

**Centre logistique régional : application au
contexte de l'Est canadien**

**François Sarrazin
Luc LeBel
Nadia Lehoux**

Octobre 2020

Bureau de Montréal
Université de Montréal
C.P. 6128, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) H3C 3J7
Tél : 1 514 343-7575
Télécopie : 1 514 343-7121

Bureau de Québec
Université Laval
2325, rue de la Terrasse
Pavillon Palasis-Prince, local 2415
Québec (Québec) G1V 0A6
Tél : 1 418 656 2073
Télécopie : 1 418 656 2624

Centre logistique régional : application au contexte de l'Est canadien

François Sarrazin^{1,2,*}, Luc LeBel^{1,3}, Nadia Lehoux^{1,4}

1. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)
2. Département d'informatique et recherche opérationnelle, Pavillon André-Aisenstadt, Université de Montréal
3. Département des sciences du bois et de la forêt, Pavillon Abitibi-Price, Université Laval, Québec,
4. Département de génie mécanique, Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval

Résumé. Les difficultés de l'industrie du bois au Canada (déclin du secteur des pâtes et papiers, rareté de la ressource, crise immobilière de 2008-09, etc.) rendent nécessaires d'examiner comment mieux tirer profit de la ressource forestière. À cet égard, la création de cours de triage et de consolidation, distinctes des sites en forêt et des usines, offre des occasions de maximisation de la valeur et de minimisation des coûts. Cet article vise à mieux comprendre l'interaction entre un centre logistique forestier et un réseau forestier complexe tout en explorant plusieurs facteurs géoéconomiques favorisant l'utilisation d'une telle structure. Un modèle de maximisation des profits est proposé et appliqué pour un cas d'études dans la région de la Mauricie au Québec, Canada. Les résultats démontrent qu'un centre logistique ferait augmenter le profit de 0,90 \$ (dollars canadiens) pour chaque mètre cube de bois disponible pour la récolte, notamment grâce à une augmentation du volume de bois transformé en produits finis. De plus, un effet dynamique entre l'opération d'une cour de triage et l'utilisation des retours en charge est constaté. Ainsi, une telle cour fait en sorte qu'un même site peut servir autant comme origine que comme destination, permettant d'importantes réductions du transport à vide.

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

Remerciements. Nous remercions le consortium de recherche FORAC et ses partenaires. Nous remercions également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) d'avoir financé cette recherche par le biais de programmes de subventions à la découverte (RGPIN / 05602-2018). De plus, nous remercions tout particulièrement François Laliberté, ing.f., M.Sc. et Francis Charette de FPInnovations. Nous remercions également l'organisation du Groupe Initiative Mauricie et ses membres, en particulier Carl Tremblay de Kruger et André Gravel de Domtar.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

* Auteur correspondant : Francois.Sarrazin@cirrelt.ca

Introduction

Le secteur forestier canadien subit des difficultés continues depuis les années 2000 avec les conflits récurrents du bois d'œuvre, les fluctuations du dollar canadien (Marowits 2010), la crise immobilière de 2009 et une diminution du volume de bois disponible (Radio-Canada 2004). Mentionnons également le déclin du secteur des pâtes et papiers en Amérique du Nord, notamment celui du papier journal (Gagnon-Paradis 2013), causé par le développement des technologies de l'information. De nombreuses entreprises ont ainsi dû fermer de nombreuses installations. De plus, les préoccupations environnementales liées aux enjeux écologiques exercent des pressions croissantes sur l'industrie forestière pour qu'elle revoie ses pratiques en matière de valorisation et d'optimisation de ses opérations de transport.

L'industrie forestière représente une partie importante de l'activité économique canadienne, générant environ 24,6 milliards de dollars en retombées annuellement. Jusqu'à 200 000 emplois au Canada dépendent directement de ce secteur (Ressources naturelles Canada 2018). Par ailleurs, au Québec, la plus récente enquête quinquennale publiée par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP 2016) recense un coût de transport du bois de 16,15 \$/m³ dans le bois résineux (SEPM) et de 19,25 \$/m³ pour le feuillu. À l'échelle du Québec, en considérant qu'il s'est récolté environ 30 millions de m³ en 2016 (Ressources naturelles Canada 2016), une réduction de seulement 5% du coût de transport représenterait une économie potentielle de 26 millions de \$ (sans inflation) annuellement (Sarrazin 2019). Cependant, le secteur forestier québécois est aux dires même de certains observateurs, en retard sur d'autres industries quant à la gestion de ses opérations de transport (Castonguay 2015).

Ces faits indiquent que les possibilités d'économies dans le secteur forestier y sont importantes. Dans cette lignée, la documentation scientifique démontre que la mise en commun des capacités de transport s'avère profitable à la fois d'un point de vue économique et environnemental (Epstein *et al.* 2007). Cette mutualisation est cependant fort complexe à déployer (Frisk *et al.* 2010), y compris dans le domaine forestier (Castonguay 2015). Aussi, les processus de triage de la matière échouent à capturer le plein potentiel de valeur du bois, compte tenu des erreurs commises dans la classification du bois lorsqu'elle est effectuée en forêt (Sessions *et al.* 2005). De même, le manque d'espace disponible pour effectuer le triage en forêt (Dramm *et al.* 2002), peut engendrer des coûts supplémentaires en comparaison des cours spécifiquement dédiées à cette activité

(Favreau 1995). Enfin, les sites de triage favorisent l'accès aux camions hors normes, qui dans les bonnes circonstances ont démontré leur plus grande efficacité (Chan *et al.* 2009).

Les forêts de feuillus comportent un défi logistique supplémentaire, car le triage et la classification des produits y sont particulièrement intenses. Les billes issues du bois récolté dans les régions comportant du bois feuillu possèdent de grands écarts de valeur et sont transformées par des usines possédant des capacités de transformation très différentes (Ben Ali *et al.* 2019). Aussi, au Canada, les sites de récolte sont souvent éloignés des usines et étendues sur plusieurs secteurs. À cet égard, la création de cours de triage et de consolidation distinctes des sites en forêt et aux usines pourrait offrir de multiples occasions de maximisation de la valeur et de minimisation des coûts.

Des cours de triage peuvent également permettre de minimiser l'empreinte écologique de cette industrie en augmentant la valeur extraite des forêts et en diminuant la dégradation du bois. Il semble également important d'analyser l'interaction entre de telles cours et l'utilisation des retours en charge au sein d'une structure commune que nous appellerons, pour le reste de cet article, centre logistique forestier régional.

De tels centres ne sont cependant pas systématiquement utilisés par les entreprises forestières, malgré les bénéfices qui leur sont associés. Cela pose ainsi la question de connaître les avantages spécifiques au niveau du contrôle des coûts et de la création de valeur. Il semble également pertinent d'étudier les conditions dans lesquelles un tel centre logistique rend les retours en charge économiquement intéressants. L'effet de modifications apportées au réseau telles que la fermeture de certaines usines mérite également d'être étudié. Finalement, il serait important de mesurer l'influence des coûts de transport entre un centre et l'usine qui lui est associée sur les résultats pour aider les gestionnaires forestiers dans la conception même de telles installations.

Dans cette étude, l'implantation de centres logistiques par l'industrie forestière a été validée à travers un cas industriel, à partir de données fournies par les entreprises de la Mauricie au Québec (Canada). Ce réseau possède une grande diversité d'essences et une cour de triage y est déjà en activité. Cependant, seul du bois feuillu y est traité et sa capacité est limitée. De plus, cette cour est localisée en périphérie du centre de gravité du réseau. Ceci nous a donc incité à postuler que des profits supplémentaires pouvaient être possibles si un centre logistique était positionné de façon optimale par rapport aux secteurs de récolte et aux usines d'un tel réseau.

Le reste de cet article est structuré ainsi : premièrement, nous examinerons la littérature scientifique concernant les centres logistiques ainsi que l'influence des facteurs géoéconomiques sur la rentabilité d'un réseau logistique donné. Ensuite, une description de la méthodologie utilisée et du modèle d'optimisation est fournie. La section suivante présente les résultats du scénario de base ainsi qu'une analyse du fonctionnement du centre, son interaction avec le réseau environnant et une analyse de l'impact de différents facteurs géoéconomiques sur sa profitabilité. Nous procéderons ensuite à un examen de la contribution marginale des usines participantes dans le but de guider les décideurs quant à une juste répartition des gains. La conclusion met en évidence les principaux résultats et des suggestions sont faites pour d'autres recherches, en particulier concernant le partage des avantages.

Revue de littérature

Le réseau de création de valeur du bois regroupe toutes les entreprises ou unités d'affaires impliquées dans l'approvisionnement, la production et la transformation d'un produit du bois (Lehoux *et al.* 2012). Celle-ci a eu tendance depuis le XXe siècle, selon Stuart *et al.* (2010), à se fractionner en plusieurs entreprises indépendantes, rendant plus difficile l'optimisation de la chaîne de valeur. La multiplicité des processus « many-to-many » dans le domaine forestier rend leur intégration plus complexe, du fait des nombreux arbitrages entre la production, le niveau de service et les coûts logistiques comme le transport ou l'entreposage (D'Amours *et al.* 2008).

Les opérations de récolte comportent généralement les étapes suivantes : 1- les arbres sont coupés et les branches sont enlevées, 2- le tronc est coupé en billes qui sont placées sur le bord de la route, 3- le bois est transporté aux usines ou dans des cours pour y être entreposé temporairement avant le traitement (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec 2009). Le triage peut être opéré selon: 1- l'essence, 2- la taille, 3- la qualité de la bille (Lehoux *et al.* 2012), laquelle dépend de la partie de l'arbre d'où celle-ci provient (Duchesne *et al.* 1997). La partie la plus basse des arbres possède un plus grand diamètre et donc une plus grande valeur et est envoyée aux scieries (D'Amours *et al.* 2008), alors que la partie la plus haute est dédiée aux pâtes et papiers

(*Ibid.*). Le « *merchandising* » évite ainsi aux usines de recevoir la partie des arbres dont elles n'ont pas besoin et favorise la maximisation de la valeur (Gil et Frayret 2016).

Les contraintes d'espace sont un obstacle majeur au triage en forêt (Dramm *et al.* 2002). Les cours de triage centralisées, disposant d'espace supplémentaire, permettent d'examiner de plus près les billes (*Ibid.*) et de diminuer les erreurs de classement (Sessions *et al.* 2005). Elles valorisent aussi l'optimisation de l'allocation du bois aux usines (Alam *et al.* 2014).

Selon la localisation des cours, celles-ci peuvent permettre d'utiliser des camions possédant une plus forte capacité, mais qui ne sont pas autorisés à circuler sur les routes publiques (Chan *et al.* 2008). Utiliser une cour de transit implique cependant un chargement et un déchargement supplémentaire (Cloutier *et al.* 2009) ainsi que des coûts fixes associés à la mise en place du site (Chung *et al.* 2012). De même, le bois transitant par la cour ne peut plus être livré directement des zones de récolte aux usines, occasionnant des détours au niveau du transport (Sessions *et al.* 2005). Au meilleur de nos connaissances, l'effet de telles cours sur la profitabilité des retours en charge (combinaisons de livraisons pour réduire le transport à vide) demeure peu étudié dans la littérature scientifique. Les économies générées par les retours en charge semblent pouvoir atteindre jusqu'à 20% (Epstein *et al.* 2007). La collaboration au niveau du transport demeure aussi malheureusement rare en foresterie, souvent pour des raisons de confidentialité (Frisk *et al.* 2010).

L'ensemble des opportunités et des défis peut expliquer que les résultats obtenus par des cours de triage ou de consolidation varient beaucoup selon les auteurs. Keron (2012) évalue que l'implantation d'une cour dans un cas théorique pourrait ajouter un profit de presque 9\$ par m³ traité. De leur côté, Shahi et Pulkki (2015) ne montraient pas de gains financiers pour une cour de triage en Ontario visant à servir de tampon par rapport à l'incertitude de la demande. Sessions *et al.* (2005) pour leur part, recommandent de ne *pas* installer de cour de triage pour leur cas d'études en Colombie-Britannique. Finalement, Chan *et al.* (2008) proposent un modèle de sélection de sites pour une cour de transformation en copeaux. L'économie potentielle générée était de 1 850 000 \$ pour un site à Thunder Bay en Ontario, soit 6,8% de l'ensemble des coûts. Chen et al. (2020) démontrent également qu'un centre logistique peut procurer des gains importants en termes de coûts de transport et d'émissions de gaz à effet de serre (GES).

Les bénéficiaires sont tributaires de la planification logistique associée à une telle cour. Il semble donc utile d'étudier les outils permettant de mesurer sa profitabilité.

Planification logistique forestière et modélisation

Au niveau des opérations forestières, plusieurs déplorent que leur planification soit effectuée manuellement (Beaudoin *et al.* 2007) ou de façon mal intégrée aux besoins des entreprises forestières (Lehoux *et al.* 2012). Aussi, certains considèrent que les modèles d'optimisation, que ce soit en foresterie ou ailleurs, se concentrent trop souvent sur la minimisation des coûts (Stuart 2003). Un triage plus élaboré ferait augmenter certains coûts, mais il pourrait offrir de plus grandes possibilités de création de valeur (Cloutier *et al.* 2009).

Nous constatons que les modèles d'évaluation de la rentabilité des cours de triage se concentrent essentiellement sur une partie des aspects pertinents. Ainsi, aucun n'intègre simultanément les coûts de transport, de triage et de stockage. Seul Chung *et al.* (2012) intègrent les revenus générés par le triage, dans un calcul de coût schématisé et sans un modèle d'optimisation.

Un centre logistique forestier comportant une cour de triage et la coordination du transport offre le potentiel d'améliorer la performance du réseau de création de valeur forestier. Il rend cependant le processus de décision plus complexe. Des outils permettant de guider son implantation sont donc nécessaires. L'étude des moyens disponibles révèle qu'il est possible d'offrir une analyse beaucoup plus vaste que ce qui a été fait à ce jour. Ainsi, les objectifs de cet article sont d'analyser l'interaction entre une cour de triage et l'utilisation des retours en charge. Nous visons également à évaluer l'effet de facteurs géoéconomiques sur la rentabilité d'un tel centre au sein d'un réseau forestier complexe. Nous voulons aussi mesurer la contribution marginale des usines participantes au centre étudié. L'atteinte de chacun de ces objectifs permettra de guider les gestionnaires de l'industrie dans leurs décisions quant à l'opportunité de mettre en place un centre logistique forestier régional. Ainsi, les objectifs de cet article sont de mesurer l'impact de la mise en place d'un parc de tri sur l'utilisation des retours en charge, d'évaluer l'effet des facteurs géoéconomiques sur la rentabilité d'un tel centre au sein d'un réseau forestier complexe et de comparer les contributions des usines participantes afin de faciliter le partage des bénéfices entre elles. L'atteinte de ces objectifs aidera à guider les gestionnaires dans leurs décisions quant à l'opportunité de mettre ou non en œuvre une ou les deux composantes d'un centre logistique régional forestier.

Méthodologie et modélisation

Méthodologie

Un modèle d'optimisation a été développé sur la base de celui proposé par Sarrazin et al. (2019). Ce modèle intègre la récolte, le transport, la capacité des usines et des cours de triage. Il fut modifié pour permettre à un nombre prédéterminé d'usines de participer aux activités d'une cour de triage et de décider de l'identité de ces usines pour les besoins des analyses effectuées. La majorité des données requises pour utiliser le modèle furent collectées auprès d'entreprises forestières de la région de la Mauricie, ainsi que de sources scientifiques. Des expérimentations furent réalisées afin de mesurer le niveau de profit généré par chaque instance (aucun site, puis un ou deux site(s) sélectionné(s) comme cour(s) de triage). La validation du modèle intégrait une boucle de rétroaction dans laquelle les données et le modèle furent ajustés jusqu'à ce qu'une solution admissible et réaliste soit obtenue. La méthodologie se résume aux étapes suivantes :

- Cartographie du réseau forestier;
- Collecte des données;
- Développement du modèle d'optimisation;
- Validation du modèle;
- Test du scénario de base et analyse de sensibilité;
- Compilation et analyse des résultats;

Spécifiquement, les entreprises forestières dans la région ont fourni les distances, les volumes récoltés et les garanties d'approvisionnement pour chacune des usines pour l'année 2016. Avec ces données, la capacité de récolte et la composition des unités d'aménagement forestier (UAF) furent définies, pour un total de 5 160 822 m³ disponibles à la récolte sur un horizon de deux ans. La base de données incluait neuf essences différentes. La capacité de production de chaque usine fut définie en utilisant la somme des garanties d'approvisionnement pour chacune des zones de récolte. Quatre UAF furent incluses dans la base de données (4151, 4251, 4351, et 4352). Il y a 11 usines dans le réseau, incluant cinq scieries, trois usines de pâtes et papier, deux usines de

placage (incluant une usine de déroulage) et une usine de panneaux. Une carte de la région, incluant la localisation des cours de triage, peut être observée à la figure 1.

Le bois résineux domine le nord de la région, alors que le bois feuillu et les blocs de récolte mixtes sont concentrés dans le sud. Le bois est alloué à des unités d'affaires qui transforment soit du résineux, soit du bois feuillu.

Un rapport de FPIinnovations FERIC (Michaelsen et Tran, 2008) a fourni des projections quant aux coûts d'implantation d'une cour de triage. Ceux-ci sont estimés à 0,48\$ pour chaque mètre cube traité au centre (incluant l'inflation). Les coûts de transformation en copeaux furent déduits de Constantineau et Lacroix (2012). Les taux de conversion entre les quantités de produits entrant et sortant du processus de triage, les niveaux de redevance les plus récents, les coûts de récolte, les prix des produits et les capacités de récolte furent calculés à l'aide du logiciel MÉRIS utilisé par le *Bureau de mise en marché des bois* (2018) du gouvernement du Québec, Canada. Les niveaux de densité par essence furent recensés dans Lemieux (2014). Leur évolution à travers le temps fut déduite en comparant la densité du bois vert et du bois sec (Engineering Toolbox, 2018) et en estimant la vitesse à laquelle le bois perdait de son humidité (Partenariat Innovation-Forêt, 2015). Les coûts de transport furent estimés à partir du logiciel FPIinterface™ développé par FPIinnovations (FPIinnovations, 2018). Finalement, des experts de l'industrie furent consultés pour comprendre et organiser les données ainsi que pour vérifier que le modèle représentait adéquatement les opérations forestières dans la région.

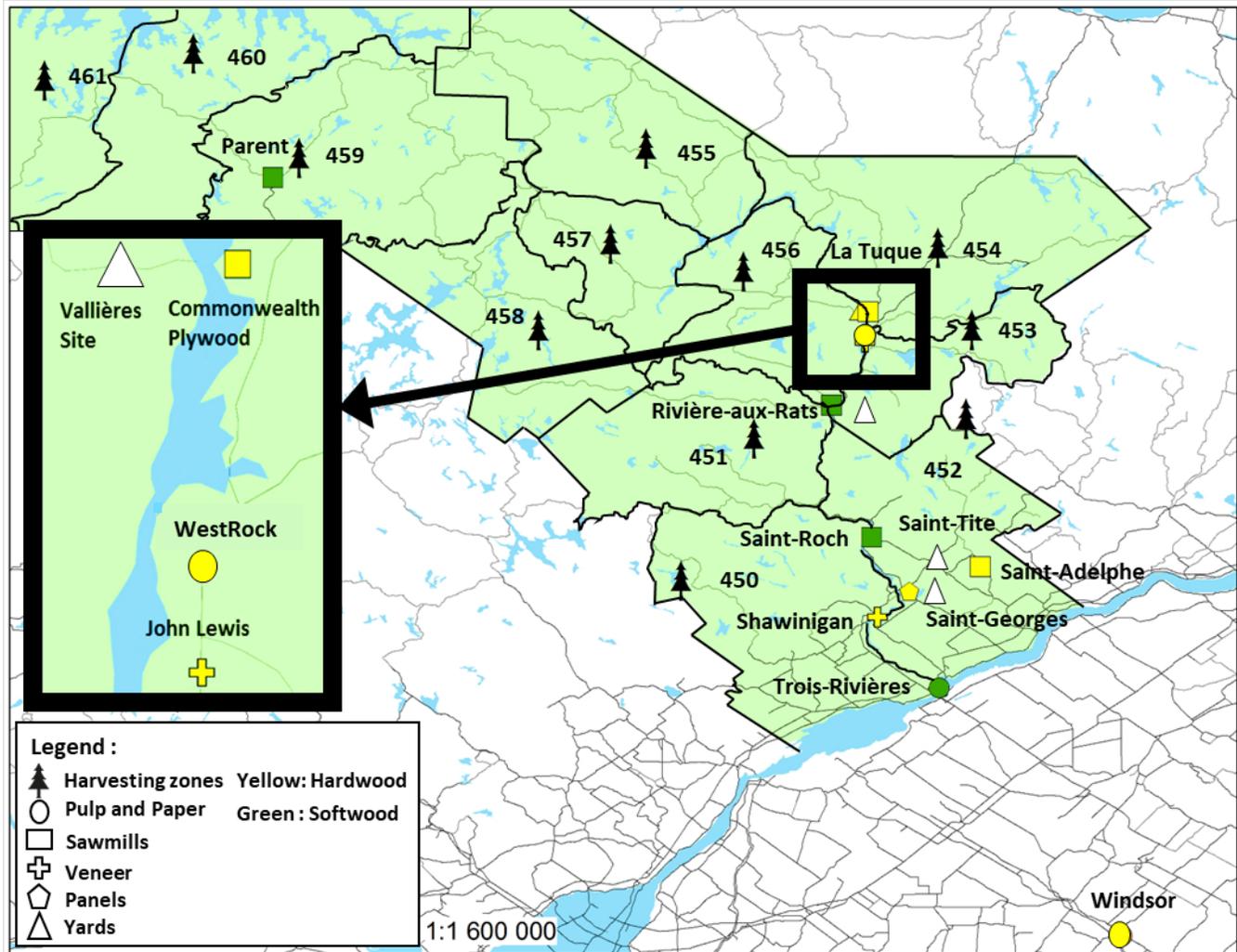


Figure 1: Le réseau forestier de la Mauricie avec 12 zones de récolte et 11 unités d'affaires (usines) (Sources: © Gouvernement du Québec and Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs).

Cas d'études – Région de la Mauricie

La région de la Mauricie est située à mi-chemin entre Montréal et Québec, dans la Province de Québec, au Canada. Un certain nombre de forêts mixtes y sont situées, surtout dans le sud de la région. Elle possède aussi une cour de triage en service appelée le site Vallières, plus au nord (Ville de La Tuque, 2017). Cette cour a une capacité annuelle de 400 000 m³ par année et traite seulement du bois feuillu. Deux des usines de sciage de bois résineux de la région (c.-à-d. Parent et Rivière-aux-Rats) ont accès à des camions hors normes, du fait

qu'elles ont un accès direct au réseau des chemins forestiers. Les cours de triage ouvrent la porte à une utilisation accrue des B-trains, car ces derniers ont difficilement accès aux sites de récolte dans cette région.

Modélisation et génération de routes

Pour analyser les interactions d'un centre logistique avec un réseau forestier complexe, nous avons construit un modèle mathématique. Le modèle maximise les profits du réseau, soit les revenus moins les coûts de récolte, les redevances, les coûts de transport, de triage, de production, de stockage et les coûts d'implantation. Les variables de décision concernent les quantités récoltées, transportées, triées, produites, stockées et vendues pour chaque matériel de base, produits, sites, modes de transport, période de temps et client. Un horizon de huit périodes s'étendant sur deux ans fut utilisé.

Modèle mathématique

Les éléments suivants sont utilisés dans le modèle:

Ensemble

P^0 : ensemble des produits $p \in P^0$ qui incluent des copeaux ou de la sciure.

PE, PS : ensembles des produits p qui entrent ($p \in PE$), ou sortent d'un processus ($p \in PS$).

P : ensemble de tous les produits $p \in P$.

S : ensemble de tous les processus de transformation $s \in S$.

S_i^+ : ensemble de tous les processus de transformation $s \in S_i^+$ dans lesquels le site i est spécialisé (triage pour une cour, production pour une usine).

F : ensemble des sites de récolte $f \in F$.

Y : ensemble des sites potentiels pour une cour de triage $y \in Y$.

M : ensemble des usines $m \in M$.

N : ensemble de tous les sites i et $j \in N$, tel que $N = F \cup Y \cup M$.

O : ensemble de tous les nœuds d'origine $i \in O$, tel que $O = N$.

D : ensemble de tous les sites $j \in N$ où les produits peuvent être livrés, tel que $D = Y \cup M$.

T : ensemble des types de camions $t \in T$.

L : ensemble des périodes de temps $l \in L$ pour l'horizon de temps (incluant $l = 0$, pour définir un stock de départ).

C : ensemble des clients $c \in C$.

R : ensemble des routes $r \in R$.

G : ensemble des familles d'essences $g \in G$ qui peuvent inclure plusieurs essences (par exemple l'érable, le bouleau, et le résineux, aussi appelé SEPM).

U : ensemble des UAF $u \in U$; chaque UAF inclut trois ou quatre zones de récolte.

A : ensemble des âges possibles $a \in A$. (l'âge peut aller de 0 à 8 périodes, qui est la durée de l'horizon de planification).

Log, log^+, log^- : ensemble des billes ($p \in log^+$), ou du bois qui va plus tard être transformé en billes ($p \in log^-$). $Log = log^+ \cup log^-$.

Paramètres

E^t : capacité en volume (en m^3) pour un véhicule de type t .

Q_{ij}^{lt} : limite de poids (en tonnes) pour une livraison avec un véhicule de type t entre l'origine i et la destination j ($i, j \in N$) durant la période l .

Ω^t : taille de la flotte de véhicules de type t .

β^{lt} : temps disponible (en heures) sur la route par mois pour un véhicule de type t durant la période l .

η_{ij}^{rt} : nombre de fois que l'origine i , et la destination j ($i, j \in N$) ainsi qu'un véhicule de type t font partie de la route r .

W^r : nombre d'heures requises pour effectuer la route r avec un véhicule de type t .

o^p, o^{pa} : tonnes métriques par m^3 pour un produit p sans ou avec l'âge a respectivement.

δ^{pl} : paramètre binaire indiquant si la limite de poids s'applique au produit p durant la période l ou non.

c_{ij}^p : redevances (en $\$/m^3$) devant être payées pour le produit $p \in log^+$, récolté dans la forêt $i \in F$ et consommé par l'usine $j \in M$.

c_i^p : coût de récolte (en $\$/m^3$) du produit p au site en forêt $i \in F$.

c_i, c_i^+ : coût fixe (en $\$$) pour mettre en place la cour i (c_i) et le coût d'installation pour installer un bloc de capacité à la cour i (c_i^+).

c_{ij}^{plt} : coût variable de transport (en $\$/m^3$) du produit p à partir du site i vers la destination j ($i, j \in N$) durant la période l avec le type de véhicule t .

c_i^s : coût de triage ou de production (en $\$/m^3$) d'utilisation du processus s au site $i \in N$.

c_i^{pl} : coût de stockage (en $\$/m^3$) du produit p au site $i \in N$ durant la période l .

c^r : coût fixe de la route r .

V^{pc}, V^{pca} : valeur (en $\$$) du produit p lorsqu'il est vendu au client c sans ou avec l'âge a .

Q_i, Q_i^l : capacité de récolte ou de traitement de la matière pour un bloc de capacité au site i sur l'ensemble de l'horizon (Q_i) ou une période l (Q_i^l).

Q_i^+, Q_i^{l+} : capacité extra au site i sur l'ensemble de l'horizon (Q_i^+), ou pour une période (Q_i^{l+}), indépendamment du nombre de blocs de capacité.

Q^l : capacité de récolte (en m^3) pour la période l pour l'ensemble du réseau.

Q_i^p : quantité estimée (en m^3) d'une bille p à la forêt i . Utilisé pour comptabiliser les redevances.

W_{ij}^g : quantité de bois (en m^3) du groupe g , provenant de l'UAF u garantie à l'usine j .

E^i : volume de capacité ou d'espace de stockage (en m^3) durant une période donnée pour le site $i \in N$.

\min_i, \max_i : Nombre minimal ou maximal, respectivement, de blocs de capacité devant être installés à la cour ou à l'usine i (sert également pour exprimer le pourcentage minimal de récolte à un site en forêt). Acheter un bloc de capacité donne le droit de trier ou de traiter une certaine quantité de bois (typiquement $250\,000\,m^3$ pour une cour de triage).

g^{sp} : taux de conversion entre la quantité d'un produit p et celle du produit p' obtenue d'un processus de triage ou de production s .

l^{\max} : dernière période de l'horizon temporel.

v^i : paramètre exprimant la quantité minimale du niveau de production ou de triage qui doit être effectué au site $i \in YUM$ durant la période l (représente un pourcentage de sa propre production moyenne).

z_i : paramètre binaire qui est égal 1 si la cour de triage ou le site de production $i \in YUM$ est actif, 0 sinon.

z_{ij} : paramètre binaire qui est égal 1 si la cour de triage $i \in Y$ a le droit d'envoyer du bois au site de production j , 0 sinon

Z : Nombre d'usines $i \in M$ qui ont le droit d'utiliser les services de la ou des cours de triage

θ_j^p : paramètre binaire qui est égal 1 si le produit p est l'intrant d'un processus utilisé à l'usine $j \in M$, 0 sinon.

\aleph : très grand chiffre

Variables

x_i^t : nombre de véhicules de type t qui opèrent à partir du site $i \in YUM$ durant la période l .

x^{rt} : nombre de fois que la route r est utilisée durant la période l et par le véhicule de type t .

x_{ij}^{pl} : nombre de livraisons du produit p de l'origine i à la destination j ($i, j \in N$) durant la période l avec un véhicule de type t .

$q_{ij}^{pl}, q_{ij}^{pl,a}$: quantité du produit p livrée de l'origine i à la destination j ($i, j \in N$) durant la période l avec un véhicule de type t sans ou avec l'âge a respectivement.

$\mathfrak{S}_i^{spl}, \mathfrak{S}_i^{spia}$: quantité du produit p extraite du processus s au site $i \in N$ durant la période l sans ou avec l'âge a respectivement.

x_i^{pl} : quantité du produit p récoltée au site en forêt $i \in N$ durant la période l .

x_{ij}^p : quantité du produit $p \in \log^+$ fabriquée avec du bois de la forêt $i \in F$ et assignée à l'usine j .

x_i^{spl}, x_i^{spia} : quantité du produit p traitée par le processus s au site $i \in N$ durant la période l sans ou avec l'âge a respectivement.

$x_{ic}^{pl}, x_{ic}^{pia}$: quantité du produit p vendue à partir du site $i \in N$ au client c durant la période l sans ou avec l'âge a respectivement; permet au système d'éliminer le bois qui n'est pas profitable, les produits peuvent être vendus virtuellement et pour aucun revenu (sous certaines conditions).

I_i^{pl}, I_i^{pia} : niveau de stockage du produit p au site $i \in N$ durant la période l sans ou avec l'âge a respectivement.

n_i : nombre de blocs de capacité de triage ou de processus de production installés au site $i \in YUM$.

$Threshold_{il}$: niveau minimal de production ou de triage devant être effectué durant la période l et au site $i \in YUM$.

Fonction objectif et les contraintes du modèle

Fonction objectif: *Maximiser*

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{c \in C} \sum_p \sum_l V^{pc} x_{ic}^{pl} - \sum_{i \in F} \sum_p \sum_l c_i^p x_i^{pl} - \sum_{i \in F} \sum_{j \in M} \sum_p c_{ij}^p x_{ij}^p - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_i c_i^s x_i^{spl} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_t c_{ij}^{plt} q_{ij}^{plt} - \sum_r \sum_l \sum_t c^r x^{rt} - \sum_{i \in Y} c_i z_i - \sum_i c_i^+ n_i - \sum_i \sum_p \sum_l c_i^{pl} I_i^{pl} \end{aligned} \quad (1)$$

La fonction objectif (1) maximise les profits, c'est-à-dire la somme des revenus des ventes de produits moins les coûts de récolte, de redevances, de triage, de production, de transport, d'implantation et de stockage, sujet aux contraintes suivantes:

$$Q_i^* \min_i \leq \sum_p \sum_l x_i^{pl} \leq Q_i \quad \forall i \in F \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p x_i^{pl} \leq Q^l \quad \forall l \in L \mid l \geq 1 \quad (3)$$

$$\sum_p I_i^{pl} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L \mid l \geq 1 \quad (4)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{p^{l-1}} + x_i^{pl} + \sum_s I_i^{sp^l} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{pl} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{pl} - \sum_s x_i^{sp^l} - \sum_u x_{iu}^{pl} \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L | l \geq 1 \quad (5)$$

$$I_i^{pl} \geq I_i^{l'} \quad \forall i \in N, p \in P | l = l^{max} \& l' = 0 \quad (6)$$

$$I_i^{sp^l} = \sum_{p' \in PE} g^{sp'p} x_i^{sp'l} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L^+, s \in S \quad (7)$$

$$z_i \min_i \leq n_i \leq z_i \max_i \quad \forall i \in YUM \quad (8)$$

$$\sum_{s \in S^+} \sum_p \sum_l x_i^{sp^l} \leq n_i Q_i + Q_i^+ \quad \forall i \in YUM \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S^+} \sum_p x_i^{sp^l} \leq n_i Q_i^l + Q_i^{l+} \quad \forall l \in L, i \in YUM | l \geq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{sp^l} \geq v^{il} \frac{Q_i^l}{\sum_l Q_i^l} * \sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{sp^l} \quad \forall l \in L, i \in YUM | l \geq 1 \quad (11)$$

$$Treshhold_{il} = v^{il} \frac{Q_i^l}{\sum_l Q_i^l} * \sum_{s \in S_i^+} \sum_p x_i^{sp^l} \quad \forall l \in L, i \in YUM | l \geq 1 \quad (12)$$

$$\sum_r (W^{rt} x^{rl}) \leq \beta_{lr} x_i^{lt} \quad \forall l \in L, i \in YUM, t \in T | l \geq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in YUM} x_i^{lt} \leq \Omega^l \quad \forall l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (14)$$

$$\delta^p q_{ij}^{pl} \leq \delta^{pl} x_{ij}^{pl} Q_{ij}^l + (1 - \delta^{pl}) x_{ij}^{pl} E \quad \forall i \in N, j \in YUM, p \in P, l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (15)$$

$$\sum_i x_{ic}^{pl} = \sum_r \eta_{ij}^{rl} x^{rl} \quad \forall i \in N, j \in YUM, l \in L, t \in T | l \geq 1 \quad (16)$$

$$\frac{\sum_{j \in M} x_{ij}^p}{Q_i^p} \frac{\sum_p \sum_l x_i^{pl}}{Q_i} \quad \forall i \in F, p \in P \quad (17)$$

$$\sum_{i \in F} x_{ij}^p \geq \sum_c \sum_l x_{jc}^{pl} + \sum_s \sum_l x_j^{sp^l} \quad \forall i \in YUM, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{i \in F} \sum_p \sum_l \sum_t q_{ij}^{pl} - \sum_s \sum_{p' | p' \neq p} \sum_l I_i^{sp'l} - \sum_{j' | j' \neq j} \sum_{p' | p' \neq p} \sum_l \sum_t q_{j'i}^{p'l} \leq W_{ij}^g$$

$$\forall g \in G, j \in M, u \in U, p \in Log \mid \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \ \& \ g_p = g \ \& \ u_f = u \ \& \ Q_j > 0 \ \& \ \emptyset_j' = 0 \quad (19)$$

$$\sum_i \sum_p \sum_l \sum_t q_{ij}^{plt} - \sum_s \sum_{p' \neq p} \sum_l \Gamma_i^{sp'l} - \sum_{j' \neq j} \sum_{p' \neq p} \sum_l \sum_t q_{ij'}^{p'l} \leq \sum_u W_{uj}^g$$

$$\forall g \in G, j \in M, p \in Log \mid \sum_u \sum_g W_{uj}^g > 0 \ \& \ g_p = g \ \& \ u_f = u \ \& \ Q_j > 0 \ \& \ \emptyset_j' = 0 \quad (20)$$

$$\sum_i x_{ic}^{pl} = 0 \quad \forall i \in Y \cup M, l \in L \mid V^{pc} = 0 \ \& \ p \notin P^o \ \& \ l \geq 1 \quad (21)$$

$$\sum_p \sum_l \sum_t x_{ij}^{plt} \leq \alpha z_{ij} \quad \forall i \in Y, j \in M \quad (22)$$

$$\sum_i x_i \leq Z \quad \forall i \in M \quad (23)$$

$$I_i^p, x_i^{pl}, x_i^{spl}, q_{ij}^{plt}, x_{ij}^{plt}, x_i^l, x_{ij}^p, x_{ic}^p, x_i^p, x_i^p, x_i^l, n_i, I_i^{spl} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T \quad (24)$$

La contrainte (2) établit une limite de capacité de récolte pour l'horizon de planification et force le système à récolter un pourcentage minimal du bois disponible dans chaque zone (dans notre cas, 90%). Il existe aussi une limite de récolte pour tous les réseaux et pour chaque période (contrainte 3). La contrainte (4) représente une capacité de stockage pour chaque site. La contrainte (5) représente les conservations de flux pour chaque site et chaque produit. De façon à garantir que chaque produit peut toujours sortir du réseau, la matière première et les produits intermédiaires peuvent être vendus pour un revenu nul à un client « virtuel ». Cela peut être justifié (économiquement) pour certains produits intermédiaires possédant une faible valeur.

La contrainte (6) garantit que le stock pour un produit à un site donné à la fin de l'horizon sera toujours au moins aussi grand qu'au début de celui-ci. Cela permet d'éviter d'avoir un stock de départ qui pourrait être vendu sans aucun des coûts associés à sa transformation. La contrainte (7) définit la relation entre les quantités de produits entrant et sortant d'un processus de triage ou de production. La contrainte (8) définit un nombre minimum et maximum de blocs de capacité qui peuvent être utilisés par un site (dans ce cas d'études, 10 blocs de 250 000 m³ furent définis pour chaque cour de triage). Les blocs de capacité ne doivent pas être confondus avec les blocs de récolte, qui sont des aires géographiques possédant une certaine capacité de récolte. La

contrainte (9) définit une limite de capacité de production globale pour chaque cour et chaque usine. La contrainte (10) fait de même pour chaque période. La contrainte (11) établit un niveau de triage ou de production qu'une cour ou une usine doit atteindre pour limiter les variations à travers le temps. La contrainte (12) définit le paramètre $Threshold_{it}$, qui sera utilisé dans une seconde phase du modèle (voir plus loin).

La contrainte (13) assure que la flotte de véhicules a suffisamment de temps pour effectuer les routes sélectionnées. La contrainte (14) garantit que la somme de chaque type de camions assignés aux différents terminaux correspond à la taille de la flotte. La contrainte (15) fixe la capacité en volume et en poids des camions. La contrainte (16) assure que le nombre de livraisons par combinaisons de paires origine-destination et de type de véhicule soit égal au nombre de fois que ces combinaisons sont présentes dans les routes sélectionnées. La contrainte (17) assure qu'il y a cohérence entre le niveau de récolte et la somme des billes qui proviennent d'un site en forêt et qui sont assignées à une usine. La contrainte (18) spécifie que la somme des billes assignées à un site doit être supérieure ou égale à la somme des billes qui sont transformées ou virtuellement "vendues" (sans revenus associés) à ce même site. Les contraintes (19) et (20) garantissent que les usines ne reçoivent pas plus que ce à quoi elles ont droit de chacune des UAF, et ce, pour chaque produit. La contrainte (21) assure que les cours de triage et les usines ne pourront éliminer des produits intermédiaires (seules les forêts peuvent faire cela). La contrainte 22 garantit que seul un certain nombre (Z) d'usines peuvent participer aux activités des cours de tri en opération. La contrainte 23 garantit que les chantiers de tri non sélectionnés par la contrainte 22 ne reçoivent aucun bois des cours de tri. Les variables sont définies par la contrainte (24).

Pour limiter la taille du problème, le modèle fut initialement résolu sans considérer l'effet de l'âge sur la valeur et la densité des produits. Les groupes de processus où il n'avait pas au moins un processus qui était utilisé dans la première solution ont ensuite été éliminés de la base de données. Le modèle fut alors de nouveau résolu, cette fois-ci en considérant l'effet de l'âge sur la matière. La contrainte (5) concernant la conservation des flux fut remplacée par les contraintes (25) et (26) de manière à prendre en compte le stock du même produit dans la période précédente pour le bois qui a au moins une période (contrainte 25).

$$I_i^{pla} = I_i^{p^{l-1}a-1} + x_i^{pla} + \sum_s I_i^{pla} + \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{j|j \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla}$$

$$\forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A / l \geq 1 \ \& \ a \geq 1 \quad (25)$$

$$I_i^{pla} = x_i^{pla} + \sum_s I_i^{spla} + \sum_t \sum_{jj \neq i} q_{ji}^{plat} - \sum_t \sum_{jj \neq i} q_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} - \sum_c x_{ic}^{pla}$$

$$\forall i \in N, p \in P, l \in L, a \in A \mid l \geq 1 \text{ \& } a = 0 \quad (26)$$

La contrainte 11 limitant la fluctuation des niveaux de production a été remplacée par la contrainte 27 afin de limiter le nombre de variables (et le temps moyen de résolution) en utilisant le paramètre $Threshold_{ij}$, déterminé par les résultats de la première phase.

$$\sum_{s \in S_i^+} \sum_p \sum_a x_i^{spla} \geq Threshold_{ij} \quad \forall i \in Y \cup M, l \in L \mid l \geq 1 \quad (27)$$

Finalement, la fonction objectif ainsi que les contraintes (6), (7), (9), (10), (15), (18), (19), (20), (21) et (24) furent modifiées. Le facteur âge fut ajouté aux paramètres ou variables suivant(e)s : σ^{pa} , V^{pca} , q_{ij}^{plat} , x_i^{spla} , x_{ic}^{pla} , S_i^{spla} , et I_i^{pla} . Les contraintes (6), (7) et (21) furent définies pour $\forall a \in A$, alors qu'une sommation sur le facteur âge fut ajoutée aux autres contraintes. Il y a aussi une sommation sur l'âge quant au niveau de revenus, de redevances, les variables de transport, les quantités triées et en stock dans la fonction objectif.

Génération de routes

Une technique inspirée de l'algorithme MaxTour développé par Gingras et al. (2007) fut appliquée pour générer des routes avant que l'optimisation soit effectuée. Cette technique était elle-même une adaptation au transport en charge complète (qui représente la norme dans l'industrie forestière) de l'heuristique développée pour des livraisons en charges partielles par Clarke et Wright (1964), où les livraisons sont fusionnées et où les combinaisons les plus performantes sont soumises au solveur. De cette façon, un nombre substantiel de routes de livraison fut généré. Celles-ci respectent toutes une limite de temps de livraison de 14 heures tout en générant une certaine économie de coûts. Mises ensemble, elles couvrent l'ensemble du réseau. Nous définissons une route comme une séquence d'une ou de plusieurs livraisons (des forêts vers une cour, des

forêts vers les usines, d'une cour vers les usines ou d'une usine à une autre usine). Chaque route commence à un « dépôt » ou à une base.

Résultats

Expérimentation – Scénario de base

Chaque zone de récolte considérée dans cet article représente une agrégation de blocs de récolte. Seules les usines possédant une capacité annuelle supérieure à 10 000 m³ et un niveau significatif d'interaction avec le reste du réseau furent incluses dans la base de données. Trois sites potentiels furent identifiés pour accueillir une cour de triage. Un d'entre eux, le site Vallières, est déjà en activité. Les autres sites sont Rivière-aux-Rats et Parent, tous les deux proches d'une usine de sciage de bois résineux. Les camions hors normes ont accès aux trois sites. La possibilité d'élargir le site Vallières actuel pour lui permettre de traiter du bois résineux fut considérée. Le comportement du réseau sans cour fut d'abord analysé. Les améliorations de profit générées par l'utilisation des retours en charge furent mesurées pour chaque configuration. Le modèle fut implanté via le logiciel OPL Studio. Le temps de résolution variait entre 30 minutes et une heure, tout dépendant de l'instance, avec le solveur CPLEX, version 12.6.2 (IBM 2019). Nous avons utilisé un PC standard avec un processeur de 3,4 GHz et 31,8 Go de RAM.

Liste des configurations du réseau

Un grand nombre d'instances réparties sur trois groupes distincts (voir tableau 1) ont été générées puis comparées, dans le but de guider les gestionnaires dans leurs décisions stratégiques, d'analyser certains comportements du réseau et de dégager des enseignements qui pourront être généralisés à d'autres réseaux. Le premier groupe (groupe *G1*, voir tableau 2 pour une description des configurations) constitue le scénario de base, avec sept configurations et 14 instances différentes (avec et sans retour en charge). L'instance utilisée comme base de comparaison ne comporte pas de cour ni de retours en charge. Les numéros des instances ayant les meilleurs et les pires résultats de chaque groupe sont colorés en rouge (pires) ou en bleu (meilleurs) tout au long de cet article. Le second groupe d'instances (*G2*) représente le fait d'enlever une usine du réseau.

Finalement, le troisième groupe (G3) regroupe des instances où il fut considéré que les cours de triage pouvaient éventuellement être contiguës aux usines auxquelles elles sont associées.

Tableau 1: Liste des groupes d'instances

Groupe	Description
G1	Scénario de base
G2	Usines enlevées du réseau
G3	Contiguïté avec l'usine associée

Tableau 2: Instances du groupe G1 (scénario de base)

Instance/Site	Vallières	Vallières élargit	Rivière-aux-Rats	Parent	Retours en charge
<i>G1.1 (Pas de cour)</i>					
<i>G1.2</i>					✓
<i>G1.3 (Statu quo)</i>	✓				
<i>G1.4</i>	✓				✓
<i>G1.5</i>			✓		
<i>G1.6</i>			✓		✓
<i>G1.7</i>		✓			
<i>G1.8</i>		✓			✓
<i>G1.9</i>	✓		✓		
<i>G1.10</i>	✓		✓		✓
<i>G1.11</i>				✓	
<i>G1.12</i>				✓	✓
<i>G1.13</i>	✓			✓	
<i>G1.14</i>	✓			✓	✓

Tableau 3: Profits et gains pour le groupe G1 (en \$/m³ disponible)

Transport					
Retours à vide			Retours en charge		
Instance	Profit	Gain	Instance	Profit	Gain
<i>G1.1</i>	1 836 091 \$	-	<i>G1.2</i>	2 449 736 \$	+ 0,12 \$
<i>G1.3</i>	4 496 029 \$	+ 0,52 \$	<i>G1.4</i>	5 526 066 \$	+ 0,71 \$
<i>G1.5</i>	4 706 859 \$	+ 0,56 \$	<i>G1.6</i>	5 742 880 \$	+ 0,76 \$
<i>G1.7</i>	4 814 867 \$	+ 0,58 \$	<i>G1.8</i>	5 756 075 \$	+ 0,76 \$
<i>G1.9</i>	5 646 198 \$	+ 0,74 \$	<i>G1.10</i>	6 457 161 \$	+ 0,90 \$
<i>G1.11</i>	2 893 486 \$	+ 0,20 \$	<i>G1.12</i>	3 635 906 \$	+ 0,35 \$
<i>G1.13</i>	4 825 551 \$	+ 0,58 \$	<i>G1.14</i>	6 063 923 \$	+ 0,82 \$

Les résultats ont montré que l'instance sans cour ni retours en charge a affiché le plus faible profit avec un bénéfice d'environ 1,8 million de dollars (tableau 3). La configuration *GI.9* avec deux cours de tri: l'une au site Vallières et l'autre à Rivière-aux-Rats, a donné les meilleurs résultats avec un bénéfice de 5,6 millions de dollars (sans retours en charge). La quantité de bois traitée lorsque ces deux cours étaient exploitées a atteint 1 291 485 m³. Environ 80% du bois traité aux cours était du bois feuillu. Pour faire des comparaisons appropriées, les unités utilisées étaient les dollars par mètre cube disponible (à la récolte), c'est-à-dire tout le bois disponible pour être récolté dans la région, et ce, sur une période de deux ans. L'instance *GI.14* impliquant le site Vallières ainsi qu'une cour installée à proximité de l'usine de Parent offre le second meilleur résultat, surtout lorsque les retours en charge sont utilisés (6 063 923\$ de profit et 0,82\$/m³ de gain).

Le site Vallières performe mieux que celui de Rivière-aux-Rats quand il peut traiter du bois résineux et du bois feuillu et quand les deux sites ont accès à la même capacité (en m³ triés). Ainsi, Vallières est situé proche de trois usines traitant du bois feuillu alors que Rivière-aux-Rats est à côté d'une usine traitant du bois résineux. Selon les spécialistes interrogés, il n'y a pas ou peu d'erreurs dans le triage du bois résineux. Puisque les trois usines à proximité de Vallières consomment la majorité du bois qui y transite, cela a comme effet d'atténuer considérablement l'effet de « détour » qu'apporte une cour de triage. Aussi, ces trois usines de feuillu ne peuvent être desservies par le transport hors norme alors que celle de Rivière-aux-Rats y a accès. Ainsi, l'usine de Rivière-aux-Rats n'a pas besoin que son bois transite par la cour de triage pour bénéficier du transport hors norme, contrairement aux usines à proximité du site Vallières. Le même phénomène se produit de façon plus accentuée pour les instances comportant une cour à Parent, puisque l'usine de cet endroit a déjà accès à des camions surdimensionnés. Pour ces instances, la plus faible proportion de bois feuillu (18% lorsque seule une cour à Parent est utilisée) diminue de beaucoup les gains engendrés par m³. Le fort volume de bois disponible à la récolte dans les zones environnantes permet cependant d'autres économies (coût de triage et transport hors norme) sur du bois qui transite vers d'autres usines.

Pour Rivière-aux-Rats, tout le bois traité est en fait livré à d'autres usines, ce qui rend ainsi le « détour » plus important. Aussi, si on examine la performance de Vallières en \$/m³ traités à la cour quand elle est agrandie, sa plus grande capacité fait en sorte qu'elle traite du bois moins profitable que lorsqu'elle est plus petite.

Un examen plus approfondi des résultats du scénario de base (sans retour en charge, voir le tableau 4) montre que le site Vallières engendre en même temps des revenus (2,10\$/ m³ disponible) et des coûts plus élevés

(1,58\$/m³). Une augmentation des niveaux de récolte lors de l'utilisation d'un parc de tri entraîne toujours plus d'activité sur l'ensemble du réseau (vente mais aussi récolte, droits de coupe, transport, tri, etc.). Quand une cour est ajoutée à Rivière-aux-Rats, les revenus augmentent de 0,30\$/m³ (2,40 \$ - 2,10 \$ = 0,30 \$/m³) et les coûts de triage diminuent d'environ 0,06 \$/m³ (0,46 \$ - 0,40 \$).

Tableau 4: Augmentation de revenus et de coûts (en \$/ m³ disponible)

Revenus & Coûts/Instance	G1.3 - Vallières	G1.9 - Vallières & Rivière-aux-Rats
Revenus	2,10 \$	2,40 \$
Coûts	1,58 \$	1,66 \$
Récolte/Redevances	0,40 \$	0,53 \$
Triage/Production	0,46 \$	0,40 \$
Transport	0,66 \$	0,63 \$
Implantation de la cour	0,07 \$	0,12 \$
Stockage	(0,01) \$	(0,01) \$
PROFITS	0,52 \$	0,74 \$

Analyse des retours en charge

Les retours en charge permettent de combiner plusieurs livraisons afin de réduire le transport à vide. La coordination du transport est rarement utilisée dans l'industrie forestière (Frisk *et al.* 2010), ce qui signifie que les camions reviennent souvent vides jusqu'à leur point d'origine.

Dans notre étude de cas, les avantages des retours en charge oscillent entre 0,12 et 0,24 \$/m³ disponible. Le gain le plus important est observé dans le cas où le site de Vallières a été utilisé ainsi qu'une cour à côté de l'usine Parent (0,24\$/m³). Elle est principalement attribuable à une augmentation des revenus (de 0,21\$/m³), principalement en raison d'une plus grande activité à l'usine Parent ainsi qu'à l'usine de pâtes et papiers de Trois-Rivières.

Les options les plus intéressantes pour l'utilisation des retours en charge ont tendance à impliquer la scierie Parent (comme usine ou comme cour). Parent est située loin des autres usines. Dans la route la plus rentable (utilisée avec un site Vallières élargi), le camion quitte le site Vallières et se rend à la zone de récolte 457 pour récupérer le bois à livrer à la scierie de Parent. Le camion ramasse ensuite les billes de pâte et papier à livrer à Trois-Rivières, dans le sud de la région. Environ 35% des coûts (493 \$ par voyage) sont économisés en combinant ces livraisons pour une économie totale de 551 302 \$ par an. Une autre combinaison

prometteuse consiste à coupler une livraison de la zone de récolte 457 à la scierie de Parent avec une livraison de la zone 459 (vers une usine ou une cour). Un effet dynamique a été noté dans la mesure où l'augmentation du bénéfice obtenu en utilisant les retours en charge était plus importante lorsqu'une cour de triage était utilisée (environ 9-17% - voir le tableau 5). Celui-ci est d'ailleurs plus élevé lorsqu'une cour est en opération à proximité de l'usine de Parent (17%).

Cet effet dynamique est plus faible lorsque le site de Rivière-aux-Rats est combiné à Vallières (seulement 4%). Nous avons identifié deux causes à ce phénomène. Premièrement, l'utilisation d'une cour de tri permet de réduire la longueur moyenne des itinéraires de livraison en décomposant le flux de matière entre les zones de récolte et les usines de production en deux parties. Il est ainsi plus facile pour un itinéraire de livraisons de respecter la limite de temps légale de conduite de 14 heures en vigueur au Québec. Plus important encore, une telle cour peut servir à la fois d'origine et de destination, offrant plus de possibilités de réduire les déplacements à vide.

Tableau 5: Effet dynamique pour chaque configuration de réseau (en \$/m³)

Triage	Pas de retours en charge Gain	Retours en charge Gain	Effet dynamique
<i>G1.1 - Pas de cour</i>	-	+ 0,12 \$	-
<i>G1.11 - Parent seulement</i>	+ 0,20 \$	+ 0,35 \$	8 %
<i>G1.3 - Site Vallières actuel</i>	+ 0,52 \$	+ 0,71 \$	13 %
<i>G1.5 - Rivière-aux-Rats seulement</i>	+ 0,56 \$	+ 0,76 \$	12 %
<i>G1.7 - Site Vallières agrandi</i>	+ 0,58 \$	+ 0,76 \$	9 %
<i>G1.13 - Vallières et Parent</i>	+ 0,58 \$	+ 0,82 \$	17 %
<i>G1.9 - Vallières et Rivière-aux-Rats</i>	+ 0,74 \$	+ 0,90 \$	4 %

On peut également constater qu'un site Vallières agrandi entraîne une augmentation des bénéfices légèrement inférieure à celle apportée par Rivière-aux-Rats (sans Vallières). Les livraisons vers Rivière-aux-Rats sont toutefois plus difficiles à combiner, car ce site est situé plus au sud. Pour les zones de récolte pouvant utiliser des camions hors normes, les distances jusqu'à Rivière-aux-Rats sont plus grandes que celles vers Vallières. Il est donc plus difficile de combiner des livraisons en camions hors normes vers Rivière-aux-Rats que vers Vallières. Cet effet est moins évident lorsque le site de Rivière-aux-Rats est le seul en exploitation que lorsqu'il est exploité conjointement avec Vallières. La raison en est que la majorité du bois transitant par Rivière-aux-Rats (sans le site de Vallières) est du bois feuillu (71%). Il a tendance à venir davantage du sud de la région, ce qui entraîne une réduction des distances moyennes de livraison. Lorsqu'une cour à Vallières est ouverte en même temps qu'à Rivière-aux-Rats, une grande partie de ce bois feuillu transite dorénavant par Vallières et la majeure partie du bois transformé à Rivière-aux-Rats est désormais composée de bois résineux (65%), provenant surtout du nord de la région.

Analyse de l'évolution des volumes transformés

L'introduction d'une cour de triage favorise systématiquement une augmentation des volumes récoltés. Les augmentations fluctuent entre 1,8% et 3,8% selon les configurations (voir tableau 6). La plus forte augmentation est constatée lorsqu'un site est ouvert à Parent ainsi qu'à Vallières. Cela signifie que l'utilisation d'une cour permet au réseau de valoriser une plus grande portion des volumes disponibles à la récolte. L'utilisation des retours en charge favorisent également des volumes plus élevés, mais dans une moindre mesure (de 0% à 2,0%). Les seules augmentations notables provoquées par une coordination du transport surviennent lorsque le site de Rivière-aux-Rats est utilisé avec le site Vallières (+2,0%) ou seul (+1,8%).

Tableau 6: Volume livré et transformé en produits finis

<i>Configuration</i>	<i>Transport</i>			
	<i>Retours à vide</i>		<i>Retours en charge</i>	
	<i>Volume (m³)</i>	<i>Différence (%)</i>	<i>Volume (m³)</i>	<i>Différence (%)</i>
<i>G1.1 - Pas de cour</i>	3 635 063	-	3 635 063	+ 0,0
<i>G1.11 - Parent seulement</i>	3 701 052	+ 1,8	3 710 444	+ 2,1
<i>G1.3 - Site Vallières actuel</i>	3 722 915	+ 2,4	3 733 132	+ 2,7
<i>G1.5 - Rivière-aux-Rats seulement</i>	3 720 701	+ 2,4	3 794 564	+ 4,4
<i>G1.7 - Vallières agrandi</i>	3 727 122	+ 2,5	3 738 358	+ 2,8
<i>G1.13 - Vallières et Parent</i>	3 774 403	+ 3,8	3 785 553	+ 4,1
<i>G1.9 - Vallières et Rivière-aux-Rats</i>	3 738 466	+ 2,8	3 801 197	+ 4,6

Modifications à un réseau forestier et impacts sur sa rentabilité

Dans cette section, nous testerons l'impact d'un certain nombre de modifications au réseau actuel, entre autres la fermeture de certaines usines.

Usines enlevées du réseau

Le groupe d'instances *G2* évalue la fermeture de l'usine de Saint-Roch (voir tableau 8). Cette usine a été choisie, car d'autres usines ont une production similaire à la sienne et pourraient donc absorber son bois en cas de fermeture. Par souci de réalisme, les attributions de l'usine de Saint-Roch furent transférées aux usines de sciage de résineux restantes. Cette redistribution fut faite proportionnellement pour chacune des UAF et selon la quantité déjà assignée aux autres usines. Pour ce groupe, les seules instances testées furent celles n'impliquant aucune cour, le site Vallières (actuel et élargi) ainsi que Rivière-aux-Rats (avec et sans le site Vallières).

Tableau 7: Instances du groupe G2

<i>Instance /Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Rivière-aux-Rats</i>	<i>Saint-Roch enlevé</i>	<i>Retours en charge</i>
G2.9			✓	
G2.10			✓	✓
G2.11	✓		✓	
G2.12	✓		✓	✓
G2.13		✓	✓	
G2.14		✓	✓	✓
G2.15	✓	✓	✓	
G2.16	✓	✓	✓	✓

Pour les instances comportant la fermeture de l'usine à Saint-Roch (G2.9 à G2.16 – tableau 7), les garanties d'approvisionnement furent redirigées aux usines de Parent et de Rivière-aux-Rats. Des augmentations de profits furent constatées (voir tableau 8) pour toutes ces instances (entre 0,20 \$ et 0,36 \$/m³). Si l'on isole ces seules instances, on constate que tous les centres logistiques proposés qui peuvent traiter du bois résineux deviennent plus profitables (de 0,11 \$ à 0,13 \$/m³). Les retours en charge deviennent également plus rentables, surtout quand aucune cour n'est opérée ou quand le site Vallières actuel (qui peut seulement traiter du bois feuillu) est utilisé (jusqu'à 0,14 \$/m³). Les deux autres usines de sciage de résineux (Parent et Rivière-aux-Rats) ont ainsi un positionnement qui facilite la combinaison de multiples livraisons. Le tableau 9 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe G2.

Tableau 8: Profits et gains pour le groupe G2 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain</i>
G2.9	2 844 992 \$	+ 0,20 \$	G2.10	4 179 541 \$	+ 0,45 \$
G2.11	5 565 786 \$	+ 0,72 \$	G2.12	7 292 919 \$	+ 1,06 \$
G2.13	6 257 961 \$	+ 0,86 \$	G2.14	7 507 060 \$	+ 1,10 \$
G2.15	7 244 656 \$	+ 1,05 \$	G2.16	8 315 282 \$	+ 1,26 \$

Tableau 9: Faits saillants des résultats du groupe G2

Exclusion de Saint-Roch	1- Réseau plus rentable pour tous les scénarios
	2- Instances avec une cour relativement plus rentable sans exception
	3- Retours en charge relativement plus intéressants

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

Dans le troisième groupe d'instances (groupe *G3*, voir tableaux 10 et 11), il fut présumé que la distance entre une cour et l'usine qui lui est associée était nulle et qu'il n'était donc plus nécessaire d'effectuer un chargement ou un déchargement de camions supplémentaires ($c_{ij}^{pl} = 0$). Dans les autres instances, on présumait une distance de 0,5 km ainsi qu'un coût supplémentaire de déchargement. On suppose que le bois entre à l'usine de la même façon que pour une cour d'usine normale. Les coûts associés font partie des coûts de production des usines. Les sites concernés sont les usines de Rivière-aux-Rats et de Parent.

Tableau 10: Instances du groupe *G3* (pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée)

<i>Instance/ Site</i>	<i>Vallières</i>	<i>Parent</i>	<i>Rivière- aux-Rats</i>	<i>Pas de chargement</i>	<i>Retours en charge</i>
<i>G3.1</i>	✓	✓		✓	
<i>G3.2</i>	✓	✓		✓	✓
<i>G3.3</i>		✓		✓	
<i>G3.4</i>		✓		✓	✓
<i>G3.5</i>			✓	✓	
<i>G3.6</i>			✓	✓	✓
<i>G3.7</i>	✓		✓	✓	
<i>G3.8</i>	✓		✓	✓	✓

Si nous examinons les résultats du groupe *G3* (tableau 11), nous constatons que les cours situées à proximité des usines de sciage de bois résineux bénéficient beaucoup plus du changement concernant les coûts de livraison à une scierie voisine que celles qui traitent du feuillu. Si on isole l'impact qu'apporte l'absence des coûts de chargement, les gains supplémentaires pour ces instances varient entre 0,30 \$/m³ (Rivière-aux-Rats seulement) et 0,47 \$/m³ (Parent avec et sans Vallières). Pour ce qui est de l'impact sur les gains obtenus grâce aux retours en charge, ceux-ci sont généralement stables. Ces gains augmentent de 0,06 \$/m³ pour l'instance *G3.2* (Parent et Vallières) pour un gain total de 1,35 \$/m³. Il s'agit de l'instance la plus profitable parmi toutes celles qui furent testées. Cela peut s'expliquer du fait que l'usine de Parent possède une plus forte capacité qui est relativement sous-exploitée en comparaison de l'usine de Rivière-aux-Rats, laquelle fonctionne au maximum de sa capacité dans toutes les instances l'impliquant. Par comparaison, dans le scénario *G1.9* (cour à Rivière-aux-Rat et au site Vallières), l'usine de Parent fonctionne à seulement 68% de sa capacité. Ce taux

augmente jusqu'à 81% dans l'instance optimale (G3.2). L'instance G3.6 (Rivière-aux-Rats et Vallières avec retours en charge) performe également très bien (1,21 \$/m³). Le tableau 12 présente les principaux faits saillants des résultats du groupe G3.

Tableau 11: Profits et gains pour le groupe G3 (en \$/m³ disponible)

<i>Transport</i>					
<i>Retours à vide</i>			<i>Retours en charge</i>		
<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain</i>	<i>Instance</i>	<i>Profit</i>	<i>Gain</i>
G3.1	7 227 841 \$	+ 1,04 \$	G3.2	8 796 583 \$	+ 1,35 \$
G3.3	5 334 127 \$	+ 0,68 \$	G3.4	6 010 127 \$	+ 0,81 \$
G3.5	7 257 789 \$	+ 1,05 \$	G3.6	8 095 484 \$	+ 1,21 \$
G3.7	6 274 613 \$	+ 0,86 \$	G3.8	7 282 710 \$	+ 1,06 \$

Tableau 12: Faits saillants des résultats du groupe G3

Pas de coût de chargement pour livrer à l'usine associée	<ol style="list-style-type: none"> 1- Amélioration du profit pour toutes les instances comportant une cour 2- Peu d'impact sur les retours en charge 3- Instance avec une cour à Parent et Vallières + retours en charge est le plus performant de toutes les instances testées dans cet article
--	---

Répartition des gains

Une question importante soulevée par la mise en place d'un centre logistique est celle de la répartition des gains que celui-ci apporte. Un certain nombre de techniques de répartition des gains sont recensées dans la littérature. Parmi celles qui pourraient être utilisées dans le cadre du projet de centre logistique, une en particulier a attiré notre attention, à savoir la contribution marginale, qui est utilisée dans plusieurs techniques comme la valeur de Shapley (Shapley, 1953) ou les coûts séparables (Tijs et Driessen 1986). Cette méthode permet de comparer le coût marginal des participants lorsqu'ils sont insérés dans une coalition. Nous avons donc mesuré la différence entre les coûts supportés par les membres d'une coalition lorsque tous les membres potentiels en font partie, et ceux où tous les membres sauf un en font partie. Le modèle utilisé optimisant les profits, c'est-à-dire la différence entre les coûts et les revenus, il devient nécessaire de réfléchir à la meilleure façon de répartir les bénéfices supplémentaires générés par l'utilisation du centre logistique. Il faut donc veiller

à définir les revenus et les coûts de chaque entité participante tout en identifiant les revenus ou les coûts qui pourraient être définis comme « non séparables ».

Pour utiliser cette technique, nous avons effectué une série d'optimisations supplémentaires pour calculer la différence de revenus que le centre logistique pourrait rapporter lorsque l'une des usines participantes est exclue de la coalition. Ainsi, une scierie exclue n'a pas le droit de recevoir du bois des deux cours de tri (Vallières et Rivière-aux-Rats). Alors que dans les scénarios précédents, le paramètre z_{ij} était toujours égal à 1, il prenait une valeur de zéro pour l'usine exclue j lors de ces nouvelles optimisations.

Si on examine la répartition des gains marginaux apportés par chacune des usines, on constate que celle spécialisée dans le feuillu située à La Tuque, soit très proche du site Vallières actuel, apporte la contribution marginale la plus importante avec un gain de 3 810 107 \$ (avec retours en charge). Cela représente 36% de la somme des contributions marginales. Les usines de pâte et de sciage feuillu (aussi à La Tuque) viennent respectivement au second et au troisième rang avec 24% et 18% des gains totaux. En quatrième place, nous retrouvons l'usine de Saint-Georges avec 13% du total. Les quatre premières usines apportent donc un gain cumulé représentant 91% de l'ensemble des gains marginaux. L'usine de pâtes et papiers à Windsor apporte une contribution représentant 4% du total, suivi de l'usine à Saint-Adelphe (3%). Les usines de Trois-Rivières, de Shawinigan et de Saint-Roch (1% ou moins chacune) ferment la marche. Les usines de Parent et de Rivière-aux-Rats n'apportent aucun gain marginal.

À cette liste, il faudrait ajouter les gains obtenus par l'utilisation des retours en charge selon les sites impliqués dans les meilleures routes. Ainsi, le site de Rivière-aux-Rats, l'usine de Parent et celle de pâtes et papiers de Trois-Rivières contribuent de façon majeure aux économies de transport par l'entremise des retours en charge (à hauteur de 57% lorsque le site Vallières et celui de Rivière-aux-Rats sont utilisés simultanément). De façon simplifiée, on peut affirmer que les usines de feuillu apportent l'essentiel des gains au niveau de l'utilisation de la cour comme telle, alors que les usines de résineux contribuent à la majeure partie des gains au niveau du transport, comme on peut le constater à la lecture du Tableau 13. Il présente les économies de transport générées par l'utilisation des retours en charge selon que du bois feuillu, résineux, ou une combinaison des types soit transporté (par exemple, une première livraison de bois feuillu suivie d'une livraison de bois résineux, ou vice versa).

Tableau 13: Économies pondérées selon les routes de livraisons

Matière transportée/ Configuration du réseau	Aucun site	Vallières	Vallières + Rivière-aux-Rats
Feuille seulement	4,3%	10,1%	7,5%
Résineux seulement	13,1%	7,2%	49,3%
Les deux	82,6%	82,7%	43,1%

Pour approfondir cette analyse, nous avons également testé l'effet sur le bénéfice total de la variation du nombre d'usines pouvant recevoir du bois de la cour. Pour ce faire, nous avons remplacé le paramètre z_{ij} par la variable x_i dans la contrainte 22, qui est devenue la contrainte 28.

$$\sum_p \sum_l \sum_t x_{ij}^{plt} \leq Mx_i \quad \forall i \in Y, j \in M \quad (28)$$

Les résultats démontrent que les quatre premières usines participantes génèrent l'essentiel des gains potentiels lorsque le site Vallières est utilisé seul (environ 96-97%). Une telle proportion est atteinte avec six usines lorsque la cour de Rivière-aux-Rats est utilisée en tandem avec celle de Vallières. Cela confirme que dans l'éventualité où la création d'une structure de gestion commune à toutes les usines de la région serait trop difficile et/ou coûteuse à gérer, il serait possible d'obtenir l'essentiel des gains avec seulement quelques-uns des acteurs potentiels. Les résultats peuvent être observés à la figure 2.

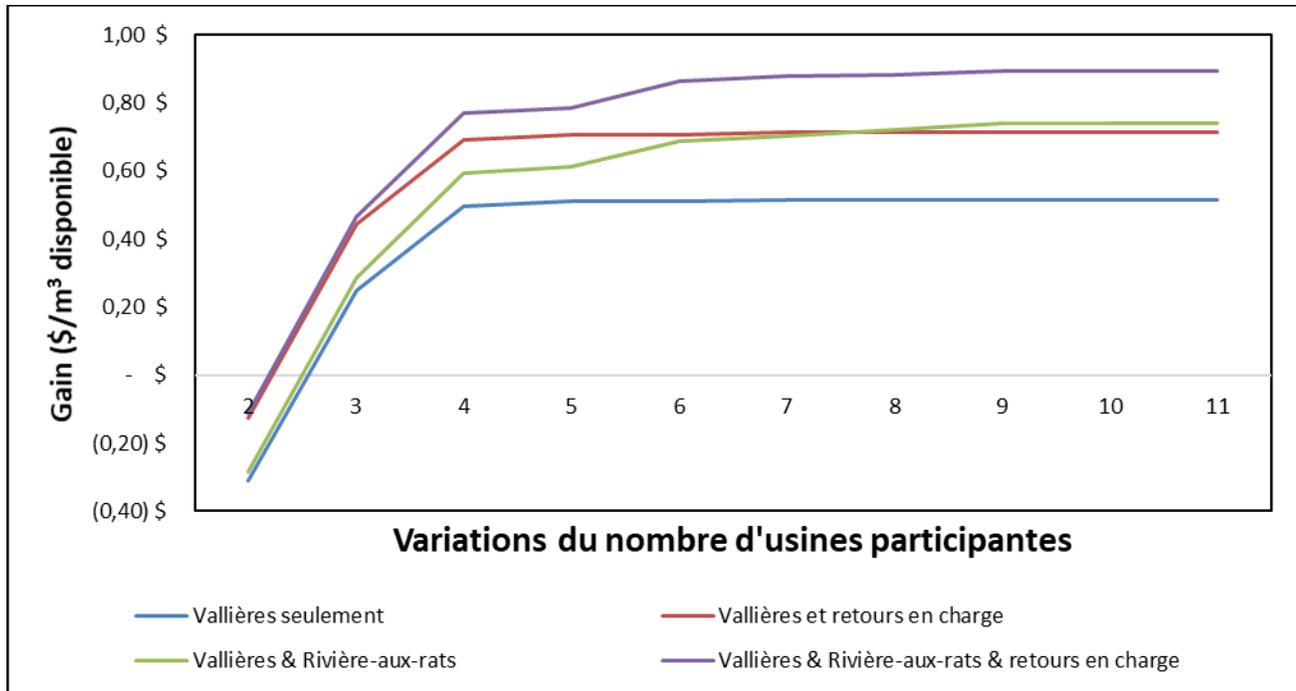


Figure 2: Impact du nombre d'usines participantes à la cour de triage sur les augmentations de profit (\$/m³ disponible)

Conclusion

Les objectifs de cet article étaient d'évaluer l'impact de la mise en place d'une cour de triage sur l'utilisation des retours en charge et d'identifier les facteurs géoéconomiques influençant la rentabilité d'un centre logistique. L'effet de ces facteurs a été testé à travers des modifications à la structure du réseau sur la profitabilité et les gains générés par le centre logistique. Le secteur forestier a souffert d'instabilité structurelle ces dernières années. Notre modèle permet d'évaluer l'impact de la fermeture d'une usine sur les avantages spécifiques et globaux du réseau. Nous avons également mesuré la contribution marginale des usines pour faciliter le partage des bénéfices et estimé le nombre idéal d'usines participantes au projet.

S'assurer que les chantiers sont situés juste à côté d'une usine (groupe G3) ajoute des améliorations substantielles aux augmentations de bénéfices associées au centre logistique régional (entre 0,30 \$ et 0,47 \$ par m³). C'est le changement le plus réaliste parmi tous ceux qui ont été testés et celui qui pourrait être le plus facilement mis en œuvre puisqu'il ne concerne que la configuration interne du chantier.

Par ailleurs, une analyse fut effectuée pour définir les usines à prioriser lors de la planification du centre logistique. Il semble que l'essentiel des gains peut être engendré avec les usines traitant du bois feuillu. Cependant, plusieurs scieries résineuses, comme Rivière-aux-Rats et Parent, ainsi que le site de Vallières ont contribué aux gains associés à l'utilisation des retours de charge. Ainsi l'essentiel des gains associés à la cour passe par les usines traitant du feuillu, alors que l'implication des usines traitant du résineux permet de chercher la part du lion dans les gains associés aux retours en charge. Quelques usines (Saint-Roch, Shawinigan et Saint-Adelphe) ont apporté une contribution très modeste et il peut être raisonnable d'exploiter le centre sans leur participation en fonction des coûts de transaction associés à leur présence.

Les cours, surtout si elles sont associées à une usine d'importance, génèrent une plus grande valeur pour le réseau. Les avantages proviennent d'une logistique plus efficace (transport hors norme et retours en charge), d'un meilleur tri et d'une plus grande proportion de la superficie forestière pouvant être exploitée de manière rentable. Cela signifie que le réseau a accès à des sources de bois marginales, celles qui étaient jugées non rentables par le réseau avant la mise en place d'une cour. En plus des augmentations de bénéfices des usines, les avantages économiques pour la société devraient être pris en compte. L'augmentation de volume apportée par le centre logistique entraîne plus de revenus de coupe pour le propriétaire foncier (principalement l'État dans notre cas d'étude), plus d'emplois et plus de revenus fiscaux. Dans notre cas particulier, cela réduit également l'écart entre les plans d'aménagement forestier et les activités opérationnelles, un problème de durabilité identifié par Paradis *et al.* (2018).

Il conviendrait d'apporter des modifications supplémentaires au réseau pour mesurer pleinement l'effet des facteurs géographiques sur la rentabilité d'un centre logistique. Par exemple, quel serait l'impact si certaines usines pouvaient être déplacées ? Quel serait l'effet d'une modification du flux de bois en appliquant de nouvelles stratégies de gestion forestière ? De plus, les interactions d'un réseau industriel régional avec ceux des régions voisines devraient être examinées. Finalement, des analyses supplémentaires sont nécessaires pour répartir les augmentations de bénéfices entre les usines participantes d'une manière juste et équitable.

4.7 Remerciements

Nous remercions le consortium de recherche FORAC et ses partenaires. Nous remercions également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) d'avoir financé cette recherche par le biais de programmes de subventions à la découverte (RGPIN / 05602-2018). De plus, nous remercions tout particulièrement François Laliberté, ing.f., M.Sc. et Francis Charette de FPInnovations. Nous remercions également l'organisation du Groupe Initiative Mauricie et ses membres, en particulier Carl Tremblay de Kruger et André Gravel de Domtar.

Bibliographie

- Alam, Md Bedarul, Chander Shahi, Reino Pulkki. (2014). Economic impact of enhanced forest inventory information and merchandizing yards in the forest product industry supply Chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.06.002>
- Beaudoin, Daniel, Luc LeBel, Jean-Marc Frayret. (2007). Tactical Supply Chain Planning in the Forest Products Industry through Optimization and Scenario-Based Analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1): 128–40.
- Ben Ali, Maha, Jonathan Gaudreault, Sophie D'Amours, Marc-André Carle. (2019). Integrating revenue management and sales and operations planning in a Make-To-Stock environment: softwood lumber case study. *INFOR*, 57(2), 314-341.
- Bureau de mise en marché des bois : <https://bmmb.gouv.qc.ca/>
(dernière consultation en mai 2018).
- Castonguay (2015), Logistique du transport, une nécessité en forêt et à l'usine. *Opérations forestières et de scierie*, jeudi le 28 mai : <https://www.operationsforestieres.ca/recolte/logistique-du-transport-une-necessite-en-foret-et-a-lusine> (dernière consultation en janvier 2019).
- Chan, Tuyva, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2008). *Locating Satellite Yards in Forestry Operations* (Rapport). CIRRELT, Montréal, Québec, 38 pages.
- Chan, Tuyva, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2009). Locating Satellite Yards in Forestry Operations. *INFOR*, 47(3), 223–234.
- Chen, Cheng, Jianbang Gan, Zhengxiong Zhang, et Rongzu Qiu. (2020). Multi-objective and multi-period optimization of a regional timber supply network with uncertainty, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol 50, 203-214.
- Chung, Woodam, Tyron J Venn, Dan Loeffler, Greg Jones, Han-Sup Han, Dave E Calkin. (2012). Assessing the Potential for Log Sort Yards to Improve Financial Viability of Forest Restoration Treatments. *Forest Science*, 58(6): 641–51.
- Clarke, G., Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581.
- Cloutier, Martin, Yves Dessureault, Riadh Azouzi, Denis Hotte, Sylvain Savard, Vincent Vallée. (2009). *Le Centre de valorisation de la fibre*, Rapport CRIQ, 326 pages.
- Constantineau, Serge, Sébastien Lacroix. (2012), Opportunités de valorisation des bois de trituration des forêts privées, *FPIInnovation*, PowerPoint Presentation : <http://www.foretprivee.ca/wp-content/uploads/2012/06/FPI-AGA-2012.pdf> (dernière consultation en août 2018).
- D'Amours, Sophie, Mikael Rönnqvist, Andres Weintraub. (2008). Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR*, 46(4): 265–81.
- Dramm, J. R., Jackson, G. L., Wong, J. (2002). *Review of Log Sort Yards*. USDA Forest Service General Technical Report, FPL-GTR-132., Forest Products Laboratory, Madison, WI, 39 pages.
- Duchesne, I, L Wilhelmsson, K Spångberg. (1997). Effects of in-Forest Sorting of Norway Spruce (*Picea Abies*) and Scots Pine (*Pinus Sylvestris*) on Wood and Fibre Properties 1. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 790–95.
- Engineering Toolbox (The) : https://www.engineeringtoolbox.com/weight-wood-d_821.html
(dernière consultation en juillet 2018).
- Epstein, Rafael, Mikael Rönnqvist, Sophie D'Amours, Andres Weintraub. (2007). Chapter 20 : Forest Transportation. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, Springer US. : 391-403

- Favreau, Jean. (1995). La production de copeaux et de billes de sciage en usines satellites dans l'est du Canada. *Institut canadien de recherches en génie forestier*, 31 pages
- FPIInnovations : http://fpsuite.ca/1_fr/fpinterface.html (dernière consultation en juin 2018).
- Frisk, Mikael, Maud Göthe-Lundgren, Kurt Jörnsten, Mikael Rönnqvist. 2010. Cost Allocation in Collaborative Forest Transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2): 448–58.
- Gagnon-Paradis, Iris. (2013). « Le secteur se réinvente, mais la relève manque à l'appel. » *La Presse*: page 7.
- Gingras, Catherine, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. (2007). Un algorithme de minimisation du transport à vide appliqué à l'industrie forestière. *INFOR*, 45(1), 41–47.
- Gil, Alvaro, Jean-Marc Frayret. (2016). Log classification in the hardwood timber industry: method and value analysis. *International Journal of Production research*, 54(15): 4669–4688.
- IBM (2019): <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer> (dernière consultation en janvier 2019).
- Keron, Robert. S. (2012). *Integrating a tactical harvest - scheduling model with a log short-yard location model*. Mémoire de M.Sc., Lakehead University, Thunder bay, Ontario, 69 pages.
- Kong, Jiehong, Mikael Rönnqvist, Mikael Frisk. (2012). Modeling an Integrated Market for Sawlogs , Pulpwood , and Forest Bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(2): 315–32.
- Lehoux, Nadia, Philippe Marier, Sophie D'Amours, Denis Ouellet, Jean Beaulieu. (2012). *Le réseau de création de valeur de la fibre de bois canadienne*, Rapport CIRRELT, 228 pages.
- Lemieux, René. (2014). Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État. *Bureau de mise en marché des bois*, Québec, Québec, 133 pages.
- Marowits, Ross. (20 mai 2010). Kruger supprimera 440 postes à Trois-Rivières. *La Tribune*, Sherbrooke, Québec, p. 27.
- Michaelsen, Jan, Emmanuel Tran. (2008). Analyse du flux de bois pour la scierie St-Roch de Kruger avec l'utilisation de parc de transfert et de camion hors normes, *FPIInnovations Feric*, Pointe-Claire, Québec, Rapport de contrat (confidentiel) RC-0387-1, 68 pages.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, (2016) : Enquête 2013-2014 sur les coûts d'opération et les revenus liés au bois d'œuvre, Mars 2016, Groupe DDM, Québec, Québec, 95 pages : https://bmb.gouv.qc.ca/media/34825/enquete_quinquennale_2014_rapp_final_volets_i_et_ii_2016-03-18.pdf
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, (2009), *Manuel de foresterie*, Québec, Multimondes, 1574 pages.
- Paradis, Gregory, Mathieu Bouchard, Luc LeBel, Sophie D'Amours, (2018), A bi-level model formulation for the distributed wood supply planning problem, *Canadian Journal of Forest Research*, 48(2), 160-171.
- Partenariat Innovation-Forêt, (2015). Tests de conditionnement de la biomasse, Québec, Québec : http://partenariat.qc.ca/wp-content/uploads/2015/12/OT-221_entreposage_sechage_biomasse.pdf (Retrieved July 2018).
- Radio-Canada, 2004, La Commission Coulombe donne raison à l'erreur boréale : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/218335/rapport-coulombe>
- Ressources naturelles Canada (2016) : <http://www.nrcan.gc.ca/forests> (dernière consultation en octobre 2018).
- Ressources naturelles Canada (2018) : L'état des forêts au Canada – Rapport annuel 2018, <http://cfs.nrcan.gc.ca/entrepotpubl/pdfs/39337.pdf> (dernière consultation en décembre 2018).
- Sarrazin, François. (2019). Intégration d'un centre logistique au sein d'un réseau d'entreprises forestières – Impact et analyse. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec, 160 pages.

- Sarrazin, François, Luc LeBel, Nadia Lehoux. (2019). Analyzing the Impact of Implementing a Logistics Center for a Complex Forest Network. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(2), 179-189.
- Sessions, John, Kevin Boston, Roger Stewart. (2005). Log sorting location decisions under uncertainty. *Forest Products Journal*, 55(12), 53–57.
- Shahi, Shashi, Reino Pulkki. (2015). A simulation-based optimization approach to integrated inventory management of a sawlog supply chain with demand uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(May), 1313–1326. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0373>
- Shapley, Loyd S. (1953). A Value for N-Person Games. *Annals of Mathematics Studies* 28: 307–17.
- Stuart, William B. (2003). Checking Our Foundations : Matthews' Least Cost Models Revisited. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(1): 30–35.
- Stuart, William B., Laura A. Grace, Robert K. Grala. (2010). Returns to Scale in the Eastern United States Logging Industry. *Forest Policy and Economics*, 12(6): 451–56.
- Tijs, S.H., T.S.H., Driessen, (1986). Game theory and cost allocation problems. *Management Science* 32(8), 1015–1028.
- Ville de La Tuque : <http://www.ville.latuque.qc.ca/fr/affaires/parcs-industriels/> (dernière consultation en septembre 2017).