel de planification qui nécessite la collaboration entre le ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs (MFFP) et les bénéficiaires de garanties d'approvisionnements (BGA), ainsi que plusieurs recommandations en vue d'améliorer le processus. Actuellement, la planification faite par les BGA se limite à l'identification des zones d'interventions potentielles (ZIP) pour répondre aux besoins des usines sur une période de cinq ans, à la localisation des chemins pour accéder aux secteurs d'intervention potentiels (SIP) établis par le MFFP et à la confection de la PRAN, qui comprend les secteurs d'interventions (SI) pour l'année à venir (Lebel *et al.*, 2015). L'identification des ZIP n'est pas totalement sous la

responsabilité des BGA ; elle est réalisée en collaboration avec le MFFP (Lebel *et al.*, 2015).

Pour arriver à établir la PRAN, le MFFP doit fournir une banque de 200 % des SI aux BGA de façon à ce qu'ils puissent sélectionner les SI pour l'année à venir (Lebel *et al.*, 2015). Cependant, dans le rapport final de Lebel *et al.* (2015), on mentionne que la banque de 200 % est souvent incomplète en raison de la complexité des activités d'harmonisation. Pour s'acquitter de leurs tâches respectives, le MFFP et les BGA ont l'opportunité d'utiliser des outils technologiques avancés. Par ailleurs, une des recommandations du rapport concerne l'automatisation des tâches de planification. Habituellement, dans le secteur forestier, le processus de planification réalisé en entreprise est basé sur une approche par essai et erreur selon l'expérience et l'intuition des planificateurs (Arabi, 2013). L'étude de Mosconi (2014) fait état de la méthode de planification utilisée par une entreprise de produits forestiers œuvrant dans la province de Québec, au Canada. Dans son étude, la chercheuse énumère différents outils utilisés par l'entreprise et parmi ceux-ci, les feuilles de calcul Excel, le système d'information géographique ArcGIS, le logiciel de simulation FPinterface^{MD} ainsi que des logiciels développés à l'interne sont couramment utilisés pour la confection et l'analyse de divers scénarios de planification. En fait, le rapport final de Lebel *et al.* (2015) précise que l'utilisation d'outils technologiques avancés pour la planification permettrait d'évaluer rapidement plusieurs scénarios, en plus de visualiser les impacts associés aux modifications proposées par les différents acteurs concernés. Cependant, les partenaires du rapport final de Lebel *et al.* (2015) ont mentionné que de telles initiatives avaient été tentées par le passé et que l'utilisation des outils avait été abandonnée en raison de la complexité des modèles, du temps exigé et finalement des ressources financières et humaines nécessaires à leur utilisation.

2.5 Les modèles d'optimisation-simulation développés récemment pour l'élaboration des plans tactiques et opérationnels en foresterie

Le contexte forestier est caractérisé par de nombreuses incertitudes associées à l'hétérogénéité des forêts naturelles. D'autres facteurs, tels que la dynamique des forêts, la

variabilité de la demande pour les produits du bois et l'augmentation de la compétition, ne font qu'amplifier cette complexité qui rend de plus en plus difficile le travail des gestionnaires. Ainsi, dans les années 2000, plusieurs études se sont intéressées aux outils informatisés et le développement de modèle de simulation a connu une grande expansion (Messier *et al.*, 2001). Ces modèles sont devenus aujourd'hui des outils importants d'aide à la décision dans la planification des activités d'approvisionnement forestier. Dans cette section, un survol des modèles qui ont été développés pour supporter les décisions de planification forestière au cours des dernières années est présenté.

2.5.1 Analyse des modèles d'optimisation-simulation récemment développés.

Karlsson *et al.* (2004), ont développé un modèle d'optimisation basé sur la programmation linéaire mixte en nombre entier pour faciliter la planification annuelle de la récolte forestière. Le modèle permet de considérer simultanément la récolte, le transport et le stockage du bois. Pour les critères de récolte, deux types d'intervention sont considérés, les volumes récoltés par coupe totale et ceux par éclaircie. La productivité des peuplements et les prévisions de productivité au niveau de planification supérieure, l'état des chemins, les conditions climatiques et la saisonnalité, sont également prise en compte. L'objectif principal vise à allouer les aires à récolter aux équipes de récolte disponibles de façon à minimiser les coûts totaux. Le modèle a été testé selon l'étude de cas d'une grande entreprise forestière suédoise. Les résultats montrent qu'il est possible de réduire les coûts d'opération en utilisant le modèle développé pour la planification annuelle de la récolte de façon intégrée.

Beaudoin *et al.* (2007) proposent un modèle de programmation linéaire mixte comme outil d'aide à la décision pour procéder à la planification tactique des approvisionnements d'une entreprise forestière possédant plusieurs usines. Basé sur un cas hypothétique, mais réaliste, le modèle permet d'évaluer la performance d'un plan en générant plusieurs scénarios permettant ainsi de considérer les éléments aléatoires. La planification effectuée permet la prise en compte de la fraîcheur du bois, qui a un effet sur les revenus générés par la qualité des produits finaux qui en découle en vue de répondre à

la demande sur le marché. L'objectif à la base du modèle est une maximisation du profit et les revenus sont associées aux prix de vente du bois sur le marché libre. Une analyse basée sur la simulation a permis d'ajuster les plans à l'aide d'une seconde planification sur un horizon roulant et de faire valoir la robustesse du plan. Les résultats ont montré une augmentation moyenne de 8.8 % des profits en utilisant le processus de planification proposé, plutôt qu'une approche de planification faite manuellement.

Marques *et al.* (2014), ont développé un modèle qui combine l'optimisation à la simulation pour procéder à la planification du transport forestier. Le modèle vise à évaluer la performance du système en se basant sur l'attente des camions pour le déchargement, tout en intégrant des éléments aléatoires qui affectent le respect du plan préalablement établi par optimisation. Quatre scénarios ont été développés soit un scénario optimiste, un scénario pessimiste et deux scénarios neutres. Un plan optimal a été établi, basé sur la méthode d'optimisation en trois phases de Marques *et al.* (2014). Chaque scénario fut ensuite simulé dix fois en intégrant des temps d'arrivés aléatoires pour évaluer la performance du système dans un contexte réel. Les résultats obtenus montrent que la visualisation des résultats à l'aide de la simulation permet facilement au gestionnaire d'identifier le goulot d'étranglement. L'étude permet également de motiver les planificateurs à développer de nouvelles méthodes de planification et de conscientiser les conducteurs de camion à l'importance de respecter la planification établie. Comme le modèle a été adapté à l'étude de cas, des modifications doivent être apportées afin de l'appliquer à toute autre situation.

Gautam *et al.* (2014), ont utilisé un système de simulation-optimisation afin d'évaluer l'effet de la flexibilité accordée au niveau opérationnel de planification pour le choix des traitements sylvicoles sur la possibilité forestière à long terme. En fait, en permettant le changement de traitement sylvicole planifié au niveau tactique ils ont pu optimiser le choix du type de traitements sylvicole en vue de satisfaire la demande du marché. Dans cette étude, deux modes de récolte ont été considérés, le procédé par arbre entier et celui par bois tronçonné. La productivité de ces procédés a été adaptée aux conditions de terrain de chacun des blocs de coupe récoltés. Pour la planification au niveau

opérationnel, une seconde planification sur un horizon roulant a été utilisée. Deux scénarios ont été développés, un scénario permettant une flexibilité dans le choix des traitements sylvicoles au niveau opérationnel et l'autre devant suivre le plan établi au niveau tactique pour tester l'effet sur la possibilité annuelle de coupe et le niveau de profit. Les résultats montrent que la flexibilité dans le choix des traitements sylvicoles permet de générer un profit significativement plus élevé que sans cette flexibilité, et ce, sans impact significatif sur la possibilité annuelle de coupe.

Eyvindson et Kangas (2014) proposent d'utiliser la formulation par *Stochastic Goal Programming* (SGP) pour procéder à la planification forestière. En utilisant la SGP, il leur est possible de considérer les événements aléatoires, tels que les imprécisions associées aux données d'inventaire forestier. Dans leur étude, trois formulations ont été développées. Chaque formulation peut être associée au type de planificateur qui l'utilise, soit un modèle pour les optimistes, les neutres ou pour les pessimistes. En appliquant le SGP, l'objectif est de minimiser les déviations par rapport aux objectifs de planification qui ont été fixés. À l'aide d'une étude de cas, les trois formulations ont été testées et l'objectif principal était d'établir la valeur nette potentielle des billes récoltées par divers type d'interventions. Même si une attention particulière est portée à la valeur économique des billes, aucune variation de cette valeur n'a été considérée, seules les variations dues à l'imprécision des données d'inventaire ont été prises en compte. Ainsi, les résultats montrent une augmentation des bénéfices associés à l'utilisation de données d'inventaire plus précises. En considérant l'imprécision des données d'inventaire, la taille du problème devient assez importante, mais de façon non exponentielle et les auteurs affirment qu'avec les améliorations constantes des logiciels d'optimisation et l'augmentation de la vitesse d'exécution des ordinateurs actuels, la résolution de tels problèmes sera facilitée.

Morneau-Pereira *et al.* (2014) proposent un système d'optimisation combinatoire pour procéder à la planification tactique des approvisionnements par le couplage de deux logiciels de simulation (FPinterface^{MD} et Optitek^{MD}) déjà utilisés en entreprise auxquels est ajouté un module d'optimisation (LogiOpt). Le système permet de modéliser un réseau logistique en intégrant les paramètres de récolte (bloc de récolte et mode de récolte), de

transport (mode de transport et réseau routier) ainsi que les caractéristiques de transformation propre à chaque usine du réseau. L'objectif principal du modèle est de générer le maximum de valeur par la vente des produits finis en allouant de façon optimale le bois récolté aux usines de transformation. Le modèle développé a été utilisé dans l'étude de cas d'une grande entreprise de produits forestiers canadienne possédant plusieurs usines de transformation. Le plan généré par le système a été comparé à plusieurs plans théoriques traduisant l'approche heuristique utilisée en entreprise. Les résultats de la comparaison montrent qu'en moyenne la valeur nette obtenue par optimisation est 55,6 % supérieure à celle obtenue par la méthode heuristique. En fait, Morneau-Pereira *et al.* (2014) ont démontré qu'en laissant le modèle sélectionner les blocs avant de décider de leur allocation aux usines, il était possible d'obtenir 15 % de gains supplémentaires comparativement à la sélection manuelle des blocs à allouer. Ainsi, seulement 15 % des gains seraient attribuables à une meilleure sélection des blocs de récolte, alors que la majorité des gains obtenus (85 %) serait en raison d'une meilleure allocation du bois aux usines de transformation. Par ailleurs, les résultats montrent qu'en général, les plans obtenus selon la méthode proposée utilisent moins de bois pour combler les capacités des usines, ce qui laisse supposer que les caractéristiques de la matière première envoyée aux divers complexes de transformation correspondent mieux aux besoins des usines.

Le Tableau 2.1 résume les principaux éléments considérés dans les modèles d'optimisation présentés et énumère les bénéfices potentiels associés à leur utilisation. Les modèles développés par Beaudoin *et al.* (2007), Gautam *et al.* (2014), Eyvindson et Kangas (2014) et Morneau-Pereira *et al.* (2014) procurent une augmentation des profits par leur utilisation. Le modèle développé par Morneau-Pereira *et al.* (2014) est celui qui considère le plus grand nombre d'éléments dans son réseau d'approvisionnement.

Tableau 2.1 Résumé des éléments considérés et des bénéfices escomptés dans les modèles récemment développés

Auteur	Éléments considérés dans le modèle						Bénéfices
	Aménagement	Récolte	Reseau	Transport	Transformation	Inventaires	
Karlsson <i>et al.</i> (2004)	x	x	x	x			↓ Coûts
Beaudoin <i>et al.</i> (2007)		x		x	x		↑ Profits
Marques <i>et al.</i> (2014)			x	x	x		↓ Temps
Gautam <i>et al.</i> (2014)	x	x				x	↑ Profits
Eyvindson et Kangas (2014)	x	x				x	↑ Profits
Morneau-Pereira <i>et al.</i> (2014)		x	x	x	x	x	↑ Profits

2.5.2 Les exigences de la mise en œuvre d'une nouvelle méthode de planification

Dans son étude, Mosconi (2014) énumère plusieurs facteurs affectant la prise de décision pour la planification du RAF. En se basant sur la littérature, elle affirme que les modèles d'optimisation et les outils d'aide à la décision qui ont été développés récemment ne permettent pas encore d'obtenir les résultats escomptés. En effet, elle indique que ces modèles ne représentent pas fidèlement le contexte réel des entreprises forestières et que la pertinence et la fiabilité des données utilisées affectent la qualité des décisions qui doivent être prises par les planificateurs. Ainsi, les méthodes proposées dans la littérature ne correspondraient pas aux besoins et aux capacités des entreprises. Pour ces raisons, les décisions prises par les planificateurs sont, encore aujourd'hui, basées sur l'intuition et l'expérience selon une approche d'essai-erreur.

Dans l'industrie forestière, les problèmes de planification du RAF affectent l'ensemble de la chaîne de valeur, ce qui démontre l'importance et l'important besoin d'améliorer l'utilisation des outils d'aide à la décision développés pour améliorer l'efficacité de la planification (Mosconi, 2014). Par ailleurs, les entreprises doivent composer avec des connaissances limitées sur l'utilisation des divers outils développés. Des efforts pour améliorer leurs connaissances, les informations qu'ils utilisent et le savoir-faire des individus devront être déployés (Mosconi, 2014). Par ailleurs, la complexité et la spécificité des modèles souvent adaptés à une problématique particulière nécessitent un effort considérable pour leur utilisation en entreprise (Mosconi, 2014). Finalement, en dépit des

bénéfices résultant de l'utilisation des modèles d'optimisation mathématique pour la planification, l'implantation dans les entreprises forestières semble très rare (Mosconi, 2014).

2.6 Pertinence de l'étude

Ce projet vise principalement à évaluer le potentiel d'amélioration du processus de planification fait actuellement en entreprise par l'implantation d'un outil d'aide à la décision basé sur l'optimisation mathématique. Plusieurs études se sont penchées sur les outils permettant d'augmenter les bénéfices monétaires, réduire la complexité du processus de planification ainsi que de réduire le temps nécessaire à la confection d'un plan efficace et réaliste. Comme le démontre Mosconi (2014), beaucoup de modèles ont été développés, mais encore aujourd'hui, il y a peu d'exemples concrets de leur utilisation en entreprise. Souvent, les modèles développés intègrent plusieurs variables qui complexifient le modèle et son utilisation, alors qu'en réalité, ces précisions sont souvent inappropriées pour l'horizon de planification à laquelle ils s'appliquent et elles sont également souvent inadaptées au contexte industriel. En supposant que le besoin immédiat n'est pas d'obtenir une planification exacte, insensible aux variations ou de procurer une solution parfaite et robuste, ce projet vise plutôt à fournir aux industriels un moyen d'obtenir un plan annuel optimal et une démarche réalisable sur le plan opérationnel.

Il a été démontré dans plusieurs études que la précision des données d'inventaire a un impact important sur la planification (Coudé, 2010 ; Savard, 2011 ; Mosconi, 2014 ; et Tilouche, 2014). Cependant, si une entreprise forestière n'a pas l'intention d'améliorer son système d'acquisition de données et qu'elle compte utiliser les données présentement disponibles, la considération de ce paramètre est inutile d'un point de vue pratique, car des données imprécises seront utilisées dans l'une ou l'autre des approches de planification. Par contre, pour éprouver la robustesse du plan, il est important de pouvoir constater l'effet d'une variation dans les données d'inventaire. La considération de ce paramètre permet également d'attribuer une valeur économique à la précision des données se traduisant en une décision d'investissement pour l'acquisition de meilleures informations.

La complexité des activités d'harmonisation est susceptible d'affecter la sélection des secteurs d'intervention sujets à plusieurs variations en cours d'année (Lebel *et al.*, 2015). Comme le montrent les résultats de Morneau-Pereira *et al.* (2014) en ce qui concerne la sélection des blocs de récolte, les auteurs affirment que ce paramètre a un effet négligeable (15 %) sur les gains obtenus dans le plan optimal par rapport à l'effet de l'allocation des blocs de récolte aux usines de transformation (85%). De plus, même si le RAF décrit par Mosconi (2014) n'inclut pas explicitement la transformation en usine, nous croyons que ce paramètre doit être considéré dans la planification du réseau. En fait, les profits globaux générés par l'ensemble du réseau dépendent de la vente des produits finis qui sont obtenus par l'entremise des complexes de transformation. La transformation des bois en produits finis constitue donc un élément important à considérer lors de la planification des activités du RAF.

En tenant compte du contexte et des objectifs de l'étude, le modèle d'optimisation LogiOpt, développé par Morneau-Pereira *et al.* (2014), semble une base intéressante pour développer de nouvelles fonctionnalités nécessaires à une application en entreprise. Le système développé par Morneau-Pereira *et al.* (2014) semble être plus complet que les autres systèmes récemment développés, dans le cas précis de l'atteinte de nos objectifs de recherche. En fait, comme il utilise une approche couplée entre deux logiciels présentement utilisés en entreprise et un module d'optimisation, il nous semble que son potentiel d'implantation en entreprise surpasse celui des autres modèles présentés. Également, l'importante augmentation des gains par rapport au plan heuristique motive grandement ce choix. Finalement, contrairement aux études antérieures ayant abordé le même sujet, ce projet cherche explicitement à documenter les conditions nécessaires à l'implantation de l'optimisation mathématique pour améliorer et simplifier le processus de planification actuellement fait sur la base de l'expérience et l'intuition des planificateurs.

Chapitre 3

3 Méthodologie

Dans cette section, l'approche méthodologique générale est présentée. Elle comprend une description de l'approche comparative des plans à l'étude, une présentation détaillée de l'étude de cas réalisée en collaboration avec une entreprise de produits forestiers et une description de l'outil d'aide à la décision basé sur un modèle d'optimisation. Les modifications apportées au modèle d'optimisation pour développer le plan optimal sont expliquées. Le chapitre se conclut par la description des scénarios qui seront présentés et analysés au chapitre 4.

3.1 Approche comparative entre la planification actuelle et optimisée

Dans cette étude, l'élément principal de l'approche méthodologique consiste à comparer un plan réel, tel que réalisé actuellement par les planificateurs d'une entreprise de produits forestiers, à un plan optimal réalisé à l'aide d'un outil d'aide à la décision. Pour bien évaluer l'approche actuelle de planification, le travail des planificateurs lors du processus d'élaboration de la programmation annuelle (PRAN) fait en entreprise a été analysé. Chaque étape fut observée et décrite afin d'établir un portrait le plus complet possible de la méthode et des exigences relatives à sa mise en œuvre. Cette étape devait permettre de bien comprendre le processus utilisé par les entreprises et ainsi, cibler les étapes de mise en œuvre sur lesquelles il est possible d'intervenir par optimisation. L'étude de cas présentée correspond à l'utilisation d'une approche de planification centralisée où l'entreprise possède plusieurs unités de transformation dont l'objectif principal est de maximiser la valeur nette du réseau. Afin de pouvoir pallier à une lacune des études antérieures, un plan réel fait en entreprise a servi de base à la comparaison. Ainsi, notre approche n'utilise pas un plan hypothétique pour représenter l'approche approximative de

planification réalisée en entreprise, mais des informations factuelles prises en compte par une équipe de planificateurs en industrie.

3.2 Étude de cas

L'étude de cas a été réalisée chez une grande entreprise de produits forestiers canadienne possédant un réseau de cinq usines de sciage regroupées dans une même région. Chacune de ces usines est détentrice d'une GA délivrée par le MFFP. Les usines concernées transforment majoritairement trois essences soit l'épinette noire (*Picea mariana M.*) le sapin baumier (*Abies balsamea L.*) et le pin gris (*Pinus banksiana L.*). Les billes livrées aux usines sont transformées en bois d'œuvre de différentes dimensions et les sous-produits (copeaux et sciures) doivent être minimisés, car ils sont généralement vendus à perte. L'approvisionnement des usines provient d'un grand territoire divisé en secteurs d'interventions (SI). Le territoire forestier québécois est divisé en 187 zones de tarifications pour lesquels la valeur marchande du bois sur pied (VMBSP) a été déterminée pour chaque mètre cube (m³) de bois récolté par les BGA (Bureau de mise en marché du bois, 2016). Cette valeur correspond au juste prix à payer par les BGA pour récolter chaque m³ de bois sur terre publique. Elle est ajustée tous les trois mois afin de refléter la valeur marchande actuelle, et ce, en fonction de la qualité des produits finaux générés (Bureau de mise en marché du bois, 2016). Le réseau routier sur le territoire est bien développé et tous les secteurs sont accessibles ou en voie de le devenir. La vente du bois d'œuvre est la source principale de revenus du réseau, tel qu'il est modélisé dans notre étude. L'approvisionnement correspondant à la GA constitue environ 75 % de l'approvisionnement des usines sur territoire public. L'autre portion des approvisionnements provient de sources très variables comme de la forêt privée, de transactions avec d'autres entreprises ou par le processus de mise aux enchères du BMMB. Il est à noter que le volume provenant des GA doit en principe être récolté en entier chaque année.

La majorité du bois correspondant aux volumes des GA est récolté par des entrepreneurs forestiers sous contrat avec l'entreprise. Trois différents modes de récolte sont utilisés par les entrepreneurs. Pour notre étude de cas : 39 % du volume est récolté en

*bois court*¹, 56 % du volume est récolté en mode *combo*² et 5 % du volume est récolté en *bois long*³. Également, différents patrons de façonnage en forêt sont utilisés selon les secteurs. Pour notre étude de cas, deux patrons visant à tronçonner la tige récoltée en une bille de 16' ou de 18' sont considérés. Actuellement, seulement deux des cinq usines du réseau sont aptes à transformer des billes de 18'. En forêt, les équipes de récolte trient les tiges récoltées en trois piles pour séparer les essences. Le transport du bois est effectué par des camions hors-normes (poids total en charge de 150 000 kg) ou des camions semi-remorques à quatre essieux (poids total en charge de 57 500 kg). Le volume transporté par camions hors-normes ne peut provenir que des secteurs liés directement à des usines par une route forestière. Trois des cinq usines du réseau peuvent être approvisionnées via des routes forestières, tout en évitant les routes publiques.

L'estimation des revenus générés par la vente des produits finis est obtenue à l'aide du logiciel Optitek^{MD} développé par FPInnovations. Optitek^{MD} simule le panier de produits optimal généré pour chaque bille entrant dans l'usine selon la configuration actuelle des lignes de sciages, et ce pour chacune des usines du réseau. La valeur du panier de produits est établie en fonction des revenus estimés de la vente des produits et sous-produits provenant de la transformation d'une bille selon la configuration de la ligne de sciage qui la transforme et des caractéristiques propres à la bille (courbure, défilement, grosseur, etc.). Ainsi, la valeur des produits dépend des caractéristiques propres à la bille transformée, de l'usine à laquelle elle est envoyée et des prix payés sur le marché.

Les inventaires forestiers utilisés pour la planification en entreprise proviennent des inventaires décennaux du MFFP. Par ailleurs, l'entreprise à l'étude, en partenariat avec le MFFP, tente de raffiner les données d'inventaire en participant à certaines études impliquant la technologie du LIDAR (Light Detection and Ranging). Cependant, lors de notre étude, les données utilisées provenaient majoritairement des inventaires décennaux, produits et diffusés par le MFFP.

¹ Généralement une abatteuse-façonneuse et un porteur forestier

² Généralement deux abatteuses-façonneuses et un porteur

³ Généralement une abatteuse groupeuse et un débardeur à grappin

3.2.1 Explication du choix de l'entreprise

Le choix de l'entreprise à l'étude fut basé sur un partenariat actuel avec le consortium de recherche FORAC et FPIInnovations. De plus, cette entreprise fait preuve de beaucoup d'ouverture par son implication constante dans plusieurs projets de recherche visant à améliorer la performance du secteur forestier. Elle s'intéresse également aux nouvelles technologies et désire améliorer son système d'approvisionnement. Cette entreprise est également un producteur majeur de produits forestiers au Canada. Bref, le choix de cette entreprise comme partenaire du projet et son désir d'y participer ont facilité la réalisation de cette étude.

3.2.2 Documentation du processus de planification fait en entreprise

Pour être en mesure de bien documenter le processus de planification actuellement utilisé en entreprise, les responsables de la planification opérationnelle (RPO), le surintendant à la planification (SP), le surintendant général des approvisionnements (SGA) et l'ingénieur forestier responsable des opérations forestières ont été rencontrés et questionnés sur leurs tâches spécifiques dans l'élaboration de la PRAN. Lors de ces rencontres, les principales questions qui ont été posées, présentées à l'annexe A, furent établies dans le but de cibler les principales étapes de la planification au sein de l'entreprise pour ainsi faciliter l'identification des étapes du processus dans lesquels il était possible d'intervenir par optimisation. À partir des réponses obtenues, un schéma résumant le processus de planification a été développé et validé par l'entreprise partenaire. Au chapitre 4 à la section 4.1.1 « Processus de planification réalisé en entreprise », le schéma de planification de l'entreprise à l'étude, les étapes de planification ciblées pour l'optimisation, la description des tâches de chacun des intervenants responsables de la planification, les différents logiciels utilisés lors du processus ainsi que le coût approximatif pour développer un plan selon la méthode actuellement en œuvre dans l'entreprise sont présentés. Le coût attribuable à l'élaboration de la planification manuelle a été établi en fonction du temps consacré par chacun des intervenants à leurs tâches respectives pour en arriver à la PRAN initiale. Le calcul des coûts est donc établi sur la base des salaires et du temps investi par le personnel interrogé.

3.2.3 Les besoins de l'entreprise partenaire

Comme l'un de nos objectifs concerne l'implantation de l'optimisation en entreprise, l'approche de recherche utilisée dans cette étude a été orientée sur les besoins de l'industrie. Des entretiens téléphoniques avec les responsables du projet chez l'entreprise partenaire ainsi qu'avec le personnel de FPInnovations ont été tenus mensuellement. Ainsi, plusieurs ajustements ont été apportés tout au long du projet pour mieux représenter la réalité de l'entreprise partenaire.

Parmi les ajustements apportés, dans le modèle de départ deux façons de générer des piles avaient été intégrées au modèle. Les blocs de récolte situés dans les secteurs nord (zone violette -ANNEXE B) étaient classés en trois piles selon la grosseur et l'essence. La première pile était constituée de billes de sapins toutes grosseurs, la seconde d'un mélange de billes d'épinettes et de pins gris à petit diamètre (<16 cm) alors que la troisième était constituée d'un mélange de billes d'épinettes et de pins gris à gros diamètre (≥ 16 cm). Dans les autres secteurs, les billes étaient seulement classées en trois piles selon l'essence (sapin, épinette et pin gris).

Un autre ajustement a été apporté aux paramètres de récolte prévus dans le modèle de départ. En fait, au départ toutes les tiges récoltées étaient façonnées en billes de 16' de longueur. En cours d'année, l'entreprise partenaire a décidé de permettre que deux des cinq usines du réseau soient aptes à transformer des billes de 16' et 18' de longueur en supposant que cette modification leur permettrait d'augmenter leurs bénéfices nets. Ainsi, le modèle d'optimisation a dû être modifié afin de permettre le façonnage des tiges en billes de 16' et 18'.

Également, la contrainte visant à forcer la récolte d'un volume fixe, tel qu'attribué aux entrepreneurs (bois court, bois long et combo) possédant un contrat de récolte avec l'entreprise, a été éliminée. En fait, après discussion avec le personnel de l'entreprise partenaire et puisque les contrats avec les entrepreneurs étaient fixes, il n'importait pas de permettre à cette valeur de fluctuer, car celle-ci ne constituait pas un critère de décision.

Finalement, comme la plupart des usines (80%) possèdent deux lignes de sciage : une ligne pour transformer les billes de faible diamètre (<16 cm) et l'autre pour transformer les billes à fort diamètre (≥ 16 cm), le modèle a été ajusté pour prendre en compte les capacités de transformations propres à chacune des lignes. Au départ, la somme des capacités de transformation des deux lignes de sciages était appliquée à une seule ligne par usine. Cette simplification faussait les résultats par une augmentation de la performance des usines (diminution du ratio M_{pmp}/m^3). Comme les lignes de sciages n'étaient pas différenciées, il était possible qu'une usine performante dans la transformation des billes à fort diamètre soit approvisionnée uniquement en billes à fort diamètre alors qu'en réalité l'usine ne peut pas transformer plus que la capacité de la ligne qui transforme ces billes, vice et versa.

3.3 Sélection du modèle d'optimisation

Il existe un vaste éventail d'outils d'aide à la décision qui ont été développés pour optimiser la planification des approvisionnements forestiers au cours des dernières années, dont plusieurs sont présentés dans l'étude de Paradis *et al.* (2013). Dans le cadre de notre étude, LogiLab, un outil d'aide à la décision intégrant un modèle d'optimisation mathématique (ANNEXE C) basé sur la programmation linéaire (Lemieux et Simoneau, 2014) a été utilisé. LogiLab permet d'intégrer plusieurs facteurs importants à considérer pour la planification de l'approvisionnement en bois à partir de la forêt jusqu'à la transformation en usine. Il est donc possible de considérer simultanément le transport, la récolte, l'hétérogénéité de la matière première ainsi que les éléments entourant la performance des usines. L'objectif est de maximiser la valeur nette obtenue par la vente des produits finis sur l'ensemble du réseau. La création et la planification de la chaîne d'approvisionnement sont traitées avec LogiLab et le modèle mathématique qui en résulte est résolu à l'aide d'un « solver » commercial (CPLEX pour notre étude).

Le choix du modèle d'optimisation utilisé dans l'étude fut basé sur deux critères principaux (i) la facilité d'utilisation et d'adaptation à un cas réel ainsi que (ii) les éléments du RAF que nous souhaitons prendre en compte. En analysant les différents modèles proposés dans la littérature, le modèle déjà intégré à LogiLab a été choisi. Ce modèle

(LogiOpt) a été développé par Morneau-Pereira *et al.* (2014). Il permet de répondre à tous nos critères de sélection. Le fait que le modèle mathématique LogiOpt soit intégré à l'outil d'aide à la décision (LogiLab) rend son utilisation plus facile. De plus, il est possible de considérer les principaux éléments d'intérêt du RAF, tels que le transport, la transformation et la récolte. Ce modèle d'optimisation est basé sur la programmation linéaire et l'objectif est de maximiser la valeur nette d'un réseau. L'avantage principal de LogiLab est qu'il peut être utilisé par des gens ayant des connaissances limitées en optimisation mathématique via une interface web. Le développement des problèmes à résoudre dans LogiLab se fait à l'aide d'un classeur Excel. Il est également possible de modifier le modèle mathématique en intégrant un fichier en langage de programmation *Python* avant de démarrer l'optimisation. De plus, l'interface web de LogiLab permet de visualiser le sommaire des résultats.

Dans le cadre de cette étude, pour analyser adéquatement la solution proposée par LogiLab, un niveau de détail supérieur était nécessaire. Pour cette raison, un fichier de solution, en format « Microsoft Excel », contenant des informations plus détaillées a été développé. Ce fichier peut être exporté suite à l'optimisation dans LogiLab et il a été utilisé dans la création d'un fichier d'interprétation visuelle des indicateurs appelé « tableau de bord » en format Excel. Le tableau de bord a été utilisé pour analyser et comparer les plans développés et ainsi présenter les résultats. Après avoir consulté l'entreprise partenaire sur les éléments importants à la prise de décision, le tableau de bord a été modifié de façon à y intégrer divers indicateurs utilisés par l'entreprise partenaire.

3.3.1 Les données entrantes

La plupart des paramètres d'entrée liés aux opérations forestières ont été générés à l'aide de FPInterface^{MD} alors que les données correspondant à la transformation en usine ont été générées à l'aide d'Optitek^{MD}. Dans le fichier d'entrée de LogiLab, les capacités minimales des usines correspondent à la proportion des volumes en GA de chaque usine, alors que les capacités maximales correspondent aux capacités totales de transformations annuelles des usines.

3.3.1.1 Les coûts de transport

Pour ce qui est du transport, l'analyse a tenu compte de l'interdiction réelle de circuler sur les routes publiques pour les camions dépassant 62 500 kg (Direction du transport routier des marchandises, 2013). Ainsi le bois transporté par camions hors-normes ne peut être envoyé qu'à trois des cinq usines. Dans le modèle, les coûts de transport (\$/m³) utilisés correspondent à ceux actuellement utilisés par l'entreprise partenaire. Ainsi, des coûts de 140,00 \$/HMP⁴ pour les camions hors-normes et de 74,00 \$/HMP⁵ pour les camions semi-remorques ont été utilisés. Pour être en mesure de considérer la distance de transport entre les blocs de récolte et les usines vers lesquelles il est possible d'acheminer le bois récolté, une matrice des cycles de transport a été générée à l'aide du logiciel FPInterface^{MD}. Pour compenser la variation du prix de l'essence, l'entreprise offre une compensation pour la surcharge de carburant aux camionneurs. Ainsi, des coûts de surcharge de carburant ont été calculés manuellement en fonction du prix de l'essence actuel moyen. Également, puisque les coûts attribuables au chargement et déchargement des camions n'ont pas été pris en compte lors de la génération de la matrice de transport, ils ont été calculés manuellement et ajoutés aux coûts de transport. Les coûts de transport utilisés en données entrantes dans LogiLab ont été calculés à l'aide de la formule suivante :

⁴ Ce coût exclut le coût relatif au temps de chargement et de déchargement

⁵ Ce coût exclut le coût relatif au temps de chargement et de déchargement

Variables :

X_E : Prix de l'essence (\$/L)

X_S : Compensation pour la surcharge de carburant (\$/L)

X_{Tij} : Coût de transport à partir du bloc i jusqu'à l'usine j (\$/m³)

K_{ij} : Distance de transport entre le bloc i et l'usine j (km)

C_T : Consommation d'essence pour le transport (L/km)

$X_{\text{chargement}}$: Coût de chargement (\$/TMV)

$C_{\text{chargement}}$: Consommation d'essence pour le chargement (L/TMV)

D : Densité de la matière ligneuse chargée (m³/TMV)

$X_{\text{chargeuse}}$: Coût de la chargeuse sans carburant (\$/HMP)

$C_{\text{chargeuse}}$: Consommation d'essence par la chargeuse (L/HMP)

P : Productivité de la chargeuse (m³/HMP)

X_C : Coût total pour les opérations de la chargeuse

Calculs :

$$X_C = \frac{X_{\text{chargement}} + C_{\text{chargement}}(X_E - X_S)}{D} + \frac{X_{\text{chargeuse}} + C_{\text{chargeuse}} X_E}{P}$$

$$\text{Coûts de transport} = (C_T(2K_{ij})(X_E - X_S)) + X_{Tij} + X_C$$

3.3.1.2 Les coûts de récolte

Les proportions de volume récolté par mode de récolte ont été ajustées pour correspondre aux contrats liant les entrepreneurs sous contractant à l'entreprise étudiée. Ainsi, les coûts de récolte (\$/m³) correspondent à la moyenne pondérée, par contrat, des sommes payées aux entrepreneurs utilisant un mode de récolte spécifique (bois court, bois long, combo). Le coût associé aux redevances à payer selon la zone de tarification forestière a également été pris en compte. La synthèse des coûts par mode de récolte est présentée au Tableau 3.1. Pour générer ces coûts, le fichier des redevances en vigueur au moment de la recherche et disponible sur le site internet du BMMB a été utilisé et pris en compte dans FPIInterface^{MD} (ANNEXE D).

Tableau 3.1 Coûts de récolte

Mode de récolte	Contrat	Taux (\$/m ³)
Bois court	39%	16,33
Combo	56%	15,99
Bois long	5%	14,83
Taux moyen pondéré		16,06

Le coût moyen des redevances, en fonction de la qualité des tiges, a été calculé selon les proportions globales prévues par l'entreprise partenaire. En général, 57 % du volume récolté serait de qualité sciage (B) alors que 43 % seraient de qualité pâte (C, M). Cette proportion a été appliquée pour chaque bloc de récolte. Par ailleurs, l'ensemble des secteurs de récolte prévus dans la PRAN pour la période 2016-2017 est situé dans les zones de tarification 240, 246, 255, 256, 258 à 269 et 271. La table des redevances qui a été utilisée pour le calcul des coûts de récolte correspond aux taux calculés pour la période du 1^{er} avril au 30 juin 2016 (ANNEXE D). Ces coûts ont ensuite été ajoutés aux coûts de récolte directement dans le fichier d'entrée de LogiLab.

3.3.1.3 Les fichiers d'entrées

Pour générer les données utilisées par LogiLab, un fichier de forme *.shp* correspondant aux blocs de récolte prévus dans la PRAN et ayant été préparé par le surintendant à la planification (SGP) de l'entreprise a été utilisé. L'outil d'agrégation FPInterface^{MD} (un module complémentaire à FPInterface^{MD}) a été utilisé pour former les blocs de récolte à partir du fichier fourni par le SGP. Les blocs de récolte ont été créés en agréant, par attribut, les polygones présents dans le fichier de forme. Ainsi chaque bloc de récolte devient un regroupement des aires de récolte spatialement dispersées correspondant aux secteurs d'interventions (SI) (Figure 3.1). Le fichier créé à l'aide de l'outil d'agrégation FPInterface^{MD} devient le fichier de base pour la création d'un système FPInterface^{MD}. Un système FPInterface^{MD} correspond à un regroupement de fichiers d'au

moins deux types provenant d'un système soit : les polygones correspondant aux blocs de coupe et les lignes correspondant aux chemins (FPInnovations, 2011). En fait, tout le travail effectué dans FPInterface^{MD} nécessite la création d'un système (FPInnovations, 2011). Dans le cadre de cette étude, un fichier de forme (point) correspondant aux usines de transformation faisant partie du réseau de l'entreprise a été utilisé en plus des fichiers correspondants aux blocs de récolte (polygones) et aux chemins (lignes) dans la création du système FPInterface^{MD}. Ainsi, le système FPInterface^{MD} permet la visualisation et la modification de différents paramètres tels que les propriétés des blocs de récolte et leur influence sur les coûts (FPInnovations, 2011).

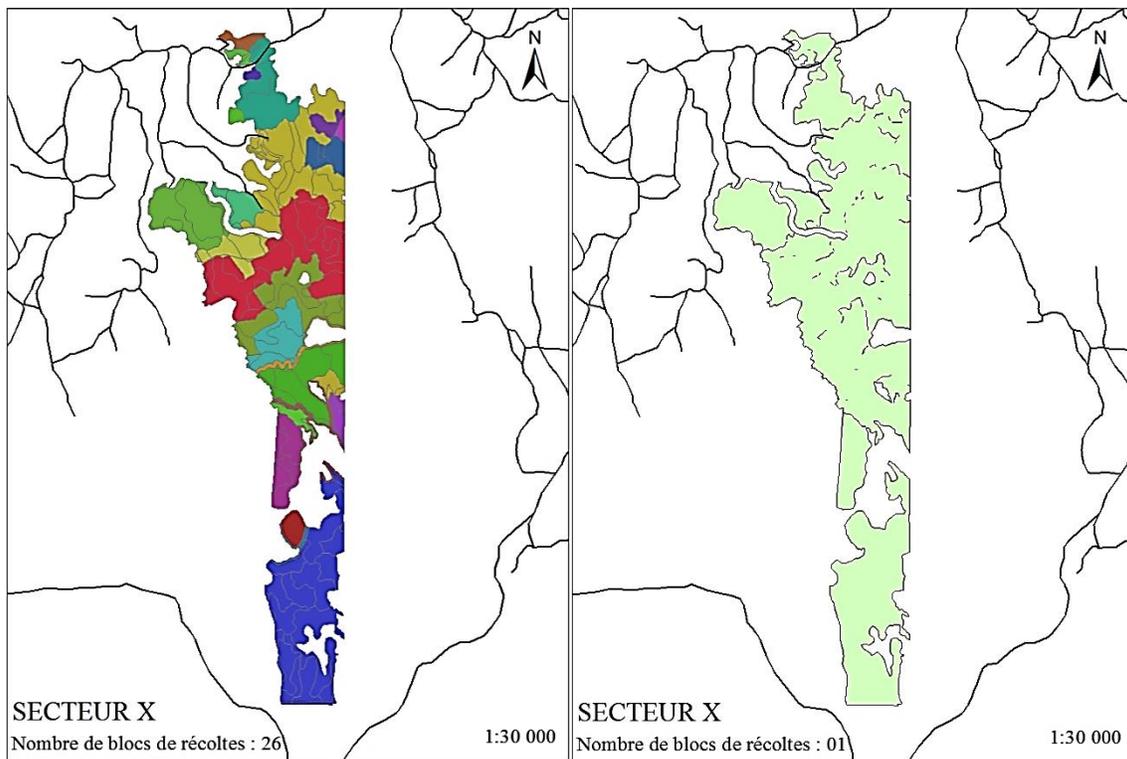


Figure 3.1 Exemple de blocs de récolte avant et après l'agrégation par secteur d'intervention (SI) avec l'outil d'agrégation FPInterface^{MD}.

Les données nécessaires à la création des fichiers utilisés par LogiLab sont exportées à partir du système FPInterface^{MD}. Pour ce qui est des fichiers propres aux usines de transformation, ils sont générés à l'aide d'Optitek^{MD}. Ce logiciel simule le panier de produits finaux généré et sa valeur selon la configuration du procédé de sciage à chacune des usines. Un fichier est ensuite exporté en format *.xlsx*, ce qui sert à créer des fichiers en format *.json* (format accepté par LogiLab) pour chaque usine et chaque procédé de sciage. La création des fichiers à partir d'Optitek^{MD} est effectuée par FPInnovations et la conversion des fichiers Excel en format *.json* est effectué à l'aide d'une console d'optimisation développée par FORAC.

3.3.1.4 Le processus de planification avec LogiLab

Afin d'adapter le modèle d'optimisation à un cas précis, des contraintes peuvent être ajoutées et intégrées dans LogiLab par l'importation d'un fichier programmé en langage de programmation *Python* avant de démarrer l'optimisation. Cela permet d'adapter le modèle au contexte spécifique de l'entreprise qui l'utilise. Dans cette étude, des contraintes de transformation, de récolte et de classement des billes ont été ajoutées au modèle par l'intégration d'un fichier *python* avant de commencer l'optimisation dans LogiLab. Ces contraintes sont décrites dans les sous-sections suivantes. La structure générale du processus d'optimisation avec LogiLab expliquée dans le paragraphe suivant est présentée dans le logigramme de la Figure 3.2.

Les données nécessaires à la création des fichiers de récolte (fichier de forme en format *.shp*) proviennent du MFFP. Elles sont ensuite transmises à l'industriel. Ces données fournies par le MFFP sont traitées à l'aide de FPInterface^{MD} pour tout ce qui concerne la récolte alors qu'Optitek^{MD} est mis à jour pour tout ce qui concerne la transformation en usine et l'évolution de la valeur des produits sur le marché, selon les besoins de l'industriel. L'industriel décide alors des contraintes essentielles qui doivent être ajoutées aux modèles pour représenter le plus fidèlement possible le contexte de l'entreprise. Il décide également des paramètres à appliquer (coûts de surcharge de carburant, proportion des secteurs récoltés par mode de récolte, etc.) lors de la création des fichiers de base. Ainsi, quatre fichiers de base sont créés à l'aide de FPInterface^{MD} et un

fichier par usine est créé à l'aide d'Optitek^{MD}. Les deux fichiers provenant de FPInterface^{MD} (matrices de transport et paramètres de récolte) doivent être adaptés manuellement (calcul et mise en forme) pour être acceptables par LogiLab. Ainsi, l'adaptation des fichiers sortant de FPInterface^{MD} génère trois nouveaux fichiers (coûts de récolte, table de peuplements et coûts de transport) constituant ainsi les onglets du fichier d'entrée de LogiLab. Les fichiers générés par Optitek^{MD} sont utilisables par LogiLab après avoir été convertis à l'aide d'une console d'optimisation développée par FORAC. Les contraintes supplémentaires nécessaires à l'adaptation du modèle d'optimisation à la réalité de l'industriel doivent être inscrites dans un fichier en langage de programmation *Python*. Une fois que les fichiers nécessaires à l'optimisation ont été créés, ils doivent être importés dans LogiLab. Ensuite, il est possible de lancer l'optimisation. Une fois l'optimisation terminée, il est possible de visualiser sommairement les résultats dans l'interface web de LogiLab. Il est également possible d'exporter le fichier détaillé de la solution en format Excel à l'aide de la console d'optimisation développée par FORAC. Finalement, les onglets du fichier solution sont copiés dans le tableau de bord qui génère des tableaux et graphiques pour interpréter facilement les résultats.

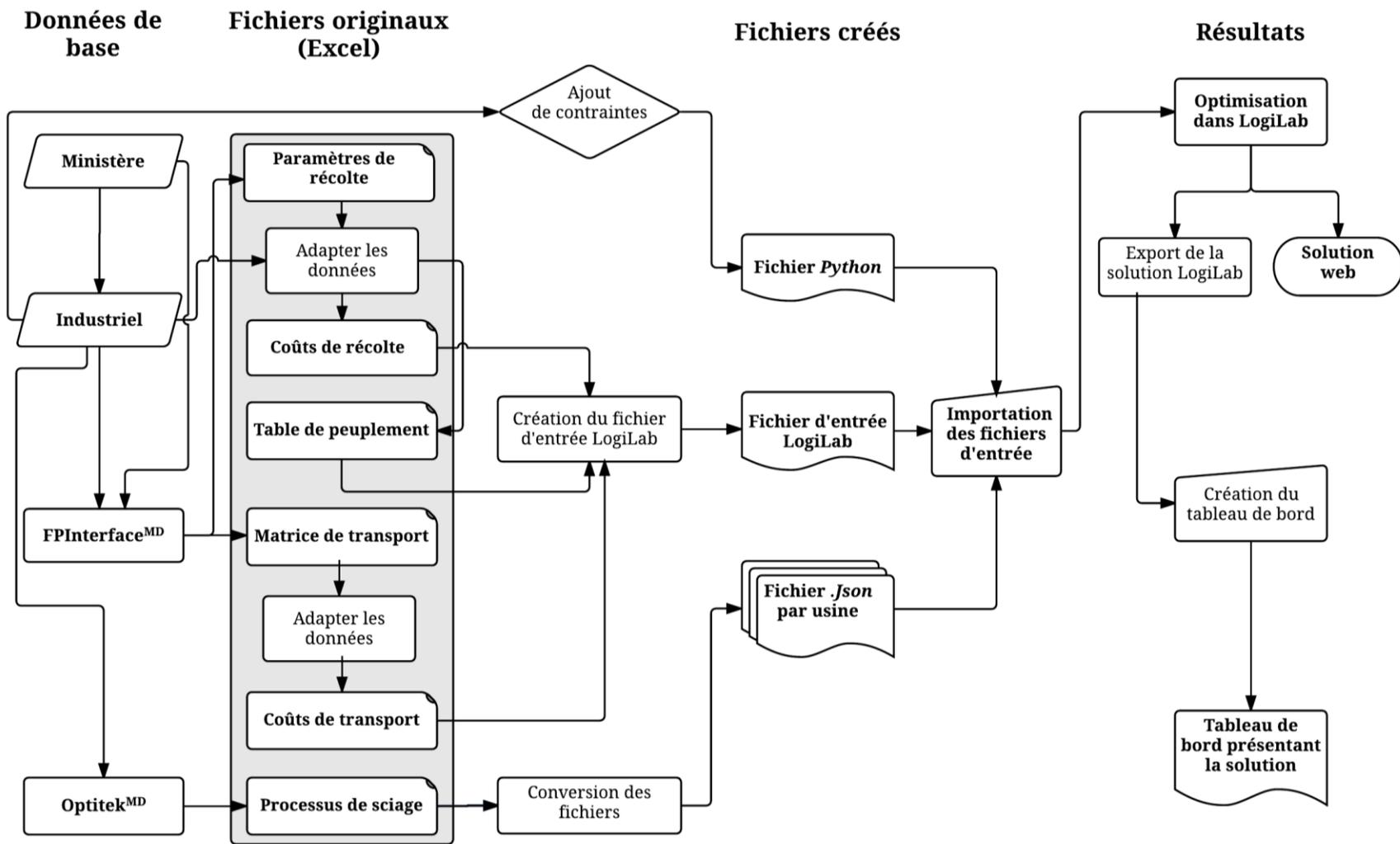


Figure 3.2 Logigramme du processus d'optimisation des approvisionnements utilisé dans le cadre du projet

3.3.2 Contraintes générales ajoutées à l'ensemble des scénarios

Le module d'optimisation derrière LogiLab (ANNEXE C) a été adapté au contexte de l'entreprise partenaire. Pour ce faire, certaines contraintes liées à la transformation en usine, aux patrons de façonnage utilisés et aux classements des billes par pile d'essences ont été ajoutées. Les modifications ont nécessité la création d'un fichier *Python* qui a été intégré dans l'interface web juste avant de commencer l'optimisation dans LogiLab. Les contraintes ajoutées au module d'optimisation se divisent en trois ensembles soit : les contraintes des lignes de sciage, les contraintes de récolte et les contraintes de transport des piles.

3.3.2.1 Contraintes des lignes de sciages

Le modèle d'optimisation de base permettait la transformation des billes de toutes grosseurs sur une seule ligne de sciage. Ainsi, la capacité de transformation des usines était basée sur le volume seulement. Par contre, cette façon de faire n'était pas représentative de la réalité, elle pouvait induire des erreurs importantes dans les plans développés et fausser grandement les résultats obtenus. En fait, comme la plupart des usines du réseau sont composées d'une ligne de sciage spécialisée dans la transformation de billes à fort diamètre et d'une autre spécialisée dans la transformation de billes à faible diamètre, il arrivait qu'une usine soit approvisionnée en bille de fort ou de faible diamètre, et ce, en quantité supérieur à la capacité réelle de transformation de la ligne de sciage spécialisée dans la transformation de ce type de bille. Pour éviter que ce problème ne survienne, une contrainte visant à séparer les capacités des usines en fonction de la grosseur des billes pour mieux représenter la capacité réelle des lignes de sciage, a été intégrée au modèle d'optimisation. Cette contrainte est représentée par la formulation mathématique suivante :

Constantes au modèle de base :

q_{ktu}	Capacité de type $k \in K$ de l'unité u au temps t disponible
λ_{kuw}	Quantité d'unité de capacité de type $k \in K$ de l'unité u consommé par le procédé w

Variable au modèle de base :

Y_{tuw}	Quantité du procédé w effectué à l'unité u se terminant au temps t
-----------	--

Nouveaux ensembles :

$S_{16}^+ \subset W_{tu}$	Ensemble des procédés de transformation sur la grosse ligne de sciage à l'unité u au temps t
$S_{16}^- \subset W_{tu}$	Ensemble des procédés de transformation sur la petite ligne de sciage à l'unité u au temps t

Nouvelle contrainte :

$$\sum_{w \in S_{16}^+} \sum_{w \in S_{16}^-} \lambda_{kuw} Y_{tuw} \leq q_{ktu} \quad \forall t \in T, u \in U, k \in K \quad (7)$$

3.3.2.2 Contrainte de récolte

Une contrainte de récolte relative au patron de façonnage a été ajoutée au modèle d'optimisation initial de Logilab. En fait, comme deux des cinq usines du réseau peuvent transformer à la fois des billes de 16' et 18' de longueur alors que les autres usines sont contraintes à ne transformer que des billes de 16' de long, des contraintes permettant le façonnage de billes de 16' ou de 18' selon la destination du bois ont été intégrées au fichier *Python*. Pour pouvoir considérer deux procédés de façonnage, des fichiers du processus de transformation pour des billes de 16' et 18' permettant à chacune des usines de générer des produits à partir du format de la bille ont été créés avec Optitek^{MD}. Ainsi, deux fichiers

Optitek^{MD} ont été créés pour les deux usines qui peuvent transformer des billes de 18' et 16' alors qu'un seul fichier est associé à chacune des trois autres usines (16'). Au total sept fichiers ont été générés par simulation avec Optitek^{MD} (deux fichiers pour les billes de 18' et cinq fichiers pour les billes de 16'). Une contrainte générale a été ajoutée à l'ensemble des blocs de telle sorte que chaque bloc de récolte ne peut être façonné que d'une seule façon. Cette contrainte permet d'éviter le façonnage tige par tige qui ne serait actuellement pas réaliste en contexte opérationnel. La contrainte ajoutée pour considérer le façonnage des tiges en bille de 18' a été intégrée au modèle initial de Logilab selon la formulation mathématique suivante :

Constante au modèle de base :

γ_{pw}	Quantité de produit p produit par le procédé w
---------------	--

Variables au modèle de base :

Y_{tuw}	Quantité du procédé w effectué à l'unité u se terminant au temps t
D_{tup}	Quantité de produit p acheminé à l'unité u au temps t

Nouvel ensemble :

$F_{18pi} \subset W$	Ensemble des procédés de façonnage des tiges en billes de 18'
----------------------	---

Nouvelle variable :

θ_{uw}	Variable binaire indiquant si l'usine u peut transformer des billes de 18'
---------------	--

Nouvelle contrainte :

$$\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{w \in F_{18pi}} \sum_{u \in U} \gamma_{pw} Y_{tuw} \leq \theta_{uw} D_{tup} \quad \forall t \in T, p \in P, u \in U \quad (8)$$

3.3.2.3 Contraintes de piles

Deux contraintes ont été générées pour représenter le triage des piles par essence, une tâche qui est effectuée en forêt par les équipes de récolte. En fait, comme les piles sont constituées de plusieurs billes ayant des caractéristiques différentes et qu'il n'est pas réaliste de permettre d'allouer individuellement chacune de ces billes aux usines de transformation, cette pratique a un effet important sur l'allocation des blocs de récolte aux usines. Ainsi, les contraintes intégrées aux modèles d'optimisation permettent l'allocation du bois provenant des blocs de récolte par piles à un maximum de deux usines de transformation. Ces contraintes ont été programmées dans un fichier en langage *Python* et ajoutées au modèle juste avant de lancer l'optimisation avec LogiLab. Grâce à ces contraintes, chaque bloc récolté est constitué de trois piles (sapin, épinette et pin gris) pouvant être transportées vers deux usines maximum. Les contraintes de piles permettent également une allocation plus réaliste des blocs de récolte aux usines en allouant des piles, plutôt qu'en procédant tige par tige, ce qui serait inconcevable pour une entreprise. Les deux contraintes ajoutées pour considérer les piles ont été intégrées au modèle initial de Logilab selon la formulation suivante :

Variable au modèle de base :

F_{ept}	Flux de produit p sur l'arc e partant du point i au temps t allant vers la destination j
-----------	--

Nouveaux ensembles :

$B \subset U$	Ensemble des blocs de récolte
I	Ensemble des piles
P_i	Ensemble des produits composant la pile i

Nouvelle variable :

$L_{uu'}$	Variable binaire qui indique si les produits de l'unité u sont transportés vers l'unité u'
-----------	--

Nouvelles contraintes :

$$\sum_{e \in \delta_u^- \cap \delta_{u'}^+} \sum_{p \in P_i} \sum_{t \in T} F_{ept} \leq ML_{uu'} \quad \forall u \in B, u' \in U, i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{u \in U} L_{uu'} \leq 2 \quad \forall u \in B \quad (10)$$

3.4 Les scénarios développés

Au total sept scénarios ont été développés et parmi ceux-ci, quatre sont considérés comme étant optimaux. Les scénarios optimaux (scénario 1 à 4) se différencient par le fait qu'ils ont des contraintes différentes susceptibles d'avoir un effet sur la solution optimale. Les scénarios optimaux développés visent à évaluer l'effet d'une variation dans les décisions d'affaires tel que le choix du démêlage des tiges, les patrons de façonnage possible et la combinaison de ces décisions sur la solution optimale proposée. Également, comme le cœur de notre méthode vise à comparer une approche de planification manuelle à une approche par optimisation, un des scénarios développés correspond au plan réalisé par les planificateurs en entreprise, il s'agit du scénario manuel (scénario 5). Une contrainte forçant le modèle à imiter l'allocation prévue dans le plan de l'entreprise a été ajoutée au modèle pour développer ce scénario. Les deux derniers scénarios développés (scénario 6 et 7) contiennent une proportion des données d'inventaire ajustées selon les données du mesurage suite à la récolte effectuée durant la saison d'opération à l'étude. Ces deux scénarios correspondent aux scénarios avec des données d'inventaire ajustées ou qualifiées de « réelles ».

Enfin, pour être comparables, certains paramètres devaient être contrôlés dans les scénarios développés. Ainsi, comme l'objectif de maximisation de la valeur nette du réseau peut être influencé par la quantité de bois transformés, chacun des scénarios développés a été contraint à récolter exactement le même volume de bois, soit environ 130 % du volume prévu par la GA. Ce volume correspond à la quantité de bois à récolter, tel que prévu dans la PRAN réalisée en entreprise. Les scénarios développés et utilisés dans ce projet sont décrits dans les sous-sections suivantes.

3.4.1 Le scénario optimal de référence (s1)

Le scénario optimal de référence est le scénario optimal qui reflète la situation actuelle de l'entreprise. Ce scénario sert de base à la comparaison de tous les scénarios. Dans ce scénario, il est possible de façonner des tiges en bille de 16' ou 18' et celles-ci sont classées par essence en trois différentes piles.

3.4.2 Le scénario optimal avec piles au nord (s2)

Par le passé, l'entreprise partenaire effectuait le classement des billes selon différents types de piles dépendamment de la situation géographique où se trouvait le bloc de récolte. Le tri des billes faisant partie des blocs de récolte situés dans un secteur « nord » était fait par grosseur et par groupe d'essence plutôt que seulement par essence. Trois différentes piles étaient obtenues soient :

- une pile de sapins (toutes grosseurs)
- une pile d'épinettes et de pins gris au faible diamètre (<16 cm)
- une pile d'épinettes et de pins gris au gros diamètre (≥ 16 cm)

En ce qui a trait aux secteurs qui ne sont pas au nord, les billes sont classées par essence en trois différentes piles. Dans ce scénario, les tiges récoltées peuvent être façonnées en bille de 16' ou 18'. Ce scénario a été développé pour évaluer l'effet d'une variation de type opérationnelle sur l'approche de planification par optimisation.

3.4.3 Le scénario optimal avec façonnage de 16' (s3)

Au départ, seul le patron de façonnage des tiges en bille de 16' était utilisé lors de la récolte. Ainsi, un scénario ne permettant que le façonnage des tiges en bille de 16' a été développé. Ce scénario devrait permettre de vérifier si la décision de l'entreprise partenaire s'avère être une décision d'affaires justifiée. Ce scénario devait également permettre d'observer l'effet de la variation d'un paramètre opérationnel sur la solution proposée par LogiLab. Dans ce scénario, les billes sont classées par essence en trois différentes piles.

3.4.4 Scénario optimal avec piles nord et 16' (combiné) (s4)

Ce scénario est une combinaison entre le scénario optimal avec piles au nord et le scénario avec façonnage de 16'. Ce scénario devrait nous permettre d'évaluer l'effet de la décision d'éliminer ces contraintes appliquées au départ par l'entreprise et l'effet combiné de ces contraintes par rapport à leurs effets individuels, tel qu'il est prévu dans les autres scénarios. Dans ce scénario, les tiges peuvent seulement être façonnées en billes de 16' et les billes situées dans les secteurs au nord sont classées par groupe d'essence et de diamètre pour les pins gris et les épinettes noires, alors que les sapins sont classés dans une seule pile. Pour les secteurs qui ne sont pas situés au nord, les billes sont classées dans des piles par essence.

3.4.5 Le scénario manuel (s5)

Le scénario manuel correspond à la planification réelle qui a été réalisée par les planificateurs de l'entreprise partenaire sans outil d'optimisation, c'est le scénario qui a été appliqué pendant la saison d'opération 2015-2016. Dans ce scénario, il est possible de façonner des tiges en bille de 16' ou 18' et les billes sont classées par essence en trois différentes piles.

3.4.6 Les scénarios optimal et manuel avec inventaire ajusté (s6 et s7)

Comme plusieurs études ont soulevé que l'imprécision des données d'inventaire forestier utilisées pour la planification a un effet considérable sur la fiabilité des plans développés (Coudé, 2010; Savard, 2011; Mosconi, 2014; et Tilouche, 2014), il est important de considérer, dans le cadre de cette étude, l'effet de la variation des données d'inventaire sur les plans développés. En fait, on suppose que les planificateurs en entreprise sont conscients de l'imprécision des inventaires utilisés pour la confection des plans et qu'ils planifient leurs activités en conséquence. Cette hypothèse s'exprime de la façon suivante : *les plans développés en entreprise devraient être mieux adaptés à une variation dans les données d'inventaire*. Pour vérifier cette hypothèse, deux scénarios ont été développés.

Les deux scénarios développés correspondent au scénario optimal de référence (s1) et au scénario manuel (s5), dont une proportion des données inventaires a été ajustée avec les données réelles provenant des blocs qui ont été récoltés et mesurés durant la saison d'opération. Pour développer les plans relatifs à ces deux scénarios, une contrainte a été ajoutée pour forcer le modèle à l'allocation exacte des scénarios auxquels ils seront comparés. Aucune optimisation n'a été effectuée dans ces scénarios, seules les données d'inventaire peuvent avoir influencé la valeur générée par la fonction objective. Ainsi, le scénario optimal de référence (s1) sera comparé au scénario optimal de référence avec inventaires ajusté (s6) alors que le scénario manuel (s5) sera comparé au scénario manuel avec inventaires ajustés (s7).

Les scénarios développés sont comparés entre eux selon le plan de traitement présenté dans le Tableau 3.2. Le scénario optimal de référence (s1) sert de base à la comparaison de tous les scénarios développés. En fait, c'est le scénario dont le plan résultant devrait être le plus profitable pour l'entreprise, car il a été adapté selon son contexte actuel. À l'exception du plan résultant du scénario optimal avec inventaire ajusté (s6), tous les plans optimaux sont comparés entre eux. La raison de cette exclusion est que les décisions prises dans ce plan sont identiques au plan résultant du scénario optimal de référence, seules les données d'inventaire peuvent affecter la valeur des indicateurs calculés dans ce scénario. De plus, cette comparaison vise à analyser l'effet de la variabilité des informations utilisées pour procéder à la planification, plutôt que l'effet d'un changement dans une décision de type opérationnelle. L'approche principale de la méthode utilisée dans cette étude vise à comparer les solutions obtenues à partir d'un plan réalisé par optimisation et les solutions obtenues à partir d'un plan réalisé manuellement. Le plan manuel, traduisant l'approche de planification actuellement utilisée par l'entreprise partenaire, a donc été comparé aux plans générés par optimisation. Le plan manuel a également été comparé au plan manuel avec inventaire ajusté. Les écarts résultant de la comparaison entre les plans optimaux de référence et manuel par rapport à ceux avec les données d'inventaire ajustées seront comparés et analysés. Les résultats des comparaisons prévues au plan de traitement, tel que présenté au Tableau 3.2, sont dans le chapitre suivant.

Tableau 3.2 Plan de traitement pour la comparaison des scénarios développés

Scénarios	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
s1		x	x	x	x	x	
s2	x		x	x	x		
s3	x	x		x	x		
s4	x	x	x		x		
s5	x	x	x	x			x
s6	x						x
s7					x	x	

Chapitre 4

4 Présentation et analyse des résultats

Dans ce chapitre les processus généraux de mise en œuvre, les coûts, les ressources nécessaires ainsi que les principales étapes de la planification réalisées actuellement par l'entreprise partenaire et lors de la planification optimale sont présentés et analysés. Par la suite, les résultats de la comparaison des différents scénarios testés sont présentés et analysés. Finalement une comparaison des plans optimaux et manuel réalisés avec des données d'inventaire estimé et ceux comportant une proportion de données issues des inventaires après la récolte (réel), est présentée et analysée.

4.1 Processus de planification original de l'entreprise

Pour évaluer le potentiel d'implantation de l'optimisation mathématique en entreprise, il a d'abord fallu analyser le processus de planification déjà en place dans l'entreprise et identifier les étapes où il est possible d'utiliser l'optimisation. Par la suite, l'approche de planification par optimisation proposée a dû être décrite. Une analyse a dû être réalisée afin d'identifier les ressources supplémentaires nécessaires à l'adoption d'une approche de planification par optimisation en entreprise. Ainsi, en comparant les deux processus, il est possible d'évaluer si l'implantation de l'approche de planification par optimisation en entreprise est réellement possible et quelles sont les exigences associées à l'adoption d'une telle approche.

Dans cette section, le processus de planification fait actuellement en entreprise est décrit. Les ressources nécessaires à l'élaboration d'un plan produit selon cette méthode et le coût relatif à cette démarche sont présentés. Les ressources nécessaires à la démarche de planification réalisée par optimisation, les coûts et la démarche en soi sont également présentées. Finalement, une analyse des approches de planification termine cette section.

4.1.1 Processus de planification réalisé en entreprise

Le processus de planification réalisé manuellement en entreprise est présenté et expliqué à l'aide d'un schéma cartographique des principales étapes à franchir pour arriver à établir le plan annuel des approvisionnements. Par la suite, les ressources nécessaires à l'élaboration du plan annuel et le coût approximatif de la planification sont présentés.

4.1.1.1 Cartographie du processus de planification réalisé en entreprise

Pour bien décrire le processus de planification en entreprise, un schéma (Figure 4.1) illustrant les étapes principales de l'élaboration de la planification en entreprise a été cartographié en collaboration avec les responsables de la planification de l'entreprise partenaire. Ainsi, sept étapes principales ont été identifiées.

Avant de pouvoir commencer la planification, le forestier en chef (FEC) doit avoir effectué un calcul de possibilité forestière. Ensuite, les volumes de bois résultant de ce calcul sont attribués aux secteurs d'intervention admissibles à la récolte de façon stratégique (étape 1). Le FEC réalise ce calcul en considérant plusieurs critères, tels que les superficies fauniques structurées (Zones d'exploitations contrôlées (ZEC), pourvoiries et Société des établissements de plein air du Québec (SÉPAQ)), les superficies à encadrement visuel (paysage), les superficies en pente forte (30 à 40%), les superficies de bande riveraine, les superficies de peuplement orphelin, les superficies en coupe partielle, les superficies touchées par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*) ou les superficies sans contraintes. Une fois que les volumes disponibles pour la récolte ont été attribués aux diverses régions du Québec, un comité opérationnel mixte composé des BGA œuvrant sur un même territoire, du BMMB et du MFFP, doit déterminer les zones d'intérêt (ZI) pour la récolte pour les cinq prochaines années (étape 2). Après que le comité ait identifié les ZI, le BMMB effectue une ponction parmi celles-ci afin de réserver des superficies forestières contenant un volume équivalent à 25% des GA. Ces superficies réservées seront par la suite attribuées au BGA. Le volume conservé par le BMMB est réservé pour le processus de mise aux enchères du bois (étape 3). Les superficies contenant le 75% du volume des GA attribuées aux BGA sont ensuite révisées

par le MFFP qui planifie les traitements sylvicoles à réaliser avant de les attribuer aux BGA. Lorsque les BGA d'une même région reçoivent la planification du MFFP, ceux-ci doivent développer une PRAN qui identifie les blocs de récolte prévus pour l'année à venir (étape 4). Cette étape vise à sélectionner et allouer des blocs de récolte aux usines de transformation (étape 4.1) pour la préparation des budgets (étape 4.2). À cette étape, la PRAN est réalisée individuellement par chacun des BGA partageant une même UAF. L'étape suivante consiste en la mise en commun des PRAN réalisées individuellement pour une même UAF (étape 5). C'est lors de cette étape que les BGA se rencontrent pour s'entendre sur la PRAN globale à présenter au MFFP pour approbation. À cette étape les BGA doivent négocier entre eux de façon à ce que chaque bénéficiaire ait son volume de GA. C'est souvent à cette étape que les négociations sont source de conflits ou de litiges. Une fois que les BGA se sont entendus sur la PRAN globale, cette dernière peut être déposée au MFFP pour l'approbation (étape 6). Le MFFP vérifie ensuite que la PRAN déposée est conforme et respecte les exigences demandées. Le cas échéant, le MFFP approuve la mise en œuvre si tout est conforme et que tous les secteurs sont harmonisés, la PRAN est autorisée, elle peut alors être implantée et les travaux peuvent débiter. S'il y a présence de secteurs non harmonisés, les BGA doivent obtenir un permis d'intervention pour commencer les travaux dans les secteurs harmonisés et la PRAN doit être adaptée pour répondre aux mesures d'harmonisation dans les secteurs non harmonisés avant de pouvoir débiter les travaux dans ces secteurs (étape 7). Finalement, s'il y a un changement de plus de 50 ha dû aux secteurs non harmonisés, les étapes de confection de la PRAN doivent être reprises à partir du début (retour à l'étape 4).

Lors du processus de planification en entreprise, les étapes sur lesquelles l'industriel a le pouvoir d'intervenir sont celles qui ont été ciblées pour être améliorées par l'utilisation de l'optimisation. Dans le cas présenté, ce serait les étapes quatre et sept, car ces étapes sont principalement sous la responsabilité des industriels (figure 4.1).

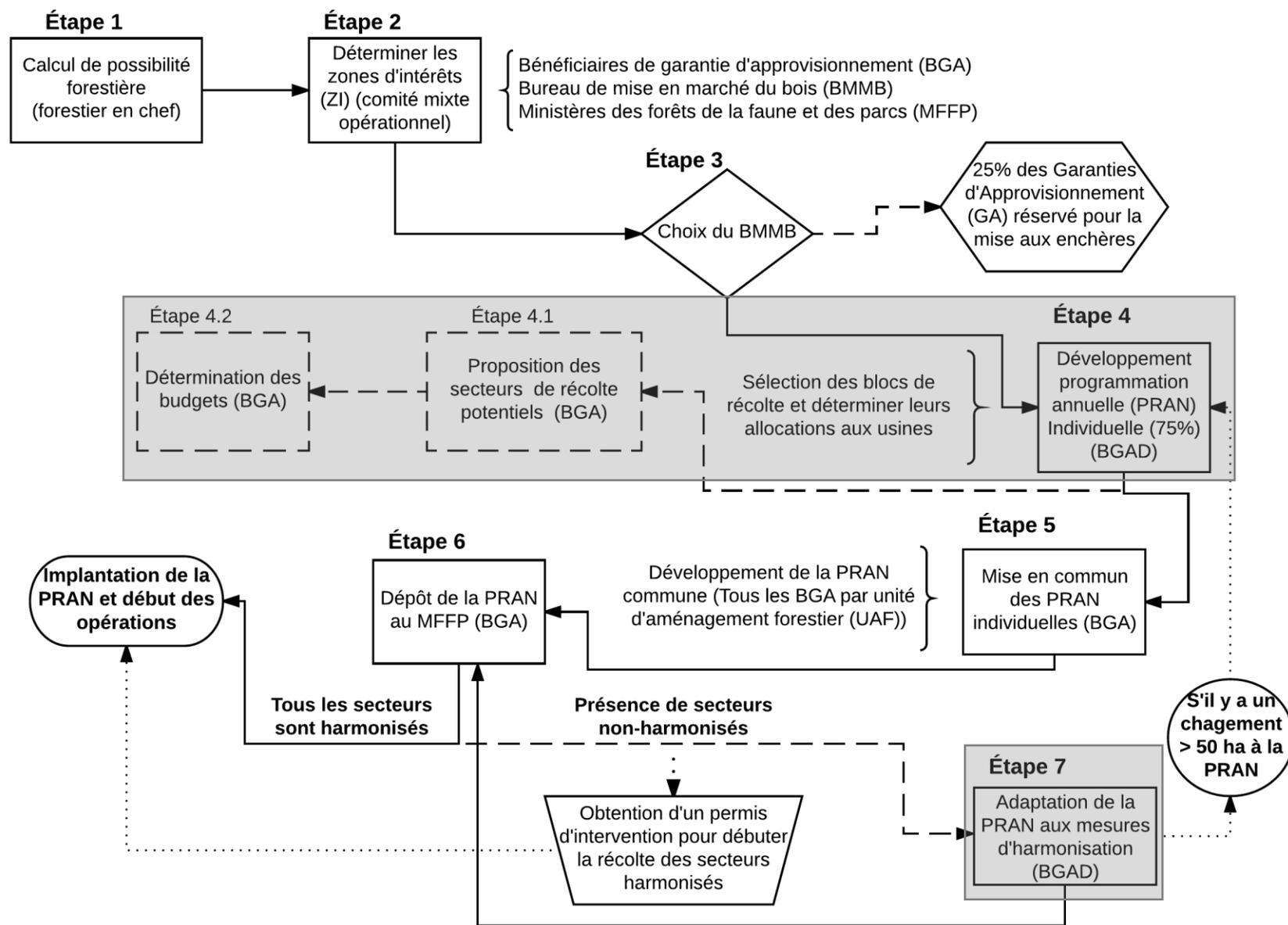


Figure 4.1 Étapes principales de l'élaboration de la planification en entreprise (en gris, les étapes visées pour l'optimisation)

4.1.1.2 Ressources nécessaires et coût de planification

Le coût du plan réalisé en entreprise a été calculé à partir du temps (rémunération en salaire) nécessaire à chacune des étapes du processus d'élaboration de la PRAN. Les ressources (matérielles, en main-d'œuvre et en temps) nécessaires à la réalisation de la PRAN ont été identifiées. Le personnel nécessaire à l'accomplissement des étapes quatre et sept comporte treize personnes, soit :

- 1 surintendant à la planification (SP)
- 4 responsables de la planification opérationnelle (RPO)
- 1 surintendant général des approvisionnements (SGA)
- 2 équipes composées d'un surintendant général de secteur et d'un assistant (SGS et A)
- 1 équipe composée d'un ingénieur forestier et de deux techniciens (IF et TF)

Le niveau de formation des travailleurs attitrés à l'élaboration de la PRAN varie du diplôme d'études professionnelles (DEP) au baccalauréat (BAC) (figure 4.2). Par contre, la majorité des travailleurs détient un diplôme d'études collégiales (DEC) en foresterie et certains travailleurs détiennent plus d'un diplôme. La figure 4.2 présente la répartition du nombre de diplômes par niveau de formation au sein du groupe de travailleurs.

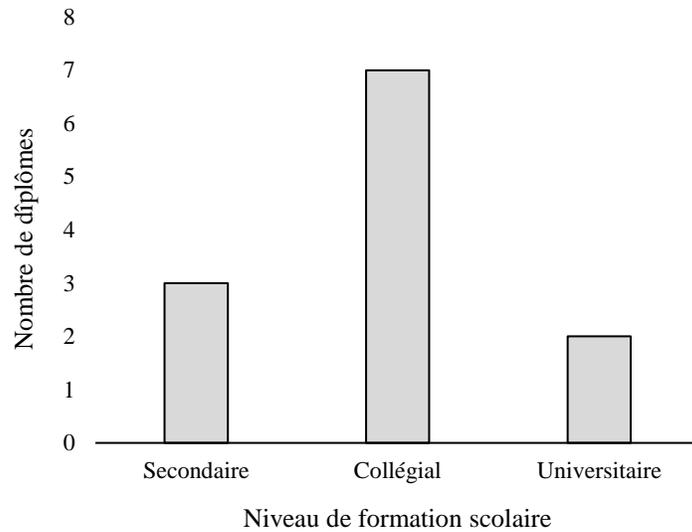


Figure 4.2 Nombre de diplômes par niveau de formation scolaire détenu par l'équipe attitrée à la PRAN dans l'entreprise

L'élaboration de la PRAN nécessite l'utilisation de plusieurs outils informatisés. Puisque la majorité de ces outils sont utilisés quotidiennement et qu'ils sont, pour la plupart, utilisés dans le processus d'optimisation, les frais rattachés à leur utilisation n'ont pas été pris en compte dans le coût de confection du plan réalisé manuellement. Parmi ces outils, on retrouve :

- Microsoft Excel
- ArcGis
- SyGif_GT (module intégré à ArcMap)
- Microsoft Word
- Microsoft Access

En ce qui a trait au temps consacré aux tâches⁶ de planification spécifiques à l'élaboration de la PRAN, il a été calculé en jours ouvrables de huit heures en fonction d'informations obtenues lors d'entrevues individuelles (Figure 4.3).

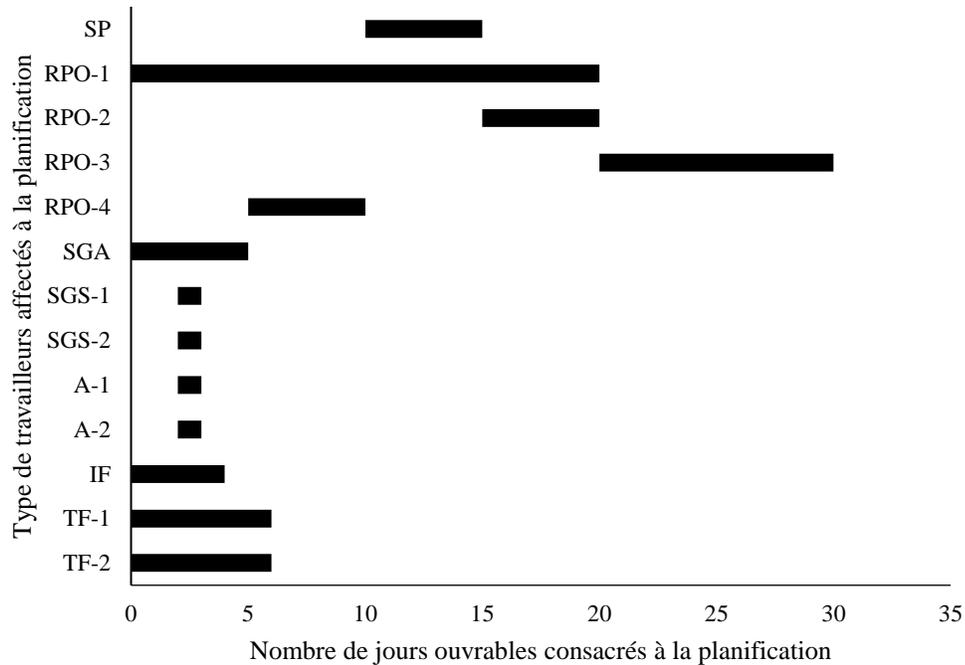


Figure 4.3 Nombre de jours ouvrables minimum et maximum consacré à l'élaboration de la PRAN par chacun des travailleurs.

Finalement, le coût global du processus de planification fait en entreprise a été calculé en fonction des salaires de chacun des travailleurs et du temps moyen que ceux-ci ont affirmé passer à effectuer la totalité des tâches spécifiques à cette planification. Comme le temps consacré aux processus varie en fonction de plusieurs facteurs qui varient d'année en année, les travailleurs nous ont fourni une approximation du temps minimal et maximal qu'ils pouvaient passer à planifier année après année. Les coûts minimal et maximal ont été obtenus avec ce calcul. Ainsi, la confection de la PRAN, réalisé manuellement en entreprise, a un coût variant entre 23 872,95 \$ et 30 917,57 \$, pour une moyenne de 27 395,26 \$.

⁶ Les principales tâches accomplies par les intervenants sont présentées dans l'ANNEXE F

4.1.2 Processus de planification proposé utilisant l'optimisation (LogiLab)

L'utilisation de LogiLab pour développer un plan optimal nécessite plusieurs outils et logiciels informatiques (Figure 4.4). Ce matériel comprend les logiciels FPInterface^{MD} et Optitek^{MD} développés par FPInnovation, ArcGis, et le « solver » commercial CPLEX. LogiLab fonctionne avec un classeur Excel qui est utilisé comme fichier d'entrée pour générer des scénarios de planification. De plus, les classeurs Excel ont été utilisés pour exporter les résultats détaillés des solutions LogiLab et pour créer le tableau de bord pour l'analyse des résultats.

Les principales étapes de la démarche du développement d'un plan optimal à l'aide de LogiLab consistent en la création du fichier d'entrée pour générer un scénario de planification optimal (Figure 4.4). La première étape consiste à agréger les polygones, provenant des fichiers préparés par le SP de l'entreprise partenaire. Pour le cas étudié, les polygones ont été agrégés par secteur d'intervention afin de former 66 blocs de récolte. Par la suite, le fichier résultant de cette agrégation a été travaillé dans ArcGis de façon à obtenir les coordonnées géographiques en degrés décimaux, utilisées dans l'onglet « unité d'affaires » du fichier d'entrée de LogiLab. Ces coordonnées sont utilisées pour situer géographiquement les blocs de récolte dans l'interface web de LogiLab. Le fichier résultant de l'agrégation est ensuite combiné aux fichiers de formes du réseau routier et à celui contenant les usines de transformation. Cette combinaison sert à la création d'un système FPInterface^{MD}. À partir de ce système, deux classeurs Excel sont générés (matrice de transport et statistique de volume marchand), dont les données serviront à créer les onglets flux, blocs et récolte du fichier d'entrée de LogiLab. Une fois le fichier d'entrée créé, il doit être importé dans l'interface web de LogiLab. Les fichiers des procédés de sciage (en format *.json*) provenant d'Optitek^{MD}, qui ont été créés préalablement chez FPInnovations, et les contraintes additionnelles, contenues dans un fichier *Python*, doivent également être importés. Dès que les fichiers ont été importés dans LogiLab, le problème à résoudre est créé et il est possible de lancer une optimisation. Dans le cadre de cette étude, le temps de résolution était généralement en deçà de 15 minutes. Suite à l'optimisation, il est possible d'exporter la solution détaillée en fichier *.csv* dans Microsoft Excel. Une fois les fichiers exportés, ils sont copiés dans le tableau de bord qui permet l'analyse du plan.

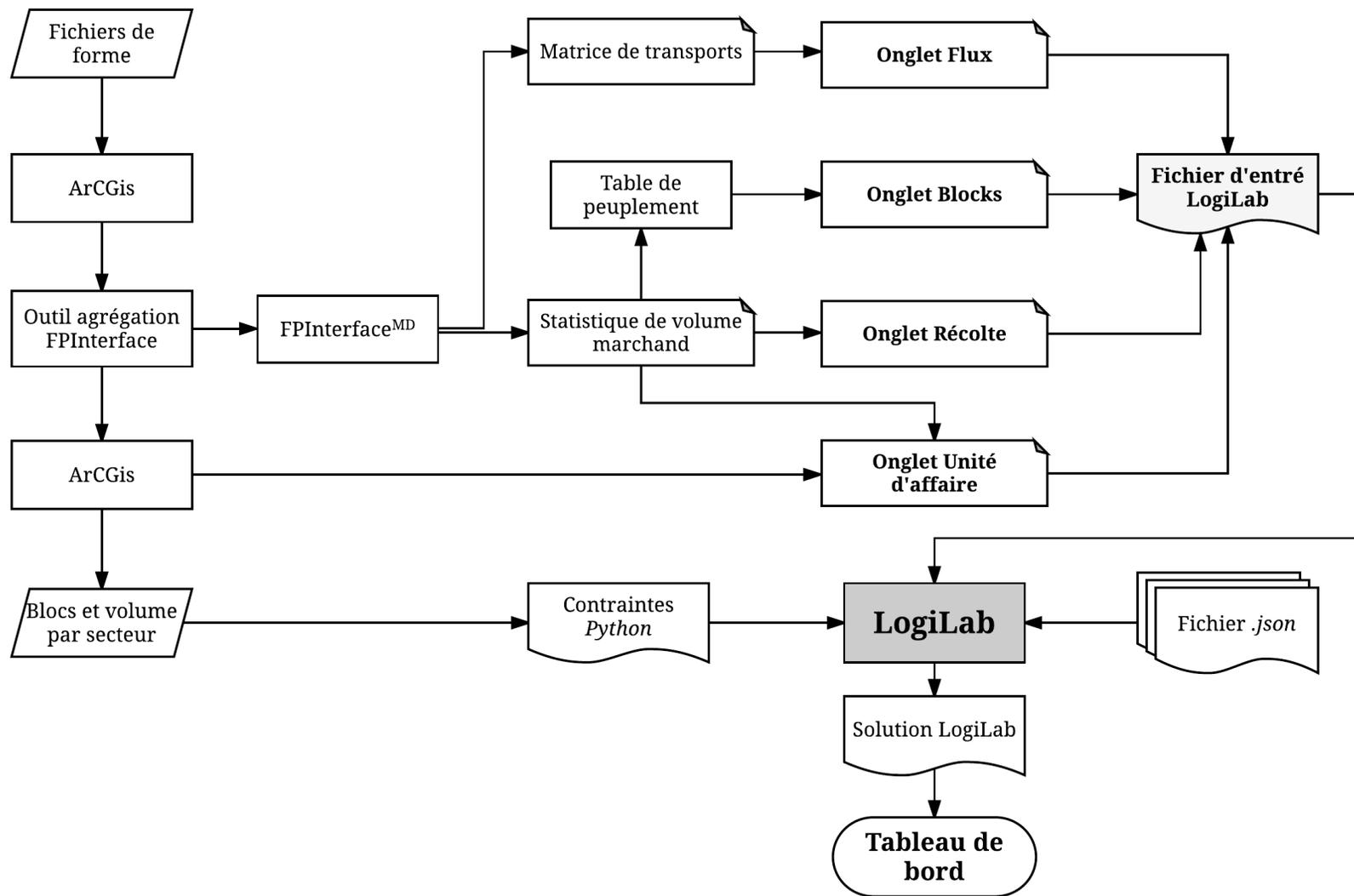


Figure 4.4. Démarche à suivre pour développer un plan optimal à l'aide de LogiLab

Dans le cadre de l'étude, le niveau de formation qui a été nécessaire à l'utilisation de LogiLab est de type universitaire. La création et l'analyse des scénarios obtenus à l'aide de LogiLab nécessitent un professionnel détenant un baccalauréat en foresterie (ingénieur forestier). Pour ce qui est de l'adaptation du système à l'étude de cas, de la programmation informatique a été nécessaire. La programmation a été réalisée par un professionnel en génie logiciel détenant un niveau de formation universitaire de deuxième cycle. Au final, la programmation requise pour adapter le système selon le cas de l'entreprise, soit l'utilisation de LogiLab, semble être accessible à un ingénieur forestier. Une validation, et si nécessaire une adaptation du plan proposé par LogiLab, doit être faite par le personnel affecté à la planification en entreprise. Ainsi, le travail fait actuellement par les planificateurs de l'entreprise ne sera pas complètement éliminé, mais il pourrait être grandement réduit.

Le temps nécessaire à la génération d'un scénario de planification optimal à l'aide de LogiLab, de la création du fichier d'entrée jusqu'à l'intégration de la solution détaillée dans le tableau de bord, est estimé à une journée et demie pour une personne maîtrisant bien le processus. En cours de projet, le temps consacré au développement des fichiers nécessaires au processus de planification optimisé a évolué rapidement. Au départ, la confection des fichiers pouvait prendre entre une et deux semaines. Il est donc possible d'estimer que le temps moyen pour réaliser la planification optimisée sera d'une semaine en début de processus (première année) et qu'il diminuera rapidement par la suite. Ainsi, le coût relatif au temps de travail a été calculé à l'aide du salaire moyen de base d'un ingénieur forestier selon l'*Enquête 2012 sur la rémunération des ingénieurs forestiers du Québec* de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (2012) (ANNEXE G). Le coût de la planification, pour la première année est donc estimé à 1 119, 23\$, montant auquel on devra ajouter le coût d'acquisition d'une licence pour l'utilisation des logiciels FPInterface^{MD} et Optitek^{MD}, en plus d'une licence d'utilisation d'un « solver » commercial comme CPLEX. Pour la licence de FPInterface^{MD}, le logiciel coûte 3 500\$ + l'abonnement annuel qui est de 1 150 \$, additionné de 9 500 \$ selon Nehme (2015), pour acquérir la licence de CPLEX (tableau 3.1.2). En ce qui a trait à la licence d'Optitek^{MD}, puisque ce

logiciel est déjà utilisé par l'entreprise partenaire, nous n'avons pas imputé ce coût au processus de planification.

Plusieurs étapes du processus de planification réalisé en entreprise sont simplifiées par l'utilisation de l'optimisation : analyse plus rapide des différents scénarios et génération d'une solution optimale, choix des allocations forêt-usine, génération des budgets, etc. Il est donc probable que le temps relatif au processus de planification en entreprise serait grandement réduit par l'optimisation de la planification. En fait, en intégrant l'optimisation au processus de planification en entreprise, on estime que le temps actuellement nécessaire au personnel responsable de la planification serait minimalement réduit de moitié, ce qui représente une économie moyenne de plus de 13 697,63 \$ (Tableau 4.5.). Cette estimation est basée sur l'analyse de l'ensemble des tâches effectuées par les travailleurs affectés à la planification, au temps de retour des plans qui ont été fournis et analysés par les planificateurs, ainsi que sur les observations faites tout au long du projet. Les calculs du coût relatif au processus de planification fait par optimisation pour les deux premières années et le calcul du coût annuel de la planification actuellement réalisé en entreprise sont présentés dans le Tableau 4.5. Des économies de 2 488,01 \$ seraient possibles dès la deuxième année de mise en œuvre du processus de planification optimal en entreprise.

Type de coût	Planification avec LogiLab		Planification actuelle
	Année 1	Année 2	
Salaire ingénieur	1 119,23 \$	559,62 \$	- \$
Salaire travailleur actuel	13 697,63 \$	13 697,63 \$	27 395,26 \$
FPinterface ^{MD}	4 650,00 \$	1 150,00 \$	- \$
CPLEX	9 500,00 \$	9 500,00 \$	- \$
TOTAL	28 966,86 \$	24 907,25 \$	27 395,26 \$

Tableau 4.5 Comparaison entre le coût du processus de planification optimisé pour les deux premières années de mise en œuvre et le coût annuel du processus de planification réalisé en entreprise.

4.1.3 Discussion

Le processus de planification manuel qui est actuellement en place requiert plus de temps au total que le processus de planification optimisé. Ainsi, on estime qu'il serait plus rentable pour une entreprise d'adopter le processus de planification optimisé avec LogiLab, et ce, dès la deuxième année de mise en œuvre en raison des investissements de départ liés à l'acquisition des licences pour l'utilisation des logiciels nécessaires au processus. L'expérience acquise par les responsables de la planification en entreprise en lien avec le nouveau processus, lors de la première année, devrait permettre de réduire le temps nécessaire à la planification lors de la deuxième année d'utilisation du processus de planification avec LogiLab. Ainsi, le temps de planification réduit devrait permettre à l'entreprise qui opte pour l'optimisation mathématique de procéder à plusieurs scénarios potentiels et d'adapter son processus de planification rapidement en cas de changement ou d'imprévu.

Pour passer du plan manuel au plan optimisé, des investissements dans la formation de la main-d'œuvre seront nécessaires afin de maîtriser les particularités de l'utilisation de LogiLab. Cependant, étant donné les qualifications des travailleurs déjà affectés au processus de planification en place dans l'entreprise partenaire, ces investissements devraient être négligeables. Étant donné que les logiciels de base (ArcGis et Microsoft Excel) sont utilisés dans les deux approches de planification, que le retour sur l'investissement est prévu dès la deuxième année de mise en œuvre, qu'une formation minimale est requise et qu'une réduction du temps de travail est prévue, opter pour le processus de planification optimal est non seulement possible, mais procure de nombreux avantages. En fait, l'implantation de l'approche de planification optimale proposée ne nécessite qu'un minimum d'effort et devrait être envisagée sérieusement par les entreprises de produits forestiers. Ainsi, il est possible de confirmer notre hypothèse de départ, qui veut que l'implantation d'une approche de planification par optimisation en entreprise à l'aide d'un modèle déjà existant soit possible. Par ailleurs, même si la réduction des coûts associés à la mise en œuvre de la planification est intéressante et qu'elle doit être prise en compte, le bénéfice souhaité par les entreprises est principalement une augmentation de la valeur nette générée par le plan. C'est ce que la prochaine section évaluera.

4.2 Comparaison des scénarios de planification

L'estimation des bénéfices et avantages liés à l'utilisation de l'optimisation mathématique pour soutenir les décisions de planification dans un contexte industriel nécessite la comparaison des plans développés à l'aide de l'approche de planification actuelle à ceux produits à l'aide d'un modèle d'optimisation mathématique. Pour ce faire, nous avons sélectionné, avec l'aide des planificateurs de l'entreprise partenaire, certains indicateurs pour valider la performance des plans. Ainsi, plusieurs indicateurs ont été sélectionnés, ils correspondent à la valeur nette générée, aux revenus du sciage et des sous-produits, aux coûts de récolte, de transport et de production, au volume récolté et produit, aux facteurs de performance de transformation, ainsi qu'à la proportion de transport par camions hors-normes utilisée. Les résultats relatifs à la valeur de ces indicateurs ont ensuite été comparés entre les différents scénarios de planification qui ont été développés.

Cette section présente et analyse les résultats des plans issus des quatre scénarios obtenus par optimisation et les résultats du plan obtenu selon la méthode réalisée en entreprise (optimisation manuelle). Au total, 66 blocs de récolte ont été créés et alloués aux cinq usines de transformation du réseau de l'entreprise. La valeur nette, les coûts et les revenus, le volume récolté, le volume produit, la performance des usines, ainsi que la proportion du transport fait par des camions hors-normes sont les facteurs qui ont été comparés dans la sous-section 4.2.1. La différence liée à l'allocation des blocs de récolte vers les usines est présentée dans la sous-section 4.2.2, alors que les résultats comparant le scénario aux données d'inventaire escomptées avec celui comportant une portion des inventaires réels sont présentés dans la section 4.3.

4.2.1 Manuel vs optimisé à l'aide de Logilab

La Figure 4.6 présente les écarts entre les plans développés et le plan optimal de référence sur la valeur nette, les revenus du sciage ainsi que les revenus des copeaux et des sciures qui ont été générés. Le plan optimal de référence est celui qui présente la valeur nette la plus élevée, suivi de près par le plan optimal avec contraintes de piles au nord (Figure 4.6). Le plan manuel génère la plus faible valeur nette avec 19,26% d'écart au plan

optimal de référence (Figure 4.6). Dans le plan manuel, les revenus escomptés pour les produits du sciage sont les plus faibles et les revenus pour les sous-produits sont les plus élevés, alors que les revenus les plus élevés escomptés pour les produits du sciage sont obtenus par le plan optimal avec contrainte de piles au nord et les revenus pour les sous-produits les plus faibles correspondent au plan optimal de référence (Figures 4.6b et c).

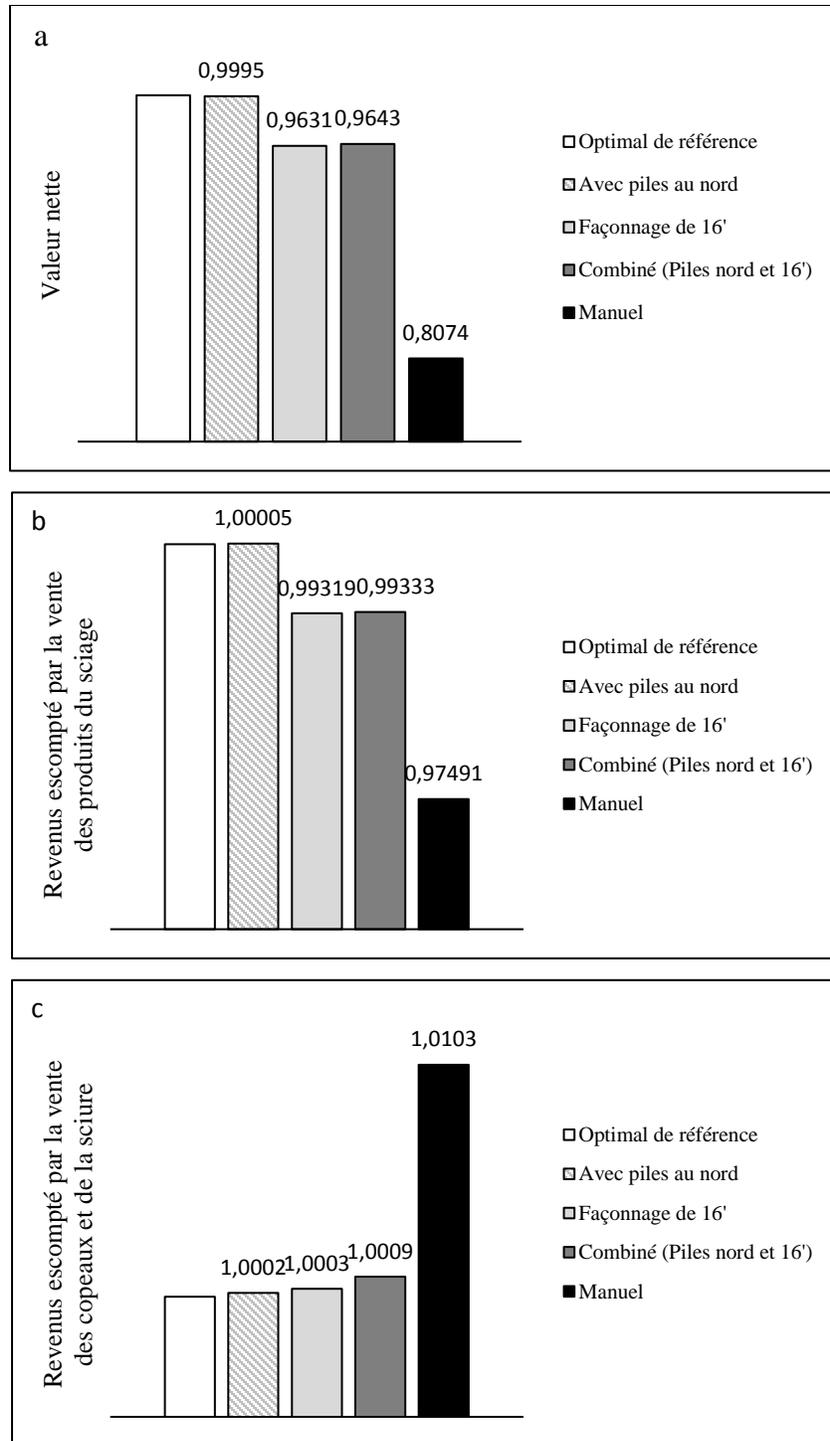


Figure 4.6 Ratio correspondant à la valeur monétaire escomptée dans chacun des scénarios pour : a) la valeur nette, b) les revenus du sciage et c) les revenus de copeaux et de sciure.

La Figure 4.7 présente les écarts entre les plans développés et le plan optimal de référence sur les coûts de récolte, de transport et de transformation. Étant donné que tous les volumes disponibles sont récoltés dans chacun des scénarios et que les coûts de récolte correspondent à une moyenne pondérée des coûts par mode de récolte, les coûts de récolte sont les mêmes pour chaque scénario (Figure 4.7a). Les coûts de transport les plus élevés sont observés du côté du plan manuel. Ils sont supérieurs de 1,7% à ceux du plan optimal de référence qui présente les plus faibles coûts de transport (Figure 4.7b). Pour ce qui est des coûts de transformation, la même tendance est observée : les coûts les plus élevés sont générés par le plan manuel avec 2,7% de plus que les coûts de transformation du plan optimal de référence (Figure 4.7c).

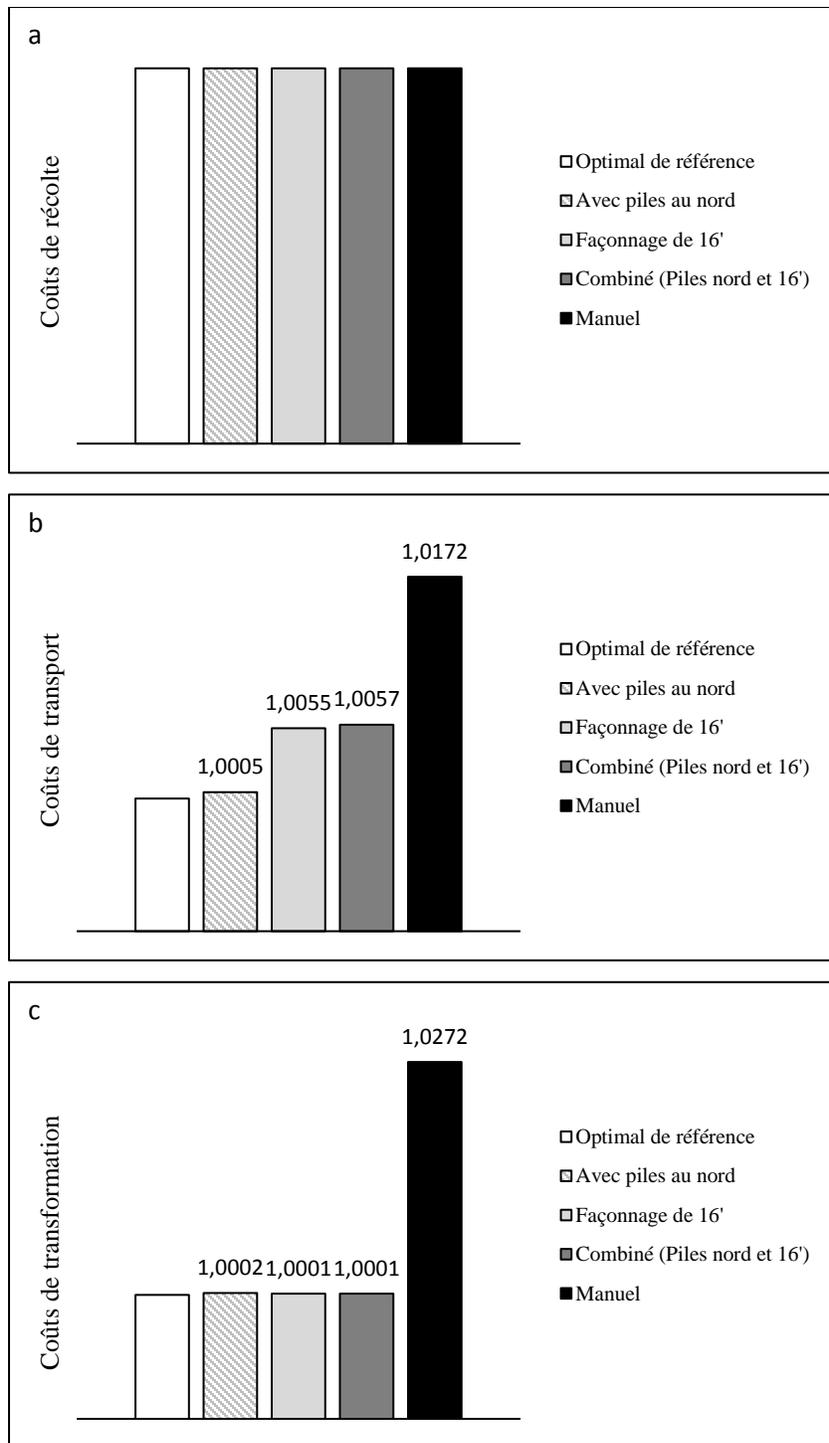


Figure 4.7 Comparaison entre les ratios relatifs aux coûts de : a) récolte, b) transport et c) de transformation.

La Figure 4.8 présente les écarts entre les plans développés et le plan optimal de référence sur les volumes récoltés et les volumes produits. Les volumes récoltés sont les mêmes pour tous les scénarios, soit 2 816 253 m³. Le volume des produits du sciage optimal de référence permet de produire le plus grand volume de sciage (598 918 Mpmp). Le plan manuel produit le plus faible volume avec un écart de 10 453 Mpmp, soit une diminution de l'ordre de 1,7% (Figure 4.8). Les volumes de copeaux produits suivent la tendance inverse : le plus faible volume est observé dans le plan optimal de référence et le volume plus élevé est observé dans le plan manuel. En ce qui a trait au volume de sciures, il suit la tendance du volume de sciage produit (Figure 4.8).

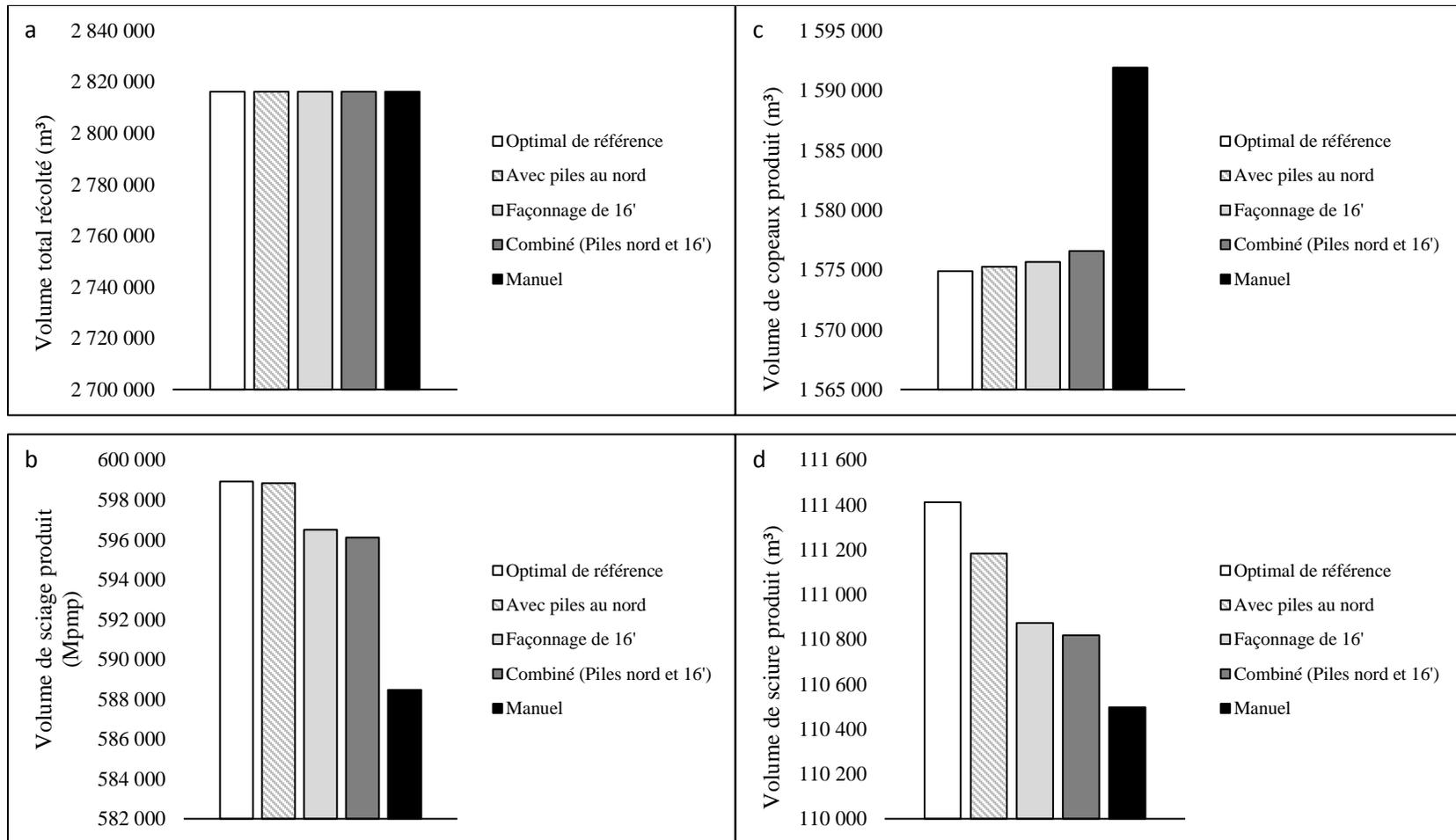


Figure 4.8 Comparatif des volumes : a) total récolté, b) de sciage produit c) de copeaux produits et d) de sciures produites.

La Figure 4.9 présente les écarts entre les plans développés et le plan optimal de référence concernant la performance de transformation des usines. Cette dernière est évaluée en fonction du nombre de m³ brut utilisé pour produire un Mpmp de bois de sciage. Ainsi, la moyenne pondérée de la performance de transformation des cinq usines du réseau varie entre 4,70 m³/Mpmp et 4,79 m³/Mpmp soit un écart correspondant à 1,7% (Figure 4.9). Le scénario dans lequel, en moyenne, les usines sont les plus performantes est le scénario optimal de référence. Dans ce scénario, les usines utilisent moins de m³ bruts pour produire un Mpmp de sciage comparativement aux autres scénarios. Le scénario manuel est celui pour lequel la moyenne des usines est la moins performante (Figure 4.9).

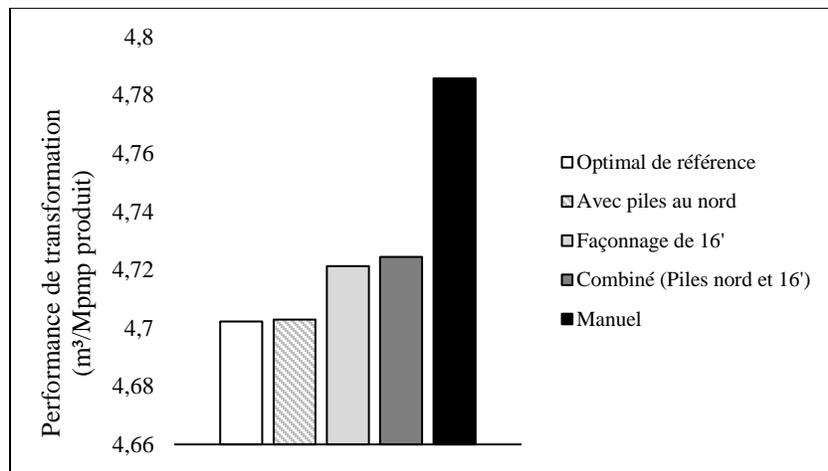


Figure 4.9 Moyenne pondérée des performances de transformation des usines pour chaque scénario

La Figure 4.10 présente les écarts entre les plans développés et le plan optimal de référence sur la proportion du transport par camions hors-normes utilisé. Le transport par camions hors-normes est le moyen de transport le plus utilisé dans 80% des scénarios. Le scénario qui utilise le plus ce moyen de transport est le scénario avec piles au nord, alors que celui qui l'utilise le moins correspond au scénario manuel dont le volume transporté par les camions hors-normes correspond à moins de 50% du transport total (Figure 4.10).

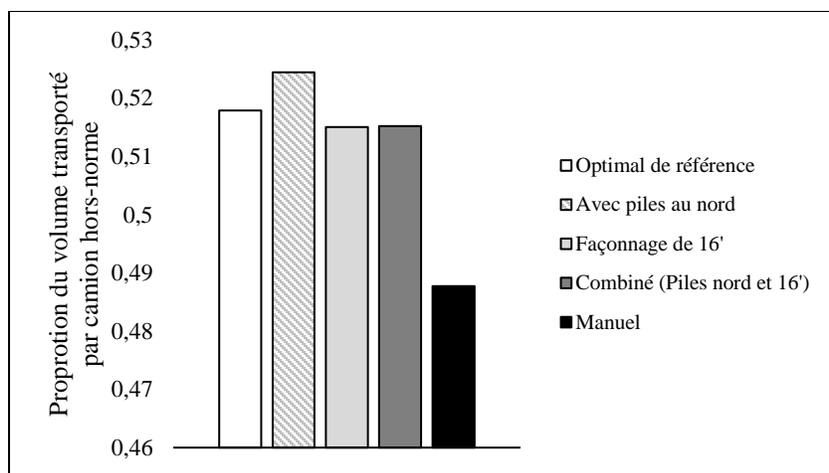


Figure 4.10 Proportion du bois transporté par les camions hors-normes pour chaque scénario.

4.2.2 Allocations des blocs de récolte aux usines

La Figure 4.11 présente l'allocation prévue dans chacun des scénarios pour l'approvisionnement de l'usine de transformation du réseau dont les résultats sont les plus variables d'un scénario à l'autre. Le portrait de l'allocation prévu pour les autres usines du réseau est disponible en annexe (ANNEXE H)

Dans la figure 4.11, l'axe des abscisses présente le nom des blocs, alors que la proportion du volume qui est envoyé à l'usine de transformation est représentée dans chaque colonne sous forme de pourcentage. L'allocation des cinq scénarios est présentée en différentes couleurs et les pourcentages correspondent à la proportion du volume provenant d'un bloc de récolte spécifique qui est alloué à l'usine. Ainsi, plusieurs scénarios peuvent avoir alloué 100% du volume d'un bloc à l'usine. Dans ce cas, il est inscrit 100% dans plusieurs sections de couleur d'une même colonne qui correspond aux différents scénarios.

Dans le scénario manuel, le volume de bois total transformé à l'usine provient de cinq blocs de récolte (Figure 4.11). Les cinq blocs, choisis par les planificateurs de l'entreprise n'ont pas été sélectionnés dans les scénarios optimaux. Dans tous les scénarios optimaux, une grande proportion du volume de bois alloué à l'usine provient

principalement des 17 mêmes blocs de récoltes (Figure 4.11). Au total, le volume envoyé à l'usine provient de 22 blocs de récolte dans le scénario optimal de référence, de 23 blocs de récolte dans le scénario avec piles au nord, de 25 blocs de récolte dans le scénario avec du façonnage en 16' seulement et dans le scénario combiné (piles nord et 16') (Figure 4.11).

Optimal de référence
 Avec piles au nord
 Façonnage de 16'
 Combiné (piles nord et 16')
 Manuel-

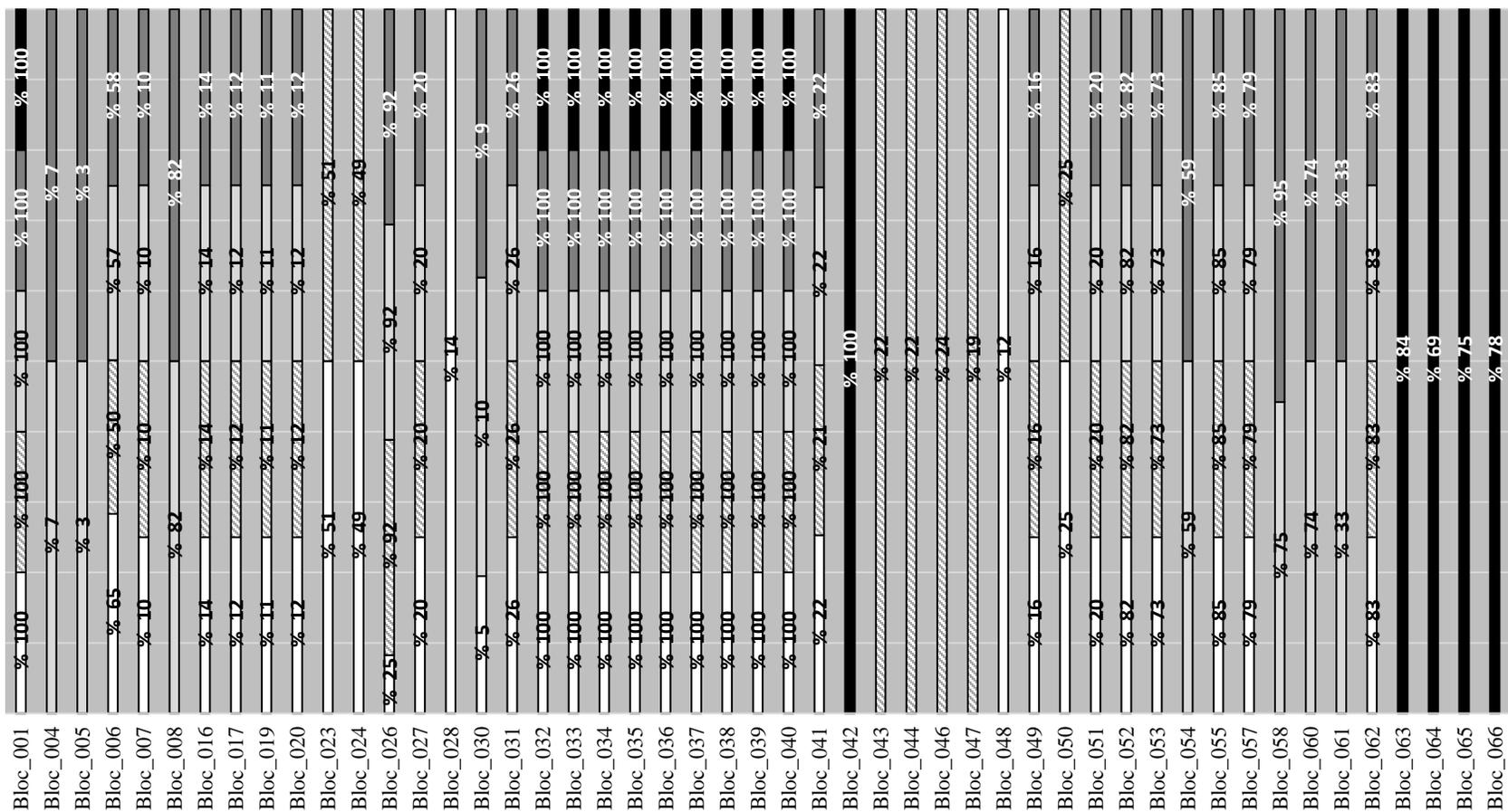


Figure 4.11 Exemple de l'allocation du bois provenant des blocs de récolte, à une des usines de transformation du réseau.

4.2.3 Discussion

L'analyse comparative des résultats présentés démontre qu'il y a peu de variation entre les différents scénarios de plans optimaux. En fait, le plan optimal de référence qui constitue un scénario de planification réaliste et adapté au cas actuel de l'entreprise est le scénario qui obtient les plus grands bénéfices. Ce résultat s'explique par le fait que ce scénario est celui ayant le moins de restrictions opérationnelles. Ce scénario permet le façonnage des tiges en billes de 16' et 18' et ne contraint pas à classer les billes de façon plus restrictive dans les secteurs nord. La différence entre la valeur nette générée dans ce scénario et celle générée dans le scénario avec piles au nord (plus faible de 0,05%) provient essentiellement d'une réduction dans les coûts de transport et de transformation, ce qui explique que le scénario avec piles au nord obtient une valeur nette légèrement plus faible, et ce, même s'il génère des revenus de sciage plus élevés.

Étant donné que le transport par camions hors-normes est généralement priorisé, car il permet de transporter un plus grand volume de bois par voyage, cela réduit habituellement les coûts de transport. Nous nous attendions à ce que les coûts de transports soient plus faibles dans le scénario avec piles au nord où la proportion du transport effectué par des camions hors-normes est plus élevée que dans le scénario optimal de référence. Étrangement, c'est le cas contraire qui a été observé. Il est possible d'expliquer ce résultat par la contrainte qui impose un classement différent des billes dans les piles des blocs récoltés plus au nord (séparation des grosses et des petites billes) qui affecte le choix des usines de transformation auxquelles sont alloués les volumes de bois. Ainsi, le bois provenant des blocs situés plus au nord a possiblement été affecté à des usines situées à de plus grandes distances de transport que dans le scénario optimal de référence.

Comme la fonction objective du modèle d'optimisation est de maximiser la valeur nette du réseau et que la principale source de revenus des usines composant le réseau provient du volume de sciage produit, le modèle tente de maximiser ce volume. Ainsi, comme les volumes récoltés sont les mêmes dans tous les scénarios et que la performance de transformation est établie en fonction de la quantité de volume brut (m^3) utilisé pour produire une unité de volume des produits du sciage (Mpmp), il est possible de déduire

qu'une allocation efficace des blocs de récolte aux usines permet de maximiser la performance de transformation. Cependant, même si la principale source de revenus provient des produits du sciage, la solution optimale tient compte de plusieurs autres facteurs, tels que les différents coûts et les capacités de transformation.

En comparant le plan manuel aux plans optimaux, on constate qu'il y a un écart important entre le volume produit (diminution variant de 1,28% à 1,75%), les coûts de transport (augmentation variant de 1,15% à 1,67%) et de transformation (augmentation de 2,70%), les revenus du sciage (diminution variant de 1,84% à 2,56%) et la valeur nette générée (diminution variant entre 15,69% et 19,26%). Dans le scénario manuel, même si les revenus provenant de la sciure et des copeaux procurent certains revenus à l'entreprise, ce sont des sous-produits qui sont vendus à perte. En fait, les coûts de production des copeaux et de la sciure produite sont plus importants que leurs valeurs de reventes. Pour cette raison, plus le volume de sous-produits générés augmente, plus la valeur nette tend à diminuer. Cependant, cette étude se limite aux usines de transformation du bois et n'inclut pas les profits générés par les papeteries qui reçoivent ces copeaux. Il est possible que pour une entreprise intégrée il vaille parfois la peine de pénaliser le sciage pour favoriser les usines de papiers.

La comparaison entre les allocations montre qu'il y a peu de différence entre les allocations faites par optimisation, alors que l'allocation fait manuellement est totalement différente. Il serait à propos d'avancer que ce constat provient du fait qu'une approche de planification par optimisation permet de prendre en compte plusieurs éléments simultanément, tels que les distances et les coûts de transport, les capacités de transformation des usines, les caractéristiques de la matière première, la valeur des produits finaux, les coûts de transformation, alors qu'un plan développé manuellement est limité à seulement quelques éléments. De plus, l'approche par optimisation permet l'analyse rapide de tous les scénarios possibles alors qu'une approche manuelle doit se limiter à seulement quelques scénarios choisis par le(s) planificateur(s).

En résumé, les résultats montrent qu'il y a peu de variation entre les plans optimaux et que le plan optimal de référence est le plan le plus profitable pour l'entreprise. De ce fait, il est possible de confirmer que les décisions d'affaires qui ont été prises par l'entreprise, soit de ne plus trier les piles au nord différemment des autres secteurs et de permettre la récolte et la transformation des billes de 18', ont vraisemblablement permis à l'entreprise d'augmenter ses bénéfices nets. Il est possible d'affirmer que l'approche par optimisation est robuste en constatant la faible variation, entre les scénarios optimaux, induite par des changements d'ordre décisionnel imputés au modèle d'optimisation testé dans le cadre de l'étude. Les résultats confirment que l'allocation des blocs de récolte a un impact important sur les bénéfices escomptés (Morneau-Pereira *et al.*, 2014). Finalement, à la lumière des résultats obtenus, il est possible de confirmer l'hypothèse qui veut que l'approche de planification par optimisation génère des bénéfices économiques plus importants que ceux générés selon l'approche de planification faite actuellement. Ainsi, on peut en conclure que l'approche de planification manuelle est moins avantageuse monétairement (-19,26%) qu'une planification faite par optimisation selon la méthode proposée.

4.3 Effet d'une variation dans les données d'inventaire forestier

Des ajustements sont souvent apportés à la planification en contexte industriel puisqu'elle est préalablement établie sur la base des connaissances disponibles au début du processus de planification. Le début de la saison des opérations permet de recueillir davantage de données et la bonification de la planification est alors possible. Les nouvelles données disponibles permettent aux planificateurs d'ajuster leurs plans de départ, ainsi la version bonifiée peut parfois devenir très différente du plan initialement élaboré. À titre d'exemple, il arrive que le bois rendu à l'usine ne corresponde pas à ce qui était prévu, en termes d'essence, de qualité ou de grosseur, et doit être acheminé vers une autre usine ou encore, un volume trop important de billes d'une certaine grosseur implique un dépassement de la capacité de production d'une ligne de sciage. Ainsi, dans l'objectif d'analyser l'effet d'une variation dans les informations utilisées lors de la planification, nous avons utilisé pour le développement de nos plans initiaux les mêmes données d'inventaire forestier que celles employées par les planificateurs en entreprise. Ensuite, nous avons demandé au personnel attiré à la planification au sein de l'entreprise partenaire de nous fournir les données provenant de la récolte des secteurs qui ont été mesurés au cours de la saison d'opération. Ces données nous ont permis d'ajuster les données d'inventaire utilisées dans le développement de nos plans initiaux. Finalement, nous avons remplacé les données d'inventaire initiales dans nos plans par celles ayant été ajustées avec les données « réelles », permettant ainsi l'analyse de l'effet de ce changement sur les plans élaborés au départ.

Dans cette section, la différence entre les données d'inventaire initiales et celles ayant été ajustées est présentée. Par la suite, les plans initiaux sont comparés à ceux dont les données ont été ajustées, qui sont ensuite comparés entre eux. Finalement, la section se termine avec une analyse des écarts entre les plans comparés.

4.3.1 Portrait des différences entre les données d'inventaire

La Figure 4.12 présente l'effet de la modification des données d'inventaire sur l'ensemble des blocs de récolte ((blocs ajustés + autres blocs)/tous les blocs de départ (non ajusté)), de même qu'uniquement sur les blocs de récolte dont l'inventaire a été ajusté (blocs ajustés/blocs ajustés avec inventaire de départ). Les planificateurs de l'entreprise partenaire sont parvenus à fournir le volume réel récolté de 18 blocs de récolte sur 66 (27%), ces volumes réels ont été mesurés pendant la saison d'opération. Ce sont ces volumes qui ont été utilisés pour ajuster nos données d'inventaire initiales. Les ajustements effectués aux données d'inventaire initiales entraînent une réduction de 8,18% du volume total et une réduction de 11,6% de la superficie totale des blocs de récolte (Figure 4.12). Par conséquent, les volumes ajustés des 18 blocs de récolte sont réduits de 22,44 % par rapport aux volumes prévus avant la récolte. La proportion des volumes d'épinette noire et de pin gris est augmentée par ces ajustements d'inventaire, alors que le volume de sapin diminue (Figure 4.12).

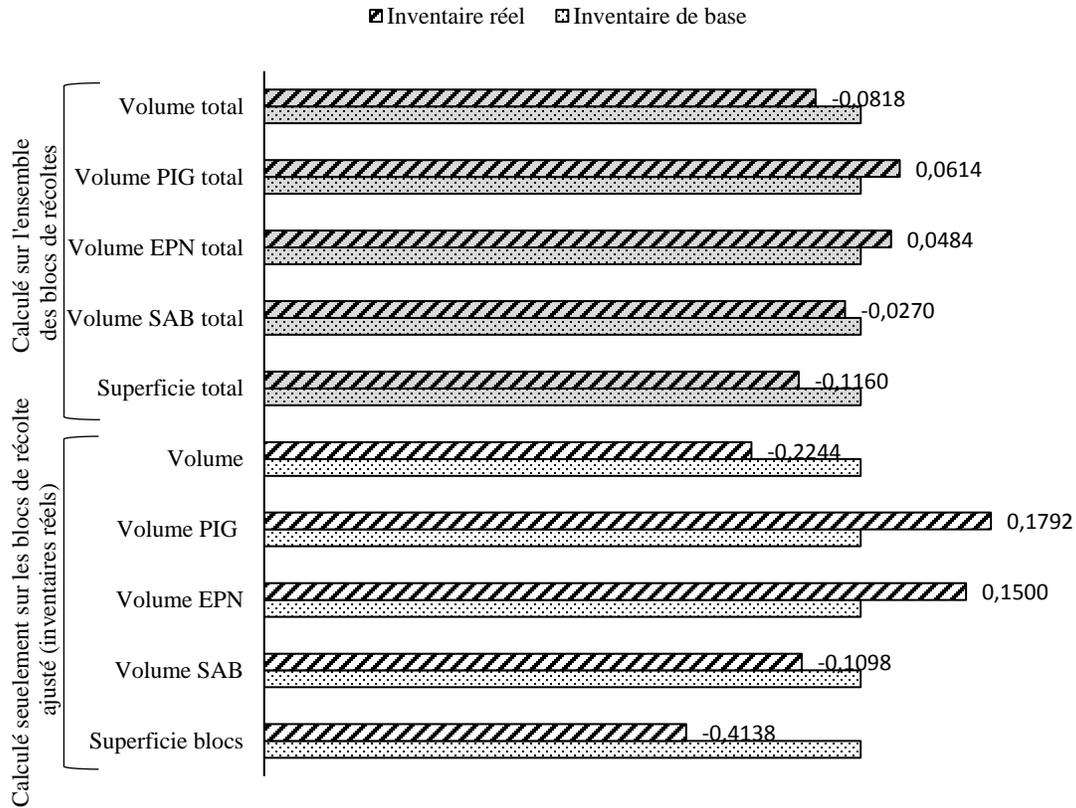


Figure 4.12 Différence entre les données d'inventaire ajustées et les données d'inventaire initiales

La Figure 4.13 présente les résultats de l'ajustement des données d'inventaire sur le plan manuel et sur le plan optimal de référence. L'effet de l'ajustement des inventaires forestiers entre les plans manuel et optimal est semblable par rapport aux plans initiaux (Figure 4.13). Les écarts entre le plan manuel avec inventaire ajusté et le plan manuel de départ sont moins grands que les écarts observés entre le plan optimal avec inventaire ajusté et le plan optimal de référence pour les indicateurs de la valeur nette (0,85%), des revenus du sciage (0,22%), des coûts de transport (0,51%) et du volume sciage produit (0,12%) (Figure 4.13).

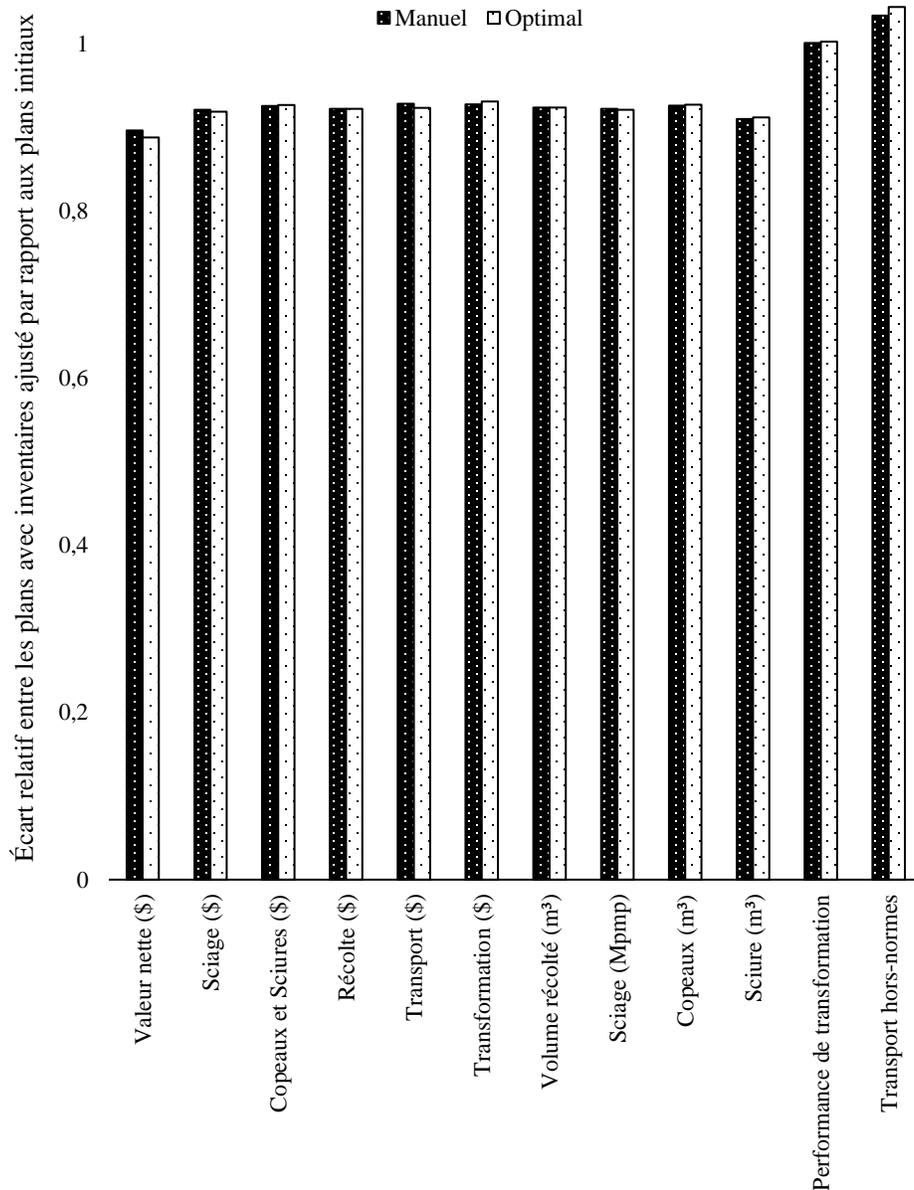


Figure 4.13 Effet d’une variation dans les données d’inventaire sur le plan manuel et le plan optimal de référence.

La Figure 4.14 présente l’écart entre le plan manuel avec inventaire ajusté et le plan optimal avec inventaire ajusté. En comparant les indicateurs, on remarque que les écarts de valeur les plus importants sont observés au niveau de la valeur nette, des revenus du sciage et du transport hors-norme avec respectivement 18,48%; 2,27% et 6,76% plus faible dans le plan manuel avec inventaire ajusté que dans le plan optimal avec inventaire ajusté (Figure 4.14). En ce qui a trait au plan optimal avec inventaire ajusté, la valeur des

indicateurs de coût de transport et de coût de transformation est plus faible de 2,24% et 2,31% par rapport à la valeur de ces mêmes indicateurs au plan manuel avec inventaire ajusté (Figure 4.14).

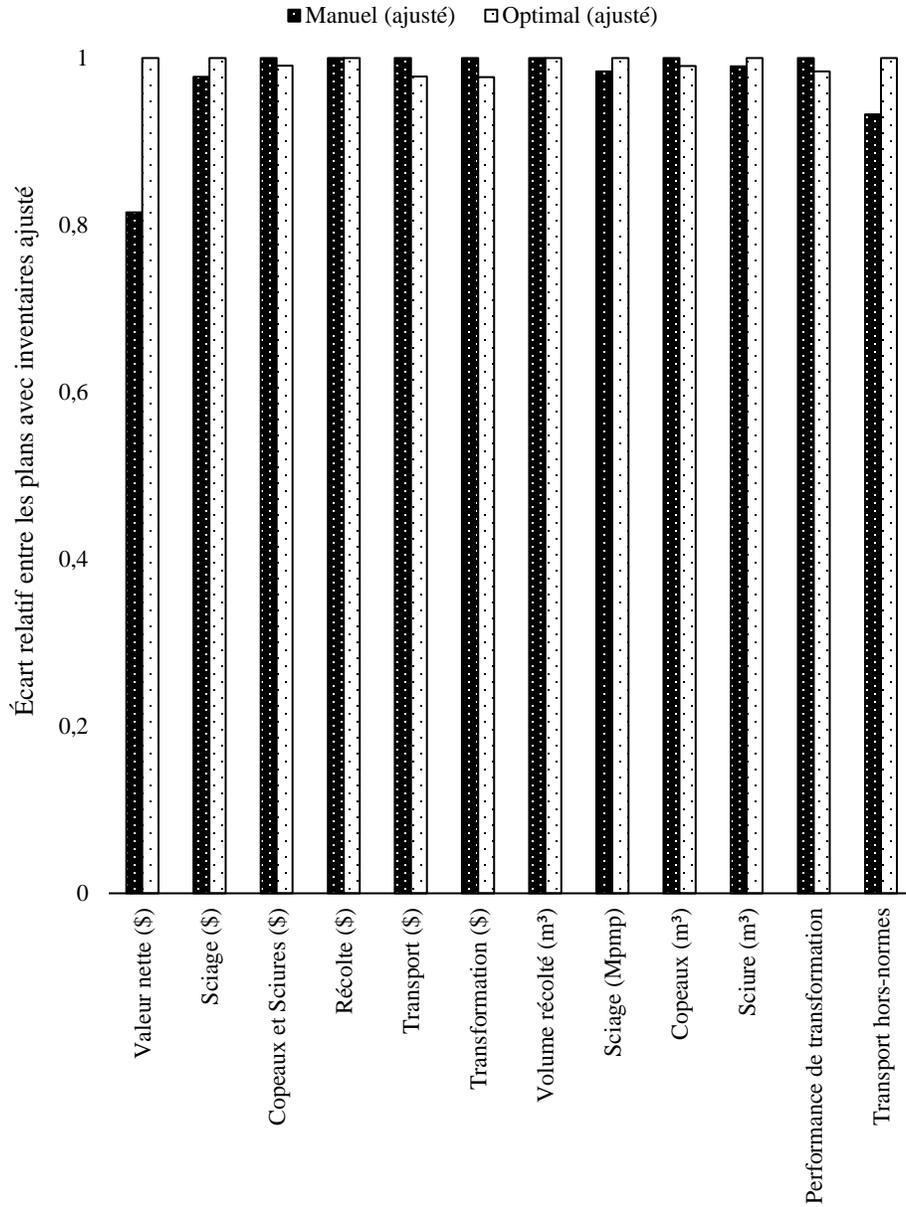


Figure 4.14 Écart entre le plan manuel avec inventaire ajusté et le plan optimal avec inventaire ajusté.

4.3.2 Discussion

Les différences ne semblent pas significatives même si le plan manuel montre une tendance à être moins affecté par une variation dans les données d'inventaires utilisées. Comme l'écart relatif entre la valeur nette générée dans le plan optimal avec inventaire ajusté par rapport au plan manuel avec inventaire ajusté est plus grand, on constate que l'écart relatif entre la valeur de la fonction objectif (valeur nette) est moins affecté par un changement dans les données d'inventaire initiales au niveau du plan manuel. Cette observation va dans le même sens qu'une de nos hypothèses de départ qui veut que le plan optimal soit affecté davantage par une variation dans les informations utilisées par rapport au plan réalisé manuellement. En fait, on pourrait supposer que les planificateurs sont conscients du biais potentiel lié aux inventaires et qu'en conséquence, les plans qu'ils développent manuellement tiennent compte de la réalité terrain. Si on suit cette logique, le plan manuel serait alors développé en tenant compte d'une réalité non considérée dans le plan optimal. Malgré cela, le plan manuel avec inventaire ajusté propose tout de même une planification moins efficace que le plan optimal avec inventaire ajusté tel qu'il est présenté dans la figure 4.14. En fait, les revenus générés par les produits du sciage sont plus élevés, les coûts de transport et de transformation sont plus faibles et conséquemment, la valeur nette générée est plus élevée que dans le plan manuel avec inventaire ajusté. Ainsi, l'effet de la variation engendrée par un ajustement dans les données d'inventaire n'est pas suffisant pour que la solution proposée par le plan manuel procure de meilleurs bénéfices que celle proposée par le plan optimal. Ce faisant, l'allocation optimale des bois basés sur les données d'inventaire initiales propose une meilleure solution lorsqu'on permet une variation d'environ 27% de ces données. Étant donné que l'étude s'attarde à une seule saison d'opération et vu la faible proportion des données ajustées, il n'est pas possible de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de départ H_3 que *le plan optimal développé est davantage affecté par une variation dans les informations utilisées pour le développement des plans que le plan fait manuellement en entreprise.*

Chapitre 5

5 Conclusion

En contexte actuel, la planification des approvisionnements en bois aux usines de produits forestiers est généralement effectuée selon une méthode basée sur l'expérience et l'intuition des planificateurs. C'est d'ailleurs ce que nous avons pu constater lors de nos travaux avec un partenaire industriel. La planification des interventions en forêt nécessite cependant la considération d'une multitude d'éléments tels que les coûts de récolte, de transport et de transformation, la valeur des produits finaux, la capacité des usines, les caractéristiques de la matière première qui ont été pris en compte dans notre étude. Sur la base de ces éléments, plusieurs décisions doivent être prises. Alors que l'utilisation de l'optimisation permettrait vraisemblablement d'aider les planificateurs à prendre de meilleures décisions, on s'est questionné sur les bénéfices qu'apporterait un système d'optimisation informatisé pour planifier les interventions forêt-usine et sur l'implantation d'un tel outil en entreprise. Ce questionnement est issu du fait que dans la littérature, plusieurs modèles prometteurs ont été proposés, mais aucun exemple concret de leur utilisation en entreprise n'a été recensé. Ainsi, reconnaissant que la complexité du problème et l'expertise nécessaire pour utiliser ces modèles devaient limiter leur application dans un contexte industriel, nous avons souhaité reproduire fidèlement le processus de planification d'une entreprise, tout en y intégrant un outil d'optimisation permettant d'améliorer le processus de planification actuellement en place dans l'entreprise ciblée. Ainsi, suite à notre étude il est possible d'affirmer, que l'implantation, en entreprise, d'une approche de planification par optimisation telle que proposée est possible et qu'elle permettrait de générer de meilleurs profits que la démarche actuellement utilisée.

Cette étude avait pour objectif principal d'analyser le potentiel de l'optimisation mathématique pour améliorer la planification des approvisionnements en bois aux usines de produits forestiers. À partir de cet objectif, nous avons établi trois objectifs secondaires

permettant de vérifier les hypothèses de départ, soient (H₁) l'implantation d'une approche de planification par optimisation en entreprise est possible, (H₂) l'approche de planification par optimisation génère des bénéfices économiques plus importants que l'approche de planification manuelle, (H₃) le plan optimal développé est influencé davantage par une variation dans les informations utilisées pour le développement des plans qu'un plan réalisé manuellement. Les objectifs secondaires consistaient donc à (i) évaluer le potentiel d'implantation de l'optimisation mathématique en entreprise (ii) estimer les bénéfices et avantages d'utiliser l'optimisation mathématique pour soutenir les décisions de planification dans un contexte industriel (iii) analyser l'effet d'une variation dans les informations utilisées pour la confection des plans. Pour ce faire, l'étude a été réalisée avec la collaboration d'une grande entreprise de produits forestiers possédant un réseau de cinq usines de transformation du bois, dispersées sur un vaste territoire.

5.1 Le potentiel d'implantation de l'optimisation de la planification en entreprise

Afin d'évaluer le potentiel d'implantation du processus d'optimisation de la planification développé, en contexte industriel réel, le processus de planification utilisé actuellement en entreprise et celui développé dans le cadre de cette étude ont été analysés. Les tâches relatives à chacune des méthodes de planification ont été décrites et comparées. Les coûts d'utilisation de chacune des approches ont été calculés, principalement sur la base du salaire associé aux différents postes des travailleurs attirés à la planification. Pour calculer ces coûts, le temps moyen nécessaire à la réalisation des tâches de planification a été comptabilisé. Les coûts supplémentaires associés à l'acquisition des logiciels nécessaires à l'adoption du processus de planification optimal ont également été considérés dans le calcul des coûts. Les exigences particulières à l'adoption du processus de planification optimisé, telles que les connaissances ou le niveau de formation requis, ont également été intégrées dans l'analyse.

Les résultats montrent qu'en adoptant le processus de planification optimal développé, des économies liées à l'élaboration de la planification seraient possibles dès la

deuxième année de mise en œuvre. Cependant, plusieurs exigences pour la mise en œuvre du processus de planification optimal en entreprise sont à considérer. Parmi ces exigences, on note l'acquisition de certains logiciels pour la création des données de base qui sont nécessaires à l'utilisation de LogiLab, soit FPInterface^{MD}, Optitek^{MD} ou un « solver » mathématique tel que CPLEX. Le niveau de formation pour utiliser ce processus est de type universitaire et cela nécessite un minimum de connaissances en optimisation mathématique et quelques connaissances en programmation informatique.

Finalement, le projet a permis de confirmer l'hypothèse qui veut que l'implantation d'une approche de planification par optimisation en entreprise soit possible. Cependant, l'adoption de cette méthode exige un minimum de formation du personnel et plusieurs coûts de départ liés à l'acquisition de logiciels. Par contre, il faut être conscient que l'adoption d'une telle approche en entreprise n'élimine pas complètement le travail fait actuellement par les planificateurs, mais il en sera réduit considérablement.

5.2 Les bénéfices de l'approche d'optimisation de la planification

Afin de pouvoir démontrer les bénéfices d'utiliser l'optimisation mathématique pour soutenir les décisions de planification, les résultats des plans faits manuellement et par optimisation ont été comparés. D'abord, le processus de planification qui est utilisé actuellement en entreprise a été analysé et le plan fait par l'entreprise selon cette méthode nous a été fourni. Cette analyse nous a permis de bien comprendre le processus de planification manuel pour adapter le modèle d'optimisation qui devait être utilisé dans le développement d'un plan optimal. Ainsi, parmi les modèles d'optimisation développés récemment, celui de Morneau-Pereira *et al.* (2014) fut sélectionné dû à son plus grand potentiel d'adaptation. Ensuite, le modèle fut adapté au contexte de l'entreprise partenaire. Le plan optimal développé selon l'approche de la planification optimisée a été comparé au plan réalisé manuellement par les responsables de la planification en entreprise.

Les résultats démontrent que le plan optimal procure de nombreux bénéfices par rapport au plan manuel, notamment une augmentation de la valeur nette de l'ordre de 19,26%. Cette augmentation serait principalement attribuable à une meilleure allocation des blocs de récolte aux usines de transformation. De plus, en optant pour l'approche de planification optimisée, il est possible d'analyser un grand nombre de scénarios très rapidement puisque l'optimisation prend généralement moins de 15 minutes à être réalisée. Également, les plans optimaux alternatifs développés étaient tous supérieurs au plan manuel et demeuraient assez près des résultats du plan optimisé. Ce résultat peut être interprété comme une indication que le plan généré par optimisation est relativement robuste.

À la lumière des résultats obtenus, il est possible de confirmer l'hypothèse que l'approche de planification par optimisation génère des bénéfices économiques plus importants que l'approche de planification manuelle. L'augmentation des profits escomptés par une allocation plus efficiente du bois aux usines et la réduction du temps de planification sont les principales raisons de l'augmentation des profits associés à ce type de planification. Par ailleurs, il y a plusieurs autres avantages liés à la planification optimisée, notamment la rapidité du développement des plans alternatifs et la réduction du temps consacré aux tâches de planification manuelle.

5.3 L'effet d'une variation dans les informations utilisées pour le développement des plans

Comme plusieurs études ont soulevé que l'imprécision des données d'inventaire forestier a un effet sur la planification, il était important de considérer cet élément dans le cadre de cette étude. Conséquemment, les effets de la variation des données d'inventaire sur le plan optimal de référence et sur le plan manuel ont été comparés. Ainsi, nous avons demandé au personnel attitré à la planification au sein de l'entreprise partenaire de fournir les données provenant de la récolte des secteurs mesurés au cours de la saison d'opération. Ainsi, l'équivalent de 27% des données d'inventaire réelles a été fourni. Ces données ont bonifié les données d'inventaire initialement utilisées dans le développement des plans.

Les données d'inventaire initiales ont donc été remplacées par les données ajustées, permettant ainsi d'analyser l'effet de ce changement sur les plans de départ.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences importantes induites par la connaissance d'une proportion de 27% des inventaires sur la confection des plans. La comparaison entre le plan manuel et le plan optimal de référence illustre que le plan manuel semble être moins affecté par une variation dans les informations utilisées que le plan optimal. Cette observation va dans le sens de notre hypothèse de départ qui veut que le plan optimal soit affecté davantage par une variation dans les informations utilisées que le plan réalisé manuellement. Malgré cela, le plan manuel avec données d'inventaire ajustées propose une solution moins intéressante que le plan optimal avec données d'inventaire ajustées. Les revenus générés par les produits du sciage sont plus élevés, les coûts de transport et de transformation sont plus faibles et conséquemment, la valeur nette générée est plus élevée dans le plan optimal avec données d'inventaire ajustées.

Finalement, l'effet de la variation engendré par un ajustement dans les données d'inventaire n'est pas suffisant pour que la solution proposée par le plan manuel procure de meilleurs bénéfices que la solution proposée par le plan optimal. Par ailleurs, étant donné que le projet est fait sur une seule saison d'opération et que seulement une faible proportion des données d'inventaires ont été ajustées, il n'est pas possible de confirmer l'hypothèse de départ. Cette dernière ne peut être ni infirmée ni confirmée. Afin de vérifier cette hypothèse, il serait intéressant, de répéter l'étude sur l'ensemble d'une saison d'opération étant terminé. Il serait ainsi possible d'utiliser à la fois le plan réel et les données du mesurage effectuées après la saison d'opération afin d'ajuster les inventaires forestiers avec l'ensemble des données réellement mesuré. De cette façon il serait possible de comparer un plan fait avec des données d'inventaires de départ (imprécise) à un plan ajusté avec des données d'inventaires réelles (précises) couvrant l'ensemble des blocs de récolte et non seulement une proportion de ceux-ci comme ce fut le cas dans notre étude.

5.4 Retombées possibles pour le secteur forestier

Les résultats de cette étude démontrent que l'implantation de l'optimisation mathématique pour procéder à la planification des approvisionnements en bois aux usines de produits forestiers dans un contexte industriel réel offre un grand potentiel. De plus, l'implantation est possible en optant pour le processus développé dans cette étude. L'utilisation de LogiLab a démontré de nombreux bénéfices comparativement à la planification réalisée manuellement. Les bénéfices proviennent principalement d'une allocation plus efficiente du bois issu des blocs de récolte aux usines de transformation. Des bénéfices plus élevés de 19,26% ont été observés. Le temps consacré à la planification serait réduit de moitié. L'analyse rapide de plusieurs scénarios simultanément devient possible. Cependant, la mise en œuvre du processus proposé requiert plusieurs exigences, telles que l'acquisition de logiciel spécifique comme FPInterface^{MD} ou une licence d'utilisation d'un « solver » mathématique comme CPLEX, des connaissances ou un minimum de formation dans l'optimisation mathématique et la programmation informatique, ce qui constitue des investissements de départ importants, mais dont le retour sur l'investissement pourrait être possible dès la deuxième année de mise en œuvre du processus. Pour ces raisons, nous croyons que l'implantation en entreprise est non seulement possible, mais qu'elle devrait être envisagée sérieusement par les industriels désirant améliorer la planification de leur approvisionnement, pour augmenter leurs bénéfices et se démarquer face à la concurrence. Par ailleurs, l'entreprise partenaire dans ce projet a manifesté son intérêt à utiliser la procédure développée pour planifier l'approvisionnement de leurs usines suite aux résultats obtenus. L'entreprise élabore actuellement la planification de la saison courante à l'aide de la méthode proposée.

Au niveau des limitations, cette étude a été contrainte à l'examen d'une seule saison d'opérations forestières. Il est donc possible que ces résultats varient d'une année à une autre. En fait, il est possible que les planificateurs en entreprise performant mieux certaines années, ce qui réduirait les écarts entre le plan optimal et le plan manuel. Également, malgré les efforts qui ont été déployés pour refléter le plus fidèlement possible le processus de planification en entreprise, il est possible que certains éléments aient échappés à notre analyse. Par ailleurs, comme ce projet s'attarde à la PRAN, soit la planification exécutée

pour une année d'intervention en forêt, il serait intéressant de répéter l'expérience sur une échelle plus opérationnelle ou en temps réel, et ce, afin d'évaluer le potentiel d'adaptation de la méthode de planification proposée aux changements qui pourraient survenir à très court terme. Il serait également intéressant de répéter l'expérience avec une plus grande quantité de données d'inventaire réel.

Références

- ARABI, M. (2013). An optimization and simulation framework for integrated tactical planning of wood harvesting operations and lumber production. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 68p.
- BARRÉ, P. et RIOUX, C. (2012). L'industrie des produits forestiers au Québec : la crise d'un modèle socio-productif. *Recherches sociographiques*, 53(3):645–669.
- BEAUDOIN, D., LABEL, L. et FRAYET, J.-M. (2007). Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Can. J. For. Res.*, 37:128–140.
- BETTINGER, P., BOSTON, K., SIRY, J. P. et GREBNER, D. L. (2010). *Forest management and planning -1st Edition*. Academic press. 360p.
- BUREAU DE MISE EN MARCHÉ DES BOIS (2016). [En ligne] Adresse URL : <https://bmmmb.gouv.qc.ca/publications-et-reglements/tarification-forestiere> (Page consultée le 1er novembre 2016).
- COUDÉ, V. (2010). Amélioration de la planification opérationnelle par une connaissance plus précise des stocks forestiers (produits spécifiques) et leur localisation en forêt. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 110p.
- D'AMOURS, S., RÖNNQVIST, M. et WEINTRAUB, A. (2008). Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 46(4):265–281.
- DIRECTION DU TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES (2013). *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers*. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, Publications du Québec. 34p.
- EYVINDSTON, K. et KANGAS, A. (2014). Stochastic goal programming in forest planning. *Can. J. For. Res.*, 44:1274–1280.
- FPINNOVATIONS (2011). *FPInterface – Manuel de l'utilisateur*. FPInnovations. Date de révision : 01/05/2012. 100p.
- FRANÇOIS, J. (2007). *Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance*, Thèse de doctorat. Université Bordeaux. France. 195p.

- GAUTAM, S., LEBEL, L., BEAUDOIN, D. et SIMARD, M. (2014). Modelling hierarchical planning process using a simulation-optimization system to anticipate the long-term impact of operational level silvicultural flexibility. *ScienceDirect, IFAC PapersOnLine*, 48(3):616–621.
- GHARBI, H. (2012). Planification réactive et robuste au sein d'une chaîne logistique. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. France 182p.
- HAX, A.C. et MEAL, H.C., (1975). Hierarchical integration of production planning and scheduling, In: *Studies in the Management Sciences*, M.A. Geisler éd., Logistics, North Holland - American Elsevier.
- HENRI, R. (2014). Cadre décisionnel pour l'analyse d'investissements et de stratégies de production dans l'industrie du bois d'œuvre. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.82p.
- JERBI, W. (2014). Intégration de l'optimisation et de la simulation pour l'élaboration et l'évaluation de politiques de production et de transport d'une chaîne logistique. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 74p.
- KARLSSON, J., RÖNNQVIST, M. et BERGSTRÖM, J. (2004). An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 34:1747–1754.
- LEBEL, L., LALIBERTÉ, F., SIMONEAU, L., MORIN, F. et GHARBI, C. (2015). Planification forêt efficiente (phase 1) : Rapport final. Consortium de recherche FOR@C, Groupe Initiative Mauricie (GIM):34–43.
- LEHOUX, N., MARIER, P., D'AMOUR, S., OUELLET, D. et BEAULIEU, J. (2012). Réseaux de créations de valeurs de la fibre canadienne. Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'entreprises, la Logistique et le Transport (CIRRELT), (2012-33):194p.
- LEMIEUX, L. et SIMONEAU, L. (2014). Logilab 1.1.13 — guide utilisateur. Consortium de recherche FOR@C, 21p.
- MARQUES, A. F., de SOUSA, J. P., RÖNNQVIST, M. et JAFE, R. (2014). Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(sup1):166–177.
- MESSIER, C., BERNIER, P. Y., LO, E. et COATES, D. (2001). Le développement des modèles de simulations en foresterie : En pleine expansion. *L'Aubelle*, 136: 10–13.

- MEYR, H., WAGNER, M. et ROHDE, J. (2008). Structure of advanced planning systems. In supply chain management and advanced planning. Springer Berlin Heidelberg: pp. 109–115.
- CONSEIL DU PATRONAT DU QUÉBEC (2015). Les ressources naturelles au Québec : Une source naturelle de prospérité – Étude sur la prospérité n°2. Conseil du patronat du Québec. Québec. 30p.
- MINISTÈRE DES FORÊTS DE LA FAUNE ET DES PARCS (2015). Stratégie d'aménagement durable des forêts. Gouvernement du Québec. 50p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013a). Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier - une gouvernance renouvelée. Gouvernement du Québec. 4p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013b). Le nouveau régime forestier : Garantie d'approvisionnement. Gouvernement du Québec. 2p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013c). Le nouveau régime forestier : Planification forestière. Gouvernement du Québec. 4p.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (2013d). Le nouveau régime forestier : Marché libre des bois des forêts publiques du Québec. Gouvernement du Québec. 2p.
- MORNEAU-PEREIRA, M., ARABI, M., OUHIMMOU, M., GAUDREAU, J. et NOURELFATH, M. (2014). An optimization and simulation framework for integrated tactical planning of wood harvesting operations, wood allocation and lumber production. MOSIM14, 10th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMlation.
- MOSCONI, E. P. (2014). L'apport d'une approche multidimensionnelle de gestion des connaissances à la performance décisionnelle des organisations. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec. 230p.
- NEHME, D (2015). How much does a commercial CPLEX license cost? David Nehme, Ph.D. Operations Research. The University of Texas at Austin (1995). [En ligne] Adresse URL : <https://www.quora.com/How-much-does-a-commercial-CPLEX-license-cost> (Page consultée le 20 mars 2017).
- ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC (2009). Manuel de foresterie, nouvelle édition entièrement revue et augmentée. Éditions Multi Mondes. Québec. 1574p.

- ORDRE DES INGÉNIEURS FORESTIERS DU QUÉBEC (2012). Enquête 2012 sur la rémunération des ingénieurs forestiers du Québec. Québec. 43p.
- PARADIS, G., LEBEL, L., D'AMOUR, S. et BOUCHARD, M. (2013). On the risk of systematic drift under incoherent hierarchical forest management planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(5), 480-492.
- PROVENCHER, J.-F. (2014). Orientation du nouveau régime forestier vers un aménagement forestier durable. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Québec. 94p.
- RÖNNQVIST, M. (2003). Optimization in forestry. *Math. Program. Ser., B* (97):267–284.
- SAVARD, M. (2011). Planification stratégique d'un réseau logistique : Cas d'une entreprise forestière au Québec et de ses activités d'approvisionnement. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 140p.
- SOMERS, F. (1996). Hybrid : Unifying centralised and distributed network management using intelligent agents. In *Network Operations and Management Symposium*, pages 34–43.
- TILOUCHE, S. (2014). Utilisation de la gestion des connaissances pour le développement d'un modèle d'optimisation de la planification des approvisionnements forestiers. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec. 55p.

ANNEXE A – Questions aux planificateurs

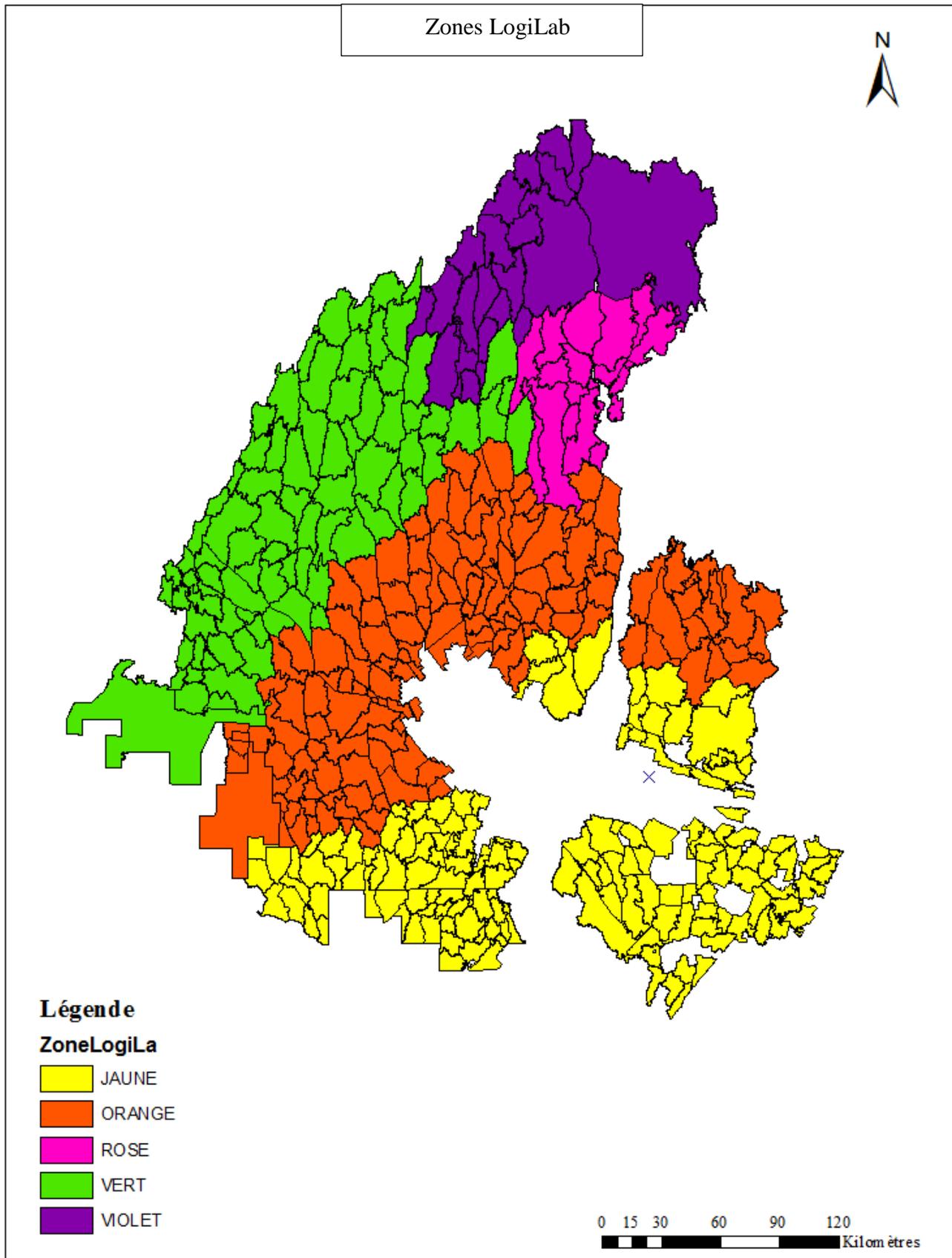
Questions posées au surintendant à la planification (SP)

1. Quelles sont les étapes du processus d'élaboration de la PRAN jusqu'à son dépôt final ?
2. Quelles sont les informations que vous utilisez lors du processus d'élaboration de la PRAN ?
3. Quels sont les intervenants internes qui participent à l'élaboration de la PRAN et quels sont leurs rôles ?
4. Quels logiciels informatisés (ou outil d'aide à la décision) utilisez-vous lors de vos tâches relatives à l'élaboration de la PRAN ?
5. Combien de temps consacrez-vous aux travaux relatifs à la PRAN dans une année ?
6. Quel est votre salaire ?

Questions posées aux intervenants participants à l'élaboration de la PRAN

1. Quel est votre rôle et quelles tâches spécifiques devez-vous effectuer lors du processus d'élaboration de la PRAN ?
2. Sur quelles informations et sur quels critères sont basées vos décisions ?
3. Quels logiciels informatisés (ou outil d'aide à la décision) utilisez-vous lors de vos tâches relatives à l'élaboration de la PRAN ?
4. Combien de temps consacrez-vous aux travaux relatifs à la PRAN dans une année ?
5. Quel est votre salaire ?

ANNEXE B – Carte des zones LogiLab



ANNEXE C – Modèle d'optimisation mathématique

Définitions

T	l'ensemble des périodes de temps
U	l'ensemble des unités d'affaires
K	l'ensemble des types de capacité (capacité machine, limite des stocks)
W	l'ensemble des procédés (machines, inventaires)
$W_{tu} \subset W$	l'ensemble des procédés pouvant être effectué à l'unité u à la période t
P	l'ensemble des produits
E	l'ensemble des liens existant entre les unités
$\delta_u^+ \subset E$	l'ensemble des liens arrivant à u
$\delta_u^- \subset E$	l'ensemble des liens partant de u

Table 12 – Ensembles

q_{ktu}	capacité de type $k \in K$ de l'unité u au temps t disponible
f_{etp}^l	flux minimal du produit p passant sur l'arc e à la période t
f_{etp}^u	flux maximal du produit p passant sur l'arc e à la période t
f_{et}^l	flux minimal de tous les produits passant sur l'arc e à la période t
f_{et}^u	flux maximal de tous les produits passant sur l'arc e à la période t
c_w	coût du procédé w
c_{etp}^f	coût de transport du produit p sur l'arc e si le transport commence à la période t
l_{etp}	délai de transport du produit p sur l'arc e si le transport commence à la période t
s_w	délai de production du produit p avec le procédé w
α_{pw}	quantité de produit p requis par le procédé w
γ_{pw}	quantité de produit p produit par le procédé w
λ_{kuw}	quantité d'unité de capacité de type $k \in K$ de l'usine u consommée par le procédé w
d_{tup}	demande de produit p à l'unité u à la période t
ρ_{tup}	valeur de vente du produit p à l'unité u à la période t

Table 13 – Constantes

Y_{tuw}	La quantité du procédé w effectué à l'unité u et se terminant à la période t
D_{tup}	La quantité de produit p vendue à l'unité u à la période t
F_{ept}	Le flux de produit p sur l'arc e partant de i à la période t et allant à j

Table 14 – Variables

$$\max \sum_{t \in T} \left(\sum_{u \in U} \left(\sum_{p \in P | d_{tup} > 0} \rho_{tup} D_{tup} - \sum_{w \in W_{tu}} c_w Y_{tuw} \right) - \sum_{e \in E} \left(\sum_{p \in P} c_{etp}^f F_{etp} \right) \right)$$

Sujet à :

$$\sum_{t_1 \in T} \left(\sum_{w \in W_{t_1 u} | t_1 + s_w = t} \gamma_{pw} Y_{t_1 u w} \right) + \sum_{e \in \delta_u^+} \left(\sum_{t_2 \in T | t_2 + l_{et_2 p} = t} F_{et_2 p} \right) - \sum_{w \in W_{tu}} \alpha_{pw} Y_{tuw} - \sum_{e \in \delta_u^-} F_{etp} - D_{tup} = 0 \quad \forall t \in T, u \in U, p \in P \quad (1)$$

$$D_{tup} \leq d_{tup} \quad \forall t \in T, u \in U, p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{w \in W_{tu}} \lambda_{kuw} Y_{tuw} \leq q_{ktu} \quad t \in T, u \in U, k \in K \quad (3)$$

$$f_{et}^l \leq \sum_{p \in P} F_{etp} \leq f_{et}^u \quad t \in T, e \in E \quad (4)$$

$$f_{etp}^l \leq F_{etp} \leq f_{etp}^u \quad e \in E, t \in T, p \in P \quad (5)$$

$$Y, D \geq 0 \quad (6)$$

Source : Lemieux et Simoneau (2014)

ANNEXE D – Valeur marchande des bois sur pied établie par le BMMB (1^{er} avril au 30 juin 2016)



TAUX UNITAIRES DE LA VALEUR MARCHANDE DES BOIS SUR PIED DES FORÊTS DU DOMAINE DE L'ÉTAT
PAR ZONE DE TARIFICATION POUR LA PÉRIODE DU 1^{er} AVRIL 2016 AU 30 JUIN 2016

TAUX UNITAIRES DE LA VALEUR MARCHANDE DES BOIS SUR PIED I
PAR ZONE DE TARIFICATION POUR LA PÉRIODE DU 1^{er} A

Essences	Qualité ^a	Valeur marchande (\$/m3) Zones										Valeur marchande (\$/m3) Zones							
		151	152	153	154	155	156	157	158	180	181	182	183	184	185	186	187	190	191
Sapin	B	15,21	15,16	20,18	17,44	18,21	17,17	14,78	15,87	15,09	10,37	14,29	12,77	8,69	12,73	11,24	8,65	5,13	4,93
	C, M	0,97	0,97	1,77	0,97	2,37	1,75	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	20,78	20,76	26,23	23,11	23,97	22,58	19,86	20,30	21,15	16,15	19,72	18,33	13,73	17,97	17,15	14,40	9,78	9,26
	C, M	3,03	2,76	6,77	4,87	8,25	7,88	3,15	5,20	4,02	2,64	4,48	2,80	2,08	3,91	3,15	2,30	2,15	1,89
Pin gris	B	17,16	17,43	22,53	19,68	20,15	18,81	16,31	17,20	16,90	12,92	16,65	15,12	11,74	15,53	10,21	11,52	7,47	7,53
	C, M	1,55	1,55	3,33	2,29	4,16	3,48	1,55	1,99	1,55	1,29	2,19	1,55	1,55	2,39	1,29	1,55	1,55	1,55
Pin blanc	G	24,85	24,85	24,02	23,12	20,33	20,00	20,71	19,84	18,92	16,53	17,90	17,31	14,92	14,50	16,70	15,44	14,50	14,77
	H	15,55	15,10	13,15	13,15	11,52	11,19	11,90	11,03	10,11	7,72	9,09	8,50	6,11	5,28	7,89	6,63	4,74	5,96
	I	9,84	8,21	6,69	6,09	2,53	2,15	2,48	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	40,49	40,49	40,49	40,49	38,44	38,07	38,09	37,54	36,19	32,03	34,43	33,40	29,24	28,54	32,33	30,14	28,52	28,98
	G	20,89	19,27	17,75	17,15	13,91	13,67	14,19	13,55	12,87	11,09	12,11	11,68	9,90	9,59	11,22	10,28	9,59	9,79
	H	14,47	12,84	11,32	10,72	7,38	7,13	7,66	7,02	6,33	4,56	5,58	5,14	3,39	3,39	4,69	3,75	3,39	3,39
	I	9,81	8,19	6,67	6,07	2,52	2,14	2,18	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	8,88	8,46	7,33	6,67	2,77	2,35	2,72	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	1,77	0,97	2,37	1,75	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	35,42	43,67	58,65	54,08	46,20	38,32	38,87	31,37	35,42	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	17,57	20,57	24,22	19,91	17,67	20,52	21,07	15,22	17,57	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22
	C	10,62	12,37	14,12	11,77	10,62	12,37	12,37	10,62	10,62	6,54	8,52	6,75	3,90	4,96	6,42	5,62	3,00	1,68
Bouleau jaune	A	31,29	38,39	50,99	47,04	40,24	34,64	34,74	27,69	31,29	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	15,84	18,44	21,59	17,54	15,84	18,39	19,34	13,84	15,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84
	C	9,84	11,84	13,39	10,84	9,84	11,50	11,84	9,84	9,15	5,53	7,20	5,71	3,03	3,98	5,43	4,84	2,25	1,42
Bouleau blanc	A	32,12	36,90	41,82	38,64	36,25	35,47	35,57	28,52	32,12	28,52	28,52	28,52	27,11	28,52	28,52	28,52	26,24	25,68
	B	8,44	8,47	11,17	8,98	7,23	8,97	10,12	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
	C	1,08	2,00	2,80	1,33	0,74	0,84	1,62	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	45,43	45,53	61,83	59,68	45,13	45,53	45,53	39,68	39,68	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	15,23	16,83	22,03	16,58	12,53	16,83	16,83	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53
	C	6,28	6,28	9,83	6,28	6,28	7,43	8,53	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	4,08	4,08	6,28	5,26	4,08	4,65
Autres feuillus	B	9,69	11,09	12,79	10,61	9,69	11,07	11,58	8,61	9,69	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61
	C	6,46	7,35	8,26	7,00	6,46	7,05	7,44	6,19	5,61	3,39	4,42	3,50	1,43	2,44	3,33	2,64	0,87	0,87
Hêtre	B,C	1,08	2,00	2,00	1,33	0,35	0,77	1,00	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	1,90	1,90	1,90	1,95	1,30	1,90	3,65	1,90	1,30	0,80	1,30	1,30	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	1,08	2,00	2,00	1,33	0,35	0,77	1,00	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

^a Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité résultant de l'évaluation de pièces de bois selon l'essence, le diamètre, la longueur et les imperfections observées sur les découpes et le tronçonnage.

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3)																	
		Zones																	
		192	193	194	195	240	241	242	243	244	245	246	247	250	251	252	253	254	255
Sapin	B	8,70	12,97	13,32	15,00	18,03	11,91	11,01	12,37	11,09	12,81	10,47	8,05	12,54	10,76	9,38	6,05	5,09	18,50
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	1,89	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	3,23
Épinettes	B	13,07	17,90	18,05	19,74	23,93	18,07	16,66	18,68	17,14	19,21	16,40	13,52	17,94	15,99	14,63	11,25	10,46	24,57
	C, M	1,98	2,71	4,08	3,46	11,36	5,15	2,98	4,14	1,98	2,13	1,90	1,89	4,12	3,27	2,10	1,89	1,89	11,27
Pin gris	B	10,82	14,78	15,27	14,37	20,90	15,85	14,67	16,27	14,13	16,29	14,23	10,77	13,55	10,94	12,35	9,43	9,10	22,35
	C, M	1,55	1,55	2,19	1,55	3,36	3,35	2,24	2,50	1,55	1,55	1,55	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	5,81
Pin blanc	G	14,90	16,26	16,62	18,48	19,95	22,60	24,45	22,73	18,59	19,12	17,43	15,82	17,16	14,50	14,50	12,42	11,63	19,96
	H	6,09	7,45	7,81	9,67	10,95	13,15	13,15	13,15	9,78	10,31	8,62	7,01	8,35	4,65	3,70	3,40	3,40	11,14
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	3,92	6,79	6,27	5,94	2,15	2,32	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	3,81
Pin rouge	F	29,21	31,57	32,19	35,43	37,99	42,59	45,19	41,94	35,62	36,55	33,60	30,81	33,13	28,52	28,52	24,90	23,53	37,99
	G	9,89	10,89	11,16	12,54	14,99	17,85	17,33	17,00	13,02	13,39	12,06	10,57	11,85	9,59	9,59	8,05	8,04	14,88
	H	3,39	4,36	4,63	6,01	8,56	11,43	10,90	10,57	6,59	6,96	5,63	4,03	5,42	3,39	3,39	3,39	3,39	8,45
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	3,91	6,77	6,25	5,92	2,14	2,31	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	3,80
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	4,29	7,04	6,86	6,51	2,35	2,54	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	4,17
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	0,97	1,89	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	3,23
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	39,37
	B	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	17,57
	C	3,08	6,11	6,20	8,38	10,62	10,62	7,28	10,62	9,06	8,91	6,95	3,34	7,40	2,45	1,68	1,68	1,68	10,62
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	35,39
	B	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	15,84
	C	2,60	5,17	5,24	7,08	9,84	9,66	6,16	9,39	7,66	7,54	5,88	2,82	6,26	2,02	1,42	1,42	1,42	9,84
Bouleau blanc	A	27,45	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52	27,75	28,52	26,84	26,06	23,52	23,52	36,16
	B	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	5,33	4,35	8,97
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	1,16
Érable à sucre	A	30,18	30,18	31,43	39,68	35,03	39,68	39,68	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53
	C	4,10	4,08	4,67	6,28	6,28	6,28	4,08	6,28	6,28	5,33	4,08	4,65	4,08	4,65	4,65	1,58	1,58	6,28
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	9,69
	C	1,60	3,17	3,22	4,35	6,46	5,93	3,78	5,76	4,70	4,62	3,61	1,73	3,84	1,24	0,87	0,87	0,87	6,46
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	0,80	1,20	1,30	1,30	1,30	1,30	1,10	1,30	1,30	1,30	1,30	0,80	1,30	0,80	0,80	0,80	0,80	1,30
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité re

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3) Zones								Valeur marchande (\$/m3) Zones									
		256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
Sapin	B	15,77	14,15	14,29	9,79	4,48	16,72	13,71	13,36	11,35	8,85	16,97	14,66	13,26	12,30	10,95	9,80	7,82	12,87
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	2,91	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	21,92	20,06	20,46	15,54	10,62	22,26	19,35	19,05	16,80	13,86	22,38	19,95	18,60	17,71	16,43	15,20	13,34	18,23
	C, M	8,34	7,14	7,32	1,89	1,89	9,94	6,39	5,69	4,59	2,49	12,95	9,15	6,53	6,08	3,68	3,04	1,89	6,27
Pin gris	B	19,09	16,95	16,51	11,84	6,94	19,42	16,71	16,39	13,53	10,94	18,91	16,17	14,49	13,82	12,79	11,67	10,38	15,76
	C, M	2,61	1,55	1,74	1,29	1,29	2,66	1,29	1,29	1,29	1,29	5,21	1,50	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Pin blanc	G	18,05	14,50	14,50	14,35	8,07	17,92	14,50	14,50	14,45	12,11	16,26	15,92	14,33	13,57	14,50	10,86	10,44	13,60
	H	9,24	4,50	3,40	3,40	3,40	9,11	4,63	3,40	3,40	3,40	7,45	7,11	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,77
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	34,68	28,94	28,84	28,26	16,52	34,46	28,94	28,54	28,43	24,36	31,58	30,98	28,64	26,98	28,52	22,22	21,46	27,62
	G	12,70	10,91	9,59	9,48	8,04	13,03	9,59	9,59	9,55	8,04	13,17	13,02	9,46	8,90	9,59	8,04	8,04	10,19
	H	6,28	4,49	3,39	3,39	3,39	6,60	3,39	3,39	3,39	3,39	6,74	6,59	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,76
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	2,35	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22
	C	9,26	5,77	4,57	1,68	1,68	10,62	6,61	4,82	3,15	1,68	9,20	4,71	2,73	1,68	1,68	1,68	1,68	2,60
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84
	C	7,83	4,88	3,86	1,42	1,42	9,19	5,59	4,08	2,66	1,42	7,78	3,98	2,31	1,42	1,42	1,42	1,42	2,20
Bouleau blanc	A	28,52	28,52	28,52	25,23	23,17	28,52	28,52	28,52	27,68	25,32	28,52	28,52	28,15	26,89	26,88	24,17	23,52	28,04
	B	6,62	6,62	6,62	6,62	3,37	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	5,50	4,97	6,62
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	12,53	12,53	12,53	12,53	10,52	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	10,34	9,69	11,88
	C	6,28	4,08	4,08	4,65	1,58	6,28	4,08	4,08	4,65	4,02	4,08	4,65	4,65	4,65	4,65	2,84	2,09	4,65
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61
	C	4,81	2,99	2,37	0,87	0,87	5,64	3,43	2,50	1,63	0,87	4,77	2,44	1,42	0,87	0,87	0,87	0,87	1,35
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	1,30	0,92	0,80	0,80	0,80	1,30	0,81	0,80	0,80	0,80	1,30	0,93	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité re

Essences	Qualité ^a	Valeur marchande (\$/m ³)																	
		Zones																	
		274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291
Sapin	B	9,87	9,96	15,61	9,48	10,61	9,78	5,81	3,20	6,81	5,31	4,56	6,76	10,59	4,83	7,40	8,95	12,20	10,38
	C, M	0,97	0,97	3,47	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	14,78	14,86	20,71	14,28	15,37	15,11	10,94	7,14	11,04	9,49	9,36	11,77	16,00	10,25	12,85	14,65	17,96	15,87
	C, M	4,12	5,30	14,98	5,21	6,30	3,36	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	7,36	1,89	2,04	5,17	9,29	7,06
Pin gris	B	11,82	12,10	17,96	10,29	11,65	11,48	7,02	3,18	5,96	4,86	5,07	7,25	11,79	6,16	9,31	11,01	14,08	12,50
	C, M	1,29	1,29	6,86	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Pin blanc	G	12,96	11,34	14,50	11,88	11,75	10,93	8,15	8,07	9,66	9,52	9,61	10,02	14,43	10,60	11,15	13,98	14,50	13,95
	H	3,46	3,40	4,74	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	26,52	23,55	28,74	24,09	23,96	22,44	17,49	16,62	20,14	19,86	20,02	20,76	28,52	21,91	22,92	27,84	28,69	27,83
	G	9,87	8,04	11,15	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	9,54	8,04	8,04	9,20	9,59	9,27
	H	3,45	3,39	4,72	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	2,35	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	13,80	11,73	15,22	14,03	13,78	15,22	15,22	11,43	15,22	15,22	15,22	15,22
	C	2,64	2,48	2,12	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	12,05	9,98	13,75	12,45	11,89	13,37	13,84	10,21	13,58	13,84	13,84	13,84
	C	2,23	2,10	1,79	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Bouleau blanc	A	28,12	27,72	27,60	23,54	25,39	24,13	20,26	18,57	22,07	20,18	19,94	21,48	25,62	19,09	21,46	24,28	26,83	25,28
	B	6,62	6,62	6,62	4,31	5,83	4,97	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	5,86	2,90	2,90	3,96	6,59	5,00
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	12,25	12,53	12,53	9,09	10,86	9,61	10,90	10,90	9,57	10,90	10,90	10,24	10,77	10,90	10,61	9,02	11,49	9,93
	C	4,65	4,65	4,65	2,20	4,08	2,80	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	4,27	1,58	1,58	2,94	4,65	3,95
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	7,39	6,12	8,43	7,68	7,29	8,20	8,61	6,66	8,47	8,61	8,61	8,61
	C	1,37	1,29	1,10	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

^aLes lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité re

Essences	Qualité*	e (\$/m3)					Valeur marchande (\$/m3)													
		292	350	351	352	353	Zones													
		354	355	356	357	450	451	452	453	454	455	456	457	458						
Sapin	B	9,37	17,44	19,65	21,39	14,04	13,53	12,46	9,44	6,87	14,30	15,15	18,27	17,02	14,43	455	456	457	458	
	C, M	0,97	3,52	6,75	2,99	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	1,47	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	14,84	23,59	25,66	28,71	21,24	19,68	18,23	15,18	12,98	22,41	22,24	26,63	24,83	22,00	18,93	21,55	22,12	18,31	
	C, M	4,25	11,72	15,17	10,35	4,03	3,74	7,27	1,99	1,89	3,56	2,39	8,15	3,92	2,57	3,79	5,45	6,78	2,39	
Pin gris	B	12,04	20,19	20,56	22,63	16,41	15,37	15,05	12,73	12,27	19,64	19,92	23,90	22,45	19,60	17,40	19,81	20,84	16,53	
	C, M	1,29	7,42	8,16	3,84	1,55	1,55	3,83	1,55	1,55	1,29	1,29	4,57	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Pin blanc	G	13,22	26,75	27,28	40,30	41,40	35,55	23,58	22,06	20,23	23,88	27,85	31,05	38,40	30,85	21,50	30,40	22,18	21,07	
	H	3,40	16,34	18,21	17,15	15,63	14,59	14,77	13,15	11,42	15,07	14,22	15,55	14,68	13,15	10,20	13,80	13,15	12,69	
	I	2,15	11,67	13,54	9,70	8,42	6,60	5,49	4,48	3,61	8,30	7,60	9,68	7,95	5,97	3,14	6,92	7,61	8,03	
Pin rouge	F	26,97	46,09	46,09	51,19	50,49	49,19	42,39	40,09	38,47	44,82	50,84	50,69	49,29	48,04	40,68	50,64	41,85	39,92	
	G	9,21	22,72	24,59	28,72	29,54	25,20	16,56	15,55	14,68	19,36	19,49	21,86	27,31	21,71	14,78	21,38	18,67	19,08	
	H	3,39	16,29	18,16	14,33	13,05	11,23	10,13	9,12	8,25	12,93	12,23	14,31	12,58	10,61	7,79	11,55	12,25	12,66	
	I	2,14	11,64	13,51	9,67	8,40	6,58	5,48	4,47	3,60	8,28	7,58	9,65	7,93	5,95	3,14	6,90	7,59	8,00	
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	9,08	9,34	8,69	7,93	7,23	6,02	4,91	3,95	7,65	7,23	8,31	7,46	6,54	3,44	7,04	6,88	6,47	
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	3,52	6,75	2,99	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	1,47	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	
Chênes, cerisier	A	31,37	60,22	67,82	78,87	44,47	63,28	31,37	31,37	31,37	55,93	50,72	76,67	70,29	59,23	31,37	63,17	35,42	31,37	
	B	15,22	27,02	29,32	30,97	20,03	23,27	15,22	15,22	15,22	22,40	22,77	30,16	25,76	21,77	15,22	25,36	17,57	15,22	
	C	1,68	12,37	12,37	18,49	10,62	12,52	9,70	8,47	8,08	11,07	10,62	17,92	11,77	10,62	9,66	12,52	11,02	10,62	
Bouleau jaune	A	27,69	53,54	59,24	73,26	38,99	54,99	27,69	27,69	27,69	48,64	44,39	71,49	61,04	51,49	27,69	54,89	31,29	27,69	
	B	13,84	23,99	25,99	27,09	17,64	20,44	13,84	13,84	13,84	19,69	20,19	26,39	22,59	19,14	13,84	22,24	15,84	13,84	
	C	1,42	11,84	11,84	15,63	9,84	11,14	8,20	7,16	6,83	10,24	9,84	15,84	10,84	9,84	8,17	11,94	10,19	9,84	
Bouleau blanc	A	25,73	44,37	50,07	62,97	37,89	45,82	28,52	28,52	28,52	40,31	38,86	62,32	51,87	42,32	28,52	45,72	32,12	28,52	
	B	4,39	11,17	13,97	16,97	8,88	10,07	6,62	6,62	6,62	11,42	11,87	13,92	10,22	8,28	6,62	12,07	8,62	6,69	
	C	0,74	2,38	4,35	5,12	1,08	0,79	0,74	0,74	0,74	2,38	1,80	3,46	2,43	1,72	0,74	3,17	1,12	0,74	
Érable à sucre	A	30,18	56,93	70,58	74,88	48,23	67,78	37,73	30,18	30,18	58,23	63,53	73,28	62,78	39,68	39,68	45,53	39,68	39,68	
	B	9,04	20,78	25,03	31,33	17,28	22,58	13,78	12,53	12,53	19,18	22,48	27,98	19,98	14,33	12,53	16,83	12,53	12,53	
	C	4,37	10,23	10,63	10,68	6,28	7,43	4,40	4,66	4,25	6,28	6,28	10,68	6,28	6,28	6,21	7,43	6,28	6,28	
Autres feuillus	B	8,61	14,08	15,16	15,76	10,66	12,17	8,61	8,61	8,61	11,33	11,58	14,93	12,88	11,03	8,61	12,68	9,69	8,61	
	C	0,87	7,53	7,53	9,59	6,46	6,84	5,03	4,40	4,19	6,67	6,46	9,72	7,00	6,46	5,01	7,59	6,64	6,46	
Hêtre	B,C	0,35	1,68	2,00	2,00	1,08	0,35	0,35	0,35	0,35	1,95	1,80	2,00	2,00	1,72	0,35	2,00	1,01	0,35	
Peupliers	B	0,80	1,30	1,30	2,00	1,30	1,30	0,88	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	1,68	2,00	2,00	1,08	0,35	0,35	0,35	0,35	1,95	1,80	2,00	2,00	1,72	0,35	2,00	1,01	0,35	

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité ré

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3) Zones										Valeur marchande (\$/m3) Zones									
		459	460	461	551	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	750	751	
Sapin	B	10,86	10,17	11,61	20,44	17,06	18,06	14,96	13,96	14,62	15,20	14,96	11,28	10,53	7,54	9,39	11,93	15,74	16,24		
	C, M	0,97	0,97	0,97	4,39	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97		
Épinettes	B	16,81	15,77	17,08	26,66	24,49	25,29	20,98	20,09	20,44	21,43	20,70	16,97	16,51	13,45	15,12	19,18	22,96	23,38		
	C, M	5,11	1,89	1,89	9,68	5,77	5,38	7,14	3,62	4,89	2,39	2,71	1,89	3,01	1,89	1,91	2,43	3,18	2,60		
Pin gris	B	15,14	13,55	14,13	22,06	18,97	20,35	17,35	17,59	17,40	19,53	18,99	15,16	14,64	12,43	14,04	15,16	18,41	19,39		
	C, M	1,29	1,29	1,29	5,32	1,81	2,17	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,55	1,55		
Pin blanc	G	19,40	17,05	17,02	28,10	49,50	37,05	30,35	23,21	23,55	49,00	26,50	37,40	29,85	21,03	36,10	41,90	49,55	49,30		
	H	10,58	7,94	8,21	20,25	17,75	16,11	14,57	14,40	14,74	16,85	15,25	15,31	13,15	12,22	13,15	16,46	19,20	18,84		
	I	4,22	2,15	2,15	13,87	11,22	11,45	9,39	9,25	10,01	10,44	9,15	8,43	6,89	4,90	6,87	9,68	10,76	10,28		
Pin rouge	F	37,02	32,95	32,89	46,09	54,49	53,59	53,64	43,65	44,24	53,54	49,37	50,89	46,79	39,87	48,54	53,14	54,49	54,79		
	G	15,29	12,44	12,74	24,91	35,54	22,52	21,34	20,30	21,06	35,17	20,21	26,57	20,97	15,96	25,61	29,91	35,58	35,40		
	H	8,86	6,01	6,32	18,48	15,84	16,06	14,02	13,88	14,63	15,06	13,78	13,06	11,52	9,54	11,51	14,30	15,38	14,90		
	I	4,21	2,14	2,14	13,83	11,19	11,41	9,37	9,22	9,98	10,41	9,13	8,41	6,87	4,88	6,85	9,65	10,73	10,25		
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	4,63	2,35	2,35	10,22	8,99	8,54	7,40	7,32	7,49	8,53	7,74	7,77	6,93	5,37	7,29	8,34	9,70	9,52		
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	4,39	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97		
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	79,12	81,92	79,03	48,57	35,42	35,52	61,25	31,37	43,89	31,37	31,37	42,79	81,52	85,91	85,34		
	B	15,22	15,22	15,22	31,67	29,99	29,18	22,27	17,57	17,57	24,32	15,62	18,35	15,22	15,22	15,80	29,87	31,55	31,26		
	C	7,88	4,32	5,22	17,17	18,60	18,39	12,37	10,62	10,62	12,37	10,62	10,62	9,13	10,62	14,32	16,07	17,89	17,89		
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	73,64	71,09	68,59	42,39	31,29	31,29	53,24	27,69	38,24	27,69	27,69	37,29	70,74	72,64	72,75		
	B	13,84	13,84	13,84	27,84	26,24	25,54	19,89	15,84	15,84	21,34	14,09	16,19	13,84	13,84	13,99	26,14	27,59	27,34		
	C	6,67	3,65	4,42	15,99	15,72	15,55	11,84	9,84	9,84	11,84	9,84	9,84	9,73	7,72	9,84	13,04	14,54	15,13		
Bouleau blanc	A	28,52	28,50	28,52	64,47	61,92	59,42	38,22	32,12	32,12	44,07	28,52	37,60	28,52	28,52	35,32	61,57	65,62	64,87		
	B	6,62	6,62	6,62	17,42	17,22	16,92	14,27	7,90	8,08	10,87	9,09	8,58	6,62	6,62	6,62	13,82	13,57	17,02		
	C	0,74	0,74	0,74	4,64	4,60	4,97	1,82	0,74	1,00	2,22	1,00	1,00	0,74	0,74	0,74	3,16	4,09	4,16		
Érable à sucre	A	36,38	30,18	30,18	85,48	83,73	71,70	45,53	39,68	39,68	71,93	41,03	46,48	39,68	38,03	41,23	71,07	80,33	86,48		
	B	12,53	12,53	12,53	29,03	28,98	25,48	16,83	12,53	12,53	24,88	14,78	16,68	12,53	12,53	12,53	22,63	27,78	30,43		
	C	4,08	4,65	4,65	12,73	13,83	10,23	7,43	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	5,71	6,28	7,43	9,53	14,48		
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	16,16	15,28	14,92	11,87	9,69	9,69	12,23	8,75	9,78	8,61	8,61	8,69	14,78	15,58	15,48		
	C	4,09	2,24	2,71	9,77	9,65	9,54	7,53	6,46	6,46	7,53	6,46	6,46	5,97	4,74	6,35	8,18	8,99	9,28		
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	2,00	2,00	2,00	1,00	0,73	1,00	2,00	1,00	0,91	0,35	0,35	1,56	2,00	3,97	3,97		
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	1,90	1,90	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	0,80	1,30	1,30	1,90	1,30		
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	2,00	2,00	2,00	1,00	0,73	1,00	2,00	1,00	0,91	0,35	0,35	1,56	2,00	3,97	3,97		

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité re

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3) Zones														Valeur			
		751	752	753	754	755	756	757	758	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859
Sapin	B	9,30	2,40	2,40	6,99	10,88	5,49	5,15	3,91	2,58	2,40	2,40	3,30	2,59	8,35	4,08	9,87	12,12	17,50
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	6,22
Épinettes	B	16,05	10,23	10,01	15,55	18,91	13,05	11,74	10,16	8,66	7,24	10,84	10,18	15,85	11,34	16,45	18,33	23,89	
	C, M	2,01	2,31	2,32	2,44	2,36	1,99	1,89	1,89	2,12	2,04	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	2,23	5,31	14,25
Pin gris	B	15,55	7,70	7,49	12,51	19,60	12,79	10,25	8,12	8,43	6,16	5,71	9,27	9,02	14,49	8,28	14,24	16,32	21,17
	C, M	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,55	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	6,41
Pin blanc	G	47,00	42,90	39,80	30,90	42,75	31,80	23,50	20,72	33,00	32,20	26,00	22,95	26,00	24,90	24,90	22,60	24,20	24,90
	H	17,75	14,94	13,03	16,12	17,80	13,56	13,42	11,91	10,44	10,75	8,91	7,73	7,89	8,27	6,25	8,17	8,59	8,25
	I	8,34	5,52	3,62	6,81	9,91	5,01	4,96	3,54	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	53,99	52,94	50,89	51,64	51,49	47,74	44,15	39,33	50,94	51,04	48,50	43,20	48,50	46,59	43,84	42,59	43,84	42,29
	G	33,69	30,65	28,35	21,75	30,54	22,42	16,26	14,61	23,31	22,72	18,12	15,86	18,12	17,30	17,30	15,60	16,78	17,30
	H	12,42	9,91	8,50	11,44	14,54	9,65	9,60	8,18	6,58	6,81	5,44	4,57	4,69	4,97	3,47	4,89	5,21	4,95
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	8,98	2,40	2,40	6,99	9,00	5,49	5,15	3,87	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
	C	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	2,35
Chênes, cerisier	A	52,40	38,50	31,37	31,78	55,00	31,37	31,37	31,37	35,55	36,13	31,37	31,37	51,30	40,01	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	19,28	15,22	15,22	15,22	20,26	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	18,87	15,42	15,22	15,22	15,22	15,22
	C	10,62	8,45	8,16	10,62	10,62	10,62	9,07	6,57	1,68	2,77	3,55	4,14	1,92	3,82	1,68	4,25	5,12	4,28
Bouleau jaune	A	45,59	33,59	27,69	27,79	47,84	27,69	27,69	27,69	31,04	31,54	27,69	27,69	44,64	34,89	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	16,99	13,84	13,84	13,84	17,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	16,64	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84
	C	9,84	7,14	6,90	9,84	9,84	9,19	7,67	5,56	1,42	2,34	3,00	3,50	1,62	3,23	1,42	3,59	4,33	3,62
Bouleau blanc	A	36,95	32,10	28,52	28,62	39,09	28,52	28,52	28,52	26,87	27,37	27,93	28,43	35,47	28,69	25,72	28,47	28,52	28,47
	B	6,87	6,62	6,62	6,62	9,04	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,92	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	2,00	0,74	0,74	0,74	1,00	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	39,68	39,68	39,68	39,68	56,38	39,68	39,68	30,18	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	36,38	33,98	33,53	37,28
	B	14,33	12,53	12,53	12,53	15,43	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53
	C	6,28	4,08	4,08	6,28	6,28	6,11	5,37	4,08	4,65	4,65	4,65	4,29	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65
Autres feuillus	B	9,88	8,61	8,61	8,61	10,33	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	9,78	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61
	C	6,46	4,38	4,23	6,16	6,46	5,64	4,71	3,41	0,87	1,44	1,84	2,15	1,00	1,98	0,87	2,20	2,66	2,22
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	2,00	0,35	0,35	0,35	1,00	0,55	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	1,30	1,30	1,18	1,30	1,30	1,30	1,30	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,30	1,30	1,30
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	2,00	0,35	0,35	0,35	1,00	0,55	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité ré

Essences	Qualité*	marchande (\$/m3)						Valeur marchande (\$/m3)											
		Zones						Zones											
		860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	
Sapin	B	6,60	2,40	2,61	11,98	15,80	16,15	20,17	13,23	12,89	12,10	13,20	18,54	16,10	12,52	14,30	11,06	9,61	7,17
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	1,62	3,50	6,87	0,97	0,97	0,97	0,97	3,63	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	13,25	9,03	9,10	17,38	21,00	21,35	25,01	18,98	17,92	16,94	17,95	22,90	21,36	18,31	19,10	16,20	14,90	12,99
	C, M	1,98	1,89	1,89	4,12	11,00	12,68	16,19	6,71	7,56	6,91	7,18	12,88	10,21	6,45	8,08	4,96	4,09	2,71
Pin gris	B	11,18	7,09	7,25	15,33	18,29	19,23	23,13	16,61	15,31	14,28	15,64	20,79	18,26	15,08	15,70	13,05	12,08	9,99
	C, M	1,29	1,29	1,29	1,29	2,63	4,07	7,39	1,29	1,29	1,29	1,29	4,07	2,19	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Pin blanc	G	19,10	19,10	17,47	17,06	19,76	18,04	16,65	17,71	14,55	14,50	14,65	15,05	14,50	12,72	14,50	14,50	12,29	12,20
	H	9,21	7,65	8,66	8,25	10,95	9,22	7,40	8,90	4,51	3,40	3,72	6,44	4,29	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	36,51	36,69	33,67	32,96	37,66	34,66	32,25	34,10	29,29	29,19	29,39	30,09	29,19	26,10	29,19	29,19	25,48	25,09
	G	13,00	13,00	11,79	11,49	13,49	12,55	12,46	11,97	10,92	9,59	9,90	12,85	9,98	8,27	9,59	9,59	8,04	8,04
	H	5,67	4,51	5,26	4,95	6,96	6,13	6,03	5,44	4,50	3,39	3,47	6,42	3,55	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	0,97	1,62	2,35	2,35	0,97	0,97	0,97	0,97	2,35	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	14,94	11,75
	C	4,65	4,18	1,68	1,95	5,38	4,12	4,15	1,68	1,68	1,68	1,68	3,77	2,02	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,25	10,49
	C	3,93	3,53	1,42	1,65	4,56	3,48	3,92	1,42	1,42	1,42	1,42	3,19	1,71	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Bouleau blanc	A	28,52	28,49	25,93	27,44	28,52	28,52	28,52	26,75	25,21	24,51	25,75	28,52	27,59	24,84	25,06	23,44	22,58	20,43
	B	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	4,38	3,30	3,96	6,62	6,44	3,70	4,33	2,90	2,90	2,90
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	12,53	11,57	9,15	9,02	9,02	12,53	11,18	9,02	9,02	9,41	10,90	
	C	4,19	4,08	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	4,65	3,90	3,19	4,43	4,65	4,65	3,49	3,72	2,12	1,58	
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,29	6,81
	C	2,41	2,17	0,87	1,01	2,80	2,14	2,63	0,87	0,87	0,87	0,87	1,96	1,05	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3) Zones										Valeur marchande (\$/m3) Zones							
		878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	950	951	952
Sapin	B	4,39	2,40	3,61	8,86	12,89	7,87	4,76	2,40	14,84	19,49	23,16	21,77	21,29	11,31	9,37	3,27	2,40	4,67
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	3,97	9,98	6,26	4,19	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	10,20	7,61	9,58	14,51	18,18	13,26	10,41	6,35	19,67	23,49	28,13	26,03	25,22	16,45	14,53	9,21	4,85	10,18
	C, M	1,89	1,89	1,89	5,55	7,40	5,22	2,41	1,89	10,53	13,09	20,14	17,10	14,96	8,82	5,75	2,18	2,04	1,89
Pin gris	B	6,40	3,80	6,47	11,43	16,11	10,02	7,00	3,22	17,08	21,35	25,13	22,67	22,26	14,85	12,85	8,55	7,08	5,83
	C, M	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	3,92	11,02	8,46	6,42	1,29	1,29	1,55	1,55	1,29
Pin blanc	G	11,89	9,79	10,43	13,72	14,50	13,21	11,61	8,07	15,69	15,33	17,90	18,70	17,95	13,84	8,48	15,83	16,14	15,09
	H	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	6,88	6,52	9,08	8,72	3,40	3,40	3,40	7,02	7,33	6,28
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	24,20	20,41	21,58	27,59	29,19	26,56	23,72	16,65	30,57	29,96	34,41	35,81	34,51	27,36	18,13	30,83	31,36	29,54
	G	8,04	8,04	8,04	9,01	9,59	8,64	8,04	8,04	11,36	11,88	12,11	12,71	12,15	9,10	8,04	10,58	10,81	10,03
	H	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	4,94	5,45	5,57	5,30	3,39	3,39	3,39	4,04	4,27	3,49
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
	C	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	2,35	2,35	2,35	2,35	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	8,60	8,60	8,96	14,45	15,22	15,22	11,27	9,56	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	11,59	15,22	15,22	15,22	15,22
	C	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	2,70	4,15	4,15	2,65	1,68	1,68	2,48	2,75	1,68
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	7,76	7,76	8,08	12,82	13,84	13,52	10,07	8,59	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	10,35	13,84	13,84	13,84	13,84
	C	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	2,28	3,92	3,70	2,24	1,42	1,42	1,80	2,32	1,42
Bouleau blanc	A	18,52	18,52	18,52	22,40	25,08	23,11	19,90	18,62	26,50	28,13	28,52	28,52	28,15	23,76	21,13	26,60	27,22	26,12
	B	2,90	2,90	2,90	2,90	3,85	2,90	2,90	2,90	4,77	6,50	6,62	6,62	6,62	2,90	2,90	6,62	6,62	6,62
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	10,90	10,90	10,90	10,90	9,02	10,75	10,90	10,90	9,42	11,40	12,53	12,53	11,28	9,66	10,90	12,53	12,53	12,53
	C	1,58	1,58	1,58	1,58	3,76	1,78	1,58	1,58	4,65	4,65	4,65	4,65	2,36	1,58	4,08	4,65	4,65	4,65
Autres feuillus	B	5,34	5,18	5,51	8,06	8,61	8,44	6,58	5,78	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61
	C	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	1,40	2,77	2,27	1,37	0,87	0,87	1,06	1,42	0,87
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,90	1,30	1,30	1,30	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité ré

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m ³)																	
		Zones																	
		953	954	955	956	957	960	961	962	963	964	965	966	967	970	980	981	982	983
Sapin	B	2,40	4,75	2,40	4,16	6,89	8,07	6,93	3,72	2,90	2,40	4,88	5,20	7,11	2,40	11,39	9,04	3,44	3,66
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	6,88	9,89	5,46	9,19	11,97	13,71	12,33	8,89	8,08	4,67	9,58	10,19	12,38	5,43	17,20	14,90	8,99	9,31
	C, M	2,05	2,42	1,89	1,89	1,89	1,97	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	2,32	2,21	2,01	1,93
Pin gris	B	3,54	6,82	3,18	5,14	7,54	9,31	8,57	4,90	4,59	3,18	4,85	5,81	8,32	3,18	14,00	11,94	6,59	7,06
	C, M	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,55	1,55	1,55	1,55
Pin blanc	G	14,50	16,28	14,45	12,01	14,50	14,50	13,99	11,33	10,73	10,59	11,79	12,56	13,38	11,90	11,21	9,61	8,47	8,07
	H	5,08	7,47	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	28,52	31,60	28,43	24,18	28,52	28,52	27,63	23,00	21,95	21,73	23,80	25,14	26,56	24,00	22,81	20,02	18,03	16,57
	G	9,59	10,91	9,56	8,04	9,59	9,59	9,21	8,04	8,04	8,04	8,04	8,15	8,76	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04
	H	3,39	4,37	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22	14,99	14,10	10,49	13,16	13,58	15,22	8,60	14,82	11,33	8,60	7,79
	C	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	13,84	12,67	11,92	8,98	11,70	12,07	13,50	7,76	13,14	10,12	7,60	6,59
	C	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Bouleau blanc	A	23,75	25,62	21,40	23,63	26,05	23,52	22,65	21,35	21,15	18,52	20,03	20,08	21,38	18,52	20,82	18,52	18,52	18,52
	B	6,07	6,62	2,90	5,19	6,62	4,02	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	11,41	12,53	10,25	9,96	12,53	9,02	9,02	10,55	10,83	10,90	10,90	10,90	10,46	10,90	10,90	10,90	10,90	10,24
	C	2,46	4,65	1,58	2,07	4,47	1,90	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Autres feuillus	B	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	8,61	7,77	7,32	5,51	7,46	7,66	8,28	5,27	8,16	6,22	4,66	4,04
	C	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

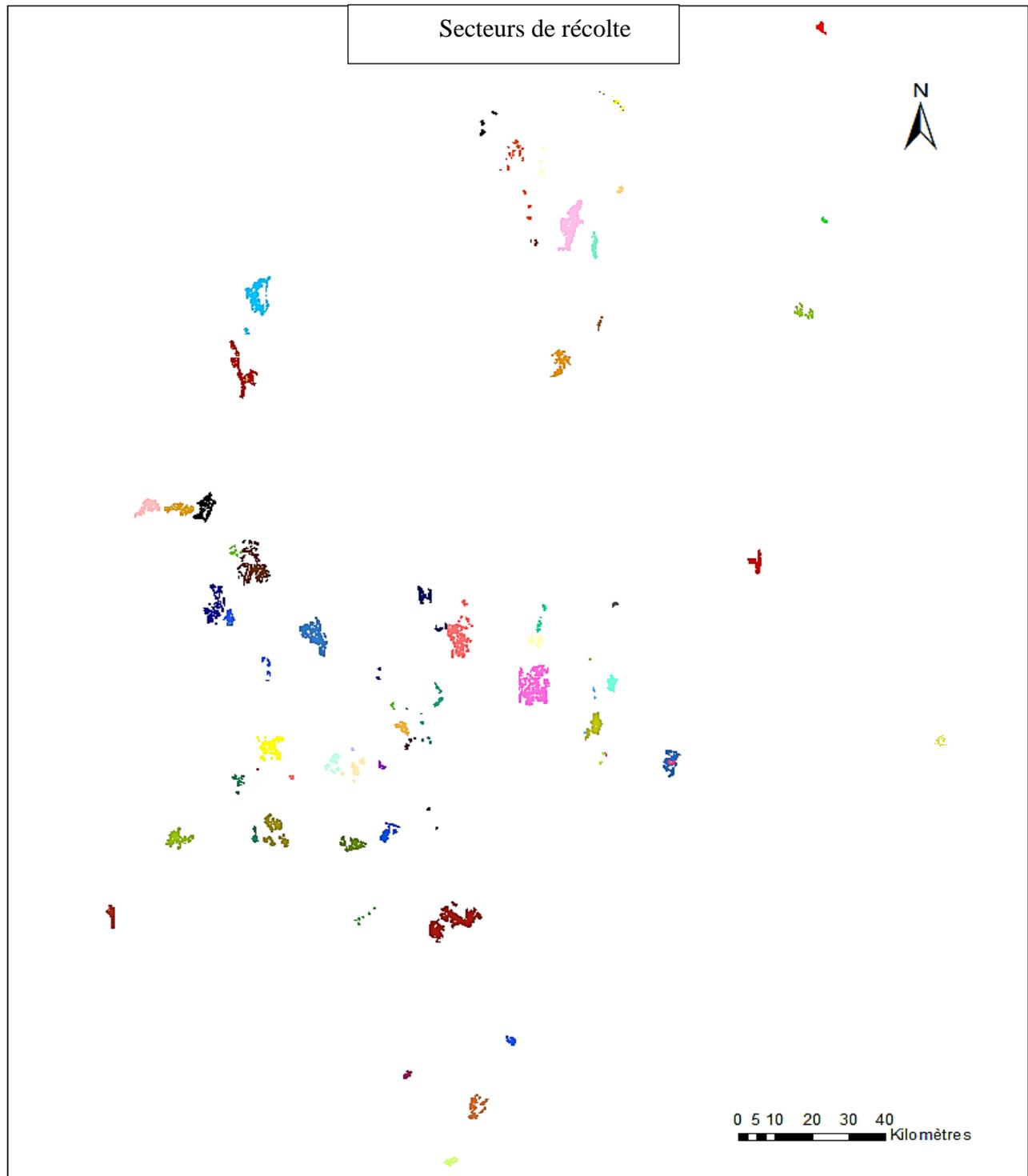
*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité

Essences	Qualité*	Valeur marchande (\$/m3)						
		Zones						
		984	985	986	987	990	995	998
Sapin	B	6,61	3,72	3,72	5,05	6,64	2,40	2,40
	C, M	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Épinettes	B	12,50	9,27	9,00	10,22	12,54	4,67	4,67
	C, M	2,19	1,89	1,89	1,89	2,40	1,89	1,89
Pin gris	B	9,61	7,29	7,41	8,80	9,55	3,91	3,18
	C, M	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,29
Pin blanc	G	8,07	8,07	8,07	11,65	8,24	10,26	8,07
	H	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	I	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Pin rouge	F	17,31	16,52	16,52	23,57	17,64	21,14	16,52
	G	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04	8,04
	H	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
	I	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	B	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
Pin blanc, pin rouge, pruche, thuya, mélèze et Épinette de Norvège	C	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Chênes, cerisier	A	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37	31,37
	B	8,60	6,35	7,67	12,59	8,31	10,22	8,60
	C	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Bouleau jaune	A	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69	27,69
	B	7,76	5,37	6,48	11,21	7,03	8,84	7,76
	C	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
Bouleau blanc	A	18,52	18,52	18,52	19,39	18,52	23,52	18,52
	B	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	5,31	2,90
	C	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Érable à sucre	A	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18	30,18
	B	10,90	9,13	10,24	10,90	10,78	6,52	10,90
	C	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58
Autres feuillus	B	4,80	3,29	3,98	7,20	4,31	3,61	4,92
	C	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Hêtre	B,C	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Peupliers	B	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tous les feuillus (sauf peupliers)	D,E	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

*Les lettres A, B, C, D, E, F, G, H et I correspondent à des niveaux de qualité re

Source : <https://bmb.gouv.qc.ca/publications-et-reglements/tarification-forestiere/>

ANNEXE E – Carte représentant la dispersion des secteurs de récolte



ANNEXE F - Tâches des travailleurs pour l'élaboration de la PRAN

1. Surintendant à la planification

- a. Découpage des blocs de récolte
- b. Préparation du tableau des secteurs d'intervention (étape 4.1)
- b. Pré-rencontre de suivi avec les autres BGA pour prévenir les conflits lors de l'élaboration des PRAN individuelles (processus de négociation préventive) (étape 4)
- c. Vérification de l'état d'atteinte des cibles (étape 4)
- d. Ajustement des choix avec les RPO (étape 4)
- e. Montage du tableau d'allocation (R.174) et préparation de la carte (.shp) des BGAD (localisation des interventions faites par tous les BGAD sur le territoire) et de la carte des interventions à faire à l'interne (opérations faites par PFR) (étape 4)
- f. Rencontre des BGA, présentation et finalisation de la PRAN (étape 5)

2. Responsables de la planification opérationnelle (RPO)

- a. Sélection des blocs de récolte/usines avec un surplus de volume d'environ 25% (étape 4)
 - i. Distances de transport (1/4)
 - ii. Secteurs été-hiver (3/4)
 - iii. Disponibilité des blocs (R.154) (1/4)
 - iv. Âge des peuplements (1/4)
 - v. Composition en essence (1/2)
 - vi. Concentrer les coûts d'opération (1/4)
 - vii. Démêlage de la grosseur des bois (1/2)
 - viii. Conservation d'une certaine constance dans l'approvisionnement (1/4)
 - ix. État des infrastructures (1/2)
 - x. Compartiment d'organisation spatiale (COS) (1/4)
 - xi. Pourcentage de feuillus pour l'approvisionnement des autres BGA (1/4)
 - xii. Volume ou superficie par traitement (1/4)
- b. Calcul des volumes
- c. Planification des bouquets résiduels (entre 1 et 10%)
- d. Planification des chemins (à construire et infrastructures à réparer) à emprunter

- e. Ajuster la sélection des blocs de récolte en regard des cibles fixées par le MFFP
 - f. Calcul de débit
 - g. Échange de données avec fournisseurs externes
 - h. Forêt morcelée (définir le potentiel de récolte)
- 3. Surintendant général des approvisionnements (SGA)**
- a. Préparation des données nécessaires aux budgets
 - b. Déterminer le % de carie et de surlongueur par secteur d'opération
 - c. Compilation des volumes prévus par UAF pour établir de calendrier annuel
 - d. Balancement entre les volumes d'approvisionnement externe et les GA
 - e. Maximiser les scénarios de récolte (quantité d'achats au BMMB, prévoir plusieurs scénarios pour maximiser les GA, conseil sur les transferts de billes entre usines, conseil sur le type de transport)
- 4. Équipes composées d'un surintendant général de secteur et d'un assistant**
- a. Préparation des budgets sous forme de calendrier hebdomadaire de la prévision des volumes livrés aux usines pour chaque UAF
 - b. Balancer les volumes (grosueur et essence)
- 5. Équipe composée d'un ingénieur forestier responsable des opérations forestières et de deux techniciens forestiers**
- a. Confection du fichier de la PRAN selon la mise en forme d'échange numérique exigée par le MFFP (format .dbf)
 - i. Intégration couche de chemin
 - ii. Intégration des blocs demandés non inclus dans le fichier R.154
 - b. Rencontre avec le surintendant à la planification pour finalisation des fichiers
 - c. Négociation des accès et dates d'opération avec les tiers (pourvoirie, SÉPAQ, zecs, club ou association de villégiature)
 - d. Dépôt officiel de la PRAN au MFFP

ANNEXE G – Salaire annuel des ingénieurs forestiers

Salaire de base au 1^{er} février 2012 en milliers de dollars pour l'ensemble des ingénieurs forestiers

Année du diplôme	Moyenne	Médiane	Décile inférieur	Quartile inférieur	Quartile supérieur	Décile supérieur	Nombre d'ingénieurs forestiers
	\$	\$	\$	\$	\$	\$	N
Années 2000	58,2	55,0	42,3	47,4	65,0	76,1	347
Années 1990	74,7	72,0	56,0	64,0	80,3	96,0	249
Années 1980	87,6	79,5	64,0	71,0	100,0	122,0	235
Années 1970	90,8	82,9	65,5	71,7	105,0	125,0	80
Total	75,2	71,7	47,5	58,5	85,0	105,0	911

Source : http://www.oifq.com/images/pdf/enquete-salariale-2012_version-web.pdf

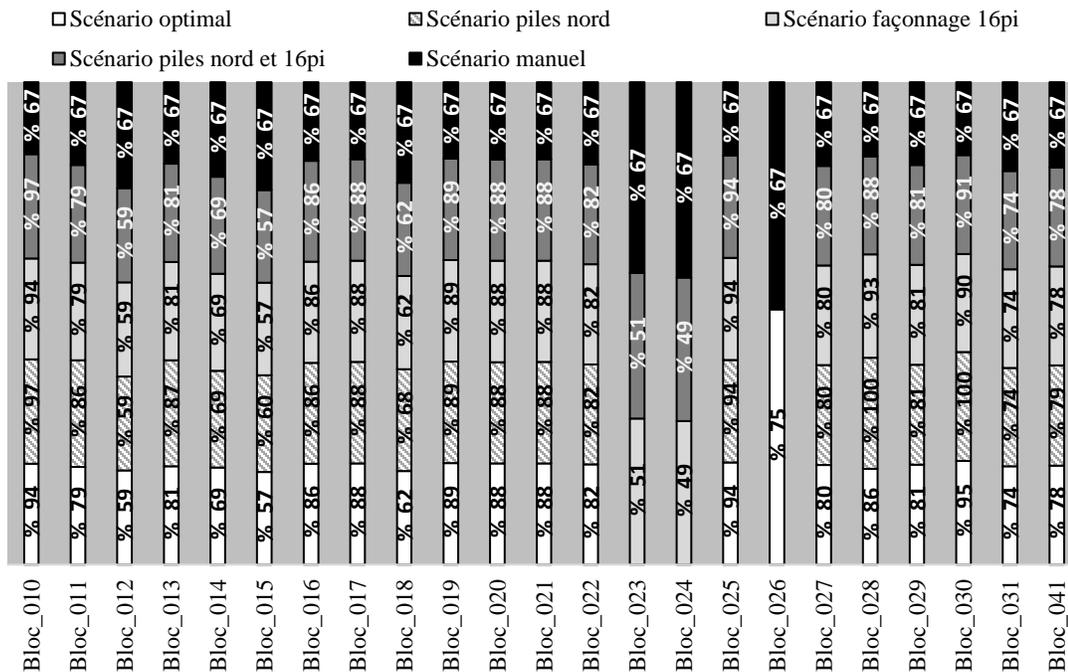
(Source : Réseau des ingénieurs du Québec)

Croisissez pour chacune de ces quatre caractéristiques d'un emploi (1 à 4), la description qui correspond le mieux à votre situation et encadrez le nombre de points. Reportez ce nombre dans les cases « Nombre de points », additionnez et inscrivez le « Total des points » dans la case en bas à droite. Au bas de la page, pour chaque niveau, une brève description des qualifications généralement requises qui sert de repère en déterminant la formation et l'expérience généralement requise.

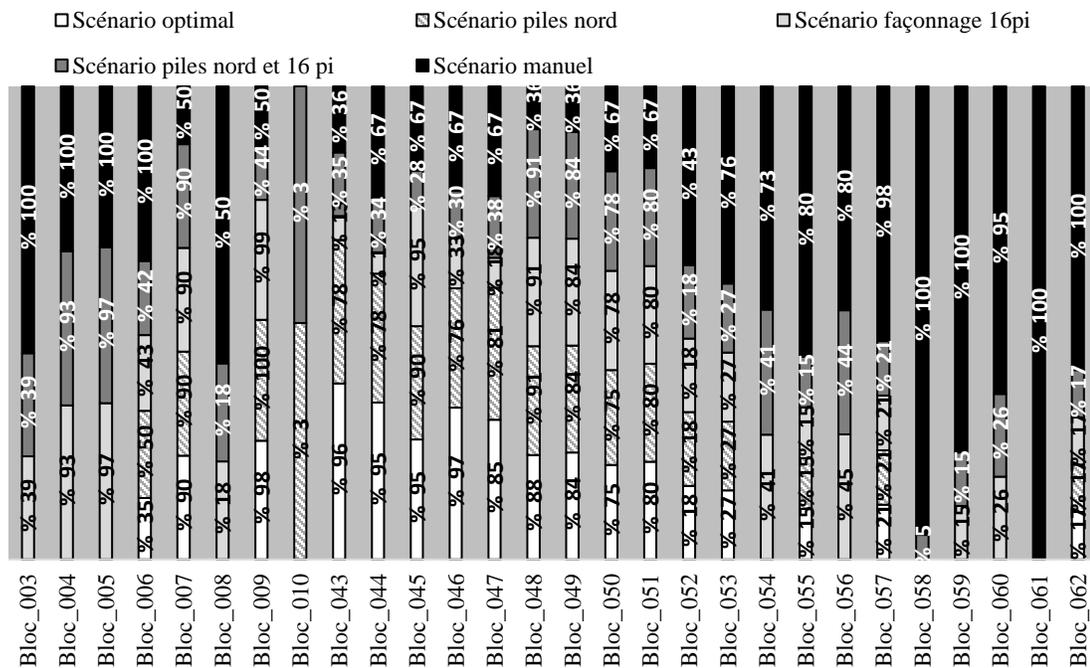
Caractéristiques d'un emploi	A	B	C	D	E	F	F+	
1	Reçoit un entraînement théorique ou pratique sur les diverses phases du travail de l'ingénieur au bureau, à l'usine ou sur le terrain. Le travail consiste à préparer des plans simples, à faire des calculs élémentaires, à déterminer des coûts et des quantités conformément à des méthodes normalisées, des plans et devis établis par d'autres. Peut être appelé à préparer des rapports ou à faire des inspections ou des relevés techniques de routine.	Échelon considéré normalement comme le début de l'entraînement et de la formation de l'ingénieur. Se voit confier des tâches simples et répétitives de plusieurs domaines du génie ainsi qu'une solide formation professionnelle pour élaborer ou exécuter des projets nécessitant une coordination des tâches difficiles, comportant des responsabilités et ouvrant le champ à l'initiative personnelle. La nature des problèmes à résoudre oblige à modifier des méthodes établies, à en élaborer de nouvelles, à appliquer des principes connus sous de nouvelles formes et à tirer des conclusions en faisant une étude comparative de cas analogues.	À cet échelon, l'ingénieur est considéré comme étant pleinement qualifié. Prend en charge des tâches variées et importantes de plusieurs domaines du génie ainsi qu'une solide formation professionnelle pour élaborer ou exécuter des projets nécessitant une coordination des tâches difficiles, comportant des responsabilités et ouvrant le champ à l'initiative personnelle. La nature des problèmes à résoudre oblige à modifier des méthodes établies, à en élaborer de nouvelles, à appliquer des principes connus sous de nouvelles formes et à tirer des conclusions en faisant une étude comparative de cas analogues.	Premier échelon où l'on exerce une surveillance directe et soutenue sur une ou des commandes assurées au sein d'un département ou d'un bureau. Participe à l'évaluation de projets courts et à long terme, décide lui-même des méthodes de travail et de la ligne de conduite à suivre dans le cadre d'un programme donné. La solution pratique et économique des problèmes demandés est d'origine et de l'initiative. Il peut y avoir surveillance d'un personnel de non-professionnels, ou autorisé sur un petit groupe de professionnels hautement qualifiés.	Doit posséder normalement des connaissances un peu plus approfondies qu'une ou des commandes assurées au sein d'un département ou d'un bureau. Participe à l'évaluation de projets courts et à long terme, décide lui-même des méthodes de travail et de la ligne de conduite à suivre dans le cadre d'un programme donné. La solution pratique et économique des problèmes demandés est d'origine et de l'initiative. Il peut y avoir surveillance d'un personnel de non-professionnels, ou autorisé sur un petit groupe de professionnels hautement qualifiés.	Habituellement chargé d'une fonction professionnelle administrative, agant sous ses ordres plusieurs groupes de professionnels, ou en tant que spécialiste-conseil, peut d'une autorité dans un domaine du génie d'importance majeure pour l'entreprise. Détermine lui-même les problèmes à être analysés et les programmes de travail. Prend part aux décisions servant à fixer les politiques fondamentales d'opération, à élaborer et les moyens d'atteindre des objectifs de la manière la plus économique et à passer aux éventualités susceptibles d'affecter le marché du travail.	Habituellement chargé d'une fonction professionnelle administrative, agant sous ses ordres plusieurs groupes de professionnels, ou en tant que spécialiste-conseil, peut d'une autorité dans un domaine du génie d'importance majeure pour l'entreprise. Détermine lui-même les problèmes à être analysés et les programmes de travail. Prend part aux décisions servant à fixer les politiques fondamentales d'opération, à élaborer et les moyens d'atteindre des objectifs de la manière la plus économique et à passer aux éventualités susceptibles d'affecter le marché du travail.	Dans le cadre de la politique générale de l'entreprise, conçoit des projets de grande importance et de haute responsabilité nécessitant un investissement considérable en temps et en argent. Formule des politiques fondamentales d'opération et envisage les problèmes de base ainsi que les plans d'actions qui permettront d'atteindre les objectifs fixés de la manière la plus économique en dépit des imprévus.
2	Peu de décisions techniques à prendre. Certaines décisions sont prises par d'autres et s'appliquent sur des méthodes d'airement définies.	Les recommandations se limitent à des décisions techniques. Normalement, les décisions ne sont permises que dans des cadres donnés.	De son propre chef, étudie, analyse, recommande et prend des décisions techniques ou exceptionnelles, conformément à une technique et de la possibilité d'exécution.	Les recommandations sont examinées pour vérifier qu'elles sont satisfaisantes. Elles sont généralement acceptées du point de vue technique et de la possibilité d'exécution.	Prend des décisions importantes dont la validité n'est pas évidente. Les questions à élucider, sauf si des sommes importantes d'argent sont en jeu ou si elles comportent des objectifs à long terme. Prend les mesures nécessaires pour l'exécution satisfaisante des tâches.	Prend des décisions importantes sur un aspect de la production et des décisions administratives de conséquence. Met les autres responsables de l'administration au courant des questions d'importance.	Prend des décisions importantes sur un aspect de la production et des décisions administratives de conséquence. Met les autres responsables de l'administration au courant des questions d'importance.	Responsable de l'élaboration des projets et de la planification et des décisions administratives de conséquence. Met les autres responsables de l'administration au courant des questions d'importance.
3	Est l'objet d'une surveillance étroite. Le travail est vérifié afin de s'assurer qu'il soit précis, adéquat et conforme aux méthodes prescrites.	Le travail est confié au moyen d'instructions verbales, parfois écrites, données en détail les méthodes et la ligne de conduite à suivre. Peut obtenir des conseils de portée technique. Les résultats du travail sont habituellement vérifiés en détail.	Habituellement, la surveillance du travail est plus relâchée et varie suivant l'importance de celui-ci. Normalement, peut compter sur une certaine assistance technique quant à la révision des plans d'actions et à l'absence des aspects exceptionnels des travaux confiés.	Le travail est confié en fonction des objectifs à atteindre, des priorités à maintenir et des conséquences possibles sur le travail d'autres groupes. Le travail se fait suivant une ligne de conduite très flexible mais il est possible d'obtenir des directives.	Le travail est confié en fonction de l'objectif général à s'assurer de l'observance de la politique établie, de la possession des méthodes de travail et de l'efficacité générale.	Reçoit des directives administratives s'inspirant de la politique de l'entreprise et des objectifs à atteindre. Le travail n'est vérifié que pour s'assurer qu'il est conforme à la politique à suivre et pour permettre une coordination avec les autres activités de l'entreprise.	Reçoit des directives administratives s'inspirant de la politique de l'entreprise et des objectifs à atteindre. Le travail n'est vérifié que pour s'assurer qu'il est conforme à la politique à suivre et pour permettre une coordination avec les autres activités de l'entreprise.	Jouit d'une très grande autorité administrative et n'est pratiquement soumis à aucune direction technique ou contrôle; n'est limité que par la politique et les buts de l'entreprise.
4	Peut donner du travail à un groupe composé d'un à cinq techniciens ou assistants et en vérifier les résultats.	Peut être appelé à guider le travail d'un ou de deux ingénieurs de compétence inférieure à la sienne, ou de techniciens collaborant à la solution du même problème.	Peut guider le travail d'ingénieurs de compétence inférieure à la sienne ou de techniciens collaborant à la même problématique. La surveillance exercée sur d'autres ingénieurs n'est généralement pas une fonction régulière ni continue.	Confié et définit le travail, donne des conseils techniques, à assurer que le travail est précis et adéquat. La surveillance peut comporter des recommandations quant au choix, à l'entraînement, à l'évaluation et à la discipline du personnel.	Élabore les problèmes les plus difficiles et les méthodes de travail. Coordonne l'exécution du travail et décide de l'utilisation de l'outillage, du matériel et de choses connexes. En tant qu'administrateur, prend les décisions concernant le choix, l'entraînement, l'évaluation, la discipline et la rémunération du personnel.	Reçoit et évalue le travail technique; choisit, élabore et coordonne pour atteindre les objectifs donnés. En tant qu'administrateur, prend les décisions concernant le choix, l'entraînement, l'évaluation, la discipline et la rémunération du personnel.	Donne des directives administratives à ses subordonnés immédiats et ses rapports avec les différents effectifs se font normalement par l'intermédiaire de ces échelons plutôt que directement.	
Déterminez le niveau de responsabilité selon le nombre total de points obtenu et cochez la case correspondante.								
<input type="checkbox"/> 100 et moins (niveau A) <input type="checkbox"/> 105 à 145 (niveau B) <input type="checkbox"/> 150 à 205 (niveau C) <input type="checkbox"/> 210 à 295 (niveau D) <input type="checkbox"/> 300 à 405 (niveau E) <input type="checkbox"/> 410 à 480 (niveau F) <input type="checkbox"/> 485 et plus (niveau F+)								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, et normalement de deux à trois années d'expérience depuis l'obtention du diplôme.								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, avec normalement de trois à cinq années d'expérience depuis l'obtention du diplôme.								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, avec normalement de cinq à huit années d'expérience depuis l'obtention du diplôme.								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, avec normalement de huit à douze années d'expérience depuis l'obtention du diplôme.								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, avec plusieurs années d'expérience professionnelle depuis l'obtention du diplôme.								
<input type="checkbox"/> 485 et plus (niveau F+)								
Diplôme de bachelier en génie ou en sciences appliquées ou l'équivalent, avec une vaste expérience.								
Total des points								

ANNEXE H – Allocation des blocs de récolte aux usines de transformation

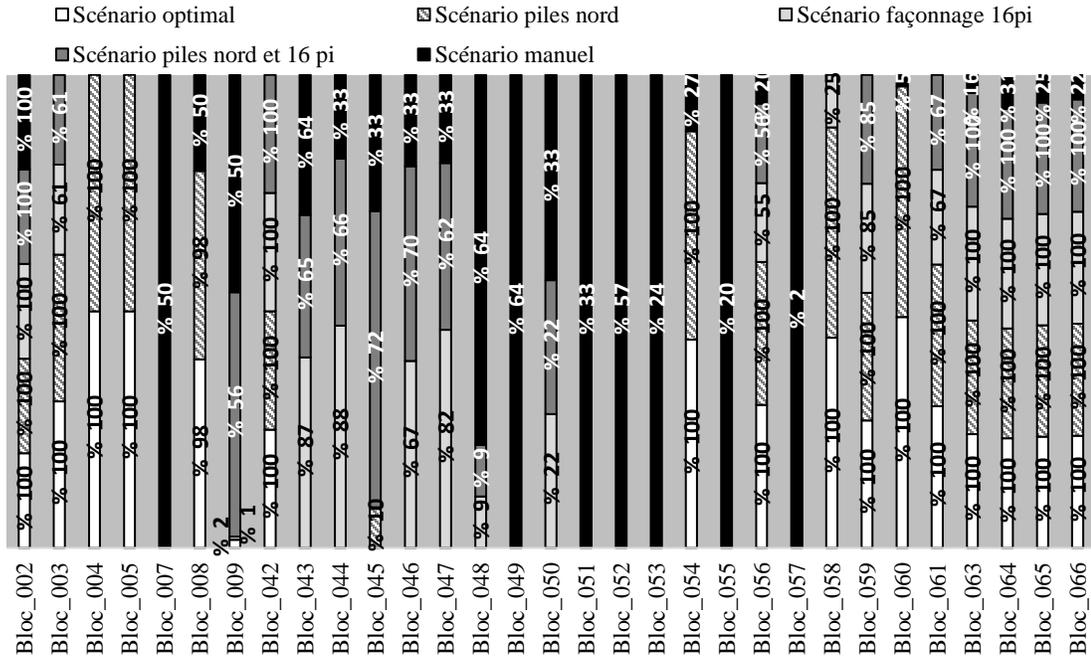
Usine 1



Usine 3



Usine 4



Usine 5

