

Localisation et pilotage d'un centre logistique forestier régional

François SARRAZIN, Luc LEBEL et
Nadia LEHOUX¹

¹ UNIVERSITÉ LAVAL
Québec (QC), Canada
francois.sarrazin@forac.ulaval.ca
luc.lebel@sbf.ulaval.ca
nadia.lehoux@cirrelt.ca

Résumé – Les défis auxquels fait face l'industrie forestière forcent celle-ci à revoir en profondeur ses pratiques d'affaires, notamment au niveau de ses opérations de triage et de transport. Notre projet consiste ainsi à développer et à tester un modèle de localisation et de pilotage d'un centre logistique régional comprenant une cour dédiée au triage ainsi qu'une coordination du transport. Une analyse de sensibilité est par la suite effectuée sur quatre paramètres. Les résultats démontrent que l'augmentation du coût du carburant rend profitable l'utilisation d'un tel centre.

Abstract – The challenges which the forest industry is facing are forcing it to revise its business practices, in particular its sorting and transportation operations. Our project aims to develop and test a profit maximisation model to identify the conditions for the success of a forestry regional logistical center comprising a sorting yard and transportation coordination. A sensitivity analysis was conducted on four parameters and the rise of cost fuel was identified as the factor that made the use of the projected center the most profitable with the data used.

Mots clés – Design de réseaux logistiques, transport, cours de triage, industrie forestière, optimisation.

Keywords – Logistic, transportation, optimization, sorting, forestry.

1 INTRODUCTION

L'industrie forestière représente une importante partie de l'activité économique québécoise, en générant des retombées annuelles d'environ 16 milliards de dollars (<http://www.cifq.com>). Les préoccupations croissantes concernant les questions écologiques mettent toutefois une pression de plus en plus grande sur ce secteur afin qu'il revise ses pratiques, notamment au niveau de l'optimisation de ses opérations de transport. Dans cette lignée, la littérature scientifique démontre que la mutualisation du transport s'avère profitable à la fois d'un point de vue économique et environnemental (Epstein *et al.*, 2007), en permettant une meilleure utilisation de la capacité tout en évitant les retours à vide. Plusieurs auteurs ont toutefois souligné qu'elle peut s'avérer fort complexe à déployer (Frisk *et al.*, 2010).

La transition de systèmes de production en flux poussés vers des systèmes en flux tirés se veut par ailleurs un moyen de mieux tirer profit de la ressource forestière. À cet égard, la création de cours de triage et de consolidation, distinctes des sites en forêt et aux usines, offre de multiples opportunités de maximisation de la valeur et de minimisation des coûts tout en représentant un défi important quant à leur insertion dans le réseau logistique déjà en place. Un tel centre permet entre autres de procéder à un triage exhaustif de la matière de façon

à réduire les erreurs de triage et les livraisons de la matière entre les usines qui en découlent. On peut également y consolider certains produits et y constituer des stocks tampons pour mieux faire face à certains phénomènes de variabilité comme le dégel du printemps, les variations de la demande ou celles des capacités de récolte à travers le temps.

De telles installations ne sont cependant pas toujours utilisées par les entreprises forestières. Cela pose ainsi la question de connaître dans quelles circonstances un tel centre serait profitable et quels avantages spécifiques il représenterait au niveau du contrôle des coûts et de la création de valeur pour les entités participantes. Nous posons donc l'hypothèse que certains facteurs, notamment au niveau des coûts et du réseau géographique, permettraient au centre de créer des économies de coûts, notamment en transport. De tels facteurs peuvent toutefois s'avérer fort complexes. Par exemple, plus la diversité de la matière première est grande, plus il sera intéressant de procéder à un triage exhaustif de la ressource, alors que si elle est très faible, il ne sera alors plus économique d'effectuer un tel tri. Il en est de même pour les coûts de manutention. Plus ils sont élevés, moins le triage sera rentable et vice versa. Ainsi, il existe une « frontière » où, selon le degré d'importance de ces deux facteurs, il deviendra rentable ou non d'utiliser une cour de triage.

Dans cet article, nous proposons donc un modèle de localisation et de pilotage d'un centre logistique qui permette de choisir les meilleurs endroits pour procéder au tirage de la ressource et les niveaux d'activités à y exécuter, tout en mettant en relief un ensemble de paramètres à prendre en compte afin d'assurer une localisation profitable du site. Un tel outil peut s'avérer très utile aux entreprises forestières canadiennes, dans la mesure où leurs coûts de transport représentent au-delà de 30% de leurs coûts d'opérations forestières (El Hachemi *et al.*, 2013) en raison de l'éloignement des ressources. D'un point de vue académique, le travail propose une modélisation complexe qui tient compte à la fois des opérations de récolte, du transport, du stockage, de la transformation du bois aux usines, des opérations de triage et de la perte de valeur due au vieillissement de la matière. Nous avons constaté qu'un tel modèle de localisation et de pilotage d'un centre de triage de la ressource forestière demeure très peu étudié dans la littérature, alors qu'il s'avère une avenue durable pour soutenir l'industrie dans son changement de pratiques.

Cet article sera divisé de la façon suivante : nous allons dans un premier temps examiner l'état de la question dans la littérature portant sur les opérations logistiques ainsi que la modélisation dans le domaine forestier. Par la suite, nous décrirons la méthodologie utilisée avant de présenter le modèle d'optimisation mathématique que nous avons développé ainsi que les résultats d'une optimisation effectuée à l'aide de données générées avant de conclure.

2 LOGISTIQUE FORESTIÈRE DANS LA LITTÉRATURE

Le réseau de création de valeur du bois inclut, selon Lehoux *et al.* (2011), toutes les entreprises ou unités d'affaires impliquées dans l'approvisionnement, la production et la transformation d'un produit du bois. La chaîne de valeur du bois est traditionnellement bâtie sur un mode en flux poussés (D'Amours *et al.*, 2010), du fait qu'elle dépend d'une ressource naturelle, ce qui implique un élément d'incertitude de l'offre.

Pour Lehoux *et al.* (2011), le classement des billes est très important au sein d'une telle chaîne et chaque classe de bille est associée à certains paniers de produits. La multiplicité des processus « many-to-many » dans le domaine forestier rend ainsi, selon D'Amours *et al.* (2008), leur intégration plus complexe du fait des nombreux arbitrages entre la production, le niveau de service et les coûts logistiques comme le transport ou l'entreposage, sans compter la compétition entre les trois secteurs de la chaîne pour l'accès à la ressource (Kong *et al.*, 2012), soient les pâtes et papiers, le sciage et la bioénergie.

Généralement, les opérations de récolte comportent les étapes suivantes : 1- Les arbres sont coupés et les branches sont enlevées, 2- le tronc est coupé en billes qui sont placées sur le bord de la route, 3- le bois est transporté aux usines ou dans des cours pour y être entreposé temporairement (D'Amours *et al.*, 2008). On procédera également parfois à un triage plus ou moins sommaire et même à un certain degré de « *merchandising* » en forêt. Le manque d'espace limite cependant les possibilités à cet égard et engendre des coûts plus importants que lorsque ces opérations sont effectuées à une cour. Il peut donc arriver que les entreprises utilisent une cour spécifiquement dédiée au triage et au « *merchandising* » (Han *et al.*, 2011).

Au niveau de l'entreposage, la gestion des stocks forestiers peut coûter entre 20% et 40% de la valeur des produits (Lehoux *et al.*, 2011). Le bois une fois coupé est placé en bord de route en

forêt, avant d'être (parfois) trié et/ou traité et envoyé aux usines (Lehoux *et al.*, 2011). Les usines possèdent également des cours où peuvent être effectuées ces opérations. Comme pour toute problématique de stockage, on doit effectuer un arbitrage entre les coûts de stockage et les risques de pénurie (Chan *et al.*, 2009). Le vieillissement du bois, surtout durant l'été à cause de la chaleur, provoque une perte d'humidité (Beaudoin *et al.*, 2007). Ainsi, du bois trop vieux sera taché et perdra une grande partie de sa valeur (*Ibid.*). Cependant, ce même phénomène fait perdre du poids au bois (Wengert, 2006) et permet ainsi de réduire les coûts de transport.

Les retours en charge, où plusieurs livraisons sont combinées ensemble dans seule et même une route, ont permis dans le passé des économies de coûts allant de 2% à 20% (Epstein *et al.*, 2007). Une difficulté avec les modèles mathématiques permettant les retours en charge est toutefois la multiplication du nombre de solutions possibles amenant certains auteurs à privilégier l'approche de génération de colonnes pour les résoudre (*Ibid.*).

Nous retenons la description de Lehoux *et al.* (2011), pour qui le triage est opéré selon trois axes : 1- par essence, 2- par taille et, 3- par qualité de la bille. Pour Duchesne *et al.* (1997) cependant, le troisième critère utilisé concerne plutôt le type de bille (milieu et bas du tronc vs haut du tronc). Ainsi, la partie la plus basse des arbres a un plus grand diamètre et donc une plus grande valeur et est envoyée aux scieries (D'Amours *et al.*, 2008). La partie la plus haute est pour sa part dédiée aux pâtes et papiers (*Ibid.*). Dramm *et al.* (2002) définissent cinq alternatives de base quant au triage : 1- utiliser une cour de triage, 2- trier en forêt, 3- effectuer un pré triage, 4- trier à la cour de l'usine et 5- ne pas trier.

Si on examine les avantages des alternatives à l'utilisation de cours de triage, le triage en forêt est justifié lorsqu'il y a peu d'intrants différents à traiter ainsi que lorsqu'une grande proportion de billes de haute valeur sont récoltées. Avec le pré triage en forêt, on se contente d'extraire les principales espèces. Cela permet de réduire la manutention aux cours et aux usines. Les faibles volumes de billes de grande valeur ont tendance à être triés aux cours d'usines, car ils ne peuvent justifier la création d'une cour de triage à eux seuls. Finalement, l'absence de triage est une option viable lorsqu'il n'y a qu'un seul marché pour les billes ou une faible diversité de celles-ci (Dramm *et al.*, 2002).

L'intérêt pour les cours de triage a augmenté au cours des dernières années avec le déclin (quantitatif et qualitatif) de la ressource forestière et le besoin de recouvrer la valeur potentielle de celle-ci (Dramm *et al.*, 2002). Il est ainsi généralement reconnu que les cours dédiés au triage permettent d'examiner de plus près les caractéristiques des billes pour les envoyer à leur destination la plus profitable. Cela permet de faire diminuer les erreurs commises dans le classement des billes (Sessions *et al.*, 2005) et donc les coûts de transport en évitant de livrer plusieurs fois le même lot (Chung *et al.*, 2012). Outre cet aspect, les effets produits par la présence d'une telle cour sont complexes. Tout dépendant de leur localisation, elles peuvent en effet permettre d'utiliser des camions possédant une plus forte capacité et qui ne peuvent circuler que sur des routes privées (Chan *et al.* 2009). Les cours entraînent cependant des coûts de manutention (Dramm *et al.*, 2002) et du transport supplémentaire du fait qu'il n'y a plus de livraisons directes des forêts aux usines pour une partie de la matière, sans oublier les coûts associés à la mise en place du

site (Sessions *et al.*, 2005).

La planification de la chaîne forestière implique un horizon temporel très vaste et la considération de la demande industrielle et des besoins sociétaux. L'allocation des zones de récolte aux utilisateurs et leur planification (Lehoux *et al.*, 2011) sont parmi les décisions les plus importantes qui peuvent être prises au niveau de la gestion des forêts. Sur un horizon de plusieurs années, la planification du transport peut être intégrée avec la gestion des forêts ainsi que la récolte (Epstein *et al.*, 2007). Une des particularités de l'industrie forestière est le caractère saisonnier des opérations de récolte, souvent concentrées en hiver, lequel rend nécessaire la planification avancée (Lehoux *et al.* 2011).

Au niveau des opérations forestières, plusieurs déplorent que leur planification soit encore aujourd'hui effectuée manuellement (Beaudoin *et al.* 2007) et ne tiennent pas compte des contraintes des entreprises (Lehoux *et al.* 2011). Selon Stuart (2003), les modèles d'optimisation, que ce soit en foresterie ou ailleurs, se concentrent trop souvent sur la minimisation des coûts et offrent ainsi une vision tronquée du réseau étudié en n'intégrant pas les revenus.

Pour ce qui est des modèles d'évaluation de la rentabilité des cours de triage et de « *merchandising* », nous constatons qu'ils se concentrent sur une partie seulement des aspects pertinents. Par exemple, aucun n'intègre simultanément les coûts de transport, de triage et de stockage, alors que le « *merchandising* » n'est mentionné dans les modèles qu'en rapport avec la transformation en copeaux (Kong *et al.*, 2012 et Chan *et al.*, 2009). De plus, la majorité des contributions retracées ne procèdent pas à une véritable analyse de sensibilité ou le font dans le cadre d'un réseau logistique spécifique (Chan *et al.*, 2009, Kong *et al.*, 2012). Seuls trois modèles recensés furent construits sous forme de programmes linéaires en nombres entiers mixtes. Le seul modèle de sélection de sites recensés est celui de (Chan *et al.*, 2009) qui traite d'une cour de transformation en copeaux permettant de diminuer de 6,8% l'ensemble des coûts du réseau étudié. Beaudoin *et al.* (2007) ont développé pour leur part un modèle couvrant les opérations entre les blocs de récolte et les usines, mais sans cour de triage ni coordination du transport. Finalement, Carlgren *et al.* (2006) présentent un modèle de minimisation des coûts de transport avec possibilités de retours en charge et où les variables binaires expriment la stratégie de triage retenu.

La littérature tend à suggérer que le recours à un centre de triage et de consolidation pourrait s'avérer un moyen d'améliorer l'agilité de la chaîne du bois tout en facilitant les échanges de bois et la mise en commun de stocks entre compétiteurs. Également, il semble pertinent de mieux lier planification des opérations en forêt, transport et production aux usines. La possibilité plus grande de commettre une erreur dans le tri d'une bille lorsque le triage est effectué en forêt milite aussi pour la centralisation de ce type d'opération. La présence d'un tel centre permettrait finalement de profiter davantage du phénomène des retours en charge.

3 MÉTHODOLOGIE

Dans le but d'identifier les facteurs et paramètres ayant le plus d'impact quant à la rentabilité d'un tel centre pour une région forestière donnée, nous avons donc conçu un modèle d'optimisation mathématique qui permette de localiser puis d'utiliser une cour de triage au sein d'une chaîne de valeur multi usines. Pour solutionner ce modèle, nous avons utilisé

une première série de données générées à partir de données recensées dans des rapports de recherche (notamment de la firme de recherche *FPIInnovations*). Ce modèle de maximisation des profits permet de mesurer les revenus générés par un réseau spécifique ainsi que ses différents coûts d'exploitation. Le modèle est résolu en deux temps. Dans une première phase, nous considérons un horizon plus stratégique où l'on détermine les quantités récoltées, les paires origine-destination possibles au niveau du transport et l'identité du site sélectionné pour accueillir la cour de triage. Dans un deuxième temps, nous supposons une planification plus tactique où on décide des quantités traitées par processus de triage et par site ainsi que des quantités vendues pour les produits finis. Les variables dont les valeurs sont fixées durant la phase stratégique deviennent des paramètres à la phase suivante. La phase stratégique est résolue à l'optimum et la phase tactique en deçà de 0,1% de l'optimum.

Les variables concernant les quantités livrées par paire origine-destination devaient à l'origine être exprimées en nombres entiers. Cette contrainte fut relaxée dans la partie stratégique du modèle lorsque celui-ci fut scindé en deux parties. Nous présentons l'écriture mathématique de la partie stratégique du modèle dans le texte ainsi que la partie tactique du modèle en annexe. Il existe essentiellement trois différences entre les deux versions du modèle : 1- les variables relatives aux quantités transportées sont en nombres continus dans la version stratégique et en nombres entiers dans la version tactique; 2- On ajoute l'indice de l'âge de la fibre dans la version tactique; 3- Les variables relatives aux quantités récoltées par site et par période ainsi que l'identité du site sélectionné pour accueillir la cour de triage deviennent des constantes dans le modèle tactique.

Une fois le modèle élaboré et validé, nous avons testé quatre scénarios de base, et ce sur deux axes, soit la présence ou non d'un centre de triage et la possibilité ou pas de retours en charge au niveau du transport. Nous avons pu mettre en relief les gains qu'apporte l'une et l'autre de ces options ou encore leur combinaison. Après avoir obtenu des résultats dans une première instance, trois autres instances ont été testées. Nous avons ainsi fait varier l'espace de stockage aux usines, les coûts de carburant et le niveau des redevances versées à l'état pour les droits de coupe. Une analyse de sensibilité sur ces trois paramètres a ainsi été effectuée pour identifier ceux qui avaient le plus d'impact sur la rentabilité du centre logistique proposé.

La matière en forêt, après avoir été récoltée, triée (possiblement) et entreposée en bord de route, est transportée à l'usine qui est le premier preneur de celle-ci. Un triage plus exhaustif pourra y être effectué et la matière sera alors transformée en produits finis devant être vendus aux clients finaux. Les coproduits (généralement les copeaux et les granules) issus des processus de transformation de l'usine sont par la suite expédiés aux clients ou à d'autres usines, généralement de pâtes et papiers. Au milieu du réseau se trouvent les sites pouvant éventuellement servir de cour de triage. Le bois pourra alors être livré des forêts vers la cour pour y être trié et entreposé de façon plus rigoureuse qu'en forêt, avant d'être livré au bon utilisateur de façon à réduire les livraisons entre usines. On peut examiner la représentation de la partie du réseau forestier qui est optimisé par notre modèle à la figure 1.

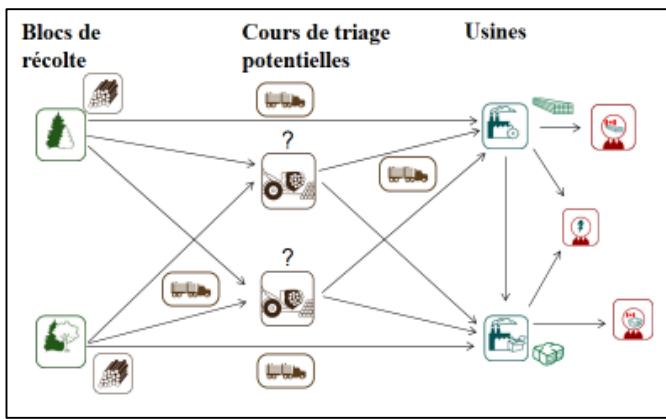


Figure 1 : Réseau logistique forestier

La section suivante décrit en détail le modèle développé.

4 MODÈLE MATHÉMATIQUE

Le modèle de localisation et de pilotage d'un centre de triage entre les sites de récolte en forêt et les usines de première transformation est ici proposé. Ce modèle étant divisé en une partie stratégique et une partie tactique (voir la section précédente pour plus de détails), seule l'écriture mathématique du modèle stratégique est présentée ici. Le modèle tactique est toutefois disponible en annexe. Cette première partie stratégique permet de déterminer le niveau de récolte par bloc en forêt et par période, l'identité des paires origines-destination utilisées pour construire les routes de livraison et l'identité du site sélectionné pour accueillir une cour de triage. La seconde partie dite tactique décide pour sa part des quantités triées, transformées et vendues par site, par produit et par période.

C'est aussi la partie tactique du modèle qui permet de mesurer les gains apportés par une coordination du transport. Nous posons comme hypothèse que le transport est effectué en charges pleines. La façon dont nous construisons les routes de livraison est la suivante : à partir des résultats de la phase stratégique, seules les paires origine-destination ayant été utilisées au moins une fois sont utilisées pour générer des routes de livraison qui seront soumises au solveur pour la résolution de la phase tactique. Pour chaque paire origine-destination, une combinaison optimale avec un des terminaux de véhicules disponibles (les sites d'où partent les véhicules au début et vers où ils retournent à la fin de leur quart de travail) est définie de façon à créer des routes comportant une seule livraison. Ces routes sont alors combinées à l'une et l'autre des paires origine-destination disponibles et pour chaque paire, les meilleures combinaisons sont sélectionnées pour constituer les routes à deux livraisons qui seront soumises au solveur. La procédure se poursuit ainsi jusqu'à ce que des routes de huit livraisons aient été construites, car au-delà, il devient presque impossible de respecter la limite de temps de 14 heures de travail fixée par la loi.

On peut examiner cette procédure avec la figure 2. La route originale 23 est jumelée à l'un et l'autre des segments possibles (les paires origines-destination). La combinaison de la route 23 et du segment numéro 2 apporte un des meilleurs gains possible pour ce segment et est donc sélectionnée pour devenir la route 45. Quand vient le temps de construire des routes à trois livraisons, cette route est elle-même jumelée aux différents segments. De nouveau, on sélectionne pour chaque segment les meilleures combinaisons au niveau des gains quant aux distances et au temps de parcours. La combinaison de la route

45 et du segment numéro 3 devient ainsi la route 76.

Index	Route originale	Segment ajouté	Gain moyen	Sélection
45	23	2	25%	Oui
X	24	2	10%	Non

Index	Route originale	Segment ajouté	Gain moyen	Sélection
76	45	3	19%	Oui
X	46	3	14%	Non

Figure 2 : Génération de routes

Les ensembles, indices, paramètres et variables utilisés à l'intérieur du modèle sont les suivants :

Ensembles :

- A : Ensemble des âges possibles.
- B : Ensemble des bases de véhicules.
- F : Ensemble des blocs de récolte en forêt.
- Y : Ensemble des sites potentiels pour des cours de triage.
- M : Ensemble des usines de sciage, de pâtes et papiers ou d'énergie.
- U : Ensemble des clients.
- N^+ : Ensemble des nœuds du réseau incluant les bases, tel que $N^+ = B \cup F \cup Y \cup M$.
- O : Ensemble des origines du réseau, tel que $O = F \cup Y \cup M$.
- D : Ensemble des destinations du réseau, tel que $D = Y \cup M$.
- L_0 : Ensemble des périodes de temps de l'horizon de planification.
- L : Ensemble des périodes de temps de l'horizon de planification à partir de la période $l = 1$.
- G : Ensemble des essences différentes.
- P : Ensemble des produits entrants dans, ou sortants d'un processus de transformation tel que $P = MP \cup PEC \cup PDV$.
- PE : Ensemble des produits entrants dans un processus de transformation tel que $PE = MP \cup PEC$.
- PS : Ensemble des produits entrants dans, ou sortants d'un processus de transformation tel que $PS = PEC \cup PDV$.
- MP : Ensemble des essences et des tailles de billes récoltées.
- PEC : Ensemble des produits ayant déjà subi un premier traitement, entrants à l'intérieur ou sortants d'un processus de transformation.
- PDV : Ensemble des produits finis du bois, sortants du processus de transformation et disponibles à la vente.
- S : Ensemble des processus de transformation (trilage et transformation).
- T : Ensemble des modes de transport. Il peut s'agir ici de différents modèles de camion avec ou sans remorque, mais aussi du train.

Indices :

- f : Bloc de récolte en forêt.
- y : Site potentiel d'une cour de triage.
- m : Usine de sciage, de pâtes et papiers ou d'énergie.
- u : Point de demande.
- i : Site.
- l : Période de temps.

l^{\max} : Dernière période de temps.

p : Produit entrant dans, ou sortant du processus de transformation.

s : Processus de transformation.

t : Mode de transport.

Paramètres :

g^{sp} : Facteur de transformation exprimant la quantité de produits p obtenue à partir d'une unité de l'assortiment ou du produit p dans le processus de transformation s . Paramètre défini pour tout $p \in MP \cup PEC$ et $p' \in P$. La proportion d'extrants classés dans la catégorie des sous-produits ou des rejets sera plus élevé si l'intrant du processus de transformation est un assortiment de produits n'ayant pas été traité au préalable (ou ayant été traité à travers un processus moins rigoureux).

d_u^{pl} : Quantité du produit p demandée au point de demande u durant la période l .

H_f^{+pl} : Capacité maximale de récolte du produit p au site en forêt f et durant la période l .

H^l : Capacité maximale de récolte sur l'ensemble du réseau durant la période l .

c_f^{pl} : Coût de récolte du produit p au site en forêt f et durant la période l (en $\$/m^3$).

c_{ij}^{plt} : Coût de transport variable entre deux nœuds du réseau (i et j) pour l'assortiment ou le produit p , durant la période l et avec le mode de transport t (en dollars par mètres cubes).

c_{ij}^t : Coût de transport fixe entre deux nœuds du réseau (i et j) et avec le mode de transport t .

c_i^{sp} : Coût d'utilisation du processus de triage s pour le produit p au site i en dollars par tonne métrique.

c_y : Coût fixe d'opérer la cour de triage y pour l'ensemble de l'horizon de planification, indépendamment du niveau d'utilisation.

c_y^s : Coût d'installation d'un processus de production du processus de transformation s à la cour de triage y au début de l'horizon de planification.

c_f^+ : Coût fixe d'ouverture du site de récolte f pour une période donnée lorsque celui-ci n'a pas été en opération durant la période précédente.

c_i^p : Coût de stockage du produit p pour une période donnée au site i .

$Essence^p$: Essence du produit $p \in PR$.

$Rang^p$: Rang du produit $p \in PR$.

Q_f^p : Quantité du produit $p \in PR$ dans la forêt f . Devient un paramètre dans la phase tactique.

Q^s : Capacité par période et en mètres cubes du processus de transformation s pour une cour de triage.

Q_i^{st} : Capacité par période l et en mètres cubes du processus de transformation s à un site en forêt ou à une usine i . Pour tout

$i \in F \cup M$.

Q_f : Capacité de récolte pour l'horizon de planification et en mètres cubes pour la forêt f .

Q^t : Limite de poids transporté par la flotte du mode de transport t durant la période l .

Q_{ij}^t : Limite de poids pour une livraison avec le mode de transport t entre les sites i et j et durant la période l .

E^t : Capacité volumique, ou limite d'espace d'un véhicule du mode de transport t pour une période donnée.

E_i : Capacité volumique, ou limite d'espace de stockage au site i pour une période donnée.

β^t : Temps maximal sur la route qu'un véhicule de type t peut effectuer dans une semaine.

\bar{U}^t : Taille maximale de la flotte des véhicules de type t .

\max_y : Quantité maximale en mètres cubes que le site y peut traiter durant une période donnée.

V^p : Valeur de vente ou prix de cession interne du produit p . Exprimé en dollars par mètres cubes.

\bar{w}_i^p : Stock de sécurité pour le site i du produit p .

θ : Très grand chiffre.

$Temps_{ij}$: Nombre d'heures requises pour franchir la distance entre le site i et j .

ψ_{ij}^{pl} : Quantité en tonnes métriques du produit p transportée durant la période l pour une livraison avec le mode de transport t entre les sites i et j .

γ : Nombre de cours sélectionnées.

Variables :

n_y^s : Nombre de processus de transformation de type s installés à la cour de triage y au début de l'horizon de planification. Variable exprimée en nombres entiers. Devient un paramètre dans le modèle tactique.

z_y : Variable binaire exprimant l'utilisation du site y comme cour de triage durant l'ensemble de l'horizon de planification. Devient un paramètre dans le modèle tactique.

h_f^{+l} : Variable binaire exprimant l'exploitation ou non du bloc en forêt f durant la période l lorsqu'il était fermé à la période précédente. Devient un paramètre dans le modèle tactique.

h_f^{-l} : Fermeture du bloc de récolte f à la période l lorsqu'il était ouvert à la période précédente. Devient un paramètre dans le modèle tactique.

x_f^{pl} : Quantité du produit p récoltée au bloc de récolte f durant la période l . Devient un paramètre dans le modèle tactique.

x_{fm}^p : Quantité du produit p récoltée au site en forêt f et livrée à l'usine m .

x_{ij}^{plt} : Nombre de livraisons du produit p transportés du site i au site j durant la période l et avec le mode de transport t .

x_{iu}^{pl} : Quantité du produit p vendue par le site i au client u

durant la période l .

x_r^{rl} : Nombre de fois que la route r est effectuée durant la période l avec le mode de transport t .

x_i^{spl} : Quantité du produit p traitée par le processus de transformation s au site i durant la période l .

Invariants :

h_f^l : Invariant binaire exprimant l'exploitation ou non du bloc en forêt f durant la période l .

I_i^{pl} : Stock du produit p entreposé au site i durant la période l .

\mathfrak{S}_i^{spl} : Processus de production s du produit p à la période l et au site i .

Récolte $_f$: Niveau (en pourcentage) des récoltes pour la forêt f .

Deviens un paramètre dans la phase tactique.

Le modèle stratégique maximise les profits du réseau, soit les revenus moins la somme de coûts pertinents.

Modèle stratégique

Fonction objectif :

Maximiser:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_u \sum_{p \in PDV} \sum_l \sum_t V^p x_{iu}^{pl} - \sum_f \sum_{p \in MP} \sum_l \sum_t c_f^p x_f^{pl} - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_i c_i^{spl} x_i^{spl} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_t c_{ij}^{pl} x_{ij}^{pl} - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t c_{ij}^a x_{ij}^{pl} - \sum_f \sum_l \sum_t c_f^+ h_f^{+l} \\ & - \sum_y \sum_l c_y z_y - \sum_s \sum_y c_y^s n_y^s - \sum_i \sum_p \sum_l c_i^p I_i^{pl} - \sum_p \sum_f \sum_m c_f^p x_{fm}^p \end{aligned} \quad (1)$$

La fonction objectif du modèle (1) maximise ainsi les profits du réseau soit la somme des revenus des produits finis moins la somme des coûts de récolte, de triage et de transformation, de transport, de gestion des sites de récolte en forêt, de sélection de la cour de triage et des équipements nécessaires aux opérations et au stockage. Mentionnons que le modèle ne tient pas compte des coûts fixes des usines dans la mesure où ils n'influencent pas les décisions à prendre pour optimiser le réseau.

Une série de contraintes a de plus été ajoutée pour assurer la cohérence et le réalisme de l'ensemble des décisions prises, que ce soit le respect des contraintes des différents processus ou la conservation des flux aux nœuds du réseau.

Contraintes :

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

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

$$\sum_f \sum_p x_f^{pl} \leq Q_l \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_p I_i^{pl} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L \quad (5)$$

$$I_f^{pl} = I_f^{pl-1} + x_f^{pl} - \sum_{t, j | j \neq f} x_{jf}^{pl} \psi_{jf}^{pl} - \sum_s x_f^{spl} \quad \forall f \in F, p \in MP, l \in L \quad (6)$$

$$I_f^{pl} = I_f^{pl-1} + \sum_s \mathfrak{S}_f^{spl} - \sum_{t, j | j \neq f} x_{jf}^{pl} \psi_{jf}^{pl} - \sum_s x_f^{spl} \quad \forall f \in F, p \in PEC, l \in L \quad (7)$$

$$I_f^{pl} = I_f^{pl-1} + \sum_s \mathfrak{S}_f^{spl} - \sum_u x_{fu}^{pl} \quad \forall f \in F, p \in PDV, l \in L \quad (8)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_{t, j | j \neq i} x_{ji}^{pl} \psi_{ji}^{pl} - \sum_{t, j | j \neq i} x_{ij}^{pl} \psi_{ij}^{pl} - \sum_s x_i^{spl} \quad \forall i \in Y \cup M, p \in MP, l \in L \quad (9)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_{t, j | j \neq i} x_{ji}^{pl} \psi_{ji}^{pl} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} - \sum_{t, j | j \neq i} x_{ij}^{pl} \psi_{ij}^{pl} - \sum_s x_i^{spl} \quad \forall i \in Y \cup M, p \in PEC, l \in L \quad (10)$$

$$I_i^{pl} = I_i^{pl-1} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spl} - \sum_u x_{iu}^{pl} \quad \forall i \in Y \cup M, p \in PDV, l \in L \quad (11)$$

$$I_i^{pl} \geq \sigma_i^p \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L | l > 1 \quad (12)$$

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

$$\sum_s \sum_p x_y^{spl} \leq \max_y z_y \quad \forall l \in L, y \in Y \quad (14)$$

$$\mathfrak{S}_i^{spl} = \sum_{p' | p' \neq p} g^{sp'p} x_i^{sp'l} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L, s \in S \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_p \text{Temps}_{ij} x_{ij}^{pl} \leq \beta^l \mathcal{O}^l \quad \forall l \in L, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_p x_i^{spl} \leq Q_i^s \quad \forall i \in F \cup M, s \in S, l \in L \quad (17)$$

$$\sum_p x_y^{spl} \leq Q_y^s n_y^s \quad \forall y \in Y, s \in S, l \in L \quad (18)$$

$$\sum_i x_{iu}^{pl} \leq d_u^{pl} \quad \forall u \in U, p \in PDV, l \in L \quad (19)$$

$$\text{Récolte}_f = \sum_{p \in MP} \sum_l x_f^{pl} / Q_f \quad \forall f \in F \quad (20)$$

$$\sum_m (x_{fm}^p / Q_f^p) \leq \text{Récolte}_f \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (21)$$

$$\sum_f x_{fm}^p = \sum_s \sum_l x_m^{spl} \quad \forall p \in PR, m \in M \quad (22)$$

$$h_f^{+l} = h_f^l \quad \forall f \in F | l = 1 \quad (23)$$

$$h_f^{+l} \leq h_f^l \quad \forall f \in F, l \in L | l \geq 2 \quad (24)$$

$$h_f^{+l} \geq h_f^l - h_f^{l-1} \quad \forall f \in F, l \in L | l \geq 2 \quad (25)$$

$$\sum_y z_y = \gamma \quad (26)$$

$$z_y, h_f^l, h_f^{+l} \in \{0, 1\} \quad \forall y \in Y, f \in F \quad (27)$$

$$n_y^s \in Z \quad \forall y \in Y, r \in R, s \in S, l \in L \quad (28)$$

$$x_f^p, x_i^{spl}, x_{fm}^p, x_{ij}^{pl}, n_y^s \geq 0 \quad \forall i, j \in N, m \in M, f \in F, s \in S, p \in P, l \in L, t \in T \quad (29)$$

Plus particulièrement, la contrainte (2) spécifie un niveau maximal de récolte en forêt par période. La contrainte (3) détermine un niveau maximal de récolte par période, et ce, pour l'ensemble du réseau. La contrainte (4) stipule un niveau maximal de stockage en forêt par période. Les contraintes des groupes (5) à (10) garantissent la conservation des flux aux différents nœuds du réseau et pour chaque période. Les contraintes du groupe (11) assurent que le niveau des stocks soit toujours supérieur ou égal à zéro. Les contraintes du groupe (12) assurent que le niveau de stock d'un produit donné soit toujours supérieur ou égal au niveau de stock de sécurité déterminé pour ce produit. Les contraintes du groupe (13)

assurent qu'il y ait cohérence entre l'installation de processus de triage ou de transformation de produits et l'identité des sites sélectionnés pour accueillir un centre de triage. Le groupe de contraintes (14) permet de définir l'invariant \mathfrak{S}_i^{spla} qui exprime la quantité du produit p extraite du processus de transformation s à la période t au site i . On multiplie la quantité du produit p par le coefficient g^{sp} . Les contraintes du groupe (15) assurent que la flotte de véhicules disponibles ait le temps d'effectuer l'ensemble des livraisons sélectionnées.

Les contraintes du groupe (16) précisent une capacité de récolte par site pour l'ensemble de l'horizon de planification. Les contraintes des groupes (17) et (18) garantissent le respect d'une capacité maximale par période à chaque processus de transformation selon le site et ce, en tenant compte du nombre de processus mis en place au site. Les contraintes du groupe (19) assurent qu'on ne puisse vendre davantage d'unités d'un produit fini que la demande pour ce même produit pour une période donnée. Les contraintes du groupe (20) définissent l'invariant $Récolte_f$ qui exprime le niveau de récolte de la forêt f . Les contraintes du groupe (21) assurent que les quantités de produits intermédiaires sur lesquels s'appliquent des redevances qui sont assignées aux usines ne dépassent pas la quantité potentielle de ce produit qui correspond au niveau de récolte en relation avec les taux de conversion entre la matière première et les produits intermédiaires. Les contraintes du groupe (22) assurent que la somme des produits de redevance assignée à une usine soit égale à la somme de ce même produit qui est traitée par un processus de transformation à cette même usine.

Les contraintes des groupes (23) à (25) permettent de définir les invariants liés à l'ouverture et à la fermeture de sites en forêts. Les contraintes du groupe (26) assurent qu'un nombre prédéterminé de γ sites soit sélectionné comme cour de triage. Dans les faits, nous limiterons les valeurs de γ à 0 ou 1. Les contraintes du groupe (27) assurent que les variables exprimant l'utilisation des sites de récolte en forêt et d'un des sites potentiels pour l'installation d'une cour de triage soient binaires. Les contraintes du groupe (28) spécifient que les variables d'installation et de transfert de machines et de processus de production sont exprimées en nombres entiers. Finalement, le groupe de contraintes (29) assure que toutes les variables soient supérieures ou égales à zéro (non négatives).

5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Le modèle de localisation et de pilotage d'un centre de triage a été modélisé via OPL Studio et résolu par le solveur CPLEX. Les temps de résolution tournaient généralement autour de moins de 30 secondes pour la phase stratégique et de 10 à 20 minutes pour la phase tactique. La taille du problème était d'environ 33 000 variables (dont 363 variables binaires et 33 variables en nombres entiers) et 334 000 contraintes pour la phase stratégique. Pour la phase tactique, le nombre de variables augmente à 470 000 (dont 30 000 en nombres entiers) et le nombre de contraintes à 6 000 000.

Pour la première instance (Instance 1) de notre série d'optimisations, la résolution du modèle a permis de dégager des profits du réseau allant de 167 millions pour le scénario « de base » où il n'y avait pas de cour dédiée au triage ni de coordination du transport, à 180 millions pour le cas où étaient

présents ces deux éléments (voir Tableau 1). En chiffres relatifs, la présence combinée de retours en charge et d'une cour permet donc de dégager des économies potentielles de l'ordre de 7,4% (voir Tableau 3). Ainsi, la présence de retours en charge apporte un gain de presque 9 millions de dollars quand une cour est déjà en place contre seulement 4 millions quand il n'y en a pas. De la même façon, l'utilisation préalable des retours en charge apporte un gain de plus de 8 millions contre moins de 4 avec des retours à vide. Mentionnons que l'absence des coûts fixes des usines dans le modèle a tendance à produire des profits plus élevés qu'ils ne le seraient en réalité dans tous les scénarios. Cela ne change pas pour autant la validité des solutions obtenues dans la mesure où ces coûts auraient été identiques, quelles que soient les instances ou les décisions prises par le solveur. On note que le gain apporté par la présence simultanée de la cour et des retours en charge est plus important que la somme des gains obtenus par la présence de l'un ou l'autre de ces éléments de façon isolée.

Tableau 1: Profit par scénario - Instance 1 (en dollars)

Cour/transport	Retours à vide	Retours en charge
Sans cour	167 708 205\$	171 918 986\$
Une cour	171 307 777\$	180 065 064\$

Si on examine plus en détail les résultats (voir Tableau 4), on remarque que les scénarios comportant une cour de triage occasionnent paradoxalement des coûts globalement plus élevés que le scénario de base. Ces coûts supplémentaires sont cependant causés par un plus grand niveau d'activités, ce qui explique qu'ils soient compensés par une hausse des revenus encore plus importante (une augmentation de 0,9% qui représente en fait plus de 2,5% du profit obtenu dans le scénario de base). Les redevances représentent la plus forte hausse avec une augmentation de 4,2% lorsqu'une cour est utilisée. Pour ce qui est des coûts de transport, on remarque que ceux-ci diminuent de 3,4% à 3,5% lorsqu'on utilise les retours en charge, mais augmentent de 4,1% quand on ajoute une cour seulement. En fait, le paradoxe s'explique du fait que la présence d'une cour, en faisant baisser certains coûts, rend plus intéressante l'exploitation de certains secteurs de récolte qui étaient moins exploités auparavant, car ayant une plus faible rentabilité. Ainsi, on observe une hausse des récoltes de l'ordre de 1%, de 2 745 152 à 2 771 529 m³, lorsqu'on utilise une cour. De la même façon, le niveau d'activité plus intense occasionne des stocks plus élevés. Les principales améliorations en pourcentages et en relation avec les profits du premier scénario se situent au niveau du triage, des revenus et du transport (voir tableau 5). En fait, si on compare les revenus et les coûts en fonction des m³ récoltés (voir Tableau 6), on constate que l'augmentation des profits est plus modeste qu'en chiffres relatifs et que les revenus par m³ sont tout à fait stables. De même, certaines hausses de coûts sont plus modestes, voire inexistantes, quand on tient compte de l'évolution du volume de bois traité.

Pour les autres instances, nous avons dans un premier temps diminué de 50% la capacité de stockage des usines. L'effet sur le profit fut limité avec une baisse de seulement 2 millions de dollars (1,2%). Le gain apporté par la présence d'une cour est sensiblement plus important que dans la première instance (2,7% contre 2,1%). Il en est de même du gain engendré par la présence simultanée d'une cour et de retours en charge (7,8% contre 7,4%).

Pour la troisième instance, nous avons augmenté les coûts de

carburant de 50%. Les profits globaux furent les plus bas de tous les scénarios avec une baisse de 27,2% pour le scénario de base. Les gains apportés par la présence de la seule cour sont très faibles (0,5%) contre 4,2% pour les retours en charge. La présence simultanée de ces deux éléments amène un gain de 10,6%. Il s'agit du plus fort effet dynamique de toutes les instances examinées.

Avec la quatrième instance, nous avons plutôt diminué le niveau des redevances à verser au gouvernement de 25%. Les gains apportés par l'ajout d'une cour ou l'utilisation des retours à vide (ou les deux) sont environ de 0,5% à 0,7% moins élevés que dans les deux premières instances. Le profit augmente de 5% par rapport à la première instance (scénario de base).

Nous pouvons donc observer que les variations du coût de carburant et des redevances ont le plus d'impact sur les profits globaux. De plus, une augmentation du coût de carburant rend la présence simultanée d'une cour de triage et de retours en charge sensiblement plus profitable que dans les autres

instances. Une baisse de la capacité de stockage aux usines rend également plus intéressant l'utilisation du centre proposé, mais ce dans une moindre mesure.

Tableau 2 : Profit du scénario de base par instance

Instance	Profit	Gain (%)
Instance 1	167 708 205\$	0,0%
Instance 2	165 623 349\$	-1,2%
Instance 3	122 041 715\$	-27,2%
Instance 4	176 054 359\$	5,0%

Tableau 3 : Hausse du profit par scénario et instance

Instance/scénario	Cour	En charge	Cour & en charge
Instance 1	2,1%	2,5%	7,4%
Instance 2	2,7%	2,6%	7,8%
Instance 3	0,5%	4,2%	10,6%
Instance 4	2,2%	2,1%	7,1%

Tableau 4 : Revenus et couts en dollars par catégorie par rapport au scénario de base (première instance)

Catégorie/scénario	Pas de cour et retours à vide	Cour et retours à vide	Pas de cour et retours en charge	Cour et retours en charge
Revenus	516 484 451 \$	521 140 831 \$	516 423 436 \$	520 930 557 \$
Récoltes	49 412 744 \$	49 887 517 \$	49 412 744 \$	49 887 517 \$
Redevances	31 873 154 \$	33 204 723 \$	31 873 103 \$	33 204 725 \$
Triage/transformation	98 995 476 \$	91 617 859 \$	99 088 162 \$	91 733 105 \$
Transport	116 063 970 \$	120 865 581 \$	112 024 948 \$	112 070 026 \$
Sélection de blocs	2 400 000 \$	2 100 000 \$	2 400 000 \$	2 100 000 \$
Sélection de cours de triage	- \$	750 000 \$	- \$	750 000 \$
Sélection d'équipements	- \$	3 800 \$	- \$	7 600 \$
Gestion des stocks	50 030 903 \$	51 403 573 \$	49 705 495 \$	51 112 521 \$
PROFITS	167 708 205 \$	171 307 777 \$	171 918 986 \$	180 065 064 \$

Tableau 5 : Évolution des coûts en pourcentages par rapport aux profits du scénario de base (première instance)

Catégorie/scénario	Pas de cour et retours à vide	Cour et retours à vide	Pas de cour et retours en charge	Cour et retours en charge
Revenus	0,0%	2,8%	0,0%	2,7%
Récoltes	0,0%	-0,3%	0,0%	-0,3%
Redevances	0,0%	-0,8%	0,0%	-0,8%
Triage/transformation	0,0%	4,4%	-0,1%	4,3%
Transport	0,0%	-2,9%	2,4%	2,4%
Sélection de blocs	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%
Sélection de cours de triage	0,0%	-0,4%	0,0%	-0,4%
Sélection d'équipement	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gestion des stocks	0,0%	-0,8%	0,2%	-0,6%
PROFITS	0,0%	2,1%	2,5%	7,4%

Tableau 6 : Évolution des revenus et des coûts par m³ par rapport au scénario de base en % (première instance)

Catégorie/scénario	Cour et retours à vide	Pas de cour et retours en charge	Cour et retours en charge
Revenus	-0,1%	0,0%	-0,1%
Redevances	0,0%	0,0%	0,0%
Récoltes	-3,2%	0,0%	-3,2%
Triage/transformation	8,3%	-0,1%	8,2%
Transport	-3,1%	3,5%	4,4%
Sélection de blocs	13,3%	0,0%	13,3%
Gestion des stocks	-1,8%	0,7%	-1,2%
PROFITS	1,2%	2,5%	6,3%

6 CONCLUSION

Les préoccupations croissantes concernant l'environnement, le développement de produits à valeur ajoutée et la crise majeure qu'a vécu le secteur forestier au cours des dernières années forcent celui-ci à revoir ses pratiques d'affaire en profondeur. À cet égard, il s'est avéré que la mutualisation de certaines ressources telles que le transport se révèle profitable à la fois d'un point de vue économique et environnemental (Epstein *et al.*, 2007), mais est cependant fort complexe à déployer (Frisk *et al.*, 2010), notamment au niveau de sa gestion quotidienne. Aussi, l'utilisation de cours de triage et de « *merchandising* » permet souvent de réduire certains coûts de transport et de mieux assigner la ressource forestière pour un meilleur usage (Chan *et al.*, 2009 et Han *et al.*, 2011). Il apparaît cependant que l'usage de cours de triage et de « *merchandising* », distinct des opérations en forêt et des usines, n'est pas généralisé à travers le secteur forestier. Cela pose la question des conditions requises pour qu'une telle installation soit rentable.

Nous pensons que lorsque les circonstances s'y prêtent, un centre permettant le regroupement de charges de transport, un triage initial de la ressource forestière, un traitement initial de celle-ci et la mise en commun des stocks de bois, favoriserait la maximisation de la valeur et la réduction des coûts d'exploitation et environnementaux de cette industrie. Il nous apparaît particulièrement pertinent d'étudier un tel projet dans le contexte québécois et canadien en raison de l'éloignement des ressources et de l'étendue du territoire.

Nous avons donc conçu un modèle d'optimisation linéaire et en nombres entiers pour justement explorer l'impact de la localisation et de l'exploitation d'un tel centre sur les entreprises forestières concernées. Sa fonction objectif maximise les profits du réseau entre les blocs de récolte en forêt et les usines de première transformation. Une première série de données réalistes, générées à partir de données obtenues à travers divers rapports de recherche, furent utilisées pour résoudre le modèle.

La première optimisation que nous avons effectuée démontre que notre centre pourrait permettre de dégager des profits de l'ordre de 7,4% avec les données utilisées. Ce gain serait obtenu entre autres par l'exploitation de secteurs de récolte autrement non rentables en réduisant les coûts par m³ de bois récoltés. Il apparaît également que la présence simultanée de la coordination du transport et de la cour de triage génère des gains supplémentaires par rapport à la somme des gains qu'apporte la présence de ces deux éléments de façon séparée. Des paramètres que nous avons fait varier lors de notre analyse de sensibilité, il semble que la variation du coût du carburant et la diminution des redevances soient celles ayant l'impact le plus significatif sur les profits. Une baisse de la capacité de stockage aux usines de l'ordre de 50% a eu un impact plus limité à ce chapitre.

Notre projet permettra de guider les entreprises se questionnant quant à la pertinence de construire une telle cour de triage, afin qu'elles puissent prendre des décisions éclairées à cet égard. Un tel projet de centre de triage et de consolidation régional aiderait de plus grandement selon nous le monde forestier à évoluer davantage vers des pratiques durables qui garantissent une meilleure utilisation de la ressource tout en minimisant les retours à vide en transport. L'industrie sera ainsi mieux armée pour répondre aux attentes en matière d'environnement dans le futur.

7 RÉFÉRENCES

- Beaudoin, D., LeBel, L., & Frayret, J.-M. (2007). Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1), 128–140.
- Carlgrén, C.-G., Carlsson, D., & Rönnqvist, M. (2006). Log sorting in forest harvest areas integrated with transportation planning using backhauling. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21(3), 260–271.
- Chan, T., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2008). *Locating Satellite Yards in Forestry Operations*. Montreal.
- Chan, T., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2009). Locating Satellite Yards in Forestry Operations. *INFOR*, 47(3), 223–234.
- Chung, W., Venn, T. J., Loeffler, D., Jones, G., Han, H., & Calkin, D. E. (2012). Assessing the Potential for Log Sort Yards to Improve Financial Viability of Forest Restoration Treatments. *Forest Science*, 58(6), 641–651.
- D'Amours, S., Epstein, R., Weintraub, A., & Rönnqvist, M. (2010). Operations Research in Forestry and Forest Products Industry. In *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- D'Amours, S., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2008). Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR*, 46(4), 265–281.
- Dramm, J. R., Jackson, G. L., & Wong, J. (2002). *Review of Log Sort Yards*. Madison, Wisconsin.
- Duchesne, I., Wilhelmsson, L., & Spångberg, K. (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, 790–795.
- El Hachemi, N., Gendreau, M., & Rousseau, L.-M. (2013). A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 40(3), 666–673. Retrieved from
- Epstein, R., Rönnqvist, M., D'Amours, S., & Weintraub, A. (2007). Chapter 20 : Forest Transportation. *Handbook of Operations Research In Natural Resources*, Springer US., 391–403.
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 448–458.
- Han, H., Bilek, E. M. T., Dramm, J. R., Loeffler, D., & Calkin, D. (2011). Financial Feasibility of a Log Sort Yard Handling Small-Diameter Logs: A Preliminary

Kong, J., Rönqvist, M., & Frisk, M. (2012). Modeling an integrated market for sawlogs, pulpwood, and forest bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research*, 42, 315–332.

Lehoux, N., Marier, P., D'Amours, S., Ouellet, D., & Beaulieu, J. (2011). *Le réseau de création de valeur de la fibre de bois canadienne*. CIRRELT.

Marowitz, R. (2010, May 20). Kruger supprimera 440 postes à Trois-Rivières. *La Tribune*, p. 27. Sherbrooke.

Sessions, J., Boston, K., & Stewart, R. (2005). Log sorting location decisions under uncertainty. *Forest Products Journal*, 55(12), 53–57.

Stuart, W. B. (2003). Checking Our Foundations : Matthews' Least Cost Models Revisited. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(1), 30–35.

Wengert, E. M. (2006). *Principles and Practices of Drying Lumber Table of Contents*. Blacksburg, Virginia.

ANNEXE

Modèle tactique

Nous commençons par introduire les ensembles, indices, paramètres et variables spécifiques à cette phase.

Ensemble :

R : Ensemble des routes de livraison

Indice :

r : Route de livraison

Paramètres :

c^{rt} : Coût de transport fixe de la route r et avec le mode de transport t .

W_b^r : Paramètre binaire exprimant si la route r est effectuée par un véhicule fixé à la base b .

$Temps^r$: Nombre d'heures requises pour effectuer la route r .

g^{pla} : Facteur de dépréciation permettant d'exprimer la perte de valeur d'un produit p ayant un âge a durant la période l .

o^{pla} : Tonnes métriques par mètres cubes pour le produit p d'un âge a durant la période l .

Variables :

x_{ij}^{plat} : Quantité du produit p d'un âge a transportée du site i au site j durant la période l et avec le mode de transport t .

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

x^{rlt} : Nombre de fois que la route r est effectuée durant la période

l avec le mode de transport t .

x_i^{spla} : Quantité du produit p d'un âge a traitée par le processus de transformation s au site i durant la période l .

x_b^{lt} : Nombre de véhicules du mode de transport t qui sont basés à la base b durant la période l .

I_i^{pla} : Stock du produit p d'un âge a entreposé au site i durant la période l .

\mathfrak{S}_i^{spla} : Processus de production s du produit p d'un âge a à la période l et au site i .

Fonction objectif :

Maximiser:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_u \sum_p \sum_{PE} \sum_l \sum_a \sum_t V^p g^{pla} x_{iu}^{pla} - \sum_f \sum_{p \in MP} \sum_l \sum_a \sum_t c_f^{pl} x_f^{pl} - \sum_s \sum_{p \in PE} \sum_l \sum_a \sum_t c_i^{spla} x_i^{spla} \\ & - \sum_i \sum_j \sum_p \sum_l \sum_a \sum_t c_{ij}^{plt} o^{pla} x_{ij}^{plat} - \sum_r \sum_l \sum_t c^{rlt} x^{rlt} - \sum_i \sum_p \sum_l \sum_a c_i^p I_i^{pla} \\ & - \sum_f \sum_l \sum_a c_f^+ h_f^{+l} - \sum_y \sum_l c_y z_y - \sum_s \sum_y c_y^s n_y^s - \sum_p \sum_f \sum_m c_f^p x_{fm}^p \end{aligned} \quad (30)$$

Contraintes :

$$\sum_p \sum_a I_i^{pla} \leq E_i \quad \forall i \in N, l \in L \quad (31)$$

$$I_f^{pla} = x_f^{pl} - \sum_{j|j \neq f} \sum_t x_{jf}^{plat} - \sum_s x_f^{spla} \quad \forall f \in F, p \in MP, l \in L | a = 0 \quad (32)$$

$$I_f^{pla} = \sum_s \mathfrak{S}_f^{spla} - \sum_{j|j \neq f} \sum_t x_{jf}^{plat} - \sum_s x_f^{spla} \quad \forall f \in F, p \in PEC, l \in L | a = 0 \quad (33)$$

$$I_f^{pla} = \sum_s \mathfrak{S}_f^{spla} - \sum_u x_{iu}^{pla} \quad \forall f \in F, p \in PDV, l \in L | a = 0 \quad (34)$$

$$I_f^{pla} = I_f^{pl-1a-1} - \sum_{j|j \neq f} \sum_t x_{jf}^{plat} - \sum_s x_f^{spla} \quad \forall f \in F, p \in MP, l \in L | a > 0 \quad (35)$$

$$I_f^{pla} = I_f^{pl-1a-1} + \sum_s \mathfrak{S}_f^{spla} - \sum_{j|j \neq f} \sum_t x_{jf}^{plat} - \sum_s x_f^{spla} \quad \forall f \in F, p \in PEC, l \in L | a > 0 \quad (36)$$

$$I_f^{pla} = I_f^{pl-1a-1} + \sum_s \mathfrak{S}_f^{spla} - \sum_u x_{fu}^{pla} \quad \forall f \in F, p \in PDV, l \in L | a > 0 \quad (37)$$

$$I_i^{pla} = \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ji}^{plat} - \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} \quad \forall i \in D, p \in MP, l \in L | a = 0 \quad (38)$$

$$I_i^{pla} = \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ji}^{plat} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} - \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} \quad \forall i \in D, p \in PEC, l \in L | a = 0 \quad (39)$$

$$I_i^{pla} = \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} - \sum_u x_{iu}^{pla} \quad \forall i \in D, p \in PDV, l \in L | a = 0 \quad (40)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ji}^{plat} - \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} \quad \forall i \in D, p \in MP, l \in L | a > 0 \quad (41)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ji}^{plat} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} - \sum_{j|j \neq i} \sum_t x_{ij}^{plat} - \sum_s x_i^{spla} \quad \forall i \in D, p \in PEC, l \in L | a > 0 \quad (42)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl-1a-1} + \sum_s \mathfrak{S}_i^{spla} - \sum_u x_{iu}^{pla} \quad \forall i \in D, p \in PDV, l \in L | a > 0 \quad (43)$$

$$I_i^{pla} = I_i^{pl \max a} \quad \forall i \in N, p \in P, a \in A | l = 0 \quad (44)$$

$$\sum_a I_i^{pla} \geq \varpi_i^p \quad \forall i \in N, p \in P, l \in L | l > 0 \quad (45)$$

$$\sum_s \sum_p \sum_a x_y^{spla} \leq \max_y \quad \forall l \in L, y \in Y \quad (46)$$

$$\mathfrak{S}_i^{spla} = \sum_{p|p \neq p} g^{sp'p} x_i^{sp'la} \quad \forall i \in N, p \in PS, l \in L, a \in A, s \in S \quad (47)$$

$$\sum_r W_b^r \text{Temps}^r x^{rlt} \leq \beta^t x_b^{lt} \quad \forall b \in B, l \in L, t \in T \quad (48)$$

$$\sum_b x_b^{lt} \leq \mathfrak{U}^t \quad \forall l \in L, t \in T \quad (49)$$

$$\sum_a x_{ij}^{plat} \leq x_{ij}^{plt} E^t \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L, t \in T \quad (50)$$

$$\sum_a o^{pla} x_{ij}^{plat} \leq x_{ij}^{plt} Q_{ij}^{lt} \quad \forall i \in O, j \in D, p \in P, l \in L, t \in T \quad (51)$$

$$\sum_p x_{ij}^{plt} = \sum_r \eta_{ij}^r x^{rlt} \quad \forall i \in O, j \in D, l \in L, t \in T \quad (52)$$

$$\sum_p \sum_a x_i^{spla} \leq Q_i^{sl} \quad \forall i \in F \cup M, s \in S, l \in L \quad (53)$$

$$\sum_p \sum_a x_y^{spla} \leq Q_y^s n_y^s \quad \forall y \in Y, s \in S, l \in L \quad (54)$$

$$\sum_i \sum_a x_{iu}^{pla} \leq d_u^{pl} \quad \forall u \in U, p \in PDV, l \in L \quad (55)$$

$$\sum_m x_{fm}^p \leq Q_f^p \quad \forall f \in F, p \in PR \quad (56)$$

$$\sum_f x_{fm}^p = \sum_s \sum_l \sum_a x_m^{spla} \quad \forall p \in P, m \in M \quad (57)$$

$$x_{ij}^{plt}, x^{rlt}, n_y^s \in Z \quad \forall y \in Y, r \in R, s \in S, l \in L \quad (58)$$

$$x_i^{spla}, x_{ij}^{plat}, x_{fm}^p, x_m^{pla} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, m \in M, f \in F, s \in S, p \in P, l \in L, a \in A, t \in T \quad (59)$$

La fonction objectif du modèle tactique (30) est essentiellement la même que celle de la phase stratégique. Nous avons simplement ajouté les indices a pour l'âge pour les variables ou paramètres appropriés. Une partie des coûts pertinents sont fixés à l'avance par les résultats de la phase stratégique.

Les contraintes du groupe (31) fixent un niveau maximal de stockage en forêt par période. Les contraintes des groupes (32) à (43) garantissent la conservation des flux aux différents nœuds du réseau et pour chaque période. Le principe est le même pour chacune de ces contraintes : on additionne au stock du même produit pour le nœud en question et à la période précédente la somme du même produit qui fut un extrant des processus de transformation opérés à ce site ainsi que la somme pour ce produit des livraisons entrantes pour cette même période. On soustrait à ce total les quantités livrées de ce produit à d'autres sites ainsi que la quantité de ce produit qui fut utilisé comme intrant à un processus de transformation pour ce site. Dans le cas d'un produit disponible à la vente à une usine, on soustraira également la quantité du produit qui fut vendu pour cette période. Les contraintes du groupe (44) assurent que le niveau des stocks soit toujours supérieur ou égal au stock de sécurité (fixé à zéro présentement). La contrainte du groupe (45) assure que le niveau de stock d'un produit soit égal au stock de ce même produit pour la dernière période de l'horizon de planification.

Les contraintes du groupe (46) assurent que l'on respecte la capacité de traitement de la cour dédiée au triage (tous processus confondus). Le groupe de contraintes (47) permet de définir l'invariant \mathfrak{Z}_i^{spla} qui exprime la quantité du produit p extraite du processus de transformation s à la période l au site i . On multiplie la quantité du produit p par le coefficient $g^{sp'p}$. Les contraintes du groupe (48) assurent que la flotte de véhicules disponibles ait le temps d'effectuer l'ensemble des routes sélectionnées. Les contraintes du groupe (49) assurent que la somme des camions de type t assignés aux différentes bases est inférieure ou égale à la taille de la flotte de ce type. Les contraintes du groupe (50) assurent qu'il y ait suffisamment d'espace dans les camions pour livrer les quantités qui leur sont assignées. Les contraintes du groupe (51) font de même au niveau du poids à transporter. Les contraintes du groupe (52) assurent que le nombre de livraisons effectuées par paires origine-destination soit égal au nombre de fois que ces paires sont présente dans les routes sélectionnées.

Les contraintes des groupes (53) et (54) fixent une capacité

maximale par période à chaque processus de transformation selon le site et ce, en tenant compte du nombre de processus mis en place au site. Les contraintes du groupe (55) assurent qu'on ne puisse vendre davantage d'unités d'un produit fini que la demande pour ce même produit pour une période donnée.

Les contraintes du groupe (56) assurent que les quantités de produits intermédiaires sur lesquels s'appliquent des redevances qui sont assignées aux usines ne dépassent pas la quantité potentielle de ce produit qui correspond au niveau de récolte en relation avec les taux de conversion entre la matière première et les produits intermédiaires. Les contraintes du groupe (57) assurent que la somme des produits de redevance assignée à une usine soit égale à la somme de ce même produit qui est traitée par un processus de transformation à cette même usine. Les contraintes du groupe (58) spécifient que les variables d'installation et de transfert de machines et de processus de production ainsi que variables quant au nombre de livraisons effectuées sont exprimées en nombres entiers. Finalement, le groupe de contraintes (59) assure que toutes les variables soient supérieures ou égales à zéro (non négatives).