

Titre: Problèmes intégrés d'approvisionnement forestier avec décisions de tronçonnage
Title: tronçonnage

Auteur: Amira Dems
Author:

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dems, A. (2014). Problèmes intégrés d'approvisionnement forestier avec décisions de tronçonnage [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1452/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1452/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Louis-Martin Rousseau, & Jean-Marc Frayret
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PROBLÈMES INTÉGRÉS D'APPROVISIONNEMENT FORESTIER AVEC DÉCISIONS
DE TRONÇONNAGE

AMIRA DEMS
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(GÉNIE INDUSTRIEL)
MAI 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

PROBLÈMES INTÉGRÉS D'APPROVISIONNEMENT FORESTIER AVEC DÉCISIONS
DE TRONÇONNAGE

présentée par : DEMS Amira

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph.D., président

M. ROUSSEAU Louis-Martin, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. PESANT Gilles, Ph.D., membre

M. RÖNNQVIST Mikael, Doctorat, membre externe

*À ma chère mère,
À mon cher père,
je vous aime...*

REMERCIEMENTS

Pour rédiger ces paragraphes, je n'ai pas vraiment suivi de hiérarchie, comme vous pouvez le constater. Je l'ai voulu unique, reflétant l'unicité de mon expérience de thèse telle que je la perçois. Je vous emmène donc au troisième étage du pavillon André-Aisenstadt. À l'entrée du CIRRELT, sur votre droite, un beau sourire nous accueille chaque matin. Lucie-Nathalie ou Nath tout court, un grand merci pour tous tes conseils d'amie et de sœur. Ce fut toujours agréable d'échanger avec toi. Quelques pas plus loin, nous accueille la deuxième Lucie, toute calme et aussi serviable que la première. Un petit détour à droite, nous ne pouvons pas passer sans entendre le sourire éclatant de M. Gendron, directeur du CIRRELT. Un grand merci à vous, pour tout ce que vous faites pour le CIRRELT. Je sais que je vous ai pas mal coincé, à quelques reprises, en arrivant quelques minutes juste avant le début de mes présentations dans plusieurs sessions que vous avez présidées, mais vous m'avez toujours accueillie avec le même sourire de soulagement. En avançant un peu plus loin, nous croisons M. Laporte. Je vous remercie mon voisin pour les messages que vous m'avez transmis sans vous en apercevoir : vous êtes pour moi un exemple de persévérance et de sérieux.

Une porte plus loin, nous aboutissons à mon bureau. Certains disent que c'est le meilleur au CIRRELT parce qu'il est très lumineux en raison de ses fenêtres qui offrent une vue magnifique. Pour moi, avec tous les souvenirs que j'ai dans ce bureau, il est certes le meilleur. Un grand merci à tous mes collègues et amis de bureau et du CIRRELT pour leur aide précieuse, leur présence et toutes leurs gentillesse, en particulier à Ola, Ines, Souhaila, Géraldine, Elivelton, Hussein et Mahdi.

En se dirigeant vers la porte arrière, nous trouvons le bureau de celui que de nombreuses personnes surnomment le sauveur. Moi je l'appelle plutôt l'indispensable, Serge Bisailon. Merci pour ton aide incroyable et pour ta gentillesse. Grâce à toi, le débogage devenait presque amusant. Je remercie aussi tout le personnel du CIRRELT : techniciens informatiques, secrétaires, étudiants et chercheurs pour leur aide incomparable.

Nous arrivons maintenant au premier héros de cette aventure, Louis-Martin Rousseau, mon directeur de thèse. J'ai obtenu tous mes diplômes avec lui : il a été mon directeur de projet de fin d'études, mon directeur de recherche à la maîtrise ainsi qu'au doctorat. Durant toutes ces années, tu as su être très présent, patient, gentil et aidant. Je te remercie vivement pour m'avoir offert la possibilité de réaliser ma thèse dans des bonnes conditions, de croire en moi et d'avoir su autant me soutenir et reconforter moralement au moment où j'en avais vraiment besoin. Tu es un professeur avec des qualités humaines inégalables. Tu as toujours su comment faire pour que tes étudiants se sentent à l'aise afin qu'ils puissent donner leur

plein rendement.

Je me rappelle le jour où tu m'as proposé Jean-Marc Frayret comme co-directeur de thèse en me disant qu'il est très gentil et compétent. Tu avais raison car Jean-Marc est presque aussi gentil et aidant que toi. M. Michel Gendreau m'a déjà dit que la thèse est un contrat de mariage à court terme. Je vous remercie pour avoir fait de ce mariage une expérience heureuse et réussie. Après chaque rencontre avec vous deux, je sortais souvent beaucoup plus motivée et confiante, ce qui me poussait à progresser davantage.

Je remercie également messieurs Jean Favreau et Sébastien Lacroix de FPInnovations qui m'ont fourni toutes les informations et les données nécessaires à la définition du problème.

Je désire exprimer également ma gratitude envers M. Martin Trépanier, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse comme il m'a déjà fait l'honneur de présider le jury de mon examen de synthèse oral. Je remercie également messieurs Gilles Pesant et Mikael Rönnqvist, pour avoir accepté d'être membres du jury. Un très grand merci va à Marie-Carline Lajeunesse et à Diane Bernier de Polytechnique Montréal.

Il m'est cher aussi de remercier mes amis du GERAD, et tout particulièrement, Mounira Groiez. Mounira, tu as été pour moi plus qu'une sœur. Ta présence, ton soutien et tes conseils durant toutes ces années de doctorat sont hors de prix. Je dois avouer que j'ai perdu quelques livres en montant les escaliers pour me rendre au GERAD à plusieurs reprises, chaque fois j'éprouvais le besoin de te voir. Je remercie également Francine Benoît pour tous ses conseils en Latex.

Finalement, aucun remerciement ne vaut le soutien inconditionnel que ma famille m'a procuré. Je suis fière d'avoir une famille aussi dévouée. Mes chers parents, sans vous, rien de ce que j'ai réussi à accomplir n'aurait été possible. Je suis plus qu'honorée d'être votre enfant. Hichem, mon frère, je te dis merci, car tu as toujours été à mes côtés. Je suis naturellement très reconnaissante envers mon mari Mahdi pour tout son amour, son soutien et son encouragement. Un merci spécial va à notre adorable fille Rahma. Je sais qu'il y a eu des moments difficiles pour toi au cours de ces années où Maman rentrait tard à la maison. J'espère que mon travail sera pour toi un jour une source de force et de fierté.

RÉSUMÉ

En foresterie, la planification annuelle des approvisionnements en bois est une tâche complexe qui implique un nombre important de décisions. Des décisions qui portent sur une multitude d'activités de la chaîne logistique forestière afin de mieux les synchroniser, à savoir la récolte, le stockage, le transport,...etc. Le degré de complexité des problèmes d'approvisionnement dépend de la diversité des activités intégrées. Cette thèse s'intéresse aux problèmes de planification annuelle des approvisionnements en bois très intégrateurs. Elle vise à développer un système d'aide à la décision pour soutenir les compagnies forestières dans le contexte de l'est canadien. Nous étudions plusieurs variantes du problème annuel d'approvisionnement de bois, de plusieurs sources vers plusieurs destinations et intégrant des décisions de tronçonnage.

Dans le premier article de ce travail, nous considérons une variante du modèle portant sur la planification annuelle, mono-périodique des approvisionnements forestiers. Nous présentons alors une approche pratique et détaillée portant sur le problème de tronçonnage des arbres dans une forêt. Le tronçonnage des arbres consiste à couper les arbres abattus en des segments de bois de plus petites longueurs (billes). Il s'agit de l'une des plus importantes opérations dans la chaîne logistique de l'exploitation forestière. Cette approche sera par la suite utilisée dans les variantes multi-périodiques. En outre, nous proposons de nouvelles structures de tronçonnage, que nous comparons à l'approche actuellement en usage. Les nouvelles structures portent sur la désagrégation de certaines activités associées au tronçonnage. Nous montrons que ces structures améliorent les opérations de récolte sans changer les technologies utilisées ou engendrer des dépenses excessives. Nous considérons aussi l'impact de la diminution de la productivité des machines de tronçonnage sur le coût de récolte.

Par la suite, nous présentons deux extensions multi-périodiques du modèle dans l'article 2 et 3 respectivement. Nous portons plus d'attention à la variation du stock et la fluctuation des demandes au cours de l'année. Nous considérons des décisions sur le séquençement de la récolte des sites forestiers dans le temps, en plus des activités d'approvisionnement traitées dans la variante mono-périodique. Ces variantes reflètent mieux la réalité parce que nous considérons que les sites forestiers ne peuvent pas être récoltés tous en même temps. Dans le troisième article, nous étudions aussi l'impact de l'intégration d'une certaine forme de flexibilité dans la récolte sur la planification en variant la capacité de récolte utilisée durant le temps. Nous montrons que cette flexibilité améliore l'efficacité des opérations de la récolte.

Nous proposons des formulations mathématiques pour modéliser les différentes variantes du problème. Pour ce faire, des approches de modélisation explicites telles que la program-

mation linéaire en nombres entiers et la programmation par contraintes sont utilisées. Nous faisons appel à des approximations pour linéariser le coût de récolte et nous utilisons certaines heuristiques et approches hybrides pour améliorer les temps de calcul.

ABSTRACT

In Canada, the industry of forest products is among the top five contributors to the nation's net trade according to Natural Resources Canada (2013). Recently, this industry has been refocusing its business model due to new challenges related to environmental issues, economic downturn, decline in newsprint demand and increasing competition. Product and process innovation are the focus of important development to help the sector adapt to recent challenges. The Wood Supply Chain (WSC) has emerged as an important field in developing an efficient wood procurement process. Wood procurement process encompasses a wide range of activities that provide quantities of wood to processing mills. Therefore, researches on the whole WSC, as a key factor of maintaining a sustainable forest industry, are intensified. This dissertation addresses different variants of the wood procurement problem for Eastern Canadian forest context.

In the first paper of this thesis, we develop a mixed integer linear model for a practical multi-facility wood procurement planning problem using a cut-to-length (CTL) bucking system. Cut-to-length bucking is the operation of cutting tree stems into smaller pieces (logs), directly at the forest area, using mechanical machinery (harvesters and forwarders). We propose a model that maximizes the products value (i.e., profit maximization) and minimizes the harvesting cost, the transportation cost and the inventory cost. The decisions included in this wood procurement problem deal with the way to harvest different forest sites (according to the bucking priority list used) and the allocation of harvested logs to sawmills. We consider a priority-list approach to generate adequate bucking patterns.

In this thesis, the harvesting cost considers the nonlinearity of the harvester productivity function, which is an important aspect of the decision-making process in forest management. To keep the model in the scope of linear models, we propose an approximation of the empirical formulation of its harvesting cost. This approximation is then used to formulate different variants of the problem. Moreover, we introduce two new harvesting scenarios in order to analyse the cost/benefit trade-offs of a more complex decision structure. We conclude that these scenarios are profitable for forest companies, without major shift in the technology in use.

Then, we extend the first mono-period procurement model to a more detailed multiple-period planning context. In the second paper, we consider the impact of temporal variations in demands, log availability and inventory holdings on the procurement plan. Also, we introduce new decisions dealing with the harvest scheduling of the forest sites. We develop a mixed integer linear model, and we propose two heuristic approaches that quickly generate

an initial feasible schedule of forest sites and solve the problem within reasonable time limits.

Finally, in the third paper, we present a new variant of the wood procurement problem in which the planning horizon is larger than the first one, since we consider periods of two weeks. We present also a new form of flexibility which allows changing the harvesting capacity depending on time periods. We study its impact upon the harvesting capacity used and the harvesting cost. We assess its performance by comparing it to the first multi-period variant of the problem. We demonstrate that this flexibility decreases the total costs. To solve the problem, we develop a hybrid approach based on both constraint and mathematical programming. In the first phase, we propose a constraint programming model dealing with forest sites harvesting. The result of this model is then used as an initial partial solution for the whole problem formulated as a mixed integer model.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Généralités	1
1.2 Les niveaux de planification dans la chaîne d’approvisionnement forestier	1
1.3 FPIInnovations	2
1.4 Description du problème	3
1.5 Approches de résolution	5
1.6 Plan du mémoire	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	8
2.1 Problèmes de tronçonnage	8
2.1.1 Problèmes de tronçonnage d’un arbre	10
2.1.2 Problèmes de tronçonnage d’une seule zone de coupe	10
2.1.3 Problèmes de tronçonnage de plusieurs zones de coupe simultanément	12
2.2 Le transport en foresterie	13
2.3 Problèmes d’approvisionnement forestier	14
CHAPITRE 3 ORGANISATION DE LA THÈSE	18
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : EFFECTS OF DIFFERENT CUT-TO-LENGTH HARVESTING STRUCTURES ON THE ECONOMIC VALUE OF A WOOD PROCUREMENT PLANNING PROBLEM	20
4.1 Introduction	21

4.2	Literature review	23
4.2.1	Bucking optimization	23
4.2.2	The multi-commodity wood distribution problem	24
4.3	Problem description	26
4.3.1	Eastern Canadian harvesting context	26
4.4	Bucking pattern definition and simulation	29
4.4.1	Priority-list approach	29
4.4.2	Log simulator	30
4.5	Mathematical formulation	30
4.5.1	Harvesting cost calculation	32
4.5.2	Mathematical model	33
4.6	Case study	35
4.6.1	Scenario 1 : Forest-aggregation bucking scenario	35
4.6.2	Scenario 2 : Sector-aggregation bucking scenario	36
4.6.3	Scenario 3 : Stand-aggregation bucking scenario	37
4.7	Description of data	38
4.8	Computational experiments and discussion	40
4.8.1	Harvesting cost calculation	40
4.8.2	Results and discussion	40
4.9	Conclusion	45
4.10	Detailed harvesting cost calculation	47
4.10.1	The real harvesting cost	47
4.10.2	The approximate harvesting cost calculation	47
4.11	Calculation of bucking incentive factor	48
CHAPITRE 5	ARTICLE 2 : ANNUAL TIMBER PROCUREMENT PLANNING WITH	
	BUCKING DECISIONS	49
5.1	Introduction	50
5.2	Literature review	51
5.2.1	Integrated wood procurement problem	52
5.3	Problem Description	53
5.4	Mathematical Formulation	56
5.4.1	Mathematical Model	58
5.5	Solution Approaches	61
5.5.1	Relax, fix, and optimize approach	61
5.5.2	Greedy heuristic based approach	61

5.6	Computational Experiments and Discussion	61
5.6.1	Results and discussion	64
5.7	Conclusion	66
CHAPITRE 6 ARTICLE 3 : A HYBRID CONSTRAINT PROGRAMMING APPROACH TO A WOOD PROCUREMENT PROBLEM WITH BUCKING DECISIONS . . .		
6.1	Introduction	67
6.2	Wood procurement planning problem	69
6.3	Problem Statement	70
6.3.1	Harvesting activities	70
6.3.2	Supply activities	72
6.4	The CP/MIP approach	72
6.4.1	The CP model	73
6.4.2	The MIP model	75
6.5	Experimental Results	80
6.6	Conclusion	83
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION		
7.1	Synthèse des travaux	85
7.2	Limitations de la solution proposée	87
7.3	Directions de recherches	88
RÉFÉRENCES		89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Cut-block inventories	39
Tableau 4.2	Product specifications	40
Tableau 4.3	Comparisons of forest-, sector-, and stand-aggregation scenarios	43
Tableau 4.4	Percentage increase in sector- and stand-aggregation scenarios compared to forest-aggregation scenario	44
Tableau 4.5	Percentage decrease in sector- and stand-aggregation scenarios compared to forest-aggregation scenario	44
Tableau 5.1	Cut-block inventories	63
Tableau 5.2	Product specifications	64
Tableau 5.3	Comparison of the three solution approaches	65
Tableau 6.1	Comparison of the solution approaches	81
Tableau 6.2	Percentage change of Fix_Cap problem comparing to the Var_Cap one	83

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Processus d’approvisionnement dans un contexte à multi-commodités .	9
Figure 4.1	Framework of CTL-harvesting-based wood-procurement planning problem	27
Figure 4.2	Example of priority list and corresponding bucking patterns	30
Figure 4.3	Forest-aggregation bucking scenario (scenario 1)	36
Figure 4.4	Sector-aggregation bucking scenario (scenario 2)	37
Figure 4.5	Stand-level aggregation bucking scenario (scenario 3)	38
Figure 4.6	Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 1 . . .	41
Figure 4.7	Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 2 . . .	41
Figure 4.8	Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 3 . . .	42
Figure 5.1	Framework of the integrated multi-period wood procurement problem.	55
Figure 6.1	Total cost of fixed and variable harvesting capacity scenarios	82

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités

Les vastes forêts canadiennes font de l'industrie forestière une partie prenante dans l'économie du pays. Selon Ressources Naturelles Canada (2014), ce secteur figure parmi les cinq principaux acteurs contribuant aux échanges commerciaux nets du Canada. L'industrie forestière a réalisé par exemple 354 millions de dollars en 2009. Elle a aussi fait du Canada le deuxième plus important exportateur de produits forestiers bruts dans le monde. Cette importance exige du Canada une meilleure étude du contexte commercial dans lequel s'insère cette industrie. Un contexte caractérisé par une présence accrue des concurrents étrangers, de l'intérêt croissant porté à la protection de l'environnement et du déclin dans la demande de papier journal en Amérique du Nord. L'industrie canadienne est alors contrainte à réorienter son modèle d'affaires pour s'adapter à ces nouveaux défis.

Pour ce faire, l'accent est mis sur la consolidation des collaborations entre l'industrie et la recherche scientifique. Ainsi de nombreux travaux de recherche portant sur divers problèmes forestiers dans le contexte canadien sont menés. Dans plusieurs travaux, la recherche opérationnelle (RO) est de plus en plus utilisée dans le développement d'outils d'aide à la décision pour optimiser divers problèmes de l'industrie forestière afin d'augmenter les profits ou diminuer les coûts, tout en respectant les différentes contraintes du marché (Rönnqvist (2003), Björndala et al. (2012), Weintraub et al. (2006), Weintraub et al. (2007)). Nous décrivons dans ce qui suit certains problèmes classiques inhérents à cette industrie et l'utilisation de la RO pour les résoudre.

1.2 Les niveaux de planification dans la chaîne d'approvisionnement forestier

La planification de la chaîne d'approvisionnement en bois fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en foresterie. Pour une revue détaillée de ces travaux le lecteur est référé à D'Amours et al. (2008) et Shahi et al. (2013). Cette chaîne implique un nombre important d'opérations et de décisions qui peuvent être associées à trois catégories : la gestion de la forêt et la récolte, le transport et le routage ainsi que la planification de la production (Rönnqvist, 2003). Des efforts considérables sont déployés pour résoudre des problèmes des plus compliqués auxquels sont confrontés les planificateurs forestiers. Ces efforts sont soutenus par la percée des outils informatiques et les systèmes d'information géographique et le recours aux

techniques de la RO. Selon l’horizon de planification considéré, les problèmes associés à ces décisions appartiennent à des niveaux hiérarchiques différents : stratégique (à long terme), tactique (à moyen terme) et opérationnel (à court terme).

La planification stratégique s’étend sur des longues périodes. Elle porte sur des décisions telles que : la stabilité du flux des produits récoltés, la construction et la maintenance des routes, l’ouverture ou la fermeture des usines de bois ainsi que le choix de leurs processus d’investissements et de leurs politique de production. Parmi les progiciels commerciaux utilisés pour résoudre certains problèmes de cette famille, on cite FORPLAN au États Unis et FOLPI en nouvelle Zélande.

Sur le plan opérationnel, certains problèmes opérationnels sont traités tels que : le tri des billes et le séchage au niveau des scieries, les problèmes de routage et le problème de découpe pour les usines de pâte à papier. La génération de colonnes est souvent utilisée comme méthode de résolution. La planification opérationnelle s’étend sur des périodes relativement courtes.

Les décisions prises sur le plan tactique lient le stratégique à l’opérationnel. Elles assurent que les décisions stratégiques soient réalisables sur le plan opérationnel. La planification tactique couvre des durées moyennement longues. Elle s’intéresse par exemple aux choix des zones à couper et aux équipements requis pour le faire ainsi qu’à l’estimation des budgets annuels. Pour résoudre les problèmes de planification tactique, plusieurs compagnies au Chili, par exemple, utilisent les progiciels PLANEX et OPTICORT. La programmation mathématique en nombres entiers est aussi souvent utilisée pour modéliser ces problèmes.

Le sujet de cette thèse s’insère à mi-chemin entre la planification tactique et opérationnelle.

1.3 FPInnovations

FPInnovations est l’un des plus importants instituts à but non lucratif au monde qui œuvrent en foresterie. Il a été créé en 2007 suite à la fusion de quatre institutions : le centre canadien sur la fibre de bois (*CCFB*), l’institut canadien de recherches sur les pâtes et papiers (*PAPRICAN*), l’institut national de recherche sur les produits du bois au Canada (*FORINTEK*) et l’institut canadien de recherches en génie forestier (*FERIC*).

CCFB a pour vocation de promouvoir l’industrie du bois en misant sur les fibres ligneuses. *PAPRICAN* est un institut qui mène des programmes de recherche visant à développer des technologies de grande valeur qui répondent aux besoins de l’industrie des pâtes et papiers. *FORINTEK* a été créé en 1915, suite à une entente entre différents partenaires industriels et les gouvernements provinciaux. Il a pour vocation d’optimiser les procédés de fabrication et augmenter la valeur de la matière première. Actuellement, il compte environ 170 profession-

nels reconnus à l'échelle internationale pour leurs réalisations. Et finalement, *FERIC* a été créé en 1975 afin d'améliorer et d'optimiser les opérations forestières canadiennes au profit de ses différents partenaires industriels et gouvernementaux. En conformité avec la vocation de FPInnovations, la définition des problèmes et les données associées à cette thèse sont fournies par le bureau de FPInnovations à Montréal suite à plusieurs rencontres avec M. Jean Favreau et M. Sébatien Lacroix au début du projet.

1.4 Description du problème

Dans le contexte forestier, un planificateur doit coordonner une multitude d'activités dans le temps et l'espace afin de livrer les produits demandés aux bons endroits et aux moments adéquats. Pour ce faire, il a souvent recours à des outils d'aide à la décision. À l'est du Canada, l'utilisation de ces outils est très restreinte voire même inexistante. La planification est souvent faite manuellement par un ensemble d'experts et révisée à plusieurs reprises au cours de l'horizon. Ceci nous a motivés pour élaborer un outil d'aide à la décision afin d'assister les gestionnaires et les planificateurs forestiers.

Le problème considéré dans cette thèse et tel que défini par FPInnovations a plusieurs spécificités. Certaines l'ont facilité par rapport aux autres variantes des problèmes d'approvisionnement en bois, d'autres l'ont compliqué. Dans notre étude, nous considérons plusieurs usines de bois appartenant à une même entreprise forestière mère, chacune avec sa demande exprimée en volume de bois de différents types. Il s'agit d'une planification centralisée où l'entreprise gère ses propres opérations de récolte ainsi que l'approvisionnement de ses différentes usines de bois. Le problème consiste à satisfaire les demandes des usines, en minimisant non seulement le coût de récolte de plusieurs sites forestiers mais aussi le coût de stockage et le coût de transport direct (pas de retour en charge) entre ces usines et ces sites. Les usines peuvent être approvisionnées à partir de tous les sites forestiers. Nous détaillons dans ce qui suit les principales composantes du système d'approvisionnement sous étude.

La forêt : La majorité des contraintes du problème traduisent la réalité du terrain du contexte forestier de l'est canadien tel que décrit par FPInnovations. Dans cette étude, le domaine forestier est divisé en unités territoriales de tailles variables. Ces unités sont divisées en sous unités qui contiennent divers zones de coupe. Toutes les activités de récolte se font au niveau de ces sous-unités, que nous appellerons sites forestiers. Ces sites sont tous mixtes mais varient en termes de superficie et composition. Certains sont beaucoup plus larges que d'autres et ils peuvent être assimilés à des districts dans certains travaux de la littérature et d'autres sont moins larges et ressemblent plus à des blocs. Les diamètres des arbres présentent une très grande variation. Certains sites voisins sont regroupés en des unités territoriales beaucoup

plus larges que nous appellons secteurs. Ces secteurs sont prédéfinis par FPInnovations. En outre, l'ensemble des sites forestiers à récolter et des secteurs, ainsi que leurs propriétés sont connus en début de l'horizon de la planification. L'ensemble des sites à récolter au cours de l'année est déterminé suite à une planification antérieure. Nous considérons aussi que tous les sites sont accessibles via un réseau de chemins.

La récolte : Nous étudions un système de récolte en bois court entièrement mécanisé. Ce système comprend l'abattage, l'ébranchage et le tronçonnage des arbres en forêt par des équipements mécaniques appelés les abatteuses. Le débardage des billes vers la jetée est fait à l'aide d'un porteur de bois court. Les arbres arrivent ainsi tronçonnés en bordure du chemin forestier. Ils peuvent ensuite être chargés par des chargeuses sur des camions et transportés vers les différentes usines.

Le coût de récolte considéré dans cette thèse comprend la manipulation, le tronçonnage et le tri. Il varie non linéairement avec le nombre de produits à obtenir d'un site. Considérer le nombre de produits obtenus dans un site dans le calcul du coût de récolte est un aspect pratique très important dans la gestion des opérations de récolte et très peu considéré pour ce type de problème. À notre connaissance, Chauhan et al. (2009a) sont les seuls à dresser cet aspect pour des problèmes similaires mais ils ne l'ont pas considéré directement dans le calcul du coût de récolte. Les instructions de tronçonnage ne sont pas déterminées au cours de la récolte par des algorithmes de tronçonnages installés dans les ordinateurs à bord des abatteuses. Elles sont plutôt communiquées aux opérateurs des abatteuses qui les téléchargent avant le début de la récolte de chaque site forestier.

Le transport : Nous considérons que les activités de transport représentent le flot de volume de bois entre les sources (les sites forestiers) et les destinations (les usines de bois). Tous les détails portant sur le routage et la gestion de la flotte des camions ne sont pas traités dans cette thèse.

Le stockage : Une partie des billes récoltées est acheminée vers les usines de bois pour être utilisée ou stockée dans les cours si la demande est satisfaite, alors que le reste est gardé sur les bordures des chemins forestiers. Le coût de stockage en forêt est en effet une pénalité due à la détérioration de la qualité des billes. Cette détérioration est beaucoup plus importante en été qu'en hiver. Il n'y a pas de limite sur la capacité de stockage en forêt mais il est préférable de ne pas garder des volumes importants en bordures de routes pour faciliter le déplacement des équipements. Aucun échange de stock n'est permis entre les différentes usines et chaque usine a sa propre capacité de stockage. Le coût de stockage en usines dépend aussi des périodes.

Pour la première variante mono-périodique, tout le bois récolté doit être transporté vers les usines.

Problématique : La planification des activités d’approvisionnement en bois est étroitement liée au problème de tronçonnage d’arbres. En effet, les types et les quantités de produits à tronçonner doivent obligatoirement répondre, à moindre coût (coût de récolte, coût de transport, coût de stockage. . . , etc.), aux besoins des usines forestières. Donc, les décisions prises lors de la récolte vont directement affecter les activités d’approvisionnement et l’anticipation des demandes affecte aussi le déroulement des activités de tronçonnage. La problématique de recherche principale posée dans cette thèse est de comment considérer ces problèmes inter-reliés dans un même problème d’approvisionnement forestier intégré et l’optimiser, afin de supporter les planificateurs forestiers et leur donner un outil d’aide à la décision concret et adapté à leurs besoins.

1.5 Approches de résolution

Nous proposons trois modèles différents pour résoudre un problème d’approvisionnement forestier intégré, où nous synchronisons plusieurs activités de la chaîne logistique du bois, pour minimiser les coûts opérationnels de la récolte, du transport et du stockage.

Dans le premier modèle, nous considérons une planification annuelle mono-périodique. Nous considérons aussi une formulation empirique non linéaire du coût de récolte, qui dépend du nombre de produits différents obtenus dans une zone de coupe. Nous proposons alors, une linéarisation du modèle qui consiste en un modèle mixte en nombres entiers avec une approximation du coût de récolte. Pour valider l’approximation, nous comparons les coûts de récolte réels et approximatifs des différents tests effectués. Ensuite, nous élaborons deux nouveaux scénarios de récolte, en ajoutant au modèle des contraintes propres à chaque scénario, que nous comparons au scénario courant. Ces scénarios définissent de nouvelles structures portant sur la désagrégation des affectations des listes de tronçonnage aux secteurs et sites forestiers. Le meilleur scénario de récolte obtenu ainsi que l’approximation du coût de récolte sont utilisés lors de la modélisation des variantes multi-périodiques du problème.

Ensuite, nous étudions une planification multi-périodique qui considère les variations de la demande et de l’offre au cours des différentes périodes mensuelles de l’année. Dans cette partie, des décisions sur le séquençement de la récolte des sites forestiers dans le temps s’ajoutent aux décisions d’approvisionnement considérées dans le premier modèle. Nous considérons cinq capacités de récolte associées à un nombre et un type d’équipements utilisés. Nous associons à chaque site forestier un ensemble de plans de récolte obtenus en utilisant chacune de ces capacités. Chaque capacité est maintenue fixe tout au long de la récolte et génère un seul

plan de récolte par site. Si deux capacités engendrent le même plan, on garde celui dont la capacité est la plus petite.

En plus, nous abordons plus en détails la question de la gestion du stock et le flot du bois qui dépend des périodes. Alors que dans le premier modèle, tout ce qui est récolté doit être transporté aux usines, dans la présente variante, il est possible de garder du stock en forêt ou dans les usines. Il est aussi possible d’avoir des périodes d’inaccessibilité où il est impossible de transporter ou de récolter du bois. Pour résoudre ce modèle, nous testons l’approche explicite en résolvant le modèle directement avec Cplex. Cette approche génère des temps de calcul importants et n’arrive pas parfois à résoudre certains exemplaires au bout de 24 heures. Nous remarquons aussi que la majorité des efforts de calcul est déployée pour trouver un ordonnancement de la récolte des sites forestiers dans le temps, ce qui nous a motivé à développer une deuxième approche qui consiste à relaxer les variables qui portent sur cet aspect puis fixer certaines d’entre elles dans un deuxième temps pour réoptimiser le modèle. Cette approche permet d’améliorer les résultats. Cependant, il existe toujours des instances non résolues au bout de 24 heures. Pour réduire encore les temps de calcul, nous développons un algorithme glouton qui porte sur la génération d’un ordonnancement de la récolte des sites forestiers dans le temps. Cet ordonnancement doit satisfaire certaines contraintes comme le nombre maximum de sites à récolter par période ainsi que la contrainte sur la capacité de récolte mensuelle. La troisième approche permet de réduire les temps de calcul mais la réduction dépend de la capacité de Cplex à trouver une solution initiale au problème à partir de cet ordonnancement initial. Ce qui n’est pas possible pour toutes les instances.

En outre, nous proposons une autre approche de résolution pour une variante multi-périodique du problème, plus complexe et qui s’étend sur un horizon plus large. Dans cette variante, nous discrétisons l’année en des périodes de deux semaines pour mettre plus l’accent sur l’échange du flot de matière entre elles. Puis, nous étudions une nouvelle forme de flexibilité permettant de varier la capacité de récolte allouée à chaque site pour en faire une variable du modèle. Nous comparons les résultats des modèles avec récolte à capacité fixe et celle variable. Pour résoudre cette variante, nous développons une méthode hybride combinant la programmation par contraintes (PPC) et la programmation linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE). Cette approche vise à tirer profit des avantages des deux techniques. La PPC a prouvé son efficacité quant à la modélisation et résolution de plusieurs variantes de problèmes combinatoires d’ordonnancement. La solution de la PPC modélise tous les détails de la récolte à savoir : l’ordonnancement de la récolte des sites dans le temps et l’allocation des listes de tronçonnages aux différentes espèces. Certaines contraintes et coûts non linéaires sont facilement modélisables avec la PPC. Cette solution est communiquée au

modèle linéaire mixte en nombres entiers (MLMNE) comme solution initiale partielle pour faciliter la recherche d’une solution de bonne qualité au problème entier.

Finalement, dans les trois modèles, nous utilisons la même définition et approche de tronçonnage. Il s’agit d’une approche basée sur les listes de priorités. Une liste de priorité est définie comme une séquence de billes ordonnées selon l’importance de leurs valeurs commerciales définies par l’entreprise forestière. Ces listes se génèrent selon des règles heuristiques simples. Les volumes des différentes billes obtenues suite à l’utilisation de ces listes sur l’inventaire forestier s’obtiennent en effectuant des simulations avec le simulateur FPInterface, un outil propre à FPInnovations. Pour faire ces simulations, nous utilisons comme données la distribution de tiges par essence et par site, ainsi que des tiges numérisées qui couvrent la distribution des tiges de l’inventaire forestier. Ces données nous sont aussi fournies par FPInnovations.

1.6 Plan du mémoire

Cette thèse est organisée en sept chapitres. Le premier chapitre traite du contexte forestier canadien dans lequel s’insère cette thèse. Il présente une description du problème étudié, de la problématique de recherche ainsi que les différentes approches développées pour la résoudre. Dans le chapitre 2, une revue détaillée de la littérature concernant la chaîne logistique de bois et certains problèmes qui lui sont associés est présentée. Le chapitre 3 permet d’introduire les trois contributions principales élaborées dans le cadre de cette thèse, qui sont présentées et décrites en détails dans les chapitres 4, 5 et 6 respectivement. Le dernier chapitre présente la synthèse des différentes contributions et l’analyse de leurs limites, ainsi que les perspectives de recherche en rapport avec ce problème.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Nous présentons dans ce chapitre une revue de la littérature portant sur les différents aspects qui permettent de mettre cette thèse dans son contexte. En effet, la planification de la chaîne d’approvisionnement de bois fait l’objet de plusieurs travaux de recherche en foresterie. Le recours aux différentes techniques d’optimisation est d’une importance capitale dans le développement d’outils d’aide à la décision pour résoudre divers problèmes de l’industrie forestière (Rönnqvist, 2003). Un résumé récent sur l’utilisation de ces techniques dans plusieurs problèmes de la chaîne logistique du bois est présenté par Shahi et al. (2013). La majorité de ces travaux traitent certaines des activités de la chaîne logistique forestière séparément. Nous pouvons distinguer, horizontalement, deux catégories principales d’études : celles qui se penchent sur la gestion des activités forestières (la source) telles que l’optimisation de la récolte (voir Öhman et al. (2005), Borges et al. (2014), Shan et al. (2009)) et celles qui s’occupent plus de la gestion des usines de bois (la destination) comme l’étude de Todoroki et al. (2002) et de Bergman et al. (2002). Selon l’horizon de planification considéré, ces travaux peuvent aussi être classés, verticalement, en problèmes stratégiques, tactiques ou opérationnels.

Intégrer différents problèmes verticalement ou horizontalement s’avère primordial pour optimiser la chaîne logistique du bois depuis la forêt jusqu’aux usines, même si ceci augmente la complexité des problèmes (D’Amours et al., 2008). Dans cette thèse, on entend par approvisionnement forestier ou approvisionnement en bois, un système permettant de produire et livrer la matière ligneuse aux usines de transformation. Ce système inclut une série d’activités interdépendantes telles que : le tronçonnage, l’allocation des billes aux usines, le transport et la gestion de l’inventaire (voir Fig. 2.1).

2.1 Problèmes de tronçonnage

Pour être industrialisés, les arbres abattus doivent être convertis en des segments de bois de plus petites longueurs ; les billes. Cette opération s’appelle ”le tronçonnage des arbres”. C’est l’une des plus importantes opérations dans la chaîne logistique de l’exploitation forestière (Usenius, 1986). En effet, les billes obtenues suite au tronçonnage déterminent la qualité du produit final. De plus, les pertes causées par un mauvais tronçonnage ne sont pas récupérables au cours des stades ultérieurs de la production. Le tronçonnage peut être effectué directement

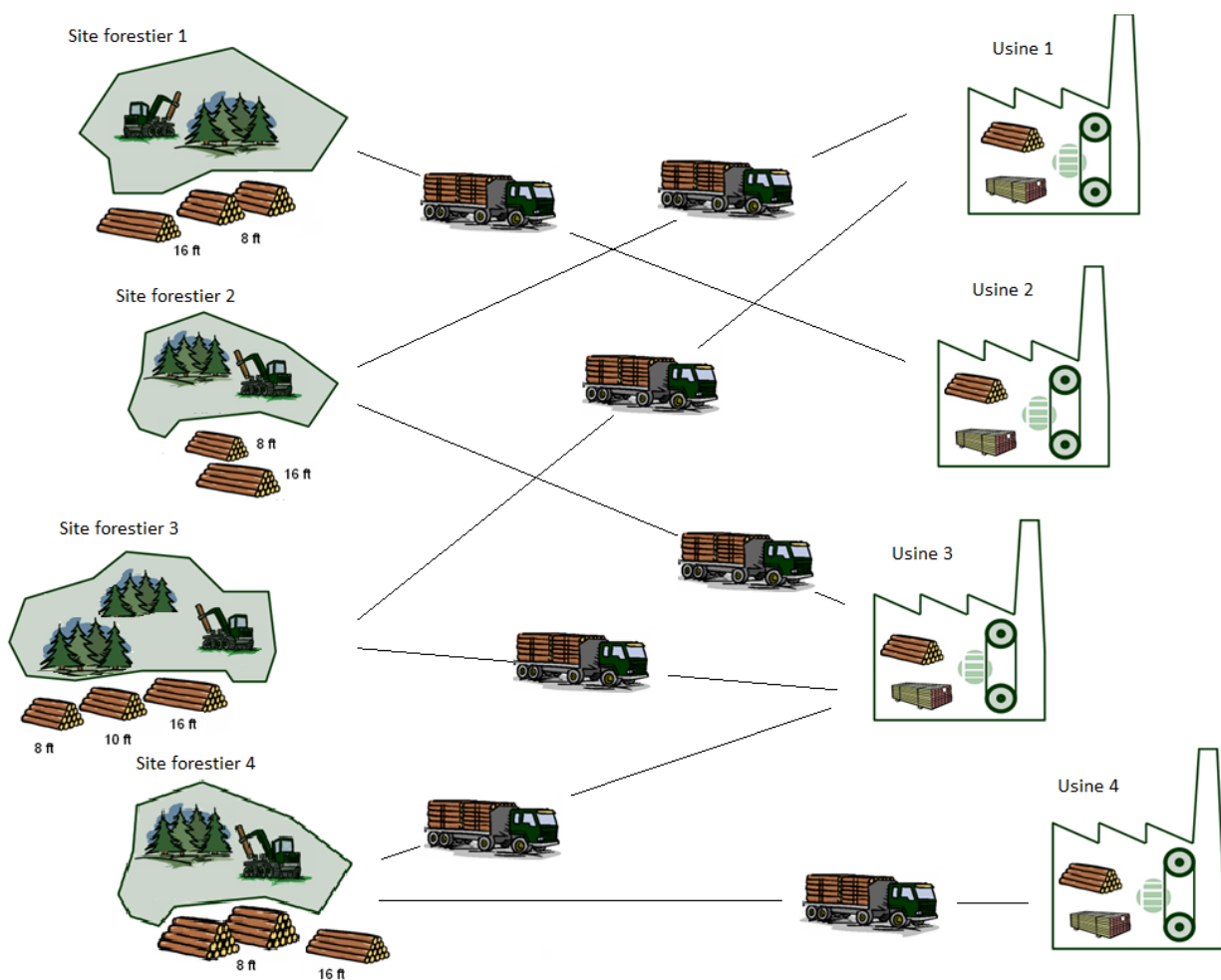


Figure 2.1 Processus d'approvisionnement dans un contexte à multi-commodités

en forêt (en bois court) ou en usine. Laroze (1999) distingue trois types de problème : le tronçonnage d'un arbre, d'un ensemble d'arbres d'une zone de coupe et finalement de plusieurs zones de coupe d'une forêt.

2.1.1 Problèmes de tronçonnage d'un arbre

Beaucoup de travaux de recherche ont porté sur la manière optimale de couper un tronc d'arbre afin de minimiser les pertes ou maximiser la valeur d'un tronc associée au profit engendré par la vente des produits finaux ou des billes obtenues du tronc. La majorité des modèles développés pour résoudre ce problème sont basés sur la programmation dynamique. La première formulation détaillée de ce problème a été introduite par Pnevmticos et al. (1972). D'autres modèles plus récents et basés sur la même technique ont été proposés par Grondin (1998). Une autre approche de modélisation, basée sur la théorie des graphes et réseaux, a été proposée par plusieurs chercheurs comme Sessions et al. (2005) ainsi que Wang et al. (2004).

2.1.2 Problèmes de tronçonnage d'une seule zone de coupe

Tandis que les travaux portant sur le tronçonnage d'un arbre sont nombreux, moins nombreux sont ceux qui portent sur le tronçonnage d'un ensemble d'arbres. Ces problèmes visent à trouver un plan de tronçonnage optimal applicable à une zone de coupe entière (bloc). Ils considèrent aussi bien les ressources disponibles que la demande des clients. L'objectif étant en général de maximiser la valeur de la production d'une zone de coupe entière ou minimiser les pertes, tout en satisfaisant la demande en bois. Dans ces problèmes, les patrons de tronçonnage sont souvent appliqués à chaque classe d'arbre. Une classe d'arbres est un ensemble d'arbres présentant une combinaison spécifique d'attributs comme l'âge et le diamètre fin bout. Des restrictions de certains marchés de bois sur la production et les caractéristiques des zones de coupe sont à considérer. Généralement, les décisions de tronçonnage d'une zone de coupe ne dépendent pas des décisions sur les autres zones.

La complexité de ces problèmes, comparés aux problèmes de tronçonnage d'un seul tronc d'arbre, provient de la diversité des classes d'arbres dans une zone donnée et de leurs densités parfois mal connues. Ce type de problème est souvent décomposé en deux parties : un problème maître qui porte sur le choix des patrons à utiliser dans chaque bloc de coupe et un sous problème qui porte sur la résolution du problème de tronçonnage d'un seul arbre.

Laroze et al. (1997) ont développé une méthode visant à maximiser le profit total engendré par la récolte d'une zone de coupe tout en respectant la demande d'un seul client. Ils ont utilisé un algorithme glouton pour générer un patron de coupe pour chaque classe d'arbres.

Une classe d'arbre est déterminée par une combinaison de trois attributs : le diamètre, le diamètre minimum au fin bout (DMFB) et la qualité. Ils ont appliqué une recherche tabou (RT) pour générer des règles de tronçonnage. Une règle de tronçonnage consiste en une liste de priorité et un ensemble de trois attributs : le DMFB, l'intervalle acceptable de qualité et le nombre maximum de billes d'un type donné pouvant être obtenu d'un arbre. Elle est définie pour chaque type de billes mais appliquée à toutes les classes d'arbres. Ces règles sont utilisées dans l'algorithme glouton pour toutes les classes d'arbres afin de générer un patron pour chacune. Les résultats de la méthode développée, comparée à la méthode exacte basée sur la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) et présentée par le même auteur, montrent que :

- le nombre de solutions réalisables diminue quand le marché devient plus restrictif, le résultat de la méthode exacte est meilleur que celui de la méthode basée sur la RT pour les marchés restrictifs, vu que la PLNE choisit parmi un ensemble de patrons de tronçonnage pour chaque zone de coupe alors que la RT ne considère qu'un seul patron par classe d'arbres ;
- la moyenne des profits générés par la RT est inférieure à 2,4% par rapport au profit généré par la méthode exacte pour des conditions de base du marché alors qu'elle atteint 3,8% dans des conditions où le prix du bois destiné à l'exportation augmente considérablement.

Bien que les profits générés par cette méthode soient assez proches de ceux obtenus par la méthode exacte, elle présente certaines limites. En effet, l'étude considère des restrictions imposées par le marché japonais qui sont réelles mais relativement simples. En outre, elle porte sur une population de pin homogène seulement.

Kivinen et al. (2002) ont introduit un système de contrôle basé sur la logique floue permettant d'ajuster la liste des prix dans les abatteuses modernes avant l'abattage des arbres d'une zone de coupe. En effet, dans les abatteuses modernes utilisées dans le contexte forestier de la majorité des pays scandinaves, le tronçonnage des arbres est effectué selon une liste des prix permettant de favoriser la découpe de certaines classes de billes où certaines combinaisons longueur-diamètre et certaines catégories comme le bois de sciage et le bois à pâte [bucking-to-value]. Le tronçonnage est aussi contrôlé par l'ajustement en ligne de la liste des prix selon la proportion de la demande satisfaite d'une catégorie définie de billes [bucking-to-demand].

Même si cette dernière approche a prouvé son efficacité, l'abatteuse doit couper des dizaines d'arbres avant que l'ajustement de la liste des prix commence. Ainsi, il est plus judicieux de régler minutieusement la liste des prix avant le début de l'abattage. L'étude porte aussi sur le contrôle de la liste des prix d'un seul type de billes qui est le bois de sciage.

Plusieurs catégories de billes sont considérées pour chaque diamètre et longueur. Les résultats des tests effectués par les auteurs montrent une amélioration de la concordance entre la distribution obtenue et demandée notamment en utilisant des données exactes sur les profils des arbres, puis en utilisant l'approche bucking-to-demand.

2.1.3 Problèmes de tronçonnage de plusieurs zones de coupe simultanément

Le but de la résolution des problèmes de tronçonnage d'une forêt est généralement d'assigner à chaque zone de coupe, un plan de tronçonnage. Ce plan vise à maximiser la valeur de la production totale (profit) en considérant des contraintes sur la demande et des caractéristiques de chaque zone de coupe. Laroze (1999) a introduit une approche hiérarchique basée sur la méthode présentée dans Laroze et al. (1997) pour résoudre le sous problème et sur la programmation linéaire pour résoudre le problème maître. Le sous problème permet de générer des règles de tronçonnage applicables à chaque zone de coupe, pour chaque restriction de marché, tandis que le problème maître détermine l'allocation des types de billes aux zones, autrement dit, quelles règles de tronçonnage faut-il appliquer à chaque aire d'une zone de coupe. Il suppose que toutes les zones de coupe peuvent être récoltées simultanément. Dans son étude, l'auteur considère la demande d'un seul marché d'exportation à satisfaire. Il vise à maximiser le profit net en considérant les coûts de récolte seulement.

Kivinen (2004) a présenté une extension du travail de Kivinen et al. (2002). L'objectif de cette étude est de chercher une matrice de prix spécifique à chaque zone de coupe. Sachant que l'approche traditionnelle était d'appliquer la même matrice de prix à toutes les zones de coupe même si ces zones présentent des caractéristiques d'arbres différentes, cette étude a validé l'hypothèse que contrôler ces matrices avant le tronçonnage permet d'améliorer le résultat de tronçonnage d'un ensemble de zones de coupe d'une forêt. L'auteur a supposé connus la demande totale d'un seul type de billes qui est le bois de sciage de qualité standard et les profils des arbres de chaque zone de coupe. Il a rapporté que le précontrôle des matrices de prix n'engendrait pas d'amélioration considérable du degré de concordance entre la distribution des demandes obtenue et celle demandée.

Comme l'ont mentionné Laroze et al. (1997), les approches exactes qui existent génèrent un très grand nombre de patrons par bloc. Ces patrons sont généralement complexes et très difficiles à mettre en œuvre par les opérateurs des abatteuses surtout si les ordinateurs à bord des abatteuses ne disposent pas d'algorithmes de tronçonnage définies pour les différentes classes d'arbres dans les blocs, ce qui est le cas au Québec. Par ailleurs, la majorité des approches qui garantissent des patrons faciles à implémenter, donnent des résultats loin de l'optimalité. D'où le besoin de recourir à des techniques d'optimisation plus avancées comme les métaheuristiques. L'approche élaborée par Laroze et al. (1997) basée sur la recherche

tabou a donné des résultats proches de l’optimalité, tout en générant des patrons simples à exécuter. Elle présente ce pendant certaines limites :

- Les auteurs considèrent des blocs de coupe homogènes contenant une seule espèce d’arbres ;
- Ils considèrent des contraintes de marché relativement simples ;
- Leur méthode génère un grand nombre de patrons par bloc ;
- Ils ne limitent pas le nombre de produits par bloc.

Ceci nous pousse à développer une méthode qui non seulement tient compte de ces points (surtout le 3ème et 4ème points qui ont un impact important sur la productivité) mais aussi qui répond aux besoins des compagnies forestières Québécoises en prenant en considération leurs exigences et les technologies dont elles disposent.

Les problèmes qui intègrent les activités d’approvisionnement en plus du tronçonnage de plusieurs zones de coupe d’une forêt sont moins étudiés que les deux précédents. Ils visent à maximiser le profit des compagnies forestières, tout en minimisant les coûts de la récolte et de l’approvisionnement tout en répondant à la demande du marché de bois.

2.2 Le transport en foresterie

Le transport est un élément essentiel dans la chaîne logistique forestière. Il joue un rôle fondamental dans le calcul des coûts d’approvisionnement puisqu’il lie l’offre à la demande. En effet, une meilleure synchronisation du transport à la récolte engendre moins de coûts de stockage et des commandes satisfaites à temps. Il permet une allocation optimale des zones de coupe aux usines. Il est ainsi judicieux d’intégrer la planification des activités de transport dans la planification des activités de gestion de la forêt.

En foresterie, plusieurs moyens de transport sont utilisés : les camions, les trains, les bateaux..., etc. Les camions sont toujours utilisés en première étape pour transporter les billes directement vers les clients ou indirectement vers les entrepôts de stockage, les terminus ferroviaires ou les ports. Dépendamment de la qualité de la matière première de bois, les billes à pâte sont transportées vers les usines de pâte et les usines de papier, les billes de sciage vers les scieries et le bois à usage énergétique vers les installations de chauffage (Epstein et al., 2007). De plus, le bois de sciage et d’autres produits finaux en bois sont distribués entre le marché local et les marchés internationaux. Différents types de camions sont utilisés en fonction du type de bois à transporter, de la politique des compagnies et des conditions opérationnelles.

Les produits forestiers sont transportés par des camions à travers un large éventail de routes provinciales et forestières au Canada. Dans la majorité des cas, un camion chargé

transporte directement sa charge d'un point d'origine à un point de destination sans être divisée en cours de route : on parle de transport en charges complètes (Gingras et al., 2002). La gestion du transport est souvent décentralisée, c'est-à-dire, chaque compagnie forestière organise ses activités de transport. Dans un cadre plus décentralisé, plusieurs gestionnaires de transport, chacun responsable d'une région donnée, déterminent la quantité à transporter des bords des routes aux différentes usines. Le transport a fait l'objet de plusieurs études. Certaines portant sur la planification d'horaire de camions sont conçues avant le début de l'activité de transport, d'autres sont élaborées en temps réel, au fur et à mesure qu'on avance dans le temps jusqu'à la fin des tâches assignées. En forêt, les camions doivent d'abord attendre le bois livré par les débardeurs pour le transporter des bords des chemins vers les usines.

Bredström et al. (2008) ont proposé un modèle mathématique qui gère la tournée et les horaires des véhicules incluant des contraintes de précédence ou de synchronisation. Au Canada, Gingras et al. (2007) ont développé une heuristique appelée MaxTour qui génère des tournées en combinant des voyages tout en minimisant le temps parcouru à vide par les camions. El Hachemi et al. (2011) se sont intéressés au problème d'ordonnancement journalier du transport entre les sites forestiers et les usines ainsi qu'au routage de la flotte de camions utilisés. Ils ont proposé une méthode hybride combinant la PLNE et la programmation par contraintes (PPC) : la PLNE modélise la circulation des camions par un modèle de flot à coût minimum. La solution optimale obtenue est communiquée par la suite à la PPC qui gère l'ordonnancement des activités associées au chargement et déchargement incluant les contraintes de synchronisation entre les chargeuses et les camions. L'objectif est alors de minimiser les coûts d'attente. Dans cette thèse, nous considérons un transport direct afin d'optimiser l'allocation des billes entre les sites forestiers et les usines. Tous les détails portant sur le routage et la gestion de la flotte des camions ne font pas l'objet de cette thèse.

2.3 Problèmes d'approvisionnement forestier

Le système complet de l'approvisionnement forestier couvre toutes les activités permettant d'approvisionner les usines de bois à partir des sites forestiers. D'une manière générale, le problème d'approvisionnement comprend ces activités interdépendantes : la construction de routes, la récolte, le tronçonnage, le tri, le transport et la gestion des stocks. La séquence et l'ordre selon lequel ces activités se produisent ainsi que le nombre d'activités à intégrer peuvent varier en fonction du système de production, du contexte de l'étude et des objectifs visés par la recherche.

Arce et al. (2002) ont proposé un modèle linéaire en nombres entiers pour un problème

d'approvisionnement intégrant le tronçonnage et le transport seulement. L'objectif étant de maximiser la somme des profits nets. Selon leur approche, le transport est implicitement considéré puisque l'allocation des produits aux usines est fixée au préalable. Leur approche permet d'éviter de transporter une petite quantité de bois vers une usine lointaine de la zone de coupe, ce qui minimise les coûts de transport et augmente le profit de l'entreprise forestière. Des contraintes sur la satisfaction des demandes, la borne supérieure sur le nombre de types de billes à tronçonner dans chaque zone et le volume maximum de chaque produit à tronçonner de chaque zone sont imposées. Pour générer les patrons de tronçonnage des règles heuristiques simples sont utilisées.

Chauhan et al. (2009a) ont proposé un plan d'approvisionnement à très court terme (une semaine), contrôlé par la demande des clients afin de mieux synchroniser les activités de récolte et de transport. Ils ont présenté une extension du travail proposé par Chauhan et al. (2009), où des données détaillées sur la distribution des essences d'arbres et leurs diamètres sont considérées. L'objectif étant de minimiser les coûts de transport et de récolte pour approvisionner des usines à partir de différentes zones de coupe. Ils ont utilisé une simplification de la réalité du processus de tronçonnage (bulk-process-based bucking) pour calculer le volume approximatif des différentes billes obtenues. À notre connaissance, ils sont les premiers à intégrer l'effet de l'augmentation du nombre de produits différents (types de billes) dans le calcul du coût de récolte.

Les problèmes présentés ci-dessus considèrent une planification mono-périodique qui ne tient pas compte de la saisonnalité. Il n'est donc pas possible d'analyser l'impact des variations temporelles comme la variation des conditions météorologiques sur les intrants tels que la demande, le flux des billes à partir des blocs de coupe et le stock. En outre, la planification mono-périodique suppose qu'il est possible de mélanger les billes provenant de différents blocs de coupe, car ces derniers peuvent être récoltés en même temps. Toutefois, en réalité, il y'a des restrictions spatiales et temporelles sur le nombre de blocs de coupe qui peuvent être récoltés à une période donnée. Pour considérer ces aspects, certains problèmes ont porté sur une planification multi-périodique des approvisionnements forestiers.

Epstein et al. (1999) ont traité un problème d'approvisionnement forestier multi-périodique, intégrant l'ordonnancement de la récolte des blocs de coupe dans le temps, les activités de tronçonnage et de transport. La méthode développée repose sur une technique de décomposition où les patrons de tronçonnage sont générés dans le sous-problème et inclus dans le problème maître au cours du processus d'optimisation. Comme rapportés par de nombreux auteurs, cette approche de décomposition est efficace et théoriquement correcte (Laroze (1993), Sessions et al. (1989)). Cependant, elle est difficile à mettre en œuvre sur le plan pratique à cause de la génération d'un grand nombre d'instructions de tronçonnage et de la

difficulté de subdiviser les arbres en différentes classes, surtout si les blocs sont hétérogènes comme c'est le cas dans le problème étudié dans cette thèse.

Karlsson et al. (2003) ont proposé un modèle linéaire mixte en nombre entiers (MLNEM) pour un problème d'approvisionnement forestier qui porte sur la planification du transport, l'ordonnancement des équipes de travail et l'entretien routier annuel d'une compagnie forestière possédant plusieurs usines. Dans ce problème opérationnel, le problème de tronçonnage n'est pas considéré parce que les instructions de coupe sont des décisions en temps réel fournies par les ordinateurs à bord des abbatteuses. L'objectif est de satisfaire la demande de différentes usines à moindre coût.

Bredström et al. (2010) ont présenté un MLMNE étroitement lié à celui de Karlsson et al. (2003). Le modèle gère l'affectation des machines et des équipes de récolte aux blocs de coupe ainsi que l'ordonnancement des blocs de coupe durant une année. L'approche de résolution en deux phases résout d'abord l'affectation des équipes aux blocs puis considère l'ordonnancement des blocs.

Carlsson et al. (2005) ont décrit en détail la chaîne d'approvisionnement propre à une importante compagnie forestière suédoise œuvrant dans l'industrie des pâtes et papiers, "Södra Cell AB". "Södra Cell AB" est l'un des principaux fabricants mondiaux de pâte à papier. Elle produit deux millions de tonnes de pâte par an et approvisionne une grande partie des usines européennes de papier. Sa chaîne logistique est parmi les plus larges et les plus difficiles à étudier. À travers leur étude, les auteurs ont proposé un aperçu général de la gestion de la chaîne d'approvisionnement dans l'industrie des pâtes et papiers en foresterie.

En étudiant les travaux qui ont porté sur la planification des approvisionnements forestiers, nous nous apercevons que chaque problème s'est focalisé sur certains aspects particuliers de la chaîne logistique forestière. Certains se sont penchés sur la première partie comme Bredström et al. (2010) qui porte sur le cheminement du bois des sites forestiers aux premières destinations. D'autres se sont intéressés à la deuxième partie portant sur son cheminement des usines de bois aux clients comme Gunnarsson et al. (2006). Nous remarquons aussi que chaque étude a porté sur un aspect différent de la chaîne logistique forestière. Les problèmes traités reflètent généralement les spécificités de leurs contextes d'études.

Les discussions avec notre partenaire industriel ont mené à orienter notre étude sur les activités incluses dans la première partie de la chaîne logistique. Le problème tel que décrit par FPInnovations présente certaines particularités. À notre connaissance, il s'agit de la première étude qui considère un coût de récolte non linéaire qui tient compte explicitement du nombre de produits différents obtenus dans une zone de coupe suite à la récolte. Le problème étudié intègre aussi un nombre considérable d'activités à synchroniser dont la principale est le tronçonnage. Une activité rarement associée à d'autres dans un système d'approvisionnement

forestier aussi complexe. Dans cette thèse, nous nous ne limitons pas à améliorer les méthodes actuelles de planification, nous concevons aussi certains scénarios futurs qui pourront aider les planificateurs forestiers.

CHAPITRE 3

ORGANISATION DE LA THÈSE

Comme le montre la revue de la littérature, les problèmes d’approvisionnement forestier varient beaucoup selon les régions et diffèrent selon le contexte dans lequel ils s’insèrent. La contribution principale de cette thèse est de proposer des approches qui résolvent plusieurs variantes du problème d’approvisionnement forestier très intégrateur, dans le contexte est canadien, pour aider les compagnies forestières dans leurs planifications. De tels problèmes induisent généralement des modèles de très grandes tailles et difficiles à résoudre.

Le premier objectif de cette thèse est de proposer des modèles explicites qui captent toutes les difficultés liées aux contraintes opérationnelles spécifiées par FPInnovations. Ces modèles doivent néanmoins garantir de bonnes solutions en des temps de calcul raisonnables. Le deuxième objectif est de proposer et comparer certaines approches de résolution pour différentes instances. Un troisième objectif, est de proposer et modéliser de nouvelles alternatives relatives aux opérations de récolte, puis d’étudier leur impact sur le coût total. Ces nouveaux scénarios peuvent s’avérer très utiles dans le processus d’aide à la décision. Cette thèse comporte trois chapitres principaux.

Le quatrième chapitre porte sur la première contribution de cette thèse, élaborée dans l’article Dems et al. (2013) publié dans la revue internationale *Annals of Operations Research* en 2013. La première partie de ce travail est aussi publiée dans le compte-rendu de la conférence internationale COFE en 2011. Dans ce chapitre, nous traitons un problème de planification annuelle, mono-périodique des approvisionnements forestiers. Nous nous penchons sur la question de tronçonnage d’arbres dans une forêt, en présentant une approche pratique et détaillée basée sur les listes de priorités pour la génération des patrons de tronçonnage. En outre, nous étudions de nouveaux scénarios de récolte, que nous comparons à l’approche actuellement en usage. Ces nouveaux scénarios portent sur la désagrégation de certaines activités associées au tronçonnage. Nous analysons aussi l’impact de la diminution de la productivité des machines de tronçonnage dans le calcul du coût de récolte. Ce coût étant non linéaire, nous proposons une approximation pour le linéariser. Le problème est modélisé comme un problème linéaire mixte en nombres entiers. Le meilleur scénario relatif aux structures de tronçonnage ainsi que la même approche de tronçonnage basée sur les listes de priorités seront par la suite utilisés dans l’étude des deux variantes multi-périodiques présentées dans les chapitres 5 et 6.

Dans le chapitre 5, nous présentons le problème traité dans le deuxième article, qui est

sous révision dans la revue internationale *European Journal of Operational Research*. Nous étudions une extension du problème pour le rendre multi-périodique. Nous traitons plus en détails les notions de stock et de la variabilité des demandes au cours de l'année. Pour résoudre ce problème, nous avons formulé un modèle linéaire en nombres entiers et nous avons testé trois approches de résolution : l'approche directe en utilisant Cplex, une deuxième approche utilisant la relaxation de certaines variables et leur fixation pour la recherche d'une solution initiale partielle et une troisième faisant appel à une heuristique constructive pour générer un ordonnancement initial de la récolte des sites forestiers. Nous remarquons que l'amélioration du temps de calcul varie considérablement avec les instances de demandes et que l'heuristique ne converge pas nécessairement vers un ordonnancement réalisable si nous changeons l'inventaire forestier. Ceci nous a motivés à investiguer d'autres pistes de modélisation beaucoup plus efficaces permettant de résoudre d'autres variantes plus complexes du problème présentées dans le chapitre 6.

Dans le chapitre 6, nous étudions le problème présenté dans l'article trois de cette thèse et qui est soumis à la revue internationale *Constraints*. Nous présentons une deuxième variante du problème d'approvisionnement forestier multi-périodique. Nous introduisons une nouvelle forme de flexibilité en considérant des contraintes sur la capacité de récolte. Deux formes de récolte sont étudiées : la récolte à capacité fixe et celle à capacité variable. Une récolte à capacité fixe est une récolte qui se fait en maintenant jusqu'à la fin la même capacité allouée au début de la récolte d'un site. Alors qu'une récolte à capacité variable considère que la capacité peut changer durant la récolte d'un même site. Une telle flexibilité permet d'assurer une meilleure distribution des capacités de récolte au cours de la récolte. Pour résoudre cette variante, nous proposons une méthode hybride combinant la PPC et PLMNE. Cette approche vise à tirer profit des avantages de ces deux techniques. La PPC a prouvé son efficacité quant à la modélisation et la résolution de plusieurs variantes de problèmes combinatoires d'ordonnancement. La solution de la PPC modélise tous les détails de la récolte à savoir : l'ordonnancement de la récolte des sites dans le temps et l'affectation des listes de tronçonnage aux différentes espèces. Cette solution est communiquée au modèle linéaire mixte en nombres entiers comme solution initiale partielle pour faciliter la recherche d'une solution de bonne qualité au problème entier.

CHAPITRE 4

ARTICLE 1 : EFFECTS OF DIFFERENT CUT-TO-LENGTH HARVESTING STRUCTURES ON THE ECONOMIC VALUE OF A WOOD PROCUREMENT PLANNING PROBLEM

Cet article a été publié à *Annals of Operations Research*. DOI :10.1007/s10479-013-1336-1,
2013.

Amira DEMS, Louis-Martin ROUSSEAU, Jean-Marc FRAYRET

*École Polytechnique de Montréal,
Département de Mathématiques et Génie Industriel
C.P. 6079, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3A7*

*Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks,
Logistics and Transportation (CIRRELT)
C.P. 6128, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3J7*

{amira.dems, louis-martin.rousseau, jean-marc.frayret@polymtl.ca}

Abstract

In this paper, we develop a mixed integer linear model for a practical multi-facility wood-procurement planning problem using a cut-to-length (CTL) bucking system. This forest management problem is difficult to solve since it integrates the forest bucking problem and the multi-facility supply planning problem. A priority-list approach was used to generate adequate bucking patterns in the Eastern Canadian context. The model provides decision support with respect to how to harvest the different cut-blocks according to the bucking priority list used, and in what quantities harvested logs should be transported to sawmills. It aims to minimize the nonlinear harvesting cost, the transportation cost, and the inventory cost and to maximize the product value (i.e., profit maximization). The harvesting cost considers the nonlinearity of the harvester productivity function, which is an important aspect of the decision-making process in forest management. The model was used to compare the current bucking scenario to two new possibilities. These scenarios allow us to investigate the gains and losses that arise from the use of different bucking aggregations. Specifically, we consider the impact on the number of different log types per block and thus on the associated harvesting cost. Moreover, we aim to better understand the cost/benefit trade-offs of a more complex decision structure in a Canadian wood-procurement context. The results of our scenario tests showed that forest bucking aggregation (the current practice) significantly reduces the company's profit. A simple bucking disaggregation that does not increase the operational cost can improve the outcome.

Keywords : Cut-to-length harvesting system, Forest bucking problem, Wood-procurement planning, Mixed integer programming.

4.1 Introduction

Uusitalo (2005) defines wood-procurement planning as a set of technical, commercial, and logistical activities. These activities are included in the process of supplying sawmills with raw material.

We present the cut-to-length bucking-based wood-procurement planning problem as a combination of two classic problems : the cut-to-length bucking problem and the multi-commodity supply planning problem with multiple supply sources and demand destinations. Cut-to-length bucking is the operation of cutting tree stems into smaller logs in preparation for further industrial processing (Arce et al. (2002), Kivinen (2007), Pickens et al. (1997)), using cut-to-length machinery. In this process, the stems are cross-cut directly at the stump. It is widely used for wood procurement since it facilitates the handling of logs and reduces

soil degradation (the logs are carried instead of being dragged on the ground). However, it is a divergent process that forces forest engineers to make an early transformation decision since one piece of raw material (a tree stem) produces a variety of subproducts (logs).

Improving the fit between mills' demand and the output of bucking operations has been shown to be even more important than minimizing the operational costs (Uusitalo, 2005). In fact, a good bucking strategy has a direct impact on the end products, and therefore on the profit of the sawmill. It is also an irreversible process, since it is impossible to correct a poor bucking output at any subsequent stage (Kivinen (2007), Usenius (1986)). In addition, when tree bucking and wood-supply planning are considered separately, some of the supply plans may be infeasible because of the heterogeneity of the forest (Chauhan et al., 2009).

This paper has two goals. The first is to find a near-optimal wood-procurement plan for a planning horizon of one year. Which products should be obtained from each cut-block according to the bucking priority list used, and in what quantities should harvested logs be transported to sawmills? We develop a mathematical model with a specific harvesting cost formulation. This cost considers the nonlinearity of the harvester productivity function and takes into account the impact of the number of different log types per block. This is an important aspect of the decision-making process in forest management (Arce et al., 2002). The model aims to increase the net profit by decreasing the operational costs (harvesting, transportation, and inventory costs) and optimizing the allocation of products to cut-blocks.

Our second goal is to compare the current bucking scenario to two new possibilities. The current scenario is called the forest-aggregation bucking scenario. It applies the same bucking priority list per species to the whole forest. The second scenario, called sector-aggregation bucking, applies the same bucking priority list per species to all the cut-blocks of each harvesting sector (i.e., a predefined group of cut-blocks close to each other). The third scenario, called stand-aggregation bucking, applies a bucking priority list per species without any aggregation. These scenarios are defined to explore the effects of the harvesting aggregation structure on the total procurement cost. Specifically, they allow us to study the impact of the number of different log types on the harvesting cost, using the nonlinear formulation. Through our collaboration with FPInnovations, the results of the comparison are used to support Eastern Canadian forest companies. They clarify the cost/benefit trade-offs of a more complex decision structure such as totally or partially disaggregated bucking.

This article is organized as follows. Section 4.2 presents an overview of the literature. Section 4.3.1 introduces the problem description, while section 4.4 defines the bucking priority lists and their simulation. Next, section 4.5 presents the mathematical formulation. In section 4.6, a description of the three bucking scenarios is given. The data used to test the performance of the models are introduced in section 4.7, and section 4.8 presents the com-

putational results. section 4.9 presents concluding remarks and some research perspectives.

4.2 Literature review

The wood-procurement planning problem can be decomposed into the bucking optimization problem and the multi-commodity supply planning problem (Chauhan et al., 2009).

4.2.1 Bucking optimization

The bucking operation consists in cutting the fallen trees in cut-blocks into smaller pieces (logs) in preparation for further industrial processing. Laroze (1999) classified bucking optimization problems into three categories : stem level, stand level, and forest level.

Stem- and stand-level bucking optimization

At the stem level, the objective is to find a bucking pattern that maximizes the single stem value. Kivinen (2007) notes that dynamic programming (DP) is generally used for stem-level bucking optimization (Pnevmaticos et al. (1972), Puumalainen (1998), Grondin (1998), Wang et al. (2004)).

Optimal bucking for individual stems does not necessarily give the same result at the stand level due to the imposition of stand level market constraints (Laroze (1999), Arce et al. (2002), Pickens et al. (1997)). It does not consider the diversity of the trees in each stand, and it does not satisfy all the market constraints (desired volume, quality, length, and minimum average small-end diameter of logs (MSD)). Stand-level bucking optimisation aims to maximize the production value taking into account the resource availability of the stand and the customers' needs.

Marshall et al. (2006) proposed a buck-to-order planning model that uses different approaches to generate cutting instructions. They presented the advantages of a buck-to-order plan in maximizing the value of the stand and in predicting the surplus volume before harvesting the stand.

Some researchers have used a two-stage model to solve the stand-level bucking optimization problem (Mendoza et al. (1986), Näsberg (1985), Pickens et al. (1997)). In their general framework, the constrained timber-procurement problem is usually modeled in the master problem and the stem bucking problem in the subproblem. The link between the two problems and the constraints considered in each vary from one model to another. This method is theoretically correct and computationally efficient (Laroze, 1993). However, it produces a

large number of cutting instructions, which are difficult for the operators of the harvesters to implement (Laroze (1993), Martell et al. (1998), Sessions et al. (1989)).

Heuristic approaches were proposed in (Karlsson et al. (2003), Marshall et al. (2006), Bettinger (2008), Sessions et al. (1989)). Laroze et al. (1997) proposed a tabu search (TS) based system that generates a bucking rule for each stand instead of assigning a bucking pattern to each stem class. Via a stepwise bucking algorithm, each stand-bucking rule generates a distinct pattern for each class-representative stem.

Forest-level bucking optimization

At the forest level, the bucking problem aims to balance stand heterogeneity and demand mix, to maximize the value of the forest. The stem distribution of different stands varies, and some are more suitable than others for certain product types. In the forest-level problem, this compatibility factor is considered to make the harvesting efficient and more profitable. Of the three levels of bucking optimization, the forest level is the least studied.

In an extension of his earlier work, Laroze (1999) used the TS heuristic method for generating bucking rules together with an LP formulation to solve the forest-level bucking optimization problem. Kivinen found that adjusting the log prices of the demand matrices prior to the harvesting operation was more advantageous in stand-level than in forest-level bucking problems (Kivinen (2006), Kivinen (2004), Kivinen et al. (2002)). In these studies, procurement activities such as the transportation of logs to different mills are not considered; they address only bucking operations on homogenous forest stands (one species). They satisfy an aggregated demand expressed in terms of product and market types (e.g., export logs, saw logs, pulp logs) and do not consider mill locations.

4.2.2 The multi-commodity wood distribution problem

The general multi-commodity distribution problem models many decision problems ranging from short- to long-term planning. For a review of multi-commodity supply-network planning, the reader is referred to (Melo et al., 2009). At the strategic (long term) level, decisions on locating facilities are made. The allocation of customers to supply points is an example of the decisions taken at the tactical (medium term) planning level. At the operational (short term) level, transportation flows and inventory levels are addressed taking into account customer demands, transportation costs, and stock costs. In this project, the planning occurs at the operational level.

There are some differences between wood-procurement and multi-commodity supply-planning problems. First, in the forest context, there is no fixed cost for locating the facilities

(the forest cut-blocks), as is the case in other contexts. Second, the level of supply at the facilities depends on the bucking decisions. The selection of the bucking patterns and the harvesting options strongly affects the production level of the cut-blocks. Therefore, considering the procurement decisions and the bucking decisions separately can lead to infeasible procurement plans. However, the integration of the bucking decisions into the wood-procurement planning problem increases its complexity (Epstein et al., 1999).

Different harvesting aspects can be addressed if we deal with short-term harvest planning (Rönnqvist, 2003). These include crew scheduling (Karlsson et al., 2003), the control of storage in the forest and at the terminals, the use of sorting yards (Sessions et al., 2005), and the forwarder route planning (Flisberg et al., 2007). For short-term transportation planning, issues such as road maintenance decisions and backhauling can be considered (Carlsson et al., 2009). In some short-term harvest planning problems, bucking patterns are not considered because cutting instructions are provided by the harvesters' on-board computers (Carlsson et al., 2009). Arce et al. (2002) formulated the log product allocation problem with transport activities as a mixed integer linear programming (MIP) problem. They generated bucking patterns for the upper-level problem through simple heuristic rules. They aimed to maximize the total net revenue at the forest level. In the formulation, they limited the number of different products bucked per stand, but they did not consider their impact on the harvesting cost.

Epstein et al. (1999) proposed a multi-period procurement planning problem including harvesting (i.e., which stands and what volumes to harvest), bucking (what bucking pattern to use), and transportation activities (what products should be delivered to the different destinations to satisfy demand). They used a column-generation-based approach where the bucking patterns are included during the optimization process.

Chauhan et al. (2009a) proposed a short-term supply-network planning problem for decisions on what timber assortments should be produced in pre-selected stands in order to fulfill the demand of different sawmills. They used a bulk-process-based bucking. It is a simplification of the real bucking process since they did not use inventory simulators (as in Epstein et al. (1999) and this work) that return the production yields resulting from the patterns used. They tested their approach on relatively small instances (number of stands < 10 , number of log types < 6). They were the first to consider the impact of the number of different products in the output mix on the harvesting cost.

In the problems presented above, a general approach is used. This common approach relies on a decomposition technique where bucking patterns are generated in the subproblem and included in the master problem during the optimization process. As noted by many authors (Laroze (1993), Sessions et al. (1989)), this decomposition approach is theoretically correct

and computationally efficient. However, it is difficult to implement because of operational constraints such as the generation of a large number of cutting instructions and the difficulty of subdividing the stand into different stem classes.

The problem of this paper is to generate a wood-procurement plan that respects the harvesting practices used in Eastern Canada. It is based on the customer demand and generates bucking patterns that are practical and easy to implement. To our knowledge, this paper is the first to include a harvesting cost function that considers the nonlinearity of the harvester productivity function. This is an important aspect of the decision-making process in forest management (Arce et al., 2002). The model also helps decision makers to develop a more efficient forest procurement system, through a comparison of different bucking scenarios.

4.3 Problem description

In this paper, the forest is divided into cut-blocks that are accessible via the road network. Their management is centralized and done by the forest company. The annual list of cut-blocks to harvest is the result of a higher-level planning problem (Beaudoin et al., 2008). A set of adjacent cut-blocks, predefined by the forest company, constitutes a sector.

4.3.1 Eastern Canadian harvesting context

In this paper (see Fig. 4.1), the trees are processed into final logs at the stump, using mechanized equipment (harvesters and forwarders). As reported in the literature (Gingras et al. (2002), Brunberg et al. (2001)), a reduction in harvester productivity of 1%–4% is generated by harvesting a new log type in a cut-block. According to the cutting instructions, the harvester cross-cuts different product types and sorts them into different piles. This forces the boom of the harvester to move over the appropriate pile to sort every different log type obtained. This creates a discontinuity (time lost) in the bucking operations, which decreases the productivity of the machines and increases the production cost for each new harvested log type (Chauhan et al., 2009a). Furthermore, an additional discontinuity is caused by cutting the same tree stem into short logs as opposed to fewer long logs. Therefore, the higher the average length, the higher the productivity of the harvester.

The literature (Gingras et al. (2002)) also reports a reduction of the forwarder productivity of 3%–7% for every new log type harvested in a cut-block. The harvested log types are separately hauled to the roadside and stored in different piles until they are loaded onto trucks. Because different products cannot be mixed, the hauling to the roadside becomes inefficient when small volumes of each product type are produced. Improving the machine productivity is thus key to decreasing the harvest-operation cost. In this paper, we consider the effect on

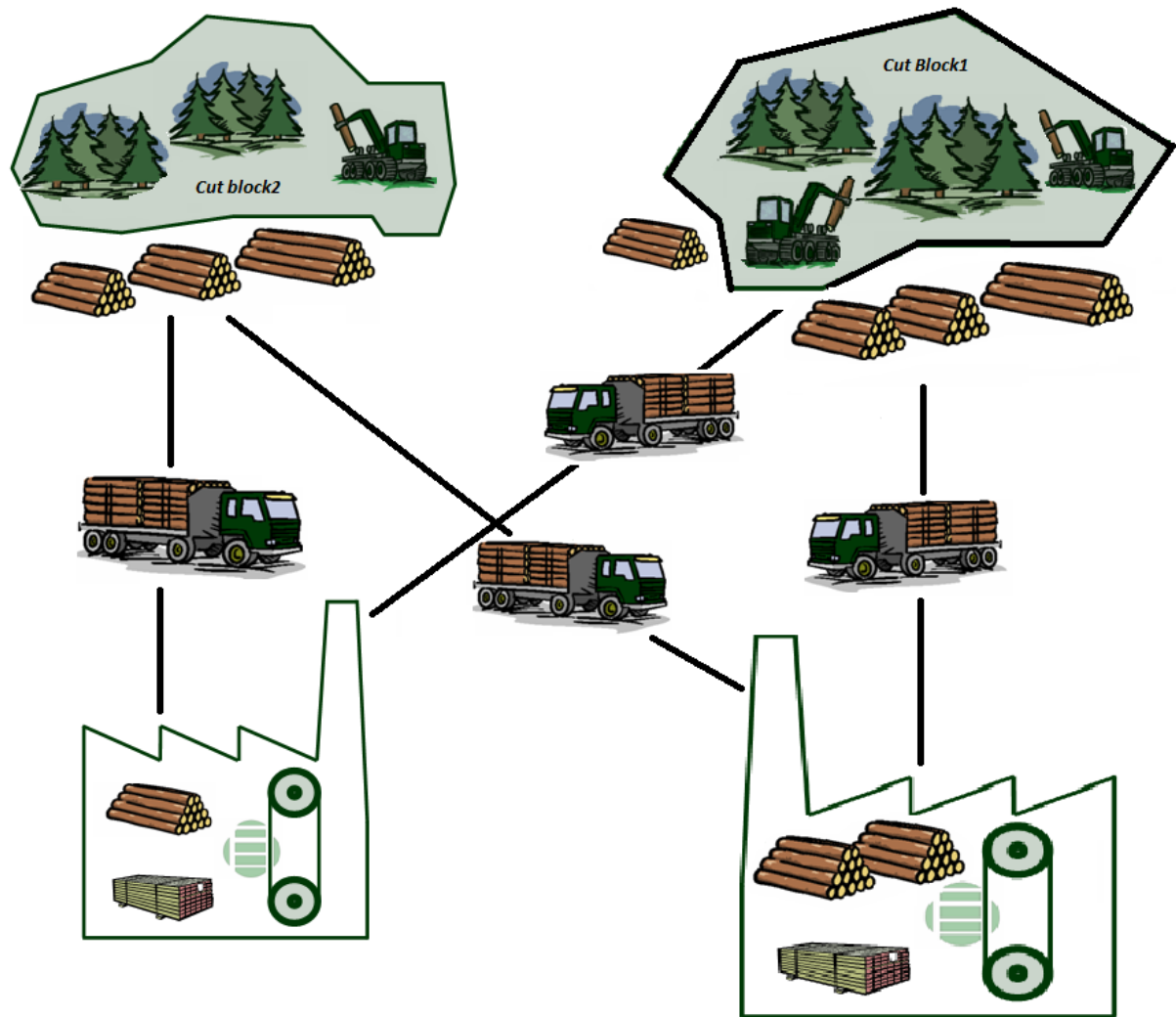


Figure 4.1 Framework of CTL-harvesting-based wood-procurement planning problem

the harvesting cost of this productivity decrease of the harvesting machinery. In its nonlinear formulation, the harvesting cost increases according to the number of different products bucked per cut-block and decreases with the average length of the products. The harvesting cost function resulting from these considerations increases the combinatorial complexity of the wood-procurement problem. A study of the impact of the average log length on the harvesting cost is beyond the scope of this paper, although we retain this in the FPIInnovations cost equation (see the Appendix).

Bucking procedure specificities. In Eastern Canada, forest cut-blocks are large and heterogeneous, with a large variability in the tree diameter. One consequence is the important number of log types that can be harvested in the same block. Consequently, generating the cutting instructions on the harvesters' on-board computer is not satisfactory since it produces complex instructions for the machine operators (Mitchell, 2004). Therefore, the bucking patterns are not determined by the on-board computers. The generated patterns must be simple and easy for operators to implement. Therefore, the priority-list bucking method is widely used.

Current planning approach. The planning is currently done manually by an experienced planner. The planner defines a bucking priority list based on the product demand for each species. This list is applied to all trees of the same species in all cut-blocks (forest-aggregation bucking scenario). The transportation cost is not optimized. This approach has limitations with respect to the time spent by the planner and the quality of the solutions.

Transportation and inventory costs. The transportation cost, which is a significant portion of the total cost, depends on the distance between the blocks and the mills, and the log type. Part of the delivery is used to meet mill demands, and the remainder is placed in storage, with an associated inventory cost.

Decision-support objective. Given the annual demand from a set of geographically distributed sawmills (buck-to-order bucking) and the set of forest cut-blocks to harvest during the year, we propose a mathematical model for the problem described above. The model must solve large instances within practical time limits. We consider the impact of the number of different log types per block on the harvesting cost, by using the specific harvesting cost formulation. We also investigate the effect of the bucking aggregation level on the harvesting cost. We compare different scenarios to help decision makers to develop an efficient forest procurement system using new bucking aggregation structures. The comparison will be used

to clarify the cost/benefit trade-offs of a more complex structure such as totally or partially disaggregated bucking options.

4.4 Bucking pattern definition and simulation

In collaboration with FPInnovations, we generated a number of priority lists to use in the mathematical model.

4.4.1 Priority-list approach

To take into account the Eastern Canadian context, we developed a method for generating bucking priority lists. In this method, we allocate logs to each stem section using a priority list (Laroze et al. (1997), Epstein et al. (1999)), instead of optimizing the value over the entire stem. The position of a log-type on the priority list is important since it will determine the volume produced (see Fig. 4.2). The priority-list method has achieved good results in bucking optimization problems (see Laroze (1993)). However, this method becomes suboptimal if the priorities remain constant during the harvesting of a cut-block. In forest-level bucking optimization, a shortage in a particular cut-block can be balanced by an oversupply in another.

The method we propose is inspired by the rule-based bucking procedure proposed in Laroze et al. (1997), some aspects of the branch-and-bound algorithm developed in Epstein et al. (1999), and the heuristic bucking algorithm presented in Arce et al. (2002). In our approach, a priority list corresponds to a combination of at least two of at most l_{max} allowable log-types obtained from a stem. Limiting the number of different product types by list has an operational impact. As previously noted, the efficiency of CTL harvesters decreases as the number of log-types included in a bucking pattern increases (Parker et al., 1995). Each product type in the priority list has an attribute, which is the MSER.

The possible priority lists are generated considering simple rules (as in Arce et al. (2002)). First, the order of the products in the priority list follows their commercial values. This choice is compatible with the forest companies' priorities. Second, products with similar values are ordered from the longest to the shortest. Third, products with the same length are ordered according to decreasing MSER. Finally, the product with the shortest length and smallest MSER, generally a pulp log, is the last piece in all the priority lists.

As stated in Sessions et al. (1989), it is difficult to identify the diameter class of each tree. Therefore, a bucking priority list is assigned to each species rather than each stem-diameter class. These assumptions generate bucking patterns that are easy for operators to implement.

Figure 4.2 shows an example of a priority list and its corresponding bucking patterns for

trees from two different stem-diameter classes. According to this list, the bucking algorithm tries to obtain as many products as possible from the first product type (A) before moving to the second (B). Different bucking patterns (one for each tree-diameter class) are obtained when applying a priority list.

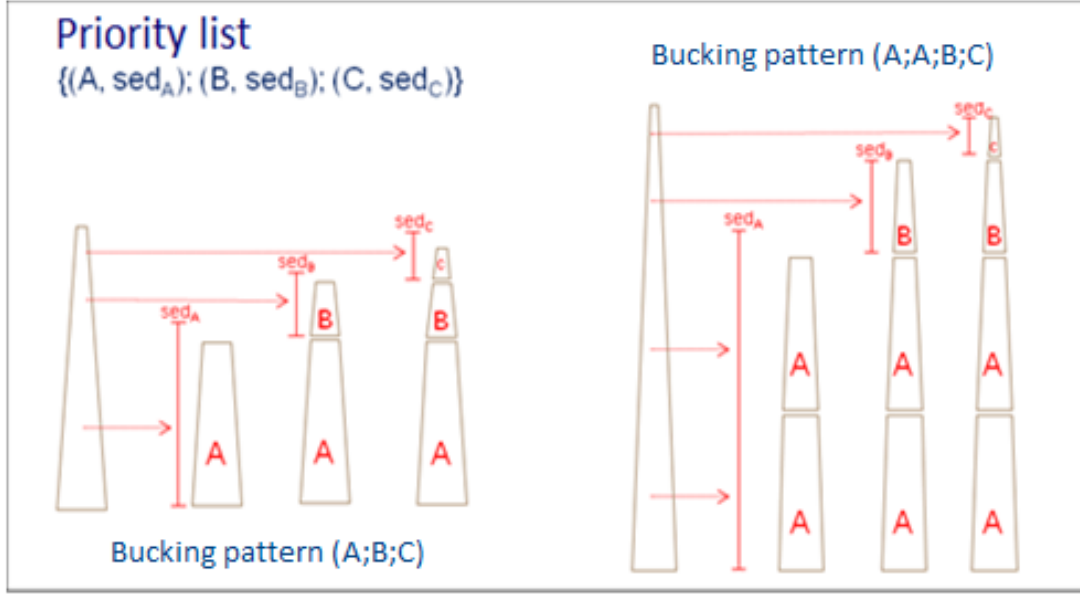


Figure 4.2 Example of priority list and corresponding bucking patterns

4.4.2 Log simulator

The software FPInterface, from FPInnovations, was used to carry out bucking simulations of the generated priority lists on the forest data set. This tool is specifically designed to simulate activities in the forest supply chain. Its harvesting module can predict the timber assortments obtained from the application of a given bucking priority list on a sample of trees from the cut-blocks. As a simplification, we did not consider the trees' quality attributes in the simulations. In practice, these simulations are done once a year before the beginning of the harvesting operations, even if the output is not used for further applications.

4.5 Mathematical formulation

This section presents a formal mathematical model of the general problem. In this formulation, the following variables and parameters are used for the three scenarios :

Parameters

B	Set of forest cut-blocks ;
U	Set of mills ;
P	Set of product types ;
E	Set of species ;
S	Set of sectors ;
B_s	Set of blocks included in sector s ;
B_{se}	Set of blocks in sector s that contain species e ;
E_b	Set of species in block b ;
B_e	Set of cut-blocks containing species e ;
R	Set of priority lists ;
P_r	Set of different products in bucking priority list r ;
d_{peu}^{Min}	Minimum demand of mill u for product p of species e (m^3) ;
d_{peu}^{Max}	Maximum demand of mill u for product p of species e (m^3) ;
p_{pe}^u	Mill u unit price for product p , species e ;
V_{pe}^{br}	Volume of product p available when bucking species e of block b , according to priority list r (output of simulation) ;
C_{bupe}^T	Unit transportation cost between block b and mill u for product p of species e ($\$/m^3$) ;
C_{upe}^S	Stock cost of product p , species e in mill u ($\$/m^3$) ;
PE_p^e	Penalty used when harvesting small volume of product p , species e ;
BIF_b^{re}	Bucking incentive factor for bucking priority list r on species e of block b ;
Ptg	Percentage of total volume harvested in given block b ;
M	Large number, for example equal to value of largest cut-block's standing timber.

Variables

x_{pe}^{bu}	Flow of product type p , species e from block b to mill u (m^3) ;
---------------	---

y_{rn}^{be}	Binary : takes value 1 if bucking priority list r is applied to species e of block b when n different products are obtained from b ; 0 otherwise;
z_n^b	Binary : takes value 1 if n different products are obtained from block b ; 0 otherwise;
k_{pe}^{br}	Binary : takes value 1 if volume of product p , species e , in block b , obtained when bucking e using priority list r is below a given percentage of total harvested volume in b ; 0 otherwise;
t_{pe}^{br}	Binary : takes value 1 if bucking priority list r is not applied to block b ; 0 otherwise;
s_{pe}^{bu}	Stock of product p , species e from block b in mill u (m^3).

4.5.1 Harvesting cost calculation

The unit harvesting cost considers the nonlinearity of the harvester productivity function. Specifically, it considers the number of different log types harvested per block, which is a delicate aspect of the forest management. It leads to the use of binary variables in MIP formulations. We use a harvesting cost function with three components, defined by FPInnovations. The first component is a correction on the number of different products in each block. The second is a correction on the average length of logs in a cut-block. The average length is calculated using the volumes generated from harvesting all the cut-blocks and the lengths of the products obtained. The third component is the roadside cost (C_b^H). It is specific to each cut-block and expressed in ($\$/m^3$). We used mathematical modeling and approximation techniques to linearize this cost function.

Harvesting cost function defined by FPInnovations

The first component is $f(n)$, where n is the number of different products obtained from block b . We introduced index n to the variables y_{rn}^{be} to linearize this. The unit real harvesting cost C_{bn}^{RH} for cut-block b , if n different products are obtained, is determined using the following equation :

$$C_{bn}^{RH} = f(n) \left[g(y_{rn}^{be}) \right] C_b^H \quad (A)$$

where

f, g Empirical nonlinear functions determined by FPIinnovations (see the Appendix for details of the calculation).

Approximated harvesting cost

We also approximate the second correction factor to linearize it. Because we apply a bucking priority list for each species, we can safely approximate the average length of the logs in the whole cut-block weighted by its total volume by the sum of the different average lengths of logs per species weighted by their respective total volumes (see the Appendix for details of the calculation). For priority list r the average length of logs per species weighted by their total volume is $h(V_{pe}^{br})$. We will test this approximation in Section 4.8.1. The unit approximated harvesting cost C_{bern}^H is pre-calculated for each priority list r applied to each species e in a given cut-block b , if n different products are obtained, as follows :

$$C_{bern}^H = f(n) \left[h(V_{pe}^{br}) \right] C_b^H \quad (B)$$

4.5.2 Mathematical model

Assuming that the unit harvesting cost for each block is pre-calculated as in Eq. (B), a mixed-integer linearized mathematical formulation of the problem common to the three scenarios (P_1) is :

Model

$$\begin{aligned} (P_1) \quad & \text{Max} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} p_{pe}^u x_{pe}^{bu} - \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} \sum_{n \in N} C_{bern}^H V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \\ & - \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{bupe}^T (x_{pe}^{bu} + s_{pe}^{bu}) - \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} P E_e^p V_{pe}^{br} k_{pe}^{br} \\ & - \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} B I F_b^{re} y_{rn}^{be} - \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{upe}^S s_{pe}^{bu} \end{aligned}$$

subject to

$$\sum_{n \in N} z_n^b = 1 \quad \forall b \in B \quad (1)$$

$$\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} y_{rn}^{be} = n z_n^b \quad \forall b \in B \text{ and } \forall n \in N \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} y_{rn}^{be} = 1 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall e \in E_b \quad (3)$$

$$\sum_{u \in U} (x_{pe}^{bu} + s_{pe}^{bu}) = \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall p \in P \quad (4)$$

$$d_{peu}^{Lw} \leq \sum_{b \in B} x_{pe}^{bu} \leq d_{peu}^{Up} \quad \forall u \in U, \forall e \in E_b, \forall p \in P \quad (5)$$

$$PtgV^b - V_{pe}^{br} \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \geq M(k_{pe}^{br} - 1) \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (6)$$

$$PtgV^b - V_{pe}^{br} \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \leq M(k_{pe}^{br} + t_{pe}^{br}) \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (7)$$

$$t_{pe}^{br} \leq 1 - \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (8)$$

$$k_{pe}^{br} \leq \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R, \forall p \in P \quad (9)$$

$$z_n^b, y_{rn}^{be}, k_{pe}^{br}, t_{pe}^{br} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, \forall r \in R, \forall e \in E_b, \forall p \in P, \forall n \in N \quad (10)$$

$$x_{pe}^{bu}, s_{pe}^{bu} \geq 0 \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (11)$$

The objective function consists in maximizing the global profit. In this objective, the first term is the net revenue of the harvested products (the timber pricing system is based on fixed product-specific log prices (\$/m³) given by mills without quality considerations). The second term is the sum of the harvesting cost, the transportation cost, the penalty (PE_e^p), the bucking incentive factor (BIF_b^{re}) described below, and the stock cost.

Constraints (1) and (2) count the number of different log types harvested in each cut-block. Constraint (3) ensures that we use only one bucking pattern per species per block. Constraint (4) ensures that the flow of product p , species e , out of block b , into mill u equals the total supply of that product available in the block. Constraint (5) ensures that the flow of product p , species e , out of all the cut-blocks and into mill u is between the lower bound d_{peu}^{Min} and the upper bound d_{peu}^{Max} of the demand. Constraint (10) ensures that the variables are binary. Constraint (11) is a non-negativity constraint.

In practice, it is not desirable to harvest a volume of a specific product that is below a certain percentage (Ptg) of the total volume harvested in a given block b ($V^b = \sum_{n \in N} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} V_{pe}^{br} y_{rn}^{be}$). Harvesting small quantities of a product type leads to the transportation of small quantities of wood from cut-blocks that are sometimes located far from the mills; this is not economic. A penalty term (PE_e^p) is used to balance the harvested volumes of each product type in each block, it was defined by FPIInnovations. Constraints (6) to (9) ensure this. This restriction increases the complexity of the model, since the number of binary variables increases.

In addition to further improve the match between supply and demand, a good harvest planning model at the forest level, must also consider the composition and the characteristics of the cut-block in order to cut only logs that are compatible with it. Therefore, if the majority of trees in a cut-block are large and long, it is more convenient to produce thick and long logs. Consequently, it is advantageous to apply a priority list that contains such logs. BIF_b^{re} enables this by prioritizing bucking priority lists that are suited to the internal composition of each block. This factor was also defined by FPInnovations (see the Appendix for details of the calculation).

4.6 Case study

In this paper, we study three different bucking scenarios to explore the effects of different bucking-aggregation levels on the harvesting cost. It is not appropriate to apply the same bucking priority list to different tree species since they differ in geometry and structure. Similarly, each cut-block represents a unique collection of trees in terms of species, number, and diameter. Different sectors have different areas, densities, and mixtures of species. Consequently, applying the same species-specific bucking priority list to a set of cut-blocks may lead to a suboptimal use of the resources. However, this simplifies the management of the harvesting operations. We wish to understand the cost/benefit trade-offs of a more complex structure in the wood-procurement planning than that currently used.

In this section, we describe the three harvesting scenarios. In the examples given in Figs. 4.3, 4.4, and 4.5, we assume that we have a forest composed of 2 sectors (not actually limited by borders as shown in the figures). Each of the sectors includes 2 cut-blocks, and each cut-block contains 2 species E_1 and E_2 (in this paper the blocks may contain up to 5 species).

4.6.1 Scenario 1 : Forest-aggregation bucking scenario

This scenario reflects the current procedure but differs in that it optimizes the allocation of logs to mills. This is our base scenario. We apply the same priority list per species to all the cut-blocks of the forest (complete aggregation). To satisfy the mills' demand, the requested products must be included in the priority list used. According to FPInnovations, this scenario is adopted in practice since it is the simplest way to manage harvesting operations. In Fig. 4.3, a first priority list (the hatched region) is applied to species E_1 and a second (the dotted region) to species E_2 , in the whole forest.

To model this scenario, we added constraint (13) to the linearized model ($P1$). This constraint states that if a bucking priority list is applied to a given species it must be applied

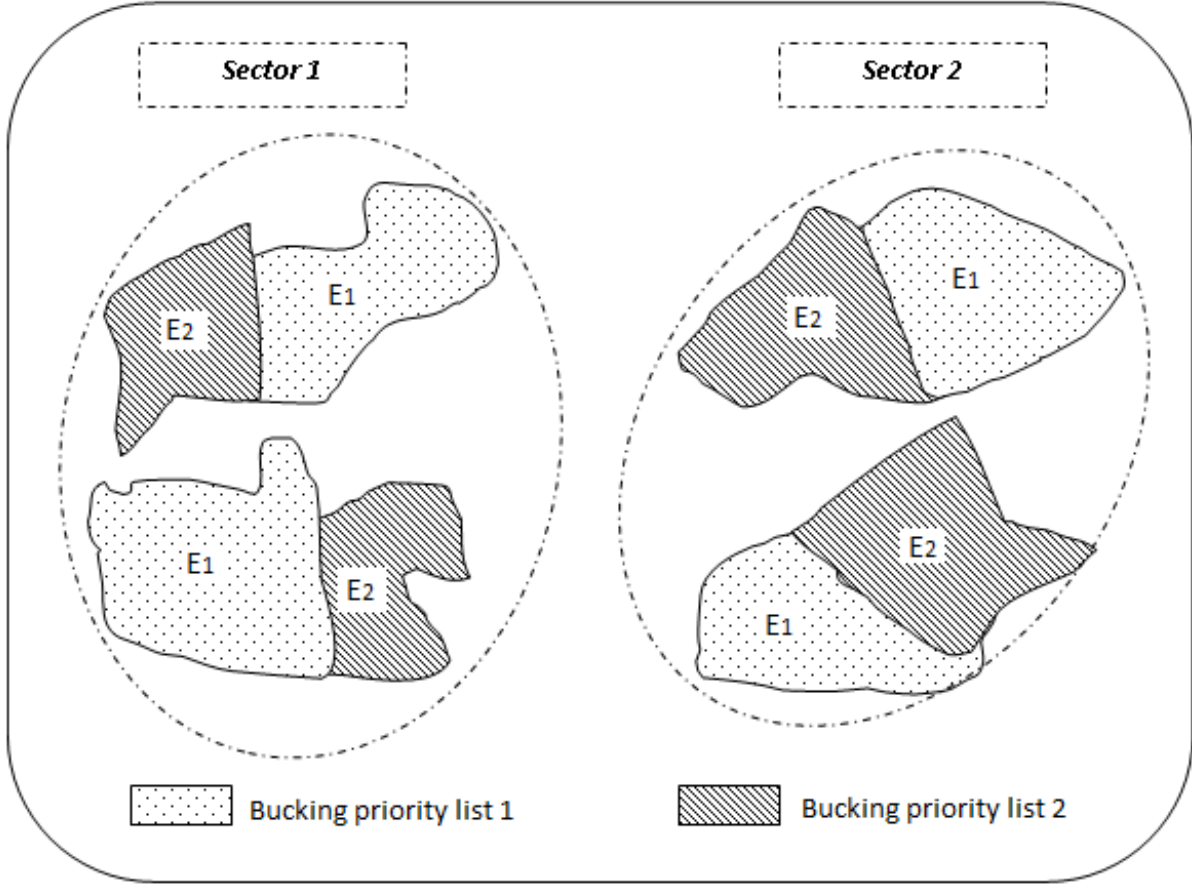


Figure 4.3 Forest-aggregation bucking scenario (scenario 1)

to all similar species in all the sectors and their corresponding blocks.

$$\sum_{b' \in B} \sum_{n \in N} y_{rn}^{b'e} = |B_e| \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R \quad (13)$$

4.6.2 Scenario 2 : Sector-aggregation bucking scenario

In this case of partial aggregation, we apply the same priority list per species to all the cut-blocks of a sector. This scenario gives more flexibility in the choice of priority list without constraining the management of the bucking operations or changing the harvesting equipment.

Figure 4.4 shows that different bucking lists are assigned to species E_1 (respectively E_2) in sectors 1 and 2.

To model this scenario, we added constraint (14) to the linearized model ($P1$). This constraint

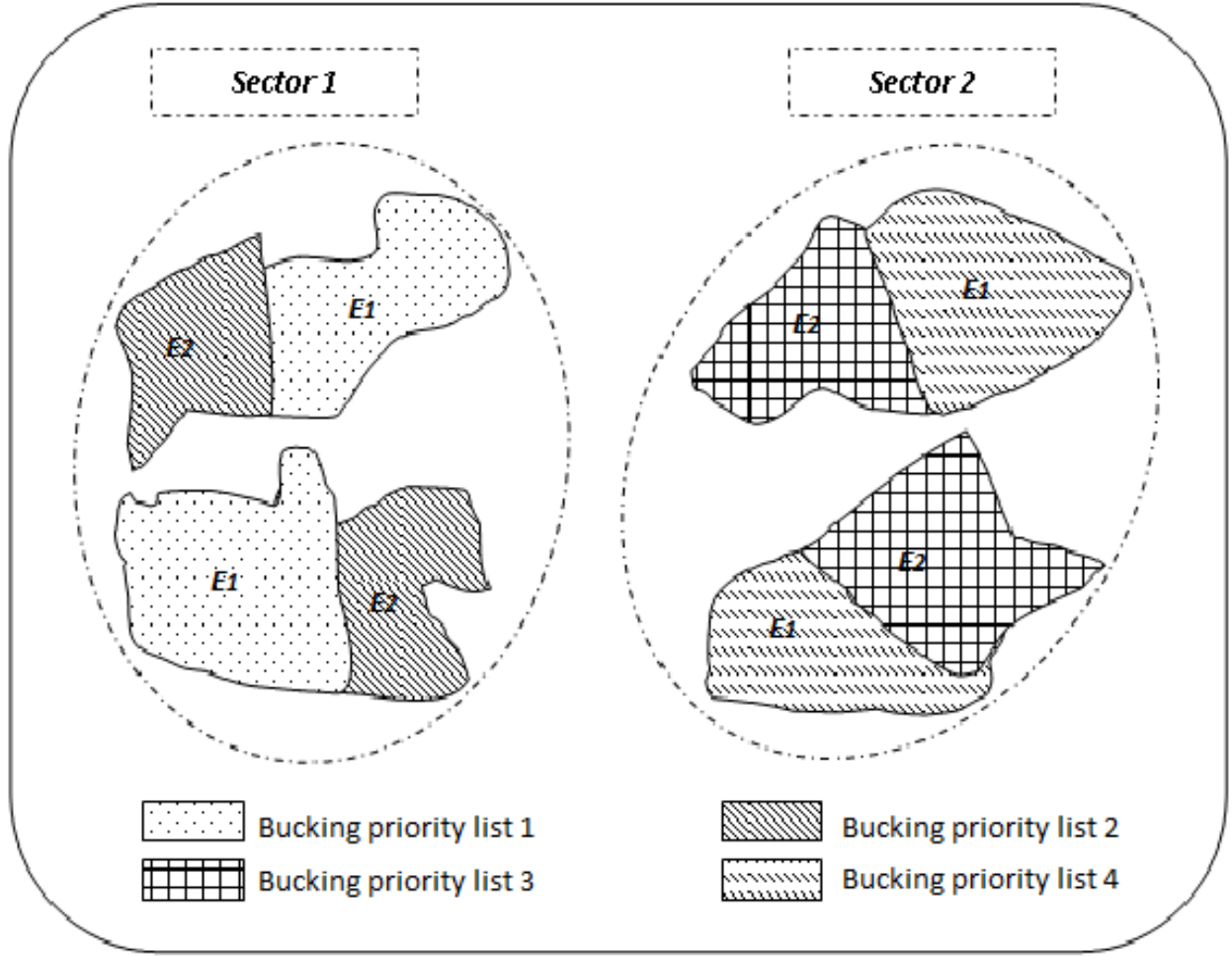


Figure 4.4 Sector-aggregation bucking scenario (scenario 2)

ensures that if a species in a given block and sector is bucked by a priority list, this list will be assigned to all similar species in the other blocks of the sector.

$$\sum_{b' \in B} \sum_{n \in N} y_{rn}^{b'e} = |B_{es}| \sum_{n \in N} y_{rn}^{be} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall r \in R \quad (14)$$

4.6.3 Scenario 3 : Stand-aggregation bucking scenario

In scenario 3, we did not add any aggregation to the definition of the bucking procedure; no changes were made to the mathematical formulation given in ($P1$). Different priority lists can be applied in different blocks and sectors, and Fig. 4.5 illustrates this scenario. In this figure, different bucking lists are assigned without restrictions.

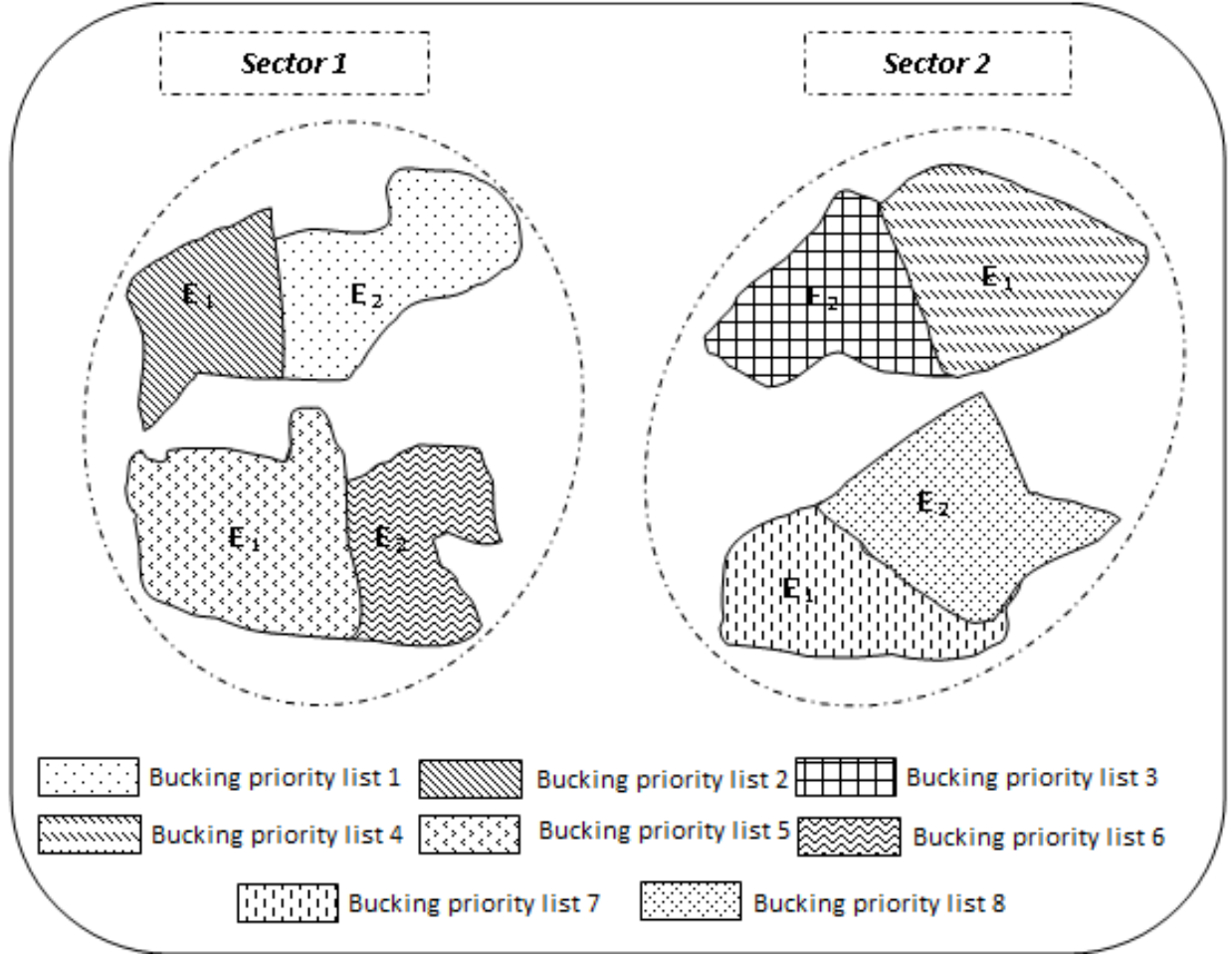


Figure 4.5 Stand-level aggregation bucking scenario (scenario 3)

4.7 Description of data

The data used to test the three scenarios consisted of 30 heterogeneous and mature cut-blocks in Eastern Canada, occupying 3673 ha and harvested during approximately one year. In Table 4.1, we present each sector, its corresponding blocks, the area in hectares (ha) of each block, and the volume per ha (m^3/h) of each species.

Each block contains at least two of these five species : white birch (WB), black spruce (BS), poplar (POP), jack pine (JP), and balsam fir (BF). The annual harvested volume is about 580 000 m^3 . In each instance, there were potentially twenty-five log-types (five log lengths multiplied by five species). These product types vary in terms of species, length, and MSFD. The log specifications for each product are given in Table 4.2.

Tableau 4.1 Cut-block inventories

Sect	Blk	Area (<i>ha</i>)	VH_WB (<i>m</i> ³ / <i>ha</i>)	VH_BS (<i>m</i> ³ / <i>ha</i>)	VH_POP (<i>m</i> ³ / <i>ha</i>)	VH_JP (<i>m</i> ³ / <i>ha</i>)	VH_BF (<i>m</i> ³ / <i>ha</i>)
0	0	190	0.00	54.86	17.46	112.03	0.00
1	1	107	0.30	37.71	43.80	135.70	0.90
2	2	4	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
	3	15	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
	4	159	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
	5	187	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
3	6	11	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
	7	102	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
	8	5	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
4	9	17	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
	10	101	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
5	11	5	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
	12	113	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
6	13	23	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
	14	56	0.94	55.107	62.34	78.68	2.16
	15	15	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
	16	38	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
	17	125	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
7	18	261	1.73	65.76	22.81	57.64	2.97
	19	603	1.73	65.76	22.81	57.64	2.97
8	20	148	8.12	52.64	6.61	11.37	25.29
	21	218	8.12	52.64	6.61	11.37	25.29
9	22	476	1.16	42.39	35.58	118.22	1.01
	23	106	1.00	68.44	15.51	38.42	0.06
10	24	59	0.00	65.09	2.57	27.83	0.02
	25	60	0.00	65.09	2.57	27.83	0.02
11	26	74	0.66	62.77	74.10	54.05	5.60
	27	174	0.66	62.77	74.10	54.05	5.60
12	28	77	0.17	59.01	0.00	0.04	2.54
13	29	144	0.28	77.75	37.20	70.81	0.28

To test the performance of the models, we used ten demand forecasts. The total demand is nearly constant, but the demand for individual product types varies greatly. The average demand is about 8% less than the total quantity of standing timber, which is an acceptable proportion of waste in current harvesting practices. It represents about 2.5% of the average total volumes obtained when harvesting all the blocks by each of the priority lists.

Tableau 4.2 Product specifications

ProductID	Log length (<i>cm</i>)	MSED (<i>cm</i>)
1	502	17
2	440	15
3	380	12
4	320	10
5	257	7

4.8 Computational experiments and discussion

The MIP models were solved using the commercial LP package Cplex v12.1 via its Concert Technology C++ platform. The problems were set up with sixteen priority lists.

4.8.1 Harvesting cost calculation

As stated in Section 4.5.1, the problem has a complex nonlinear objective function and cannot be solved by commercial software. Therefore, we used an approximate harvesting cost instead of the actual cost. This approximation has been validated by FPInnovations; the impact of the average length on the harvesting cost is maintained if we use the approximation when applying a bucking pattern. In fact, products of the same length from different species cannot be mixed on the ground. Therefore, calculating the average length by species is allowable. We calculated the actual harvesting cost for each scenario, using the variable values in the solution. We observed that the approximate and actual harvesting costs have the same behavior (Figs. 4.6, 4.7, and 4.8).

The actual cost is always below the approximate cost. The difference between these values (and between the values of the approximate and the actual profit) is below 70000\$. In the next section, the comparisons of the scenarios use the actual harvesting cost and its corresponding profit.

4.8.2 Results and discussion

The model contains 28 259 constraints and 94 711 variables where 87 180 are binary. Six hours was the maximum computational time allowed. In fact, initial tests demonstrated that the average solution gap after 6 hours is below 5%. (Avg) indicates the average of the values in each column in the tables.

Table 4.3 presents the instances (Ins), the CPU time in seconds (Time), and the average number of product types per cut-block (N_{moy}) for the first scenario, which was solved to

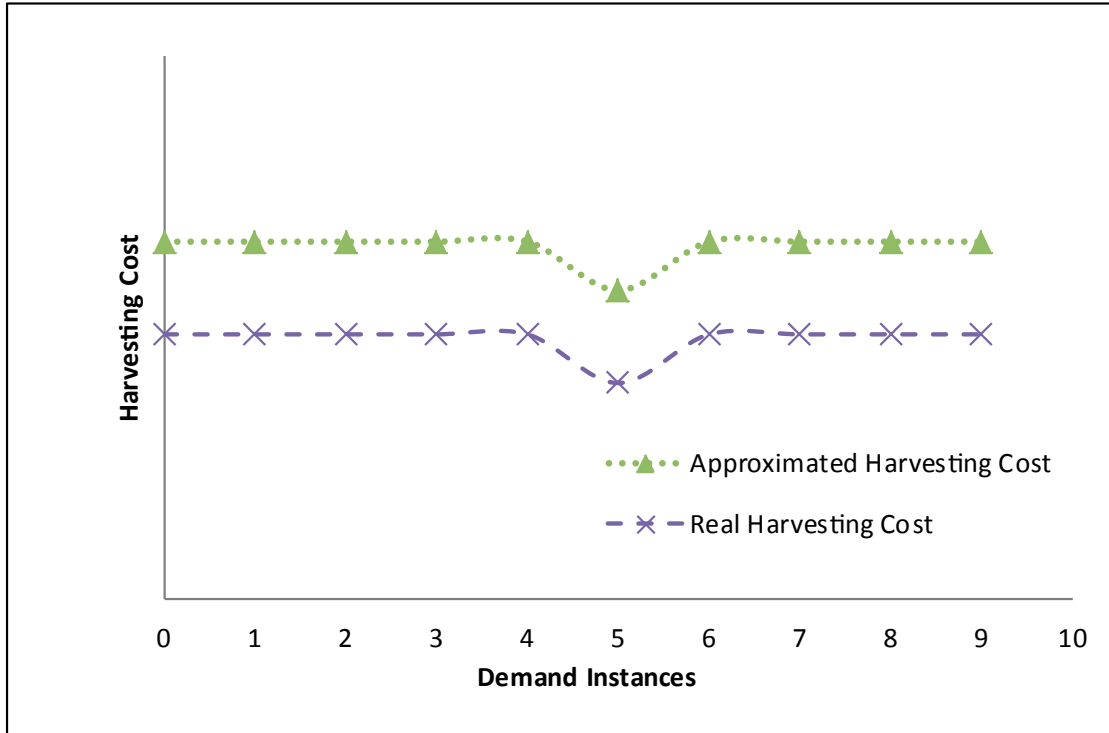


Figure 4.6 Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 1

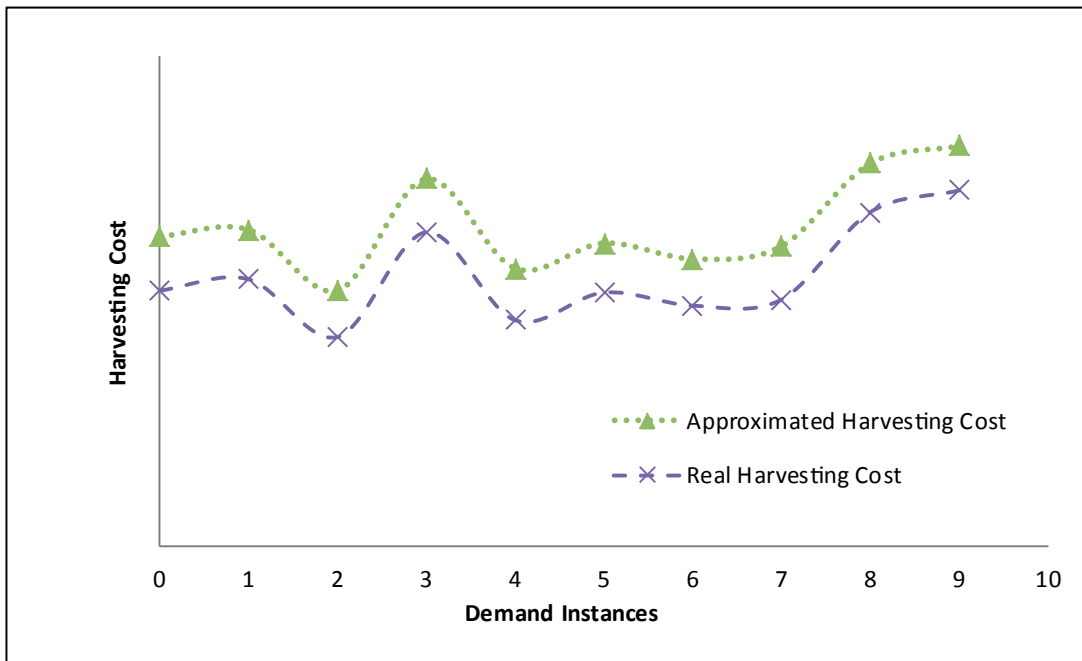


Figure 4.7 Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 2

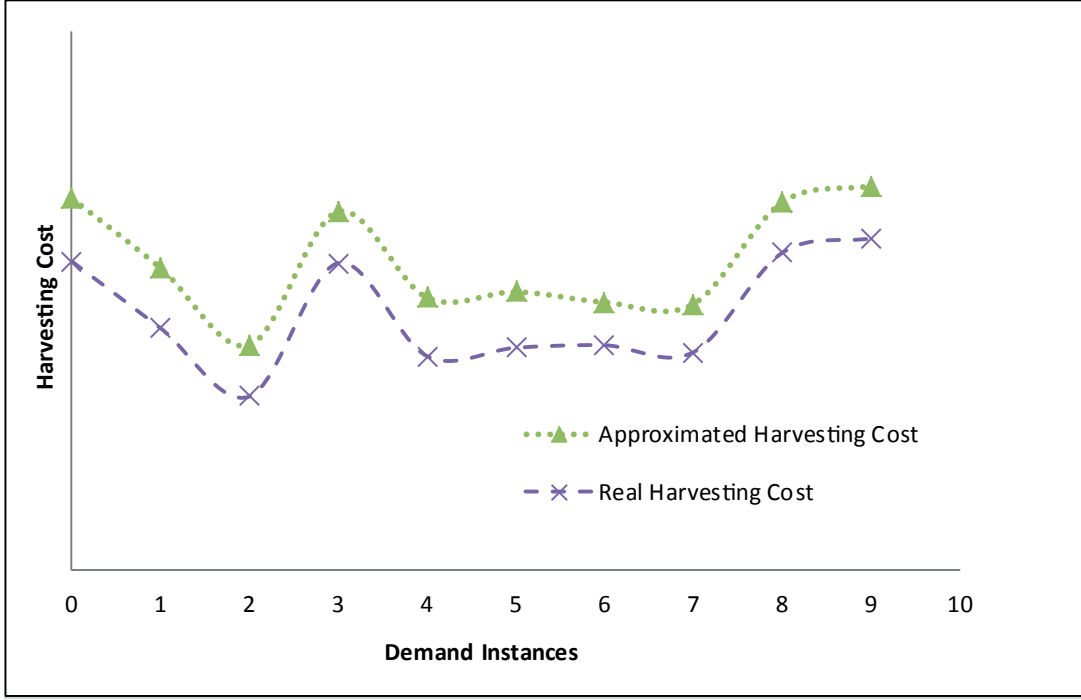


Figure 4.8 Comparison of real and approximate harvesting cost for scenario 3

optimality. It also gives the average number of product types per cut-block (N_{moy}) and the optimality gap as a percentage (Gap) for scenarios 2 and 3.

Table 4.4 lists the instances (Ins), the percentage increase in the global profit (Profit), the revenue (Revenue), and the total volume supplied to different customers (Supply) for scenarios 2 and 3 in comparison to scenario 1.

For scenarios 2 and 3 in comparison to scenario 1, Table 4.5 gives the percentage decrease in the operational costs (the harvesting cost C_R , the stock cost C_S , and the transportation cost C_T), the penalty PE on harvesting small volumes, and the bucking incentive factor BIF for using a bucking priority list r on a given block b .

Discussion

Our experiments show that our model finds a good solution within reasonable time limits (see Table 4.3). The optimal solution for the current bucking scenario (scenario 1) was obtained in less than 85s. Near-optimal solutions (average gap $< 0.5\%$) for scenarios 2 and 3 were found within 6 h. Their solution time is significantly longer because the bucking options considered are more complex.

Scenarios 2 and 3 both give a higher profit than that of scenario 1, for all of the instances

Tableau 4.3 Comparisons of forest-, sector-, and stand-aggregation scenarios

Ins	Forest-aggregation scenario		Sector-aggregation scenario		Stand-aggregation scenario	
	Time	N_{moy}	Gap	N_{moy}	Gap	N_{moy}
1	82.42	22.26	0.63	15.3	0.42	13.97
2	69.25	22.26	0.43	15.6	0.31	15.23
3	55.95	22.26	0.39	15.13	0.26	14.53
4	82.24	22.26	0.63	15.16	0.2	14.7
5	84.08	22.26	0.49	15.06	0.25	14.96
6	76.14	21.8	0.46	15.46	0.19	14.63
7	61.16	22.26	0.34	15.16	0.24	14.76
8	60.92	22.26	0.58	14.83	0.32	14.53
9	60.58	22.26	0.37	15.23	0.15	14.86
10	61.57	22.26	0.26	14.6	0.14	14.6
Avg	69.43	22.21	0.46	15.15	0.25	14.68

considered. Table 4.4 indicates that the profit increase is between 5% and 11% for sector aggregation and between 5% and 12% for stand aggregation. We report in Tables 4.4 and 4.5 the four factors that have the largest impact on the profit.

The first factor is the increase (between 5% and 11%) in revenue. This increase results from the larger volumes supplied to customers (Table 4.4). Scenarios 2 and 3 provide more bucking flexibility and produce a solution close to the upper limit of the mills' demand. A better use of standing timber to satisfy the demand for different products (3.89% increase in supplied volume) minimizes the surplus volume. The better demand fulfilment implies a decrease in the inventory cost, which is the second factor.

The third factor is the average decrease of 3.6% in the harvesting cost. This is mainly due to the decrease in the number of different product types harvested per cut-block. We confirmed this when calculating N_{moy} (it is about 22 in scenario 1 and about 15 in scenarios 2 and 3) in Table 4.3. This result is consistent with the mathematical formulation of the harvesting cost given in Eq. (A). The disaggregation reduced the number of different log types per block, leading to a harvesting cost decrease.

The fourth factor is the decrease in the penalty (PE). It decreases by an average of 22.27% since we harvest fewer small product volumes. This reduces the cost of manipulating small volumes. In scenarios 2 and 3, there is no obligation to apply the same bucking priority list per species to all the cut-blocks. The generated bucking plan tends to limit the number of different products per block because of the nonlinear harvesting cost. The limited number of products chosen are harvested in larger volumes.

Tableau 4.4 Percentage increase in sector- and stand-aggregation scenarios compared to forest-aggregation scenario

Ins	Sector-aggregation scenario			Stand-aggregation scenario		
	Profit	Revenue	Supply	Profit	Revenue	Supply
1	10.62	4.86	5.23	10.81	5.04	5.42
2	8.99	3.88	4.20	9.28	3.98	4.31
3	5.60	1.92	2.06	5.93	2.00	2.15
4	11.42	5.69	5.96	11.91	5.87	6.13
5	8.52	3.63	3.93	8.91	3.74	4.03
6	8.45	3.61	3.89	8.87	3.78	4.05
7	7.55	2.98	3.12	7.81	3.07	3.20
8	8.23	3.39	3.75	8.67	3.62	3.97
9	6.71	3.18	3.19	7.08	3.34	3.35
10	5.12	2.13	2.12	5.37	2.26	2.25
Avg	8.12	3.53	3.74	8.46	3.67	3.89

Tableau 4.5 Percentage decrease in sector- and stand-aggregation scenarios compared to forest-aggregation scenario

Ins	Sector-aggregation scenario					Stand-aggregation scenario				
	C_R	C_S	C_T	PE	BIF	C_R	C_S	C_T	PE	BIF
1	3.77	66.81	*0.01	17.31	1.88	3.52	62.42	*0.50	19.95	2.55
2	3.66	51.91	0.18	21.09	1.95	4.11	54.16	0.25	27.71	1.08
3	4.21	36.79	0.72	15.01	1.19	4.70	40.06	0.91	16.38	0.68
4	3.21	72.04	*0.31	26.38	*0.18	3.54	76.33	*0.18	24.52	0.08
5	4.05	54.49	0.74	17.25	0.56	4.35	57.21	0.84	28.13	0.43
6	3.52	55.08	0.68	18.77	2.31	4.01	58.91	0.82	25.22	1.40
7	3.91	47.90	0.90	16.32	2.47	4.25	49.35	0.96	18.91	1.86
8	3.85	51.23	0.09	30.88	1.83	4.31	53.56	0.05	29.30	0.83
9	3.01	42.98	*0.09	17.09	*0.78	3.45	45.33	*0.05	18.24	*1.49
10	2.81	28.88	0.14	15.21	1.66	3.32	31.34	0.17	14.30	0.56
Avg	3.60	50.81	0.31	19.53	1.29	3.96	52.87	0.33	22.27	0.80

* : Percentage increase

In scenarios 2 and 3, the incentive factor BIF decreases slightly. In these scenarios, the model can choose between different priority lists that are suited to the characteristics of the cut-blocks and satisfy the total demand. However, this does not greatly affect the profit since the model favors demand satisfaction, which is consistent with the nature of the factor and the mathematical formulation given in P_1 .

Moreover, the profit increment is not affected by changes in the transportation costs.

Almost the same volume of logs is transported in each scenario. The logs are either supplied to mills or stored. The first scenario has the largest excess volumes. The procurement plan for scenario 1 allocated this excess to the nearest mills, thus decreasing the transportation costs since there are no specific destinations for the excess.

Comparison of sector- and stand-aggregation scenarios. Scenario 3 has a slightly higher profit than scenario 2 (stand aggregation). This improvement is the result of a minor decrease in the inventory cost and the harvesting cost and an increase in the volume supplied and the revenue. This probably occurred because the degree of aggregation of the cut-blocks in different sectors is not important. One sector contains five cut-blocks, one contains four, one contains three, and the remaining sectors contain one or two blocks. Usually a sector contains one large cut-block (large area) with a smaller one (Table 4.1). Therefore, the impact of stand aggregation is less because the wood-procurement plans (the solutions for the two scenarios) are similar.

4.9 Conclusion

We have presented a multi-facility wood-procurement model for a cut-to-length (CTL) bucking system. A priority-list approach was used to generate bucking patterns in the Eastern Canadian context. The proposed procurement plan maximizes the profit while coordinating the activities involved in the wood supply chain. We have presented a linearized integer programming formulation for the global problem.

The model provides a good solution for a realistically sized problem, within a reasonable time limit. The model was used to compare three bucking scenarios. The two new scenarios generated a larger profit (between 5% and 11% higher) than the base scenario (forest aggregation). A loss of value occurs in various stages along the forest-to-mill value chain : the harvesting cost, the inventory management, and the order-fulfillment level. Scenarios 2 and 3 induce a decrease in the number of different products per block, which generates a potential decrease in the harvesting cost ($> 3\%$) .

To conclude, we believe that strategic changes to the harvesting structure, in the form of the disaggregation presented in scenarios 2 and 3, would be profitable for forest companies. *There would be no major shift in the technology in use.* However, we recognize that the priority-list bucking approach is effective for the relatively simple, but realistic, market restrictions considered in this project. Future research could extend the model to consider a multi-period wood-procurement plan for a cut-to-length (CTL) bucking system using sort yards.

Acknowledgement

The authors would like to thank Mr. Jean Favreau and Mr. Sebastien Lacroix from FPInnovations for their support. FPInnovations has proposed this optimization problem and has provided costs and operational data.

Appendix

Here we present the detailed formulation of the harvesting cost and the proposed approximation. We also discuss the parameters used in the mathematical model.

4.10 Detailed harvesting cost calculation

4.10.1 The real harvesting cost

For notational simplicity, we introduce index n as in (P1). The unit real harvesting cost C_{bn}^{RH} per cut-block, if n different products are obtained, is given by :

$$C_{bn}^{URH} = n^\gamma \left[\beta \left(\left(\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} l_p V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \right) / \left(\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \right)^\alpha \right) \right] C_b^H \quad (1A)$$

where

$\beta > 1, (\gamma, \alpha) < 1$ Empirical constants determined by FPInnovations ;
 l_p Length of product type p.

Therefore, the real harvesting cost per cut-block is calculated via

$$C_b^{RH} = \sum_{n \in N} C_{bn}^{URH} \left(\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \right) \quad (2A)$$

4.10.2 The approximate harvesting cost calculation

The unit approximate harvesting cost C_{bern}^{UAH} is pre-calculated for each priority list r , applied to each species e in a given cut-block b , if n different products are obtained, as follows :

$$C_{bern}^{UAH} = n^\gamma \left[\beta \left(\left(\sum_{p \in P_r} V_{pe}^{br} l_p \right) / \left(\sum_{p \in P_r} V_{pe}^{br} \right)^\alpha \right) \right] C_b^H \quad (1B)$$

Therefore, the approximate harvesting cost per cut-block is

$$C_b^{AH} = \sum_{n \in N} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} C_{bern}^{UAH} V_{pe}^{br} y_{rn}^{be} \quad (2B)$$

4.11 Calculation of bucking incentive factor

The penalty factor BIF_b^{re} for each species e in block b bucked using priority list r is as follows :

$$BIF_b^{re} = \sum_{c \in C_e} \left[\left(\sum_{p \in r} \theta (1 - l_p / L_c) \right) / |r| \right] V_c^{be} \quad (C)$$

where

- C_e Set of tree-diameter classes of species e ;
- L_c Average length of tree-diameter class c ;
- l_p Length of product type p ;
- $|r|$ Number of different products in priority list r ;
- θ Empirical positive constant ;
- V_c^{be} Volume of tree-diameter class c , of species e , in cut-block b .

CHAPITRE 5

ARTICLE 2 : ANNUAL TIMBER PROCUREMENT PLANNING WITH BUCKING DECISIONS

Cet article a été soumis à *European Journal of Operational Research* en Septembre, 2013.

Amira DEMS, Louis-Martin ROUSSEAU, Jean-Marc FRAYRET

*École Polytechnique de Montréal,
Département de Mathématiques et Génie Industriel
C.P. 6079, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3A7*

*Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks,
Logistics and Transportation (CIRRELT)
C.P. 6128, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3J7*

{amira.dems, louis-martin.rousseau, jean-marc.frayret@polymtl.ca}

Abstract

The problem we consider is a practical multiple-period wood procurement planning problem in the Eastern Canadian context. The forest cut blocks are large and heterogeneous; they have different densities and the diameter of the trees varies. This is a difficult forest management problem because it integrates two related problems : the forest bucking problem with a cut-to-length (CTL) bucking system and the multi-facility supply planning problem. The choice of the areas to harvest in each period and how to harvest them affects the assortments provided to the mills. We must decide which areas to harvest in each period so that the demands of the various wood-processing facilities are satisfied. Moreover, we must indicate how to harvest the different cut blocks according to the bucking priority list and the quantity of harvested logs from each block to transport to the sawmill. In this paper, we extend the procurement model presented by Dems et al. (2013) to more detailed multiple-period planning. We develop a mixed integer linear model, and we propose two heuristic approaches that quickly generate an initial feasible schedule of cut blocks. Computational results on data set from an Eastern Canadian forestry company are presented.

Keywords : Forest bucking problem, wood-procurement planning, mixed integer programming.

5.1 Introduction

Wood procurement planning (WPP) encompasses a wide range of activities that provide quantities of wood to processing mills (see Beaudoin et al. (2008)). The wood supply chain (WSC) involves a complex set of interrelated decisions about harvest scheduling, forest bucking, and supplies to mills (Uusitalo, 2005).

In customer-oriented WPP, it is more important to improve the fit between mill demand and the output of the bucking operations, than to minimize the operational costs (Uusitalo, 2005). If tree bucking and wood-supply planning are considered separately, some of the supply plans may be infeasible because of the heterogeneity of the forest (Chauhan et al., 2009). In addition, tree bucking is an irreversible process (it is impossible to correct a poor bucking), and it has a direct impact on the end products of the sawmill (Chauhan et al., 2009).

In this paper, we extend the procurement model presented by Dems et al. (2013) to multiple-period planning. The planning horizon considered is twelve months. Multiple-period planning allows the planner to investigate the impact of temporal variations in demands, log availability, and inventory holdings on the procurement plan.

Our first goal is to find a near-optimal wood-procurement plan, driven by mill demands,

within a practical time limit. Given a list of cut blocks to harvest, we must decide which blocks to harvest at each period to satisfy the demands of various wood-processing facilities. The allocation of the cut blocks to harvesting periods affects the assortment produced, since each cut block has a particular mix.

A significant part of the harvesting cost arises because the production yield decreases nonlinearly as the number of product types per cut block increases. Our cost formulation takes this into account (see Dems et al. (2013)). This is an important aspect of the decision-making process in forest management (Arce et al., 2002). This production level is also affected by the bucking priority list, because of the divergent nature of the bucking process.

Moreover, the model indicates in what quantities the harvested logs from each block should be transported to the mills. The problem includes overall decisions about transportation, storage in the forest, and storage at the mill terminals. There are also a number of restrictions to be considered during harvesting such as the variability of the weather conditions during the year. For example, it is impossible to carry out harvesting and transportation activities during a thaw.

We develop a mixed integer linear model describing the problem. Our objective is to decrease the operational costs (harvesting, transportation, and inventory costs). We achieve this by a better scheduling of the harvesting of cut blocks in different periods and by optimizing the allocation of bucking lists to species. This study is an extension of the research of Dems et al. (2013); see Dems et al. (2013) for more details on the bucking problem.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 5.2 presents an overview of the literature, and Section 5.3 introduces the problem. Section 5.4 presents the mathematical formulation, and in Section 5.5, we present our solution approaches. The data used in our tests and the computational results are introduced in Section 5.6. Finally, Section 5.7 presents concluding remarks and some research perspectives.

5.2 Literature review

WSC planning has been discussed in several papers; for a survey, see D'Amours et al. (2008). The WSC includes many decisions and operations. They range from strategic to operational levels of planning, depending on the planning horizon. The times differences for each level are not well defined and may differ from one problem to another. Carlsson et al. (2009) present a summary of the strategic, tactical, and operational planning decisions involved in the pulp and paper industry.

Operations research is increasingly used in the development of tools for various forest planning problems (Björndala et al. (2012), Weintraub et al. (2006), Weintraub et al. (2007)).

The methodology developed for some typical problems, at different planning levels in the WSC is reviewed by Rönqvist (2003) and Björndal et al. (2012).

5.2.1 Integrated wood procurement problem

Operational planning concerns short-term decisions covering one day to about two months (see Epstein et al. (2007)); it is directly connected to harvest operations. Short-term harvest planning may include harvest planning, transportation problems (Epstein et al., 2007), crew scheduling (Karlsson et al., 2003), machine location (Epstein et al., 2006), control of storage in the forest, at the terminals and the use of sorting yards (Sessions et al., 2005), and bucking problems (Grondin (1998), Kivinen (2007), Kivinen (2006)). In some cases, several activities are integrated within a single model to form a multi-element WPP problem.

WSC planning has helped to improve the performance of forestry companies, but integrating the requirements of different planning problems into the supply chain is still challenging.

Arce et al. (2002) proposed a mixed integer linear programming (MIP) model for a harvest planning problem with forest bucking and transport decisions. Their objective was to maximize the total net revenue at the forest level. The bucking patterns are generated using simple heuristic rules, and the number of products bucked per stand is limited; the authors did not consider the impact on the harvesting cost.

Chauhan et al. (2009a) presented a short-term (e.g., one week) multi-commodity WPP problem. They proposed an extension of the model presented in Chauhan et al. (2009) that takes bucking decisions into account. They used bulk-process-based bucking, which is a simplification of the real bucking process. They were the first to take into account the impact of the number of harvested assortments on the harvesting cost.

Dems et al. (2013) proposed an annual procurement plan that respects the harvesting practices used in Eastern Canada. The model incorporates bucking and transportation activities. The bucking optimization is based on the customer demand and generates adequate bucking patterns using a priority-list approach. Furthermore, this approach is based on a simulation of the harvest yields of each bucking scenario for each cut block, whereas the approaches in Chauhan et al. (2009) and Chauhan et al. (2009a) compute these yields directly according to the cut-block tree-diameter distributions. The model includes a harvesting cost function that considers the nonlinearity of the harvester productivity function; this is important in forest management (Arce et al., 2002). The authors compared different bucking scenarios to help decision makers to develop a more efficient forest procurement system.

The problems presented above consider a single period. Single-period WPP does not consider seasonality, which has a large impact on the WSC. It is therefore not possible to analyze the impact of temporal variations (e.g., weather conditions) on inputs such as the

demand, the flow of logs from the cut blocks, and the inventory holdings. Moreover, single-period planning assumes that it is possible to mix logs from different cut blocks since they can be harvested simultaneously. However, in the real problem, there are operational restrictions on the number of cut blocks that can be harvested at a given time.

Epstein et al. (1999) proposed a multi-period WPP problem including cut-block scheduling, bucking, and transportation activities. The method relies on a decomposition technique where the bucking patterns are generated in the subproblem and included in the master problem during the optimization process. As noted by many authors, this decomposition approach is theoretically correct and computationally efficient (Laroze (1993), Sessions et al. (1989)). However, it is difficult to implement because of the generation of a large number of cutting instructions and the difficulty of subdividing the cut blocks into different stem classes.

Karlsson et al. (2003) proposed an MIP model for a WPP problem integrating transportation and annual road-maintenance planning. In this short-term problem, bucking patterns are not considered because the cutting instructions are short-term decisions provided by the harvester's on-board computer.

Bredström et al. (2010) presented an MIP closely related to that of Karlsson et al. (2003). The model integrates the assignment of machines and harvest teams (crews) to harvest areas and the scheduling of the harvest areas during the year for each machine. The two-phase solution approach first solves the assignment and then considers the scheduling.

The problem addressed in this paper is a multi-period multi-commodity WPP problem with multiple sources (cut blocks) and multiple destinations (mills). We generate an annual wood-procurement plan that respects the harvesting practices used in Eastern Canada. The planning integrates bucking, transportation, and inventory decisions. The model extends that presented in Dems et al. (2013) to multiple periods. We use the priority-list approach developed in Dems et al. (2013) to generate bucking patterns that are practical and easy to implement.

5.3 Problem Description

The management of the forest cut blocks (harvesting areas) is centralized and done by the same multifacility forestry company. A strategic five-year plan defining the blocks to harvest is defined at a higher level of planning. The right to harvest the trees of these cut blocks is obtained from the government through timber licences (TL). The company performs the harvesting and transportation activities itself to supply its geographically distributed mills.

Current planning approach. The WPP problem is currently solved manually. Typically, the experienced planners rely on data from preceding periods and trial-and-error. They generate the plan using general-purpose tools such as spreadsheets and a geographical information system. It is difficult and time-consuming to generate a plan that meets the requirements of all the stakeholders. These plans generate significant log inventories through mismatches of production and demand. The major WSC activities included in this project are harvesting, storing logs in dedicated areas, transporting logs from the forest to the mills, and storing logs at the mills.

Harvesting. The cut blocks are large and heterogeneous, with important differences in the tree diameters. They are accessible through a road network. The proposed model links activities from two different levels of forest planning : the scheduling of cut blocks (tactical level) and forest bucking (operational level). In this paper, our optimization approach defines the sequence of blocks to be harvested over the twelve periods. We assume that an area can be harvested in at most six contiguous periods. Seasonality has also a large effect on the harvesting operations.

Forest bucking. We use the priority-list bucking approach of Dems et al. (2013) to generate simple patterns. We allocate logs to each stem section using a priority list. A priority list is a sequence of at least two of at most l_{max} allowable log-types obtained from a stem, generated according to simple rules. The position of a product in the priority list depends on its commercial value, length, and minimum small end diameter (MSED). The lowest priority is assigned to the product with the shortest length and smallest MSED, generally a pulp log. A bucking priority list is assigned to each species.

We use the simulation tool FPInterface to predict the yield products from the application of a given bucking priority list to a sample of trees from the cut blocks. This software, designed by FPInnovations, is used to simulate different activities in the forest supply chain.

As in Dems et al. (2013), we also consider the effect of a productivity decrease in the harvesting machinery on the harvesting cost. The harvesting cost increases with the number of products bucked per cut block and decreases with the average length of the products. As reported in the literature (Gingras et al. (2002), Brunberg et al. (2001)), a reduction of 1%–4% in the harvester productivity (respectively 3%–7% in the forwarder productivity) is generated by harvesting a new log type in a cut block. This increases the harvesting cost and leads to complex instructions for the log makers. The resulting harvesting-cost formulation increases the combinatorial complexity of classical WPP. The unit harvesting cost does not depend on the time periods.

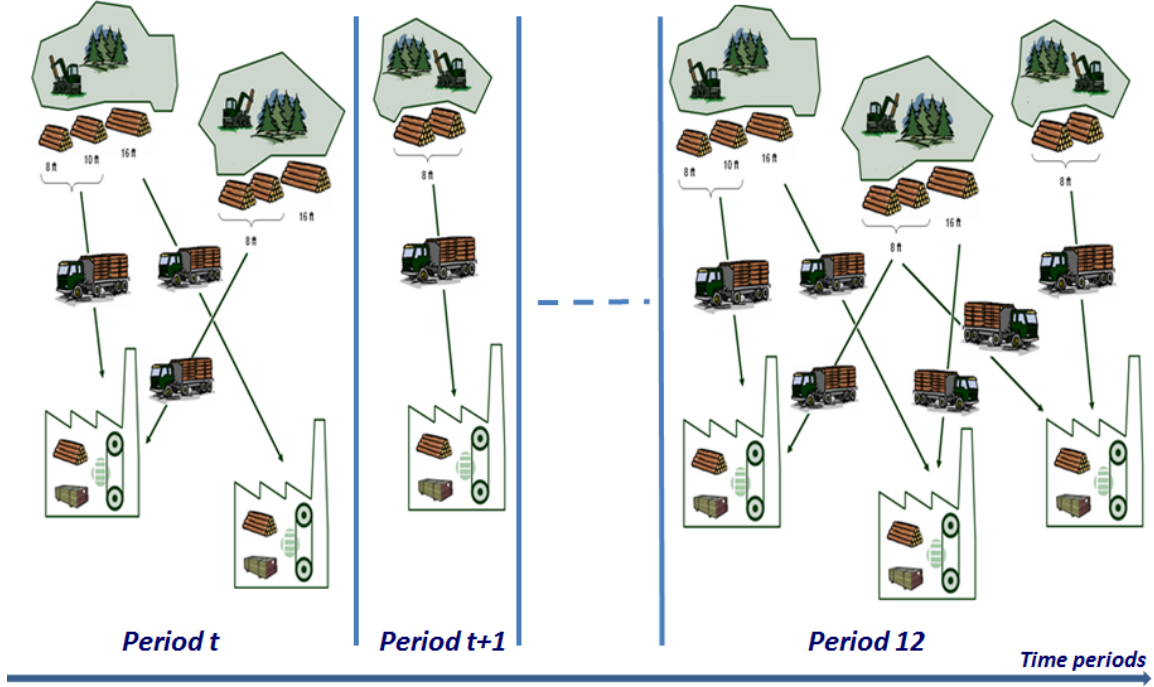


Figure 5.1 Framework of the integrated multi-period wood procurement problem.

Storage in forest areas. Some of the harvested volumes are left at the roadside. Others are transported to mills to be used or stored in their storage areas, depending on the demand. The cost of storage at the cut blocks corresponds to the quality deterioration; this decrease in quality is not as important in the winter. The roadside storage is unlimited but it is not desirable for too many products to stay at the roadside.

Transportation. The transportation cost is a significant portion of the total cost. It depends on the distance between the blocks and the mills as well as on the product type. All transported volumes are delivered to their final destinations. Part of the delivery is used to meet the mill demand, and the remainder is placed in storage, with an associated inventory cost. We place an upper bound on the total volume transported in each period.

Storage at mills. Part of each delivery may be placed in storage areas. No exchange of timber between mills is allowed, and each mill has a given storage capacity. There is an inventory holding cost per cubic meter, which depends on the period.

Decision-support objective. Given the annual demand from a set of geographically distributed mills and the set of forest cut blocks to harvest during the year, we propose a

mathematical model for the problem described above. The objective of this paper is to find a near-optimal wood procurement plan for a planning horizon of one year, divided into twelve months, to support Eastern Canadian forestry companies without changing the technologies currently in use (see Fig. 5.1).

5.4 Mathematical Formulation

This section presents a formal mathematical model for the general problem. We use the following variables and parameters :

Parameters

B	Set of forest cut blocks ;
U	Set of mills ;
P	Set of product types ;
E	Set of species ;
E_b	Set of species in block b ;
R	Set of priority lists ;
P_r	Set of products in bucking priority list r ;
I	Set of schedules ;
I_b	Set of schedules for block b ;
T	Set of time periods ;
T_b	Number of months needed to totally harvest block b ;
V_t^H	Total harvesting capacity in time period t (m^3) ;
V_t^T	Total transportation capacity in time period t (m^3) ;
V_u^S	Inventory capacity of mill u (m^3) ;
V_{pe}^{br}	Volume of product p available when bucking species e of block b , according to priority list r (output of simulation) ;
V_i^{max}	Maximum harvesting capacity per period according to schedule i ;
V^b	Volume of timber available in forest site b (m^3) ;
C_{bern}^H	Unit harvesting cost for each priority list r applied to each species e in a given block b ;

C_{bup}^T	Unit transportation cost between block b and mill u for product p of species e (\$/m ³);
C_t^{SF}	Unit inventory cost in forest during time period t (\$/m ³);
C_t^{SU}	Unit inventory cost in mills during time period t (\$/m ³);
C_{uep}^D	Unit cost corresponding to unsatisfied mill's u demand of product p , species e ;
N	Maximum number of different product types that can be harvested from a block;
NB^{max}	Maximum number of blocks to harvest in each period;
D_{uep}^t	Demand at mill u for product p of species e in period t (m ³);
a_i^t	Coefficient used to extract information from schedule i . Takes value 1 if harvesting occurs in period t , 0 otherwise;
φ_r	Number of different products in the priority list r .

Variables

w_b^n	Binary : takes value 1 if n different products are obtained from block b ; 0 otherwise;
$\tilde{w}_{ber}^n$	Binary : takes value 1 if bucking priority list r is applied to species e of block b when n different products are obtained from b ; 0 otherwise;
z_b^i	Binary : takes value 1 if block b is allocated to schedule i ; 0 otherwise;
y_b^t	Proportion of block b , harvested in time period t ;
$\tilde{y}_{ber}^t$	Proportion of block b , harvested in time period t , when bucking species e of b , using bucking priority list r ;

x_{bep}^{ut}	Flow of product type p , species e from block b to mill u in period t (m^3);
$\tilde{x}_{uep}^t$	Orders of product p , species e , used by mill u in time period t ;
s_{bep}^t	Stored volume of product p , species e , in block b , at end of period t (m^3);
$\tilde{s}_{uep}^t$	Stored volume of product p , species e , in mill u , at end of period t (m^3).

5.4.1 Mathematical Model

A mixed-integer linearized mathematical formulation of problem (P) is :

Model

$$\begin{aligned}
 (P) \quad \text{Min} \quad & \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} \sum_{n \in N} C_{bern}^H V_{pe}^{br} \tilde{w}_{ber}^n + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{bupe}^T x_{bep}^{ut} \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} C_t^{SF} s_{bep}^t + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_t^{SU} \tilde{s}_{uep}^t + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{uep}^D \tilde{x}_{uep}^t
 \end{aligned}$$

subject to

Bucking constraints

$$\sum_{n \in N} w_b^n = 1 \quad \forall b \in B \quad (1)$$

$$\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \varphi_r \tilde{w}_{ber}^n = n w_b^n \quad \forall b \in B \text{ and } \forall n \in N \quad (2)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \tilde{w}_{ber}^n = 1 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall e \in E_b \quad (3)$$

$$\sum_{n \in N} \tilde{w}_{ber}^n = \sum_{t \in T} \tilde{y}_{ber}^t \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \text{ and } \forall r \in R \quad (4)$$

Sites scheduling constraints

$$\sum_{b \in B} y_b^t V^b \leq V_t^H \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_b} z_b^i = 1 \quad \forall b \in B \quad (6)$$

$$y_b^t \leq \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (7)$$

$$y_b^{t+1} \leq y_b^t - \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i + 1 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in \{0, |T| - 2\} \quad (8)$$

$$y_b^t V^b \leq \sum_{i \in I_b} V_i^{max} z_b^i \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R} \tilde{y}_{ber}^t = y_b^t \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \text{ and } \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i \leq N B^{max} \quad \forall t \in T \quad (11)$$

Procurement constraints

$$s_{bep}^t = \sum_{r \in R} \tilde{y}_{ber}^t V_{pe}^{br} - \sum_{u \in U} x_{bep}^{ut} + s_{bep}^{t-1} \quad \forall b \in B, \forall e \in E, \forall p \in P, \text{ and } \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (12)$$

$$\tilde{s}_{uep}^t = \tilde{s}_{uep}^{t-1} + \sum_{b \in B} x_{bep}^{ut} - D_{uep}^t + \tilde{x}_{uep}^t \quad \forall u \in U, \forall e \in E, \forall p \in P, \text{ and } \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (13)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \tilde{s}_{uep}^t \leq V_u^S \quad \forall u \in U \text{ and } \forall t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} x_{bep}^{ut} \leq V_t^T \quad \forall t \in T \quad (15)$$

Binary variables

$$z_b^i, w_b^n, \tilde{w}_{ber}^n \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, \forall r \in R, \forall e \in E, \forall p \in P, \text{ and } \forall n \in N \quad (16)$$

Continuous variables

$$x_{bep}^{ut}, \tilde{x}_{uep}^t, s_{bep}^t, \tilde{s}_{uep}^t, y_b^t, \tilde{y}_{ber}^t \geq 0 \quad \forall b \in B, \forall e \in E, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall r \in R \text{ and } \forall t \in T \quad (17)$$

The objective function minimizes the total operational costs : the harvesting cost, the transportation cost, the storage cost, and the penalties on the default volumes at the mills (the

orders). The unit harvesting cost considers the nonlinearity of the harvester productivity function. Specifically, it considers the number of different log types harvested per block, which is a delicate aspect of forest management. We calculate the unit harvesting cost C_{bern}^H using the approximation presented by Dems et al. (2013) .

Constraints (1) and (2) count the number of different log types harvested in each cut block (n). Constraint (3) ensures that we have only one n in each cut block and we use only one bucking list per species per block. Constraint (4) ensures that the sum of the volume proportions of a species using a bucking list r is equal to one if this priority list is assigned to it and zero otherwise.

Constraints (5) through (11) deal with block scheduling. Constraint (5) limits the total volume harvested per period. Constraint (6) ensures that we assign only one schedule per block. Constraints (7) and (8) ensure the continuity of the harvesting activity of a block once began. Constraint (9) ensures that the harvested volume does not exceed the associated harvesting schedule capacity. Constraint (10) ensures that the proportion of the volume harvested from each species is equal to the proportion harvested from the block volume. This is an approximation of the real problem, since we consider that the species are uniformly distributed in the block. Constraint (11) limits the number of blocks in which harvesting can occur during a period.

According to FPInovations, we can define five different harvesting capacities. The harvesting capacity is determined by the production capacity of different types of harvesting equipment and harvesting teams (m^3/period). In this paper, we do not consider crew scheduling; we consider these different harvesting capacities only to generate harvesting schedules. To generate a schedule for a given cut block harvested according to a given harvesting capacity, we take the ceiling of the ratio of its standing timber to the associated harvesting capacity. This gives us the duration (the number of periods needed to harvest the whole block). Then, we associate with every cut block (duration) a set of possible harvesting sequences when beginning the harvesting in different time periods of the planning horizon, these represent the set of schedules. The schedules must respect seasonal conditions. If different harvesting capacities give the same schedule, we choose the smallest one.

Constraints (12) to (18) define the procurement activities. Constraints (12) and (13) represent the flow conservation constraints at the forest and the mills. Constraint (14) limits the stocked volume per period in each mill. Constraint (15) limits the total transportation capacity.

Constraint (16) ensures that the variables are binary, and constraint (17) is a non-negativity constraint.

5.5 Solution Approaches

In this paper, we first solve the problem directly using Cplex, we call this the explicit approach. Then, we present two other approaches. The first one uses a MIP-based heuristic technique : relax, fix and optimize approach. The second one is based on a greedy heuristic.

5.5.1 Relax, fix, and optimize approach

In this second approach, we consider a relaxed problem where the scheduling variables z_b^i are continuous, so we can harvest a cut block using fractional schedules. This new problem is easier to solve but does not give feasible solutions since we harvest a cut block using more than one schedule. Then, we solve the real problem with some variables fixed to 1 as part of an initial solution. The three steps are :

Step 1. Solve the partially relaxed problem (relax only the z_b^i variables).

Step 2. Fix to 1 the z_b^i variables that are equal to 1 in the solution of Step 1.

Step 3. Solve the MIP using the fixed variables as part of an initial solution to the problem.

5.5.2 Greedy heuristic based approach

The third approach is composed of two phases. The first one, called the “tactical harvesting problem” deals with blocks harvest sequencing. The heuristic assigns a harvesting schedule to every cut block. This phase yields a harvest schedule to every block that is communicated to the MIP model as part of the initial solution ; Algorithm 1 presents this heuristic.

We tested different methods to assign schedules to blocks and blocks to periods ; our heuristic is based on the approach that gave the best results. In the heuristic, we assign blocks to each period according to their order in the list. We then assign to each block the schedule with the lowest harvesting capacity.

At each iteration we calculate the residual volume, which is the difference between the maximum possible harvesting volume and the harvesting capacity of each period. At each assignment, we ensure that the limits on the maximum harvesting capacity and the maximum allowable blocks to harvest are respected so that the block schedule is feasible.

5.6 Computational Experiments and Discussion

The forest inventory consists of 30 heterogeneous and mature cut blocks in Eastern Canada. They occupy 3673 ha and a volume of about $580000 m^3$. Each block is composed of at least two of five different species. Table 5.1 presents each block, its corresponding area

Algorithm 1 Greedy heuristic

- 1: Let $List_Blocks$ be the set of blocks b , ordered according to decreasing volume V_b
 - 2: Let $List_Sched(b)$ be the set of harvesting schedules for block b in decreasing order of duration
 - 3: Let $List_Forbid$ be the set of tabu blocks that cannot be assigned in the current iteration, which is empty at $t = 0$
 - 4: Let V_t^H be the total harvesting capacity in time period t
 - 5: Let $V_{b,s}^t$ be the maximum harvesting capacity per period t according to schedule s of block b
 - 6: Let NB^{max} be the maximum number of blocks to harvest in each period
 - 7: Let NB^t be the current number of blocks to harvest in period t
 - 8: Let V_r^t be the residual volume, defined as $V_r^t = V_t^H - V_{b,s}^t$
 - 9: $t \leftarrow 0$; $NB^0 \leftarrow 0$; $V_r^0 \leftarrow V_0^H$; T is the last time period of the horizon;
 - 10: **if** ($t \leq T$) **then** go to step 13;
 - 11: **else** STOP.
 - 12: **end if**
 - 13: **if** ($NB^t \leq NB^{max}$) **then**
 find the first block $b \in List_Blocks$ such that $V_b \leq V_r^t$ and not in $List_Forbid$;
 if no such a block exists; increment t ; go to step 10;
 - 14: **else**
 increment t ; empty $List_Forbid$; go to step 10;
 - 15: **end if**
 - 16: Assign b to the schedule s from $List_Sched(b)$ with the longest length ($duration$) and ($t + duration \leq T$)
 - 17: if no such schedule exists, set $b \in List_Forbid$; go to step 10;
 - 18: Update $V_r^{t'}$ and $NB^{t'}$ for all $t' \in [t, t + duration]$
 - 19: **if** ($V_r^{t'} \geq 0$ for all $t' \in [t, t + duration]$) **then**
 remove b from $List_Blocks$; go to step 13;
 - 20: **else**
 - 21: Set $b \in List_Forbid$;
 - 22: Fix $V_r^{t'}$ and $NB^{t'}$ for all $t' \in [t, t + duration]$ to their previous values;
 - 23: Go to step 13;
 - 24: **end if**
-

in hectares (ha), and the volume per ha (m^3/h) of each species. We considered potentially

Tableau 5.1 Cut-block inventories

Block	Area (ha)	VH_E_1 (m^3/ha)	VH_E_2 (m^3/ha)	VH_E_3 (m^3/ha)	VH_E_4 (m^3/ha)	VH_E_5 (m^3/ha)
0	190	0.00	54.86	17.46	112.03	0.00
1	107	0.30	37.71	43.80	135.70	0.90
2	4	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
3	15	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
4	159	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
5	187	1.17	57.16	12.26	42.67	2.04
6	11	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
7	102	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
8	5	0.00	57.16	0.00	63.71	0.00
9	17	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
10	101	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
11	5	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
12	113	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
13	23	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
14	56	0.94	55.107	62.34	78.68	2.16
15	15	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
16	38	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
17	125	0.94	55.10	62.34	78.68	2.16
18	261	1.73	65.76	22.81	57.64	2.97
19	603	1.73	65.76	22.81	57.64	2.97
20	148	8.12	52.64	6.61	11.37	25.29
21	218	8.12	52.64	6.61	11.37	25.29
22	476	1.16	42.39	35.58	118.22	1.01
23	106	1.00	68.44	15.51	38.42	0.06
24	59	0.00	65.09	2.57	27.83	0.02
25	60	0.00	65.09	2.57	27.83	0.02
26	74	0.66	62.77	74.10	54.05	5.60
27	174	0.66	62.77	74.10	54.05	5.60
28	77	0.17	59.01	0.00	0.04	2.54
29	144	0.28	77.75	37.20	70.81	0.28

twenty-five log-types, varying in terms of species, length, and MSED ; see Table 5.2. We set up sixteen priority lists and we considered five mills to supply. The model is solved using the commercial LP package Cplex v12.5 via its Concert Technology C++ platform.

We define different instances to test the performance of the model under various demand conditions. The instances are generated by varying the volumes of the product mix required per mill. We ensure that the production capacity of each mill is respected every period, a

Tableau 5.2 Product specifications

ProdType	Log length (<i>cm</i>)	MSED (<i>cm</i>)
1	502	17
2	440	15
3	380	12
4	320	10
5	257	7

constraint defined by the forestry company.

Also, we consider an upper bound on every product type, which represents the yield of this product when it is considered as the first element of the priority list applied to the whole cutting block. The total demand and the monthly demand are nearly constant for all the scenarios. They are specified in terms of volume (i.e., m^3) of the different product types. The average demand is between 5% and 8% less than the total quantity of standing timber, which represents low-value small-diameter logs and branches. The demand for each mill is given per month and product type.

5.6.1 Results and discussion

Table 5.3 presents the instances (Ins), the solution time (Time) in hours (h) and minutes (min), and the optimality gap (Gap) as a percentage (%). The maximum computational time is set to about 24 hours, if no solution with a gap of at most 5% is found. The model contains 44312 constraints and 162901 variables where 73440 are binary.

We compare the first approach using Cplex directly (explicit approach) with the second (relax, fix, and optimize approach) and the third one (greedy heuristic based approach). Table 5.3 shows that Cplex successfully reached a gap of at most 5% for 19 of the 20 problems; the second approach solved 18 of them considering the same termination conditions; and the third approach solved all the problems.

Looking at the results based on Table 5.3, we remark that the second approach is clearly better than the default one in all the tests in term of calculation time (the solution quality is almost the same), except test 7 and test 15. To explain this, we believe that Cplex took a long time to solve the problem mostly due to the number of binary variables z_b^i dealing with the block harvest scheduling. The fact of choosing to relax only the variables dealing with blocks sequencing simplifies the problem in the sense that we have fewer binary variables and fewer constraints in the relaxed problem. Thus, the simplicity in the model allows Cplex to branch differently.

Tableau 5.3 Comparison of the three solution approaches

Ins	Approach (1)		Approach (2)		Approach (3)	
	Gap (%)	Time (h, min)	Gap (%)	Time (h, min)	Gap (%)	Time (h, min)
1	4.8	14, 45	-	-	4.97	1, 12
2	3.69	8, 37	4.41	4,43	5	0, 57
3	5	9, 00	4.99	5,11	4.23	1, 25
4	4.98	8, 54	4.58	4,21	4.11	0, 58
5	3.74	15, 58	4.5	14,24	4.5	11, 15
6	4.52	11, 56	4.76	11,55	4.16	10, 51
7	4.39	5, 55	4.63	8,40	4.83	0, 36
8	4.98	9, 40	4.02	2,53	4.18	2, 20
9	4.19	12, 70	3.21	3,70	4.81	1, 00
10	4.3	10, 32	4.95	1,60	3.28	0, 37
11	4.47	9, 59	4.95	2,34	4.98	2, 12
12	4.66	10, 41	4.84	4,17	4.48	2, 40
13	4.99	20, 60	3.98	4,12	4.16	2, 60
14	3.86	12, 40	4.41	2,37	4.4	2, 50
15	4.05	18, 19	4.97	22,30	4.8	13, 40
16	4.82	12, 20	-	-	4.38	9, 34
17	2.36	14, 10	3.32	3,70	4.08	1, 17
18	-	-	3.83	4,19	4.82	12, 25
19	3.27	10, 23	3.27	2,41	4.54	1, 34
20	2.49	20, 40	3.2	8,48	4.82	2, 50
AVG	4.19	12,32	4.27	9,29	4.48	4, 24

- : no feasible solution after 24 h

For the third approach, near-optimal solutions (average gap 4.48%) were found in an average computational time of 4 h. Our experiments show that the third approach finds good solutions for almost all the problems within reasonable time limits. We notice that globally the third approach outperforms the default one. Almost 75% of the tests are solved in less than 3 h (see Table 5.3) since Cplex succeeded to repair the heuristic solution, i.e. it finds quickly an initial solution using the fixed variables. The CPU time decreases by about 24% (resp. about 65% and almost the same gap) when we use the second (resp. the third) approach ; the solution quality is the same.

The main weakness of our third approach consists in the fact that in some cases, Cplex was not able to find an initial integer solution for the whole problem when using the variables fixed by the heuristic. In this case, the CPU time of the heuristic based approach is similar to the time consumed by the default approach (see test 5, test 6, test 15 and test 18 in table 5.3).

When evaluating the model, we noticed that the solutions of the different tests correspond to plans that satisfy all the requirements. The majority of the cut blocks are harvested in one or two periods.

5.7 Conclusion

We have presented an integrated multi-period wood procurement problem in the Eastern Canadian context. We have proposed a linearized integer programming model that aims to minimize the operational costs. Our model integrates the planning of the activities involved in the WSC such as harvesting, transportation, storage in the forest, and storage at the mill terminals. The resulting mixed-integer linearized problem is large. This problem can be solved using Cplex, but the solution time is large. We have proposed two approaches to obtain solutions more quickly. When we applied a greedy heuristic to generate an initial schedule for the problem, the model provided near-optimal solutions (average gap $< 5\%$) for a realistically sized problem within a reasonable time limit (4 h). The model places some restrictions on harvesting and transportation, but it does not control events affecting the flow of logs from the forest such as route construction, and it does not control the transportation activities (capacities of vehicles) in detail. It would be interesting to use the model as a basis for short-term harvest planning with crew scheduling. These aspects could be addressed in future research.

Acknowledgement

The authors would like to thank Mr. Jean Favreau from FPInnovations for his support. FPInnovations has proposed this optimization problem and has provided costs and operational data.

CHAPITRE 6

ARTICLE 3 : A HYBRID CONSTRAINT PROGRAMMING APPROACH
TO A WOOD PROCUREMENT PROBLEM WITH BUCKING DECISIONS

Article soumis à Constraints en Avril, 2014.

Amira DEMS, Louis-Martin ROUSSEAU, Jean-Marc FRAYRET

*École Polytechnique de Montréal,
Département de Mathématiques et Génie Industriel
C.P. 6079, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3A7*

*Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks,
Logistics and Transportation (CIRRELT)
C.P. 6128, succursale centre-ville
Montréal, Québec, Canada H3C 3J7*

{amira.dems, louis-martin.rousseau, jean-marc.frayret@polymtl.ca}

Abstract

In this article, we present a wood procurement problem that arises in Eastern Canada. We solve a multi-period wood supply planning problem, while taking into account bucking decisions. Furthermore, we present a new form of flexibility which allows the harvesting capacity to change from one time period to another. We study the impact of such flexibility upon the harvesting cost. We assess the performance of the problem by comparing it with a variant where the harvesting capacity is fixed during sites' harvesting. To address this problem, we develop a hybrid approach based on both constraint and mathematical programming. In the first phase, we propose a constraint programming model dealing with forest sites harvesting and bucking problems. The result of this model is used as part of an initial solution for the whole problem formulated as a mixed integer model. We test the two versions of the problem on a set of different demand instances and we compare their results.

Keywords : Forest bucking problem, wood-procurement planning, constraint programming, hybrid method.

6.1 Introduction

Forest industry represents an important economic sector in Canada. It is among the top five contributors to the nation's net trade (Natural Resources Canada , 2014). Forest planning problems cover a wide range of activities : planting, harvesting, road building, transportation, etc. They are the focus of important development to help the sector adapt to new challenges such as environmental issues and tough competition.

Wood procurement planning problems (WPPP) encompass a wide range of activities that provide quantities of wood to processing mills. In this paper, we present a multi-period wood procurement planning problem including bucking decisions for a planning horizon of one year. Given a list of forest sites to harvest, we must decide which sites to harvest in each period and the products that should be obtained from each period. We also consider the allocation of harvested products to different wood-processing facilities. Our main goal is to find a near-optimal wood-procurement plan for large instances. Through our collaboration with FPIInnovations, the method will be used to support Eastern Canadian forest companies.

The proposed method is based on two phases. In the first phase, we propose a constraint programming (CP) model. It aims to determine a harvesting schedule for each forest site and the allocations of bucking priority lists to different tree species, in order to minimize the harvesting cost. In the second phase, we use the solution of the CP model as part of the initial solution of the whole mixed integer problem (MIP). This phase deals with the

harvesting activities, the storage decisions as well as the wood flow between forest areas and wood mills. Then, we compare the current problem with the variant presented in Dems et al. (2014), where the harvesting capacity is unchanged during harvesting from a time period to another.

This paper is organized as follows. Section 6.2 presents an overview of the literature. Section 6.3 describes the problem. Next in Section 6.4, we present our solution approach. The data used in our tests and the computational results are introduced in Section 6.5. Finally, Section 6.6 presents concluding remarks and some research perspectives.

6.2 Wood procurement planning problem

To date, solving the wood procurement planning problem (WPPP) relies heavily on computer-aided modeling of operations. The majority of these models have concentrated on managing individual elements of the wood supply chain (WSC) such as harvesting and crew scheduling, machine location, transportation, and storage management. Even, there is an apparent need to considering more integrated wood procurement planning models due to the recent changes in the forest industry, considering the requirements of different elements of the wood supply into the same model is still challenging.

Bucking problems are well studied in the literature (Kivinen (2007), Kivinen (2006), Larroze (1993)). However, few models of WPPP including bucking decisions have been reported in the field of wood procurement planning. Dems et al. (2013) proposed an annual procurement plan that incorporates bucking and transportation activities. The bucking patterns are generated using a priority-list approach. The model includes a harvesting cost function that considers the nonlinearity of the harvester productivity function ;which is important in forest management (Arce et al., 2002).

Several models dealing with WPP have been developed using various types of operations research techniques (Weintraub et al. (2007), Rönnqvist (2003), Björndala et al. (2012)). CP has recently emerged as a research area that combines modeling and solving various combinatorial problems, especially in areas of planning and scheduling (Baptiste et al., 2001). Hybridization approaches combining CP and other programming techniques have been successfully applied to different problems (Hooker (2005), Sakkout et al. (2000)). The reader is referred to the work of Milano (2004), for more details about decomposition methods involving CP.

In the forestry context, a CP based hybrid approach was developed to solve the log-truck scheduling problem (El Hachemi et al., 2011). The decisions deal with scheduling the transportation of logs between forest areas and wood mills, as well as routing the fleet of

vehicles. The problem aims at minimizing the total cost of the non-productive activities such as the waiting time of trucks and forest log-loaders in addition to the empty driven distance of vehicles. To our knowledge, no studies addressing the bucking driven wood procurement problem and using constraint based approaches exist.

This paper presents a hybrid approach to solve a wood procurement problem with bucking decisions. The method combines constraint and mathematical programming (CP/MIP approach). First, we propose a constraint programming model to determine a harvesting schedule for every forest site as well as to deal with the bucking activities. Then, the CP solution is communicated to a MIP model, which deals with the whole problem including procurement activities.

6.3 Problem Statement

In order to understand the specificities of the wood procurement problem addressed in this paper, we discuss in this section the Eastern forestry practices during activities from bucking tree stems to delivering products to mills.

6.3.1 Harvesting activities

The forest is divided into a large set of heterogeneous forest sites. We assume that these sites are predefined in a higher-level of the harvesting planning problem and are accessible via the road network. Their management is centralized and done by the same multifacility forest company. Predefined sets of adjacent sites constitute sectors.

Bucking. Bucking is the operation of cutting tree stems into smaller pieces (logs) to be used in further industrial processing (Arce et al. (2002), Kivinen (2007)). When this operation is done directly in forest using cut-to-length machinery such as harvesters and forwarders, we talk about cut-to-length bucking. The harvester cross-cuts different logs following the cutting instructions. In this context, bucking instructions (patterns) are not determined by the on-board computers. Therefore, generated bucking patterns must be simple and easy for operators to implement.

The priority-list bucking approach described in Dems et al. (2013) is used to generate simple patterns. In this approach, a bucking priority list is a sequence of allowable logs obtained from a stem, generated according to practical rules defined by the forest company. In fact, the position of a product in the priority list is defined by its commercial value, length, and minimum small end diameter (MSED). The lowest priority is assigned to the log, generally a pulp log, with the smallest MSED and the shortest length. Then, the bucking

algorithm allocates logs to each stem section using an appropriate priority list. A bucking priority list is assigned to each species. To predict the yield products, we use the software FPInterface. This simulation tool, designed by FPIInnovations, is used to simulate different activities in the forest supply chain. The simulation module can predict the yield products from the application of a given bucking priority list to a sample of trees.

Harvesting cost. The specifications of forest sites (blocks) in Eastern Canada leads to a number of important log types that can be harvested in the same site. A reduction of 1%–4% in the harvester productivity (respectively 3%–7% in the forwarder productivity) is generated by harvesting a new log type in a block (see Gingras et al. (2002), Brunberg et al. (2001)). The important number of different logs types bucked per block increases the harvesting cost and leads to complex instructions for the log makers. In this work, we also consider the effect of productivity decrease in harvesting machinery on the harvesting cost. The harvesting cost, increases nonlinearly with the number of different products bucked per block and decreases with their average length. For more details about the nonlinear formulation of the harvesting cost and the priority list approach, the reader is referred to Dems et al. (2013).

Forest sites sequencing. The proposed model addresses the scheduling of forest sites' harvesting over time periods. These decisions are usually included in tactical planning. In this paper, we consider a set of schedules for each forest site. To generate them :

- We consider different production categories corresponding to five different harvesting capacities (m^3/period), which are related to the production capacities of a number of harvesting teams and their corresponding equipments defined by FPIInnovations.
- For a given forest site harvested according to the largest (resp. the smallest) harvesting capacity, we take the ceiling of the division of its standing timber by the associated harvesting capacity. This gives us the maximum (resp. the minimum) duration, which is the number of periods needed to harvest the whole site.
- We consider all the possible duration between the maximum and the minimum values, this represents the harvesting categories.
- We associate to each category, a set of possible harvesting sequences when beginning the harvesting in different time periods of the planning horizon. This represents the set of schedules.

6.3.2 Supply activities

We consider a set of geographically distributed mills to supply, each has an annual demand expressed in terms of different volumes of product types. After being bucked, logs are hauled to roadside and stored in different piles until they are transported to mills. Eventhough, there is no limitation on the volume kept in the forest ; it is not desirable that too many products be stored at the roadside since they loose freshness. A unit storage cost in the forest, representing the quality deterioration of logs in the forest, is considered. The transportation cost depends on the distance between forest sites and mills as well as on product type. There is a transportation capacity limit on the total volume transported in each period.

A part of each delivery is used to meet mills demand, and the remainder is kept in the storage areas, with an associated stock cost which depends on time periods. Each mill has a storage capacity and a stock cost corresponding to the quality deterioration specially in summer. This storage cost in mills is slightly higher than the one in the forest. We do not allow the exchange of timber between different mills.

6.4 The CP/MIP approach

The CP/MIP approach combines constraint and mathematical programming. The constraint programming model deals with harvesting activities i.e. the assignments of bucking priority lists to different species and the harvest sequencing of the forest sites. The details of the CP formulation are given in Section 6.4.1 and the MIP model is presented in Section 6.4.2. The following parameters are used in the two models :

Parameters

B	Set of forest sites (blocks) ;
P	Set of product types ;
E	Set of species ;
E_b	Set of species in site b ;
R	Set of priority lists ;
I	Set of schedules ;
I_b	Set of schedules for site b ;
T	Set of time periods ;
V_t^H	Harvesting capacity in time period t (m^3) ;
V_b	Volume of timber available in forest site b (m^3) ;

V_{br}^{ep}	Volume of product p available when bucking species e of forest site b , according to priority list r ;
V_{Pc}^{max}	Largest volume of the production categories ;
P^{Tr}	Penalty cost corresponding to the change of harvesting capacity between two adjacent time periods ;
P^{Pl}	Penalty cost corresponding to unused production capacity (production loss) ;
Nb^{max}	Maximum number of forest sites to harvest in each period ;
ϕ_b	Minimum fraction to harvest from a forest site ;
a_i^t	Coefficient used to extract information from schedule i . Takes value 1 if harvesting occurs in period t , 0 otherwise.

6.4.1 The CP model

This section presents the detailed formulation of the constraint programming model (CP model) which is implemented to find a solution to the harvesting problem without procurement activities. The following parameters and variables are used :

CP_Parameters

C_{pe}^D	Unit cost corresponding to unsatisfied demand of product p , species e ;
C_{ber}^H	Unit harvesting cost for each priority list r applied to each species e in a given forest site b ;
D_{pe}^t	Total mills' demand for product p of species e in period t (m^3) ;
M	Large number, for example equal to the total harvesting capacity.

CP_Variables

$\hat{r}_e^b$	Returns the priority list r assigned to the species e of forest site b , this variable takes an integer value defined on finite domain $[0, R]$;
---------------	---

- $\hat{z}_b$ Corresponds to the schedule assigned to the site b , this variable takes an integer value defined on a finite domain $[0, |I_b|]$;
- $\hat{q}_b^t$ Defines the harvesting capacity used in time period t to harvest site b , this variable takes an integer value defined on finite domain $[0, V_{P_c}^{max}]$;
- $\hat{y}_b^t$ Corresponds to the fraction of site b , harvested in time period t , continuous variable defined on domain $[0, 1]$;
- $\hat{x}_{pe}^t$ Represents the unsatisfied demand of product p , species e , in period t , continuous variable defined on domain $[0, M]$;

CP_Model

$$\text{Min} \quad C^H + \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} C_{pe}^D \hat{x}_{pe}^t + Penal_1 + Penal_2$$

subject to

$$\sum_{b \in B} \hat{y}_b^t V_b \leq V_t^H \quad \forall t \in T \quad (6.1)$$

$$\hat{y}_b^t V_b - \hat{q}_b^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.2)$$

$$\sum_{b \in B} a_{[\hat{z}_b]}^t \leq Nb^{max} \quad \forall t \in T \quad (6.3)$$

$$\sum_{t \in T} \hat{y}_b^t = 1 \quad \forall b \in B \quad (6.4)$$

$$\hat{y}_b^t - a_{\hat{z}_b}^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.5)$$

$$\hat{y}_b^t - \phi_b a_{\hat{z}_b}^t \geq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.6)$$

$$\hat{q}_b^t - V_{P_c}^{max} a_{\hat{z}_b}^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.7)$$

$$\sum_{b \in B} \hat{y}_b^t V_{b[\hat{r}_e^b]}^{ep} + \hat{x}_{pe}^t \geq D_{pe}^t \quad \forall e \in E, \forall p \in P \quad (6.8)$$

The objective function minimizes the global operational costs. The first term C^H is the total harvesting cost, given in equation A :

$$C^H = \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} (n_b)^\gamma V_{b[\hat{r}_e^b]}^{ep} C_{be[\hat{r}_e^b]}^H \quad (\text{A})$$

where

$n_b = \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \left[V_{b[\hat{r}_e^b]}^{ep} \neq 0 \right]$, is the number of different products obtained in a forest site b ; $\gamma < 1$, is an empirical constant determined by FPIInnovations.

The second term of the objective function aims to penalize unsatisfied demand. This term generates better solutions by matching the total demand as much as possible .

$Penal_1$ corresponds to a penalty for changing the production capacity between two adjacent periods when harvesting occurs. This penalty is calculated in the objective function as follows :

$$Penal_1 = \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} P^{Tr} |\hat{q}_b^{t+1} - \hat{q}_b^t| a_{[\hat{z}_b]}^t a_{[\hat{z}_b]}^{t+1} \quad (\text{B})$$

Finally, $Penal_2$ corresponds to a penalty for the production loss due to harvesting less than the allocated harvesting capacity. This is penalized in the objective function using the cost term given in equation C :

$$Penal_2 = \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} P^{Pl} (V_{P_c}^{max} \hat{q}_b^t - \hat{y}_b^t V_b) \quad (\text{C})$$

Constraints 6.1 limit the total volume harvested per period. Constraints 6.2 specify that the harvested volume does not exceed the used harvesting capacity. Constraints 6.3 limit the number of forest sites in which harvesting can occur during a period. Constraints 6.4 mean that the total summation of proportions of each harvest area are is 1.

Constraints 6.5 to 6.7 ensure the continuity of harvesting activities, which means that either a site is not harvested or it is fully harvested without interruption, even though it is possible to change the production capacity used between time periods. Constraints 6.8 aims at satisfying the demand of each product type in each period, and the slack variables $\hat{x}_{pe}^t$ guarantee feasible solutions.

6.4.2 The MIP model

We present in this section a mixed-integer linearized mathematical formulation (P) that has been implemented to solve the problem. The parameters and the variables used are as follows :

MIP_Parameters

P_r	Set of products in bucking priority list r ;
U	Set of mills;
V_t^T	Transportation capacity in time period t (m^3);
V_u^S	Stock capacity of mill u (m^3);
C_{bern}^H	Unit harvesting cost for each priority list r applied to each species e in a given forest site b ;
C_{bupe}^T	Unit transportation cost between forest sites b and mill u for product p of species e ($\$/m^3$);
C_t^{SF}	Unit stock cos during time period t ($\$/m^3$);
C_t^{SU}	Unit stock cost of product p , species e , in mill u during time period t ($\$/m^3$);
C_{uep}^D	Unit cost corresponding to unsatisfied mill's u demand of product p , species e ;
N	Maximum number of different product types that can be harvested from a block;
D_{uep}^t	Demand at mill u for product p of species e in period t (m^3);
φ_r	Number of different products in the priority list r .

MIP_Variables

$$w_b^n = \begin{cases} 1, & \text{if } n \text{ different products are obtained from site } b; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$\tilde{w}_{ber}^n = \begin{cases} 1, & \text{if bucking priority list } r \text{ is applied to species } e \text{ from site } b, \\ & \text{when } n \text{ different products are obtained from } b; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$z_b^i = \begin{cases} 1, & \text{if site } b \text{ is allocated to schedule } i; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$\tilde{q}_b^t = \begin{cases} |q_b^{t+1} - q_b^t|, & \text{if harvesting occurs in periods } t+1 \text{ and } t; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

q_b^t Production capacity used to harvest site b in time period t ;

$\bar{q}_b^t$ Absolute value of the difference in production capacities used in site b , between periods $t+1$ and t ;

y_b^t Fraction of site's b timber, harvested in time period t ;

$\tilde{y}_{ber}^t$ Fraction of volume of species e from b , when bucked using priority list r ;

x_{uep}^{bt} Flow of product type p , species e from site b to mill u in period t (m^3);

$\tilde{x}_{uep}^t$ Unsatisfied demand of product p , species e , at mill u , during time period t ;

s_{bep}^t Stored volume of product p , species e , in site b , at the end of period t (m^3);

$\tilde{s}_{uep}^t$ Stored volume of product p , species e , in mill u , at the end of period t (m^3).

MIP_Model

$$\begin{aligned} (P) \quad & \text{Min} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} \sum_{n \in N} C_{bern}^H V_{br}^{ep} \tilde{w}_{ber}^n + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{bupe}^T x_{uep}^{bt} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} C_t^{SF} s_{bep}^t + \sum_{t \in T} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_t^{SU} \tilde{s}_{uep}^t \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} C_{uep}^D \tilde{x}_{uep}^t + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} P^{Tr} \tilde{q}_b^t + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} P^{Pl} (q_b^t - y_b^t V_b) \end{aligned}$$

subject to

Bucking activities

$$\sum_{n \in N} w_b^n = 1 \quad \forall b \in B \quad (6.9)$$

$$\sum_{e \in E_b} \sum_{r \in R} \varphi_r \tilde{w}_{ber}^n - n w_b^n = 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall n \in N \quad (6.10)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \tilde{w}_{ber}^n = 1 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall e \in E_b \quad (6.11)$$

$$\sum_{n \in N} \tilde{w}_{ber}^n - \sum_{t \in T} \tilde{y}_{ber}^t = 0 \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \text{ and } \forall r \in R \quad (6.12)$$

Forest sites scheduling activities

$$\sum_{b \in B} y_b^t V^b \leq V_t^H \quad \forall t \in T \quad (6.13)$$

$$\sum_{i \in I_b} z_b^i = 1 \quad \forall b \in B \quad (6.14)$$

$$y_b^t V^b - q_b^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.15)$$

$$\sum_{r \in R} \tilde{y}_{ber}^t - y_b^t = 0 \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b \text{ and } \forall t \in T \quad (6.16)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i \leq N b^{max} \quad \forall t \in T \quad (6.17)$$

$$\sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i - y_b^t \leq 1 - \phi_b \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.18)$$

$$y_b^t - \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.19)$$

$$q_b^t - V_{Pc}^{max} \sum_{i \in I_b} a_i^t z_b^i \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.20)$$

$$\tilde{q}_b^t - V_{Pc}^{max} \sum_{i \in I_b} a_i^t a_i^{t+1} z_b^i \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.21)$$

$$\tilde{q}_b^t - \bar{q}_b^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.22)$$

$$\bar{q}_b^t - V_{Pc}^{max} (1 - \sum_{i \in I_b} a_i^t a_i^{t+1} z_b^i) - \tilde{q}_b^t \leq 0 \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.23)$$

$$\bar{q}_b^t \geq q_b^{t+1} - q_b^t \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.24)$$

$$\bar{q}_b^t \geq q_b^t - q_b^{t+1} \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.25)$$

Procurement activities

$$s_{bep}^t = \sum_{r \in R} \tilde{y}_{ber}^t V_{br}^{ep} - \sum_{u \in U} x_{uep}^{bt} + s_{bep}^{t-1} \quad \forall b \in B, \forall e \in E_b, \forall p \in P \text{ and } \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (6.26)$$

$$\tilde{s}_{uep}^t = \tilde{s}_{uep}^{t-1} + \sum_{b \in B} x_{uep}^{bt} - D_{uep}^t + \tilde{x}_{uep}^t \quad \forall u \in U, \forall e \in E_b, \forall p \in P \text{ and } \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (6.27)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \tilde{s}_{uep}^t \leq V_u^S \quad \forall u \in U \text{ and } \forall t \in T \quad (6.28)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{e \in E_b} \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} x_{uep}^{bt} \leq V_t^T \quad \forall t \in T \quad (6.29)$$

$$w_b^n, \tilde{w}_{ber}^n, z_b^i \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, \forall r \in R, \forall e \in E, \forall p \in P \text{ and } \forall n \in N \quad (6.30)$$

$$\bar{q}_b^t, \tilde{q}_b^t, q_b^t \in \{0, 1, 2, \dots, |V_{Pc}^{max}|\} \quad \forall b \in B \text{ and } \forall t \in T \quad (6.31)$$

$$x_{uep}^{bt}, \tilde{x}_{uep}^t, s_{bep}^t, \tilde{s}_{uep}^t, y_b^t, \tilde{y}_{ber}^t \geq 0 \quad \forall b \in B, \forall e \in E, \forall p \in P, \forall u \in U \text{ and } \forall t \in T \quad (6.32)$$

The objective function minimizes the harvesting cost, the transportation cost, the storage cost in forest and at mills respectively. The unit harvesting cost C_{bern}^H is calculated using the approximation proposed in Dems et al. (2013). The fifth term in the objective function corresponds to a sufficiently large cost for not satisfying the demand. Then, the sixth term penalizes the change of production capacities between two adjacent periods when harvesting occurs. Finally, the last term corresponds to a penalty for unused harvesting capacity.

Constraints 6.9 and 6.10 count the number (n) of different product types (logs) harvested in each forest sites. Constraints 6.11 ensure that only one n and one bucking list per species are used in each forest site. Constraints 6.12 specify that the sum of the volume proportions of a species using a bucking list r is equal to one if this priority list is assigned to it and zero otherwise.

Constraints 6.13 through 6.25 deal with forest sites scheduling. Constraints 6.13 limit the total volume harvested per period. Constraints 6.14 correspond to the restriction that only one schedule is allocated to each forest site. Constraints 6.15 specify that the harvested volume must not exceed the harvesting capacity used. Constraints 6.16 mean that the proportion of the harvested volume from each species is equal to the proportion harvested from the forest site volume. This is an approximation of the real problem, since we consider that the species are uniformly distributed in the forest sites. Constraints 6.17 limit the number of forest sites in which harvesting can occur during a period.

Constraints 6.18 to 6.20 ensure the continuity of harvesting activities of a forest site once began, which means that if a site is harvested, it is fully harvested. No interruption in

harvesting is allowed, even if it is possible to change the production capacity used.

Constraints 6.21 through 6.25 are used to calculate the change of production capacities between two adjacent periods when harvesting occurs. The harvesting capacity can be increased or decreased that is why we use the variables $\bar{q}_b^t$ to get the absolute value of its change between two adjacent periods. This change is penalized in the objective function through P^{Tr} .

Constraints 6.26 to 6.29 define the procurement activities. Constraints 6.26 and 6.27 represent the flow conservation constraints at the forest and mills. In constraints 6.27, the slack variables $\tilde{x}_{uep}^t$ are considered to guarantee feasible solutions, and the cost C_{uep}^D for slack variables, assures that the demand will be satisfied as much as possible. Constraints 6.28 correspond to the maximum storage volume per period in each mill. Constraints 6.29 limit the total transportation capacity. Constraints 6.30 state that the variables z_b^i , w_b^n and $\tilde{w}_{ber}^n$ are binary. Constraints 6.31 ensures that variables $\bar{q}_b^t$, $\tilde{q}_b^t$ and q_b^t are integers. Constraints 6.32 are non-negativity constraints.

6.5 Experimental Results

The case study was provided by the Forest Engineering Research Institute of Canada (FPInnovations). Thirty mixed forest sites in Eastern Canada are eligible for harvesting during the year. Furthermore, the case study involves five wood mills. Five log-types, varying in terms of length and MSED are considered for each of the five tree species.

For the computational experiments, hypothetical but realistic demand instances are generated on the basis of one instance of the firm's real data from FPInnovations, and the typical situation of several forest companies in Eastern Canada. In each instance, we vary the volume of the product mix required per mill. The mills' demand are expressed in terms of volume of product type, per periods of two weeks. We make sure that the mills' production capacities are respected in each period. Moreover, we consider an upper bound on every product type, which represents the yield of this product when it is considered as the first product in the bucking priority lists used. The average demand is 5% to 8% less than the total quantity of standing timber, which represents low-value small-diameter logs and branches.

The MIP model is solved using the commercial LP package Cplex v12.5 via its Concert Technology C++ platform. The CP model is solved using CP-optimizer v12.5.

The CP model encompasses 2220 variables and 4262 constraints. The MIP model contains 243832 variables with 65811 binary and 35312 constraints. We note that CP can easily model some practical aspects that were very difficult to model and solve using mathematical programming. Through the use of *element constraints*, the number of variables and constraints

decreased in the CP model.

To assess the performance of the hybrid approach, we compare it with the basic approach where the model is solved directly using Cplex. Each test is run using the basic and the hybrid approach. In Table 6.1, we represent the demand instances used to test the performance of the model (*Ins*) for both approaches. For the basic approach (Cplex), we report the value of the problem's solution (*Val_46*) and its corresponding optimality gap (*Gap_46*) after 46 *h* of computation time (execution time due to memory capacity limit). For our CP/MIP approach, we present the value of the problem's solution obtained at about 5% of optimality gap (*Val_5*) and the time consumed to obtain it (*Time_5*). After several tests with different parameters of Cp_optimizer, we set a time limit of about 30 minutes for the CP solver and a fail limit of 14 failures to restart search.

Tableau 6.1 Comparison of the solution approaches

Ins	Cplex		CP/MIP approach	
	<i>Val_46</i> ($10^7\$$)	<i>Gap_46</i> (%)	<i>Val_5*</i> ($10^7\$$)	<i>Time_5</i> (<i>h</i>)
0	-	-	2.226	7.66
1	2.199	9.08	2.110	10.46
2	2.277	8.14	2.208	14
3	-	-	2.082	13.78
4	-	-	2.152	7.85
5	2.234	8.29	2.164	9.60
6	-	-	2.262	11.92
7	-	-	2.208	7
8	-	-	2.134	7.76
9	-	-	2.209	14
10	2.240	8.50	2.179	14
11	2.338	11.20	2.192	14

- : no solution after 46 h * : solution at about 5% of gap

The experiments show that our approach successfully finds good solutions for all the problem's instances within 11 *h* of average CPU Time. However, it was impossible to find any solution in that time limit using Cplex directly (see Table 6.1). The CP/MIP approach outperforms Cplex in terms of solutions quality with an average gap of 5% compared to 9%, and computation time of 11 *h* compared to 46 *h* for the solved instances by Cplex directly. We note that it is very difficult for Cplex to find a first integer solution. We report also that the CP provided a good enough solution, to allow Cplex to find a first solution of an average gap less than 15% for all instances.

We notice that in almost all the instances the CP solution value did not change after thirty minutes of computation time which explains the chosen time limit. However, the majority of change in the problem solution value and quality obtained by Cplex, is done in the 14 *h* of

computation time. The remaining time is used only to prove optimality.

In order to study the impact of the harvesting capacity change during time periods on the total cost, we compare the problem's solution to the solution of the fixed capacity variant presented by Dems et al. (2014). In the work of Dems et al. (2014), the harvesting capacity is kept unchanged between each site's harvesting duration. We run that model using the new demand instances. Moreover, we generate schedules corresponding to the new planning horizon. We also add the penalty cost P^{Pl} corresponding to unused production capacity to make a fair comparison.

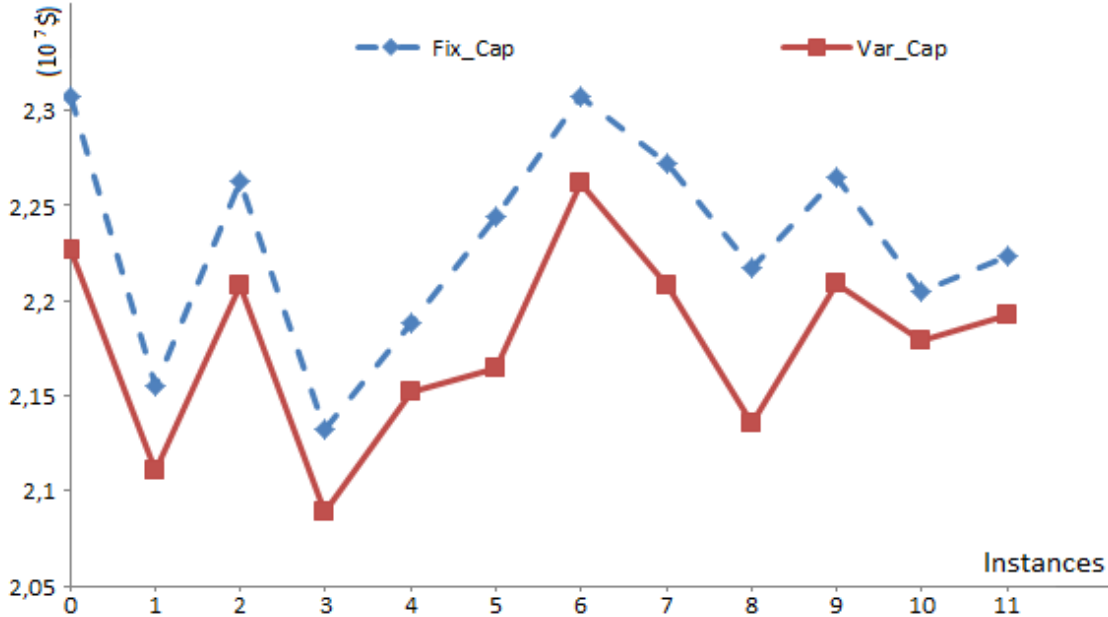


Figure 6.1 Total cost of fixed and variable harvesting capacity scenarios

We report, in Fig 6.1, the total costs in dollars of both the fixed production capacity problem (Fix_Cap) and the one with variable capacity (Var_Cap). Looking at this figure, we observe, as expected, that using a fixed capacity during harvesting gives a higher total cost than changing it, for all the instances considered.

To deeply analyze the results, we calculate in table 6.2, the relative percentage change in the total cost (C^{tot}) for the fixed harvesting capacity variant in comparison to the current variant. Moreover, we calculate this change in each term composing the total costs : the harvesting cost (C^H), the transportation cost (C^T), the production loss cost (C^{Pl}), the total stock cost (C^S), the stock cost at mills (C^{SU}), the stock cost at forest (C^{SF}) and the cost related to unsatisfied demand (C^{Slk}).

As expected, the production loss cost (C^{Pl}) is the most important factor in the total cost increase. The fixed harvesting production allows a (C^{Pl}) increase of about 49,4%. We

Tableau 6.2 Percentage change of Fix_Cap problem comparing to the Var_Cap one

Ins	C^{tot}	C^H	C^T	C^{Pl}	C^S	C^{SU}	C^{SF}	C^{Slk}
0	3.65	1.33	1.45	48.56	8.34	5.44	11.79	6.91
1	2.11	1.55	0.12	5.43	12.74	2.75	23.71	-2.63
2	2.48	0.90	-3.84	55.91	11.89	-0.34	27.55	3.21
3	2.06	1.82	-0.79	12.08	13.79	-1.28	29.91	-0.62
4	1.67	-0.59	0.70	25.13	-1.18	3.74	-5.93	22.28
5	3.71	1.36	-0.77	60.92	10.00	1.19	19.56	4.71
6	2.00	0.72	0.10	79.06	3.78	3.53	4.04	1.41
7	2.91	0.88	-1.66	78.27	5.98	1.90	9.71	5.67
8	3.82	1.42	-0.21	46.71	9.91	3.38	17.66	9.26
9	2.54	0.68	-0.37	67.09	8.46	0.66	16.95	1.49
10	1.07	1.54	0.82	39.53	10.59	-2.82	25.62	-8.57
11	1.33	-0.66	-0.16	74.61	-0.12	-1.37	1.30	7.11
AVG	2,45	0,91	-0,39	49,44	7,85	1,40	15,16	4,18

notice that cost increase is not affected by changes in transportation and harvesting costs. We observe no more than (0,91%) in average of harvesting cost increase. We even report a transportation cost decrease in the Fix_Cap variant of about 0,39% in average. This can be explained by the fact that the considered harvesting and transportation costs are similar in both variants of the problem. The total harvesting cost depends very much on the available timber volume which is the same in both versions. Respectively, the transportation cost is related to distance and product types which are not affected much by the capacity change. Finally, we note that there is a slight increase in the inventory cost kept in the forest. It seems that the Fix_Cap model favors storing excess harvesting volumes rather than losing production.

To conclude the comparison between the two variants, we remark that using a fixed capacity during harvesting instead of a variable one increases the total cost. Nevertheless, such increase is not important (about 2,45% in the total cost). To explain this, we believe that the fact that the total harvesting capacity established is very close to the available standing timber, lets the flexibility of changing the capacity very restricted. Another reason is due to the fact that the production loss cost (C^{Pl}) represents between 3% to 4% of the total cost which explains why its impact on cost change is not considerable.

6.6 Conclusion

We presented in the paper a wood procurement problem that arises in the Eastern Canadian forest context. The model coordinates several activities involved in the wood supply chain such as harvesting, transportation, storage in the forest, and storage at the mill termi-

nals, in order to decrease the total cost.

Since the resulting mixed-integer problem is large, Cplex was not able to solve any test. We proposed a hybrid approach based on both constraint and mathematical programming, in order to solve all the problem instances in realistic time limit.

Computational experiments showed that the proposed approach provides solutions under 5% of optimality gap for all the problem instances, within a reasonable time limit (an average of 11 h). In addition, we presented a form of flexibility, that allows production capacity change during harvesting. We compared this variant with the fixed capacity problem. We demonstrated that this flexibility improved the result. In fact, the fixed capacity problem has slightly increased the total cost (an increase of about 2,45%). We believe that it would result in more benefit if the total harvesting capacity will be very different from the standing timber.

Acknowledgements

The authors would like to thank Mr. Jean Favreau from FPIInnovations for his help. Also, thanks are due to FPIInnovations for proposing this optimization problem, financially supporting this research and providing us with operational data.

CHAPITRE 7

DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

7.1 Synthèse des travaux

Cette thèse vise à répondre à l'une des problématiques actuelles posées par l'industrie forestière à l'est canadien. Les objectifs généraux portent sur la définition et l'optimisation des méthodes et outils de la planification et le suivi des approvisionnements forestiers. Ce problème reconnu comme très complexe, intègre des décisions sur le tronçonnage, l'allocation des produits aux usines, le transport et le stockage.

Dans ses variantes multi-périodiques, le problème considère aussi l'ordonnancement de la récolte des sites forestiers dans le temps. L'objectif est d'optimiser les coûts opérationnels encourus durant certaines activités de l'approvisionnement forestier, tout en satisfaisant la demande. Nous avons présenté trois variantes du problème et nous avons proposé une formulation mathématique linéarisée pour chacun. Nous nous sommes aussi intéressés à l'aspect résolution du problème. En effet, différentes instances générées en se basant sur des données fournies par FPInnovations et la variation de certains paramètres, ont été considérées pour tester la performance des modèles proposés.

La première contribution dont fait état le chapitre 4, considérait une variante mono-périodique du problème d'approvisionnement. Dans un premier temps, nous nous sommes orientés vers l'aspect modélisation du problème. Nous avons présenté un modèle mathématique qui constitue une linéarisation du problème tel que défini par FPInnovations. Pour ce faire, nous avons procédé à une approximation du coût de récolte que nous avons validé. En outre, nous avons décrit en détails l'approche de tronçonnage adoptée.

Afin de mieux aider les planificateurs forestiers dans le processus de prise de décisions, nous avons aussi présenté deux nouveaux scénarios de récolte portant sur la façon d'appliquer les listes de tronçonnages sur les différentes unités territoriales. L'idée était de montrer qu'un recours à certains types de désagrégation peut nettement améliorer les opérations de récolte sans pour autant engendrer des dépenses excessives ou un changement stratégique dans la façon de procéder, surtout qu'il y a souvent une certaine résistance au changement du côté des opérateurs forestiers. Ainsi, nous avons établi une comparaison entre les deux nouveaux scénarios et le scénario initial. Nous avons prouvé que les nouvelles façons de faire ont rapportés des gains considérables par rapport aux méthodes courantes sans pour autant causer des changements majeurs dans les technologies utilisées.

Dans le chapitre 5, nous avons considéré une version multi-périodique du problème d’approvisionnement forestier. Dans cette version, nous avons décomposé l’année en des périodes d’un mois, pour étudier l’impact de la saisonnalité sur la demande, l’offre et l’accessibilité des sites forestiers. Cette variante reflétait mieux la réalité parce que nous avons traité l’ordonnancement de la récolte des sites dans le temps, vu qu’en réalité ces sites ne peuvent pas être récoltés tous en même temps.

Pour cette première version multi-périodique, nous avons supposé que la capacité de récolte allouée pour récolter un site demeure fixe jusqu’à la fin de sa récolte. Nous avons essayé de résoudre le modèle directement avec Cplex, ce qui a engendré des temps de calcul importants. Ainsi, nous avons développé deux approches permettant de trouver un ordonnancement de la récolte des sites forestiers dans le temps. Cet ordonnancement a été par la suite communiqué à Cplex comme point de départ pour trouver une solution globale au problème. La première approche consistait à relaxer les variables binaires permettant d’affecter un plan de récolte à chaque site. Une fois le problème résolu, les variables égales à un sont fixées et retournées au modèle comme point de départ. La deuxième approche est un algorithme glouton permettant de fixer ces variables. Les deux approches ont amélioré le temps de calcul mais la deuxième était beaucoup plus efficace que la première.

Une autre contribution de cette thèse à travers le chapitre 6, consistait à introduire une certaine flexibilité dans l’utilisation des capacités de récolte dans la génération des plans de récolte de chaque site. Cette capacité est considérée comme une variable du problème que nous avons optimisé.

Dans cette partie, nous avons considéré un horizon de planification plus large puisque nous avons discrétisé l’année en des périodes de deux semaines. Cette discrétisation a permis d’étudier plus en détails l’impact du changement des capacités par périodes mais elle a augmenté la taille du modèle. En effet, avec un tel pas de discrétisation, la majorité des sites sont récoltés en plus d’une période. Le changement dans la capacité de récolte par période était ainsi significatif.

Notre première approche était de résoudre le problème avec la PPC. Cette approche a permis de trouver une solution rapidement. En comparant le résultat obtenu avec PPC avec celui du modèle mixte en nombres entiers (MLMNE), nous avons remarqué que ce dernier obtenait des solutions de meilleures qualités mais en des temps de calcul très importants. Ce qui nous a poussés à développer une méthode hybride basée sur la PPC et MLMNE. Le modèle PPC est utilisé pour générer une solution initiale au problème. Il assure l’allocation des listes de tronçonnage aux différentes espèces en tenant compte de certaines contraintes opérationnelles et de la demande agrégée des différents types de produits. La solution du modèle PPC est communiquée au problème global pour améliorer le temps de calcul. Le modèle

linéaire reprend les contraintes du modèle décrit au chapitre 5. Nous avons comparé cette nouvelle variante à la variante décrite au chapitre 5 que nous avons modélisé en considérant le nouvel horizon de planification et une pénalité sur les capacités de récolte non utilisées.

Les résultats obtenus ont montré que l'introduction de ce type de flexibilité peut réduire considérablement la capacité totale requise pour récolter les blocs ce qui se traduit par un gain en termes économiques. Tous les gains rapportés dans cette thèse suite à l'étude de nouvelles formes de planification dans le chapitre 6 ou de nouvelles structures de tronçonnage présentées dans le chapitre 4 ne sont qu'un incitatif à changer les approches actuelles afin d'améliorer le système d'approvisionnement des compagnies forestières qui adoptent la même façon de faire.

7.2 Limitations de la solution proposée

L'inventaire forestier dont on disposait au début de l'étude comportait des sites forestiers hétérogènes. Certains sont très larges et souvent assimilés à des districts ou des chantiers, d'autres sont plutôt de petites tailles et peuvent être considérés comme des blocs de coupe. Si le nombre de ces sites était très important, comme c'est le cas dans certaines études où le nombre de blocs de coupe (des unités territoriales de petites tailles) approche les 500 blocs, il sera nécessaire de procéder à des agrégations pour appliquer les approches que nous avons développées.

Dans le contexte de l'étude, les restrictions du marché sur les types et la qualité des billes sont simples, ce qui permet d'avoir une petite variété de produits, et donc de limiter le nombre de listes de tronçonnage utilisées tout au long du projet, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour d'autres marchés comme celui des pays scandinaves.

En outre, l'accès aux données fut très contraignant, surtout au niveau des demandes spécifiques des usines. Jusqu'à récemment, dans le contexte de cette étude, les flux de matériaux à travers le réseau d'approvisionnement ont été dictés par un mécanisme de marché suivant une stratégie en flux poussés. Des études poussées sur les prévisions des demandes des usines de bois sont presque inexistantes. Cet aspect a fait de la génération des instances de demandes, une tâche très difficile à effectuer. Pour y remédier, nous avons considéré le nombre restreint de l'historique des demandes dont nous disposions, le résultat des simulations pour approcher plus la réalité et certains paramètres comme le volume debout de bois, la capacité de production des usines et certaines contraintes opérationnelles dictées par FPInnovations.

De plus, nous avons affronté des difficultés à statuer correctement toutes les contraintes sur les sites forestiers, comme celle de limiter la capacité de production allouée à la récolte de chacun. Ainsi, nous avons supposé que les plus petits sites sont récoltés avec une capa-

cité minimale qui représente en réalité la capacité d'une équipe avec une seule abbatteuse. Malheureusement, nous avons été incapables de quantifier exactement en termes d'argent les pertes engendrées par le changement de la capacité de récolte d'une période à une autre, ce qui se traduit sur le plan pratique par le changement du nombre et de la qualité des équipes ainsi que par le changement des équipements.

7.3 Directions de recherches

Cette thèse a porté sur l'étude de la planification de l'approvisionnement forestier d'une compagnie forestière. Il s'agit d'une planification centralisée puisque cette compagnie gère toutes les activités incluses dans le processus d'approvisionnement de ses propres usines. Cependant, il serait intéressant de considérer un contexte plus décentralisé où différentes compagnies forestières se partagent les zones de coupe. Dans un contexte de décisions décentralisé, les opérations forestières doivent être coordonnées et synchronisées afin de satisfaire la demande des différentes usines et d'optimiser la chaîne d'approvisionnement simultanément. Dans ce cas, le recours aux technologies de l'information et de la communication sera essentiel.

Il serait aussi pertinent d'inclure les incertitudes dans la planification des approvisionnements forestiers. En effet, l'optimisation déterministe suppose que toutes les données du problème sont connues avec certitude. Ce n'est malheureusement pas le cas dans les problèmes d'approvisionnement forestier, où l'incertitude sur les données est très importante : elle affecte l'inventaire forestier, les demandes des usines et surtout l'offre représentée par le volume des billes obtenues suite au tronçonnage. Intégrer la simulation pour étudier la nature stochastique de la chaîne d'approvisionnement forestier dans les modèles d'optimisation déterministe pourra remédier à ces lacunes. Les modèles d'optimisation basés sur la simulation permettront de cerner tous les détails qui caractérisent l'approvisionnement forestier et de l'optimiser. Malgré leur potentiel, ils sont jusqu'à présent très rarement utilisés dans la planification des approvisionnements forestiers.

RÉFÉRENCES

- Natural Resources Canada. *http://www.nrcan-rncan.gc.ca*, 2014.
- Ressources Naturelles Canada. *http://www.nrcan-rncan.gc.ca*, 2014.
- Arce, J.E., Carnieri, C., Sanquetta, C.R. and Filho, A.F. A forest-level bucking optimization system that considers customers demand and transportation costs. *Forest Science*. **48(3)** 492–503, 2002.
- Baptiste, P., C. LePape, and W. Nuijten. Constraint-Based Scheduling. *Kluwer Academics Publishers*, 2001.
- Beaudoin, D., Frayret, J.-M., and LeBel, L. Hierarchical forest management with anticipation : An application to tactical-operational planning integration. *Canadian Journal of Forest Research*. **38(8)** 2198–2211, 2008.
- Bergman, J., Flisberg, P., Rönnqvist, M. Roll cutting at paper mills. *Proceedings of the Control Systems 2002, June 3–5, Stockholm, Sweden*. 159—163, 2002.
- Bettinger, P. Tabu Search Experience in Forest Management and Planning, ISBN 978-3-902613-34-9. Available from : *http://www.intechopen.com/articles/show title/tabu search experience in forest management and planning*, 2008.
- Björndala, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C., and Weintraub, A. Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in Operational Research*. **19** 39–62, 2012.
- Borges P., Eid T., Bergseng E. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. *European Journal of Operational Research*. **233(3)** 700—710, 2014.
- Bredström, D., Jönssona, P., and Rönnqvist, M. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. *International Transactions in Operational Research*. **17** 155–177, 2010.
- Bredström, D., and Rönnqvist, M., Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*. **191(1)** 19—31, 2008.
- Brunberg, T. and Arlinger, J. Vad kostar det att sortera virket i skogen? (What does it cost to sort timber at the stump?) Available from : *http://www.skogforsk.se/upload/Dokument/Resultat/2001-03.pdf*, 2001.
- Carlsson, D., D’Amours, S., Martel, A., and Rönnqvist, M. Supply chain planning models in the pulp and paper industry. *INFOR*. **47(3)** 167–183, 2009.

- Carlsson, D. and Rönnqvist, M. Supply chain management in forestry : Case studies at Södra Cell AB. *European Journal of Operational Research*. **163(3)** 589–616, 2005.
- Chauhan, S.S., Frayret, J.-M., and LeBel, L.G. Multi-commodity supply network planning in the forest supply chain. *European Journal of Operational Research*. **196(2)** 688–696, 2009.
- Chauhan, S.S, Frayret, J.-M., and LeBel, L. Supply network planning in the forest with bucking decisions anticipation. *Annals of Operations Research*. DOI 10.1007/s10479-009-0621-5, 2009.
- D’Amours, S., Rönnqvist, M., and Weintraub, A. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR*. **46(4)** 47–64, 2008.
- Dems, A., Rousseau, L.-M., and Frayret, J.-M. Effects of different cut-to-length harvesting structures on the economic value of a wood procurement planning problem. *Annals of Operations Research*. DOI 10.1007/s10479-013-1336-1, 2013.
- Dems, A., Rousseau, L.-M., and Frayret, J.-M. Annual timber procurement planning with bucking decisions. *Technical Report CIRRELT-2014-20*, CIRRELT, 2014.
- El Hachemi, N., Gendreau M., and Rousseau, L.-M. A hybrid constraint programming approach to the log-truck scheduling problem. *Annals of Operations Research*. **184** 163–178, 2011.
- Epstein, R., Nieto, E., Weintraub, A., Chevalier, P., and Gabarro, J. A system for the design of short term harvesting strategy. *European Journal of Operational Research*. **119(2)** 427–439, 1999.
- Epstein, R., Rönnqvist, M., and Weintraub, A. Forest transportation. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Springer, New York. 391–403, 2007.
- Epstein, R., Weintraub, A., Sapunar, P., Nieto, E., Sessions, B., Sessions, J., Bustamante, F., Musante, H. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. *Operations Research*. **54(6)** 1017–1027, 2006.
- Flisberg, P., Forsberg, M., and Rönnqvist, M. Optimization based planning tools for routing of forwarders at harvest area. *Canadian Journal of Forest Research*. **37(11)** 2153–2163, 2007.
- Gingras, C., Cordeau J.F., Laporte G. Un algorithme de minimisation du transport à vide appliqué à l’industrie forestière. *Information Systems and Operational Research*. **45(1)** 41–47, 2007.
- Gingras, J.-F. and Favreau, J. Incidence du triage sur la productivité des systèmes par bois tronçonnés. *Avantage, Feric*. **3**, 2002.

- Grondin, F. Improvements of the dynamic programming algorithm for tree bucking. *Wood and Fiber Science*. **30(1)** 91–104, 1998.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., Carlsson, D. A combined terminal location and ship routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. **57** 928–938, 2006.
- Hooker, J.N. A Hybrid Method for the Planning and Scheduling. *Constraints* 10(4)385–401, 2005.
- Karlsson, J., Rönnqvist, M., and Bergström, J. Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews. *International Transactions in Operational Research*. **10(5)** 413–431, 2003.
- Kivinen, V.P. Design and testing of stand-specific bucking instructions for use on modern cut-to-length harvesters. *Dissertationes Forestales 37*, Available from <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/20652/designan.pdf?sequence=2>, 2007.
- Kivinen, V.P. A forest-level genetic algorithm based control system for generating stand-specific log demand distributions. *Canadian Journal of Forest Research*. **36(7)** 1705–1722, 2006.
- Kivinen, V.P. A genetic algorithm approach to tree bucking optimization. *Forest Science*. **50(5)** 696–710, 2004.
- Kivinen, V.P. and Uusitalo, J. Applying fuzzy logic to tree bucking control. *Forest Science*. **48(4)** 673–684, 2002.
- Laroze, A. A linear programming tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. *Forest Science*. **45(1)** 108–116, 1999.
- Laroze, A.J. and Greber, B.J. Using tabu search to generate stand-level rule-based bucking patterns. *Forest Science*. **43(2)** 157–169, 1997.
- Laroze, A.J. Development and comparison of stand level bucking optimization methods. *PhD Thesis. Oregon State University*, 1993.
- Marshall, H.D., Murphy, G., and Boston, K. Three mathematical models for bucking-to-order. *Silva Fennica*. **40(1)** 127–142, 2006.
- Martell, D.L., Gunn, E.A., and Weintraub, A. Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*. **104** 1–17, 1998.
- Melo M.T., Nickel, S., and Saldanha-da-Gama, F. Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*. **196** 401–412, 2009.
- Mendoza, G.A. and Bare, B.B. A two-stage decision model for log bucking and allocation. *Forest Products Journal*. **36(10)** 70–74, 1986.

- Milano, M. M. Constraint and integer programming. *Kluwer Academic Publishers.*, 2004.
- Mitchell, S.A. Thesis, University of Auckland. Available from : <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/1761>, 2004.
- Murray, A.L. and Church, L.R. Measuring the efficacy of adjacency constraint structure in forest planning models. *Revue canadienne de recherche forestière*, doi :10.1139/x95-154. **25(9)** 1416-1424, 1995.
- Näsberg, M. Mathematical programming models for optimal log bucking. *Linköping Studies in Science and Technology. Dissertation No. 132. Department of Mathematics, Linköping University, Linköping*, 1985.
- Öhman K. and Lämås, T. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index. *Forest Ecology and Management*. **212(1–3)** 346—357, 2005.
- Parker, P., Park, R., Clement, B., and Gibbons, W. Effect of number of log grades on log making error. *NZ Logging Industry Research Organisation*. **20(23)** 1–7, 1995.
- Pickens, J.B., Throop, S.A., and Friendewey J.O. Choosing prices to optimally buck hardwood logs with multiple log-length demand restrictions. *Forest Science*. **43(3)** 403–413, 1997.
- Pnevmaticos, S.M. and Mann, S.H. Dynamic programming in tree bucking. *Forest Products Journal*. **22(2)** 26–30, 1972.
- Pulkki R., M. Role of supply chain management in the wise use of wood resources. *Southern African Forestry Journal*. **191**, 2001.
- Puumalainen, J. Optimal cross-cutting and sensitivity analysis for various log dimension constraints by using dynamic programming approach. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **13** 74–82, 1998.
- Rönqvist, M. Optimization in forestry, *Mathematical Programming*. **97** 267–284, 2003.
- Sakkout, H.E., and M. Wallace. Probe backtrack search for minimal perturbation in dynamic scheduling. *Constraints* **5(4)** 359–388, 2000.
- Sessions, J., Boston, K., Hill, R., and Stewart, R. Log sorting location decisions under uncertainty. *Forest Products Journal*. **55(12)** 53–57, 2005.
- Sessions, J., Olsen, E., and Garland, J. Tree bucking for optimal stand value with log allocation constraints. *Forest Science*. **35(1)** 271–276, 1989.
- Shahi, S. and Pulkki, R. Supply Chain Network Optimization of the Canadian Forest Products Industry : A Critical Review. *American Journal of Industrial and Business Management*, doi :10.4236/ajibm.2013.37073. **3(7)** 631–643, 2013.

- Shan, Y., Bettinger P., Cieszewski, C.J., Li, R.T. Trends in spatial forest planning. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences (MCFNS)*. **1(2)** 86, 2009.
- Todoroki.C. and Rönqvist, M. Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*. **17(1)** 79–89, 2002.
- Usenius, A. Optimum bucking of sawlog stems taking the customers' needs into account. *Paperi ja Puu*. **10** 726–729, 1986.
- Uusitalo J. A framework for CTL method-based wood procurement logistics. *International Journal of Forest Engineering*. **16(2)** 37–46, 2005.
- Wang, J., LeDoux, C.B., and McNeel J. Optimal tree-stem bucking of northeastern species of China. *Forest Products Journal*. **54(2)** 45–52, 2004.
- Weintraub, A. and Romero, C. Operations research models and the management of agricultural and forestry resources : A review and comparison. *Interfaces*. **36(5)** 446–457, 2006.
- Weintraub, A., Romero, C., Björndal, T., Epstein, R. eds. Handbook of Operations Research in Natural Resources. *Springer, New York*, 2007.