

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Analyse de stratégies de triage en forêt pour une chaîne de valeur forestière efficiente

MOHAMED DHIA EDDINE BACCOUCHE, NADIA LEHOUX ET PHILIPPE MARIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FORAC, UNIVERSITÉ LAVAL

Département de génie mécanique, Université Laval  
Québec City Québec, Canada

[mohamed-dhia-eddine.baccouche.1@ulaval.ca](mailto:mohamed-dhia-eddine.baccouche.1@ulaval.ca)

[nadia.lehoux@gmc.ulaval.ca](mailto:nadia.lehoux@gmc.ulaval.ca)

[philippe.marier@forac.ulaval.ca](mailto:philippe.marier@forac.ulaval.ca)

---

**Résumé** – L'industrie forestière représente une partie importante de l'activité économique canadienne. Les forêts canadiennes sont l'une des principales sources de bois dans le monde et le triage et le transport du bois sont des aspects clés de ce secteur qui demeurent importants à bien gérer. Ce projet explore diverses stratégies de triage afin de mieux coordonner l'approvisionnement en bois avec les besoins spécifiques des usines à desservir. Pour ce faire, un modèle d'aide à la gestion a été élaboré, faisant appel à la programmation mathématique pour évaluer la rentabilité de recourir à des stratégies basées sur la distribution de méthodes de triage en forêt. Les expérimentations menées diffèrent selon le nombre et le type de piles de bois pouvant être formées en forêt. Notre étude a permis de mettre sur pied un outil apte à déterminer le choix des méthodes de triage à utiliser en forêt, le volume de bois à envoyer de la forêt aux usines, ainsi que le bois à échanger entre les usines de manière à minimiser les coûts. Cette étude se veut donc un pas de plus vers le développement d'outils d'aide à la décision permettant d'optimiser le transport du bois et d'améliorer la rentabilité de la chaîne de valeur forestière.

**Abstract** – The forestry industry is an important part of the Canadian economic activity. Canada's forests are one of the world's major sources of wood, and sorting and transporting wood are key aspects to manage in this sector. This project explores various sorting strategies to better coordinate wood supply with the specific needs of the mills. To do so, a decision support tool is developed to evaluate the profitability of using strategies based on the distribution of forest sorting methods. The experiments were conducted based on different types and numbers of piles that could be made in the forest. The model allowed to decide on the sorting methods to use, the volume of wood to be sent from the forest to the mills, and the wood to be traded between mills. This research therefore goes a little further in the development of optimization tools for the forest industry by proposing an original way for optimizing transportation and improving the profitability of the forest value chain.

**Mots clés** – Stratégies de triage, chaîne de valeur forestière, modélisation mathématique, transport forestier.

**Keywords** – Sorting methods, forest supply chain, mathematical modeling, wood transportation.

---

### 1 INTRODUCTION

L'industrie forestière représente une partie importante de l'activité économique canadienne [Ressources naturelles Canada, 2021-2022]. Au sein de cette industrie, le triage et le transport sont des étapes cruciales dans le processus de transformation du bois [Dramm *et al.*, 2002], car ils permettent de maximiser l'utilisation de la ressource et de minimiser les pertes de matière [Han *et al.*, 2011]. En sélectionnant le bois le plus approprié pour chaque destination et en le transportant efficacement, les entreprises forestières peuvent ainsi réduire considérablement leurs coûts et améliorer la qualité de leurs produits finis.

Dans cet article, nous étudions les stratégies de triage du bois en forêt. Dans notre étude, le terme forêt englobe les zones de récolte et les zones de tri leur étant associées. L'idée consiste à explorer différentes façons de classer le bois selon la longueur, le diamètre et l'essence, afin de mieux coordonner

l'approvisionnement en bois avec les besoins spécifiques des usines à desservir. En assurant la livraison du bon bois à la bonne usine, il devient alors possible de réduire les coûts de transport tout en assurant une utilisation plus efficiente de la fibre de bois.

Pour ce faire, nous avons mis sur pied un modèle mathématique basé sur la programmation linéaire en nombres entiers mixte. Ce type d'approche mathématique est très utilisé pour planifier les opérations à l'intérieur des chaînes d'approvisionnement [Zhang *et al.*, 2010]. Le modèle a pour but de déterminer quelle méthode de tri utiliser dans quelle forêt de même que les produits à envoyer vers quelles usines de façon à minimiser les coûts. En effet, chaque forêt adapte la meilleure méthode de triage qui lui convient. Le réseau considéré dans l'étude est basé sur un cas réel du secteur forestier québécois. À partir du modèle, divers scénarios de triage sont étudiés, se distinguant selon le nombre de types de piles de bois pouvant être générées.

Quatre méthodes de triage ont plus particulièrement été examinées, prenant en compte les trois caractéristiques du bois suivantes : longueur, diamètre et essence. La première méthode de triage se base sur la longueur et le diamètre de la bille. La seconde repose uniquement sur la longueur de la bille. La troisième méthode considère quant à elle le diamètre de la bille. La dernière prend finalement en considération l'essence de la bille pour le triage. Le modèle doit veiller à toujours satisfaire la demande des usines en termes de longueur, de diamètre et d'essence de bois, peu importe la méthode de triage utilisée en forêt. C'est en effet lors de la décomposition des piles aux usines et grâce à un transport du bois d'une usine à une autre que le respect de la demande est assuré.

La résolution du modèle pour chaque scénario et l'analyse des résultats ont permis de constater l'importance du triage en forêt dans l'optimisation du coût de transport du bois, en plus de souligner l'importance de la bonne distribution des méthodes de triage dans les forêts. Une telle analyse pourra guider les entreprises forestières dans le choix de la bonne stratégie de triage à sélectionner afin d'améliorer l'efficacité de leur chaîne de valeur forestière.

Cet article est divisé de la façon suivante : nous allons dans un premier temps présenter la littérature portant sur les opérations logistiques ainsi que sur la modélisation dans le domaine forestier. Par la suite, nous décrirons la méthodologie utilisée et le modèle d'optimisation mathématique développé. Finalement, nous présenterons l'expérimentation, l'analyse des résultats, l'analyse de sensibilité et une conclusion.

## 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La chaîne de valeur forestière comporte de nombreuses opérations afin de transformer la fibre en produits finis destinés à un marché étendu. Chaque nœud de cette chaîne comme la forêt, les usines et les flux entre ces parties, sont à considérer lors de la planification et la gestion des opérations logistiques [Rönnqvist, 2003]. Les opérations de triage et de transport du bois entre les points d'offre et de demande sont deux étapes fondamentales de cette chaîne, d'où l'importance d'optimiser leurs opérations. La matière première doit en effet être récoltée en forêt, triée, puis transportée vers les usines, pour y être transformée et générer ainsi de la valeur. D'après [Rönnqvist *et al.*, 2015], le coût du transport représente plus du tiers du coût total de la chaîne de valeur. De plus, [Audy *et al.*, 2012] affirment que dans certains cas, le transport du bois des sites forestiers aux usines peut représenter plus de 45% du coût opérationnel total de la chaîne de valeur.

D'après Abbas *et al.* [2013], le coût de transport du bois dépend généralement du poids des billes de bois et de la distance de transport entre les points d'offre et de demande. En particulier, Pichler *et al.* [2022] affirment que le transport du bois en bord de route forestière jusqu'aux scieries nécessite un suivi du volume transporté, mettant ainsi en évidence l'importance de connaître en détail la quantité de bois à transporter. Perić *et al.* [2020] soulignent également dans leur étude l'importance de se doter d'outils pour faire le suivi de plusieurs opérations dont le transport du bois de la forêt jusqu'à l'usine.

Plusieurs études ont été menées dans le but de développer des modèles d'optimisation aptes à réduire les coûts de transport du bois [Flisberg *et al.*, 2009 ; El Hachemi *et al.*, 2015; Palmgren *et al.*, 2004; Rix *et al.*, 2015]. Même si plusieurs chercheurs ont voulu optimiser les opérations de transport, peu d'études ont

toutefois intégré l'optimisation du triage en forêt. Carlsson *et al.* [2006] par exemple ont étudié la planification des opérations de transport de la forêt aux usines, avec pour objectif de minimiser les coûts. Les auteurs n'ont néanmoins pas examiné la question du triage du bois en forêt.

Les opérations de triage de bois contribuent à minimiser le coût total de la chaîne de valeur forestière en facilitant la coordination des opérations et en assurant généralement une meilleure utilisation de la capacité de transport. Le triage peut être effectué dans les zones de récolte, dans les cours à bois de la scierie ou dans des cours à bois indépendantes, appelées cours à bois intermédiaires ou de transit. Selon Andersson [2016], les scieries nécessitent parfois d'avoir accès à des dimensions de bois particulières pour effectuer une transformation rentable du bois. Les types d'assortiment de piles de bois doivent alors correspondre à la demande des usines, ce qui nécessite de définir des alternatives de triage à appliquer dans les zones de récolte.

D'après [Lehoux *et al.*, 2012], le triage en forêt peut être effectué selon l'essence, la taille et la qualité des billots. Cependant, le manque d'espace dans certaines forêts peut présenter un inconvénient pour les opérations de triage [Dramm *et al.*, 2002]. Le recours à des cours ou centres de triage peut alors offrir plus d'espace pour effectuer le tri tout en diminuant les erreurs [Sessions *et al.*, 2005]. La minimisation des erreurs de triage assure l'envoi du bon bois aux usines qui le demandent [Alam *et al.*, 2014]. En plus, certaines usines disposent de leurs propres cours à bois. Elles peuvent donc effectuer des opérations de tri dans ces cours et envoyer les bois qui ne répondent pas à leurs exigences vers d'autres usines [Andersson, 2016]. Selon Widmer [2012], il y a nécessité de refaire le triage à l'usine lorsqu'il y a une absence de procédures de suivi du bois de la forêt vers les usines, pour une meilleure efficacité des usines de transformation.

Dans l'est du Canada, Chauhan *et al.* [2009] affirment que les entreprises forestières considèrent deux classes de diamètre, c'est-à-dire une classe de diamètre dont la valeur est inférieure à un seuil donné et une autre classe de diamètre dont la valeur est supérieure à ce même seuil. Le modèle utilisé par ces entreprises considère aussi la caractéristique longueur. D'après ces chercheurs, la caractéristique longueur est intimement liée à la caractéristique diamètre. Une grande importance est accordée au diamètre de la bille de bois car le traitement de ces billes se fait dans des machines programmées pour des valeurs spécifiques de diamètres.

## 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette recherche consiste à analyser diverses façons de trier le bois en forêt, afin d'augmenter la valeur obtenue de la fibre tout en abaissant les coûts de transport de la chaîne de valeur forestière.

Dans le but d'atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord analysé la littérature pour mieux comprendre l'importance du triage en forêt et les stratégies actuellement étudiées et utilisées dans le secteur. Par la suite, en nous basant sur une partie d'un réseau existant constitué de diverses zones de récolte et de scieries, nous avons procédé à la collecte de données nécessaires à la modélisation. Nous avons dès lors mis sur pied un modèle mathématique qui, à partir du bois disponible en forêt, des distances séparant les forêts des usines et les distances inter-usines, de même que des demandes propres à chaque usine, est en mesure de déterminer les méthodes de tri à utiliser et les

volumes à transporter pour minimiser les coûts. Les résultats générés par le modèle ont été étudiés et une analyse de sensibilité réalisée. Les résultats ont été comparés d'après les volumes de piles transportées de la forêt aux usines, le volume reçu par chaque usine, le volume de bois échangé inter-usines ainsi que le coût de transport et d'échange de bois.

La chaîne de valeur forestière à la base de l'étude est inspirée d'une partie du réseau d'une entreprise forestière québécoise. Cette organisation est un des principaux fabricants de bois d'œuvre dans l'est du Canada. La chaîne considérée est plus particulièrement constituée de 18 forêts et de 3 usines (Usine de Saint-Hilarion, Usine de Saint-Just-de-Bretenières et Usine de Saint-Pamphile). À l'intérieur de cette chaîne, le bois est récolté puis trié dans la forêt sous forme de piles. Ces piles sont ensuite transportées vers les cours à bois associées à des usines de transformation (scieries). Une fois dans ces cours, les piles de bois sont décomposées en produits unitaires pour satisfaire la demande de l'usine ou, au besoin, transportés vers une autre usine pour combler la demande de celle-ci. La figure 1 présente le réseau étudié.

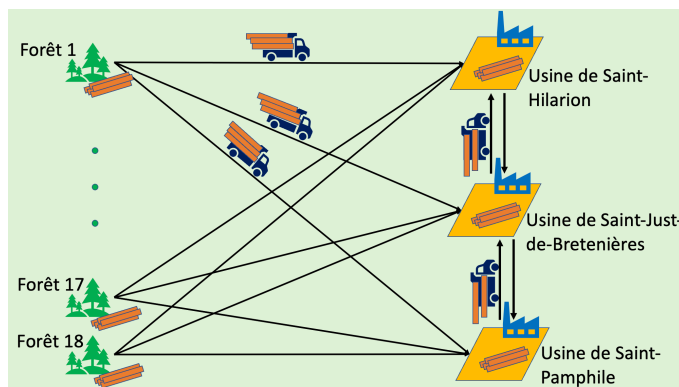


Figure 1. Chaîne de valeur utilisée pour mener l'étude

Deux types d'usines ont par ailleurs été considérées dans l'étude, soit des usines spécialisées et des usines non-spécialisées. Une usine spécialisée est une usine dont la demande comporte des caractéristiques de bois spécifiques, propres à celle-ci. Les types de bois demandés par une telle usine sont donc différents de ceux demandés par une autre usine. Une usine non-spécialisée répond à une demande composée de certains types de bois similaires à ceux demandés par les autres usines. Une telle usine non-spécialisée peut donc traiter du bois présentant les mêmes caractéristiques que celles demandées par une autre usine.

Une pile est un ensemble de bois ayant une caractéristique commune ou une combinaison de plusieurs caractéristiques. Dans notre étude, le bois est un produit caractérisé principalement par sa longueur, son diamètre et son essence. Ainsi une pile A classée suivant sa longueur pourrait être constituée de billots de bois inclus à l'intérieur d'un intervalle de longueur prédéterminé. Par exemple, cette pile A pourrait reposer sur un intervalle de longueur allant de 9 à 11 pieds. Le nombre de classes de bois dans une méthode de triage correspond aux intervalles de longueur et de diamètre considérés pour chaque méthode de tri. Si on reprend l'exemple précédent, la méthode de triage par longueur pourrait générer deux classes, la pile A et la pile B, la pile B reposant plutôt sur un intervalle de longueur allant de 11 à 15 pieds.

### 3.1 Modèle mathématique

Dans le but de trouver la meilleure façon de trier le bois à chaque forêt, nous avons eu recours à la programmation linéaire en nombres entiers mixte. Un modèle a donc été mis sur pied afin de choisir la méthode de tri la plus efficace pour chaque forêt en utilisant les données de volumes de bois disponibles ainsi que les distances forêt-usines et inter-usines. Les décisions prises par le modèle permettent donc d'optimiser le transport du bois par le biais de l'application de la bonne méthode de triage dans chaque forêt.

Afin de développer le modèle mathématique, des hypothèses ont dû être posées. Elles sont résumées comme suit :

- On se limite aux opérations de triage, de transport forêt-usines et inter-usines et de stockage ;
- Les opérations de triage se font en forêt ;
- Une seule méthode de tri est utilisée par forêt ;
- Une pile peut être transportée vers plusieurs usines ;
- Tous les produits de chaque forêt et de mêmes caractéristiques doivent être mis dans un même type de pile ;
- Le bois échangé inter-usines est sous forme de billots qui ont été extraits des piles décomposition à l'usine ;
- Le bois transporté de la forêt vers les usines est toujours sous forme de piles ;
- Tout le bois doit être transporté et stocké dans les cours à bois associées aux usines ;
- On ne considère pas les cours à bois intermédiaires.

Les ensembles, paramètres, indices et variables de décisions utilisés dans le modèle sont les suivants :

Ensembles :

F : Ensemble des forêts.

U : Ensemble des usines.

Z : Ensemble des produits.

P : Ensemble des piles.

C : Ensemble des méthodes de tri.

Paramètres :

$A_{zf}$  : Quantité de produits z à la forêt f en  $m^3$ .

$D_{zu}$  : Demande de l'usine u en produit z en  $m^3$ .

$CU_{uv}$  : Coût de transport de l'usine u à l'usine v en  $\$/m^3$ .

$CF_{fu}$  : Coût de transport de la forêt f à l'usine u en  $\$/m^3$ .

$Q_{zp}$  : Coefficient dans l'ensemble  $\{0,1\}$  présentant la proportion de chaque type de bois z à mettre dans la pile p.

$SC_c$  : Coût de la méthode de triage c en  $\$/m^3$ .

$CS_u$  : Coût unitaire de stockage à l'usine u en  $\$/m^3$ .

$B_{0u}$  : Stock initial dans l'usine u en  $m^3$ .

$C_p$  : Numéro de la méthode de tri utilisée pour générer la pile p.

$F_p$  : Forêt origine de la pile p.

Variables de décisions :

$b_{zu}$  : Quantité de produit z stocké à l'usine u en  $m^3$ .

$m_{zuv}$  : Quantité de produit z transféré de l'usine u vers l'usine v en  $m^3$ .

$k_{pu}$  : Portion de la pile p à envoyer vers l'usine u (un volume, en  $m^3$ ).

$r_{cf}$  : 1 si la méthode de tri c est sélectionnée à la forêt f, 0 autrement.

La fonction objectif du modèle d'optimisation cherche à minimiser le coût de la chaîne de valeur forestière.

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{c \in C} SC_c * r_{cf} + \sum_{f \in F} \sum_{u \in U} CF_{fu} k_{pu} + \sum_{u \in U} CS_u b_{zu} \\ + \sum_{u \in U} \sum_{v \in U} \sum_{z \in Z} CU_{uv} m_{zuv}$$

Le premier terme de la fonction objectif (1) représente le coût de tri du bois en forêt. Le deuxième terme représente le coût de transport des piles de bois triées de la forêt aux usines. Le troisième terme représente le coût de stockage du bois aux usines et le quatrième terme représente le coût d'échange de bois inter-usines. Cette fonction est soumise à certaines contraintes :

$$\sum_{c \in C} r_{cf} = 1 \quad \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{u \in U} k_{pu} = V_p * r_{c_p f_p} \quad \forall p \in P, C_p \in C, f_p \in F \quad (3)$$

$$b_{zu} = B_{0u} + \sum_{v \in U} (m_{zvu} - m_{zuv}) - D_{zu} + \sum_{p \in P} Q_{zp} * k_{pu} \\ \forall z \in Z, \forall u \in U \quad (4)$$

$$r_{cf} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, \forall f \in F \quad (5)$$

$$b_{zu}, m_{zuv}, k_{pu} \geq 0 \quad \forall z \in Z, \forall v \in U, \forall u \in U, \forall f \in F, \\ \forall p \in P \quad (6)$$

L'ensemble de contraintes (2) assure qu'une seule méthode de tri est employée à chaque forêt. L'ensemble de contraintes (3) assure le transport de la quantité totale du bois disponible dans toutes les forêts vers les usines. Dans cette contrainte, la variable  $k_{pu}$  représente la proportion de la pile  $p$  à envoyer vers l'usine  $u$ , avec  $V_p$  comme volume total de la pile  $p$ . La variable  $r_{c_p f_p}$  contient l'information sur la méthode de triage utilisée pour générer la pile  $p$  ainsi que sa forêt d'origine. Elle vaut 1 si la pile  $p$  est formée par la méthode de triage  $c$  dans la forêt  $f$ , et 0 autrement. L'ensemble de contraintes (4) est une contrainte d'équilibre de flux. Pour chaque usine, cette contrainte prend en compte le stock initial de chaque usine, la quantité de bois reçue par cette usine, celle provenant des forêts et celle transportée depuis les autres usines ainsi que la demande à satisfaire. L'ensemble de contraintes (5) spécifie que la variable de choix de méthode de tri pour chaque forêt est exprimée en nombres binaires. L'ensemble de contraintes (6) sont des contraintes de non-négativité.

## 4 EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

Le modèle mathématique mis sur pied a ensuite été exploité afin d'étudier les avantages du recours à des stratégies de triage du bois dans la chaîne de valeur forestière. Des scénarios ont été analysés concernant l'impact du changement du nombre de types de bois lors du triage ainsi que l'effet du caractère de spécialisation des usines.

### 4.1 Scénarios

Dans l'expérimentation, nous avons considéré 4 méthodes de triage soit:

- Tri par longueur et diamètre ;
- Tri par longueur ;
- Tri par diamètre ;
- Tri par essence.

Le 1<sup>er</sup> scénario, noté SC0, est le scénario qui ne considère pas de triage en forêt. Les scénarios suivants, soit SC1, SC2 et SC3, considèrent pour leur part 4 méthodes de triage du bois en forêt. Le tableau 1 présente d'ailleurs ces scénarios.

Chaque méthode de triage génère un nombre spécifique de types de piles en fonction du nombre de caractéristiques prises en compte par la méthode de tri. D'après le tableau 1, le scénario SC1 génère donc 20 types de piles en forêt, le SC2, 21 types de piles et le SC3, 24 types de piles.

#### 4.1 Résultats: usines non-spécialisées

##### 4.1.1 Transport du bois de la forêt aux usines

Les premiers résultats obtenus concernent le cas d'usines non-spécialisées. Pour le scénario SC0 qui n'implique aucun triage en forêt (voir Tableau 2), le modèle mathématique ne considère pas le type de bois en forêt puisqu'il n'y a pas de triage, se limitant alors à considérer uniquement le volume de bois demandé par les usines.

En examinant les résultats, on observe que le volume de bois envoyé vers les usines est proche du volume de bois demandé par celles-ci. Puisque les usines sont non-spécialisées, elles peuvent traiter des types de bois identiques. Lorsque la demande n'est pas satisfaite lors du premier transport du bois de la forêt aux usines, elle sera comblée lors des opérations d'échange de bois inter-usines.

**Tableau 1. Détails des scénarios SC0, SC1, SC2 et SC3**

SCi	Caractéristiques considérées	Nombre de classes	Nombre de types de piles par méthode	Nombre de types de piles par scénario
SC0	-	1	1	1
SC1	Longueur	3	12	20
	Diamètre	4		
	Longueur	3	3	
	Diamètre	3	3	
	Essence	2	2	
SC2	Longueur	3	12	21
	Diamètre	4		
	Longueur	4	4	
	Diamètre	3	3	
	Essence	2	2	
SC3	Longueur	4	16	24
	Diamètre	4		
	Longueur	3	3	
	Diamètre	3	3	
	Essence	2	2	

Pour le scénario SC1 (voir Tableau 2), les piles de bois formées en forêt peuvent contenir davantage de types de bois que ce qui est demandé par chaque usine. Ce scénario correspond également au cas où un nombre minimum de classes de caractéristiques est présent, c'est-à-dire que les valeurs de longueur ou de diamètre du bois présentes dans chaque pile appartiennent à une grande plage de valeurs. Les piles ne permettent donc pas d'avoir une bonne classification des billes. Par conséquent, les usines reçoivent des volumes de bois qui ne sont pas nécessairement demandés, puisqu'inclus dans la pile reçue, ce qui engendre des opérations d'échange de bois inter-usines.

Pour le scénario SC2 (voir Tableau 2), on remarque que le nombre de types de piles et le volume transporté sont identiques au scénario SC1.

Pour le scénario SC3 (voir Tableau 2), l'augmentation du nombre de classes de longueur dans la méthode de triage par longueur et diamètre engendre une augmentation du nombre de types de piles envoyées aux usines. En effet, la formation de plus de types de piles reflète l'amélioration du niveau de détail des piles, c'est-à-dire qu'il y a moins de variation dans la valeur des longueurs de billots. Une augmentation au niveau du nombre de classes de la méthode de triage par longueur et diamètre permet donc satisfaire efficacement la demande des usines qui effectuent ainsi moins d'échange de bois inter-usines.

#### 4.1.2 Transport du bois inter-usines

Pour le scénario SC0 (voir Tableau 3), on remarque que le volume de bois échangé inter-usines est nettement inférieur au volume de bois transporté de la forêt aux usines. Ce volume échangé est faible en raison du caractère non-spécialisé des usines réceptrices de bois. En effet, la plupart de leur demande est satisfaite lors du premier transport du bois de la forêt aux usines. Le reste de la demande est satisfait par les opérations d'échange inter-usines.

Pour le scénario SC1 (voir Tableau 4), le volume de bois échangé est de 2 244 m<sup>3</sup> sous forme de 131 types de piles, dont 94,20% (ratio du volume sortant de Saint-Hilarion par rapport au volume total échangé) de ce volume part de l'usine de Saint-Hilarion vers les usines de Saint-Just et de Saint-Pamphile. L'usine de Saint-Just échange 0,2% du bois qui lui a été envoyé (pourcentage obtenu en considérant le volume envoyé de la forêt vers Saint-Just – volume sortant de Saint-Just vers les autres usines / volume envoyé de la forêt vers Saint-Just).

Pour le scénario SC2 (voir Tableau 4), les usines échangent entre elles 131 types de produits, représentant 2 244 m<sup>3</sup> de bois, un résultat similaire à celui du 1<sup>er</sup> scénario SC1. L'augmentation du nombre de classes de la méthode de triage par longueur ne semble donc pas avoir d'influence sur le type et le volume de bois échangé.

Pour le scénario SC3 (voir Tableau 5), les usines échangent entre elles 103 types de produits, une valeur inférieure de 28 types de produits comparé à celle des scénarios SC1 et SC2. Lors de l'ajout de la classe de longueur dans la méthode de triage par longueur et diamètre, le volume de bois échangé inter-usines passe de 2 244 m<sup>3</sup> à 2 147 m<sup>3</sup> de bois. De plus, le volume de bois échangé entre les usines est réduit avec ce scénario lorsque le compare avec le scénario sans triage SC0 (2,14% plutôt que 3,13%). Cette diminution reflète l'effet de l'application du triage pour le cas des usines non-spécialisées.

Pour les scénarios SC1, SC2 et SC3, (voir tableaux 2, 3, 4 et 5) la diminution des pourcentages d'échange de bois entre les usines par rapport au scénario SC0 met en évidence l'importance des opérations de triage dans la forêt avant d'effectuer les opérations de transport vers les usines.

**Tableau 2. Nombre et volume de piles transportées en m<sup>3</sup> de la forêt aux usines pour les scénarios SC0, SC1, SC2 et SC3 pour les usines non-spécialisées**

SCi	Usine destination	St-Hilarion	St-Just	St-Pamphile
SC0	Nombre de types de piles	0	0	0
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	24 050	39 219	37 014
SC1	Nombre de types de piles	21	30	31
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	23 702	39 205	37 377
SC2	Nombre de types de piles	21	30	31
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	23 702	39 205	37 377
SC3	Nombre de types de piles	43	46	44
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	23 610	39 269	37 405

**Tableau 3. Nombre de types de bois et volumes de bois transportés inter-usines en m<sup>3</sup> pour le scénario SC0 pour les usines non-spécialisées**

Usines		SC0	
Usine source	Usine destination	Nombre de types de produits	Volume en m <sup>3</sup>
St-Hilarion	St-Just	40	1 231
	St-Pamphile	49	1 503
St-Just	St-Hilarion	28	340
	St-Pamphile	5	1
St-Pamphile	St-Hilarion	25	58
	St-Just	2	4
Total		149	3 137
% d'échange par rapport au volume reçu de la forêt			3,13

**Tableau 4. Nombre de types de bois et volumes de bois transportés inter-usines en m<sup>3</sup> pour les scénarios SC1 et SC2 pour les usines non-spécialisées**

Usines		SC1 et SC2	
Usine source	Usine destination	Nombre de types de produits	Volume en m <sup>3</sup>
St-Hilarion	St-Just	41	985
	St-Pamphile	51	1 129
St-Just	St-Hilarion	13	74
	St-Pamphile	6	4
St-Pamphile	St-Hilarion	16	52
	St-Just	4	1
Total		149	2 244
% d'échange par rapport au volume reçu de la forêt			2,24

**Tableau 5. Nombre de types de bois et volumes de bois transportés inter-usines en m<sup>3</sup> pour le scénario SC3 pour les usines non-spécialisées**

Usines		SC3	
Usine source	Usine destination	Nombre de types de produits	Volume en m <sup>3</sup>
St-Hilarion	St-Just	38	921
	St-Pamphile	43	1 098
St-Just	St-Hilarion	8	73
	St-Pamphile	5	4
St-Pamphile	St-Hilarion	7	50
	St-Just	2	1
Total		103	2 147
% d'échange par rapport au volume reçu de la forêt			2,14

## 4.2 Résultats : usines spécialisées

### 4.2.1 Transport du bois de la forêt aux usines

Pour ce cas, les demandes des usines en termes de types de bois sont différentes les unes et les autres. En effet, toutes les usines dites spécialisées traitent chacune des types de bois distincts. Pour tous les scénarios (voir tableau 6), on remarque que le volume de bois envoyé de la forêt vers l'usine de Saint-Pamphile est toujours nul en raison de la grande distance de transport entre les différentes forêts et cette usine.

En ce qui concerne le scénario SC0, le modèle se base principalement sur les distances entre les forêts et les usines pour faire les optimisations. Le bois est donc principalement transporté de la forêt vers l'usine de Saint-Hilarion, puis les opérations d'échanges inter-usines entrent en jeu. Le volume de bois échangé est alors de 42 981 m<sup>3</sup>, ce qui représente 42,86% du volume total du bois reçu de la forêt (voir tableau 7)

Pour le scénario SC1 (voir tableau 6), on remarque que 78 645m<sup>3</sup> (représentant 78,42% du volume de bois disponible en forêt) a été transporté vers l'usine de Saint-Hilarion sous forme de 75 types de piles. Le reste du bois a été acheminé vers l'usine de Saint-Just sous forme de 22 types de piles. Pour les scénarios SC2 et SC3 (voir tableau 6), l'ajout d'une classe de longueur dans la méthode de triage par longueur n'a pas eu d'effet sur le volume de bois transporté.

Les scénarios SC1, SC2 et SC3 (voir Tableau 8) montrent que les usines échangent entre elles 20 types de produits, représentant 21 641 m<sup>3</sup> de bois, sauf l'usine de Saint-Just car le premier envoi de bois de la forêt lui a permis de satisfaire la totalité de sa demande.

Pour le scénario sans triage SC0, le pourcentage du volume de bois échangé entre les usines est de 42,86% (voir tableau 7), tandis que le pourcentage du volume de bois échangé entre les usines pour les autres scénarios est de 21,58%, ce qui représente une diminution de 50,35%. Cette diminution du volume de bois échangé inter-usines met de nouveau en évidence l'importance de l'application du triage dans les forêts avant d'effectuer les opérations de transport vers les usines, particulièrement pour le cas d'usines spécialisées.

## 5 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Dans cette section, nous allons étudier l'effet du changement du coût de triage sur la distribution des méthodes de tri dans les forêts et sur les opérations de transport des piles de la forêt aux usines. La méthode de triage adoptée pour cette analyse est celle par longueur et diamètre. Cette méthode permet la génération du plus grand nombre de piles en forêt par rapport aux autres méthodes de triage. Cette analyse mettra en évidence l'importance de son application en étudiant sa persistance suite à une augmentation incrémentale de son coût.

Le coût de triage de départ utilisé est de 0,5\$/m<sup>3</sup>. On considère ensuite 7 tests d'analyse basés sur une augmentation chaque fois de 2% (soit de 0,01\$/m<sup>3</sup>) du coût de la méthode de triage la plus détaillée (méthode de tri par longueur et diamètre). Cette augmentation engendre la diminution de l'application de cette méthode de triage dans les forêts et n'entraîne l'élimination totale de son application que lors du septième test, ce qui explique le choix d'effectuer 7 tests. Puisque cette méthode permet de générer 16 types de piles triées par longueur et diamètre, le cas du scénario SC3, son élimination de quelques

forêts conduit à une diminution du nombre de types de piles formées, c'est-à-dire que le nombre de piles de bois transportées de la forêt aux usines est affecté. La Figure 2 présente l'évolution du nombre de types de piles transportées de la forêt aux usines en fonction des tests d'analyse réalisés.

**Tableau 6. Nombre et volume de piles transportées en m<sup>3</sup> de la forêt aux usines pour les scénarios SC0, SC1, SC2 et SC3 pour les usines spécialisées**

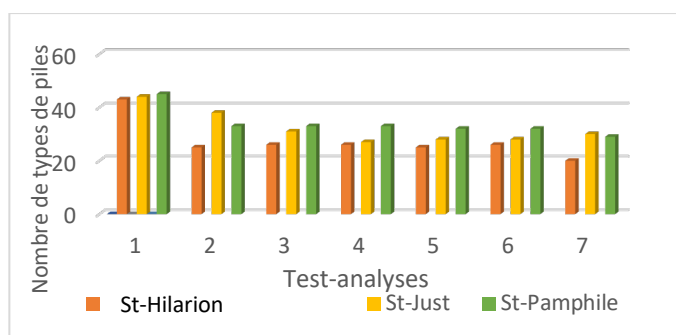
SCi	Usine destination	St-Hilarion	St-Just	St-Pamphile
SC0	Nombre de types de piles	0	0	0
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	92 254	8 030	0
SC1	Nombre de types de piles	75	22	0
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	78 645	21 641	0
SC2	Nombre de types de piles	75	22	0
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	78 645	21 641	0
SC3	Nombre de types de piles	75	55	0
	Volume transporté en m <sup>3</sup>	78 645	21 641	0

**Tableau 7. Nombre de types de bois et volumes de bois transportés en m<sup>3</sup> de la forêt aux usines pour les scénarios SC0 pour les usines spécialisées**

Usines		SC0	
Usine source	Usine destination	Nombre de types de produits	Volume en m <sup>3</sup>
St-Hilarion	St-Just	10	18 814
	St-Pamphile	10	18 814
St-Just	St-Hilarion	56	2 677
	St-Pamphile	10	2 677
St-Pamphile	St-Hilarion	0	0
	St-Just	0	0
Total		86	42 981
% d'échange par rapport au volume reçu de la forêt			42,86

**Tableau 8. Nombre de types de bois et volumes de bois transportés en m<sup>3</sup> de la forêt aux usines pour les scénarios SC1, SC2 et SC3 pour les usines spécialisées**

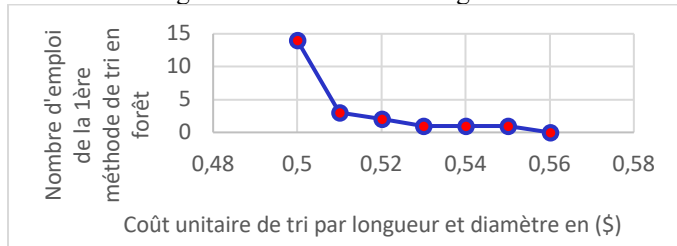
Usines		SC1, SC2 et SC3	
Usine source	Usine destination	Nombre de types de produits	Volume en m <sup>3</sup>
St-Hilarion	St-Just	0	0
	St-Pamphile	10	21 490
St-Just	St-Hilarion	10	151
	St-Pamphile	0	0
St-Pamphile	St-Hilarion	0	0
	St-Just	0	0
Total		20	21 641
% d'échange par rapport au volume reçu de la forêt			21,58



**Figure 2. Nombre de types de piles transportées de la forêt aux usines en fonction des 7 tests d'analyse réalisés**

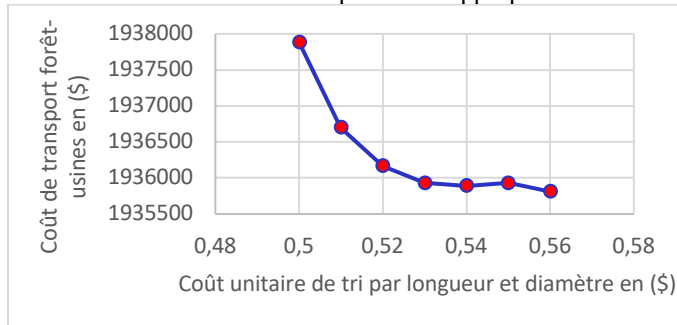
*Coût de la méthode de triage par longueur et diamètre :*

La figure 3 montre l'évolution du nombre de fois que la méthode de triage par longueur et diamètre est utilisée dans les forêts en fonction de l'augmentation du coût de triage.



**Figure 3. Nombre de fois que la méthode de triage par longueur et diamètre est utilisée en forêt en fonction de son coût**

Une augmentation du coût de 2% engendre son élimination de 11 forêts. Puis, chaque augmentation de 2% engendre une faible diminution du nombre de fois qu'elle est appliquée.



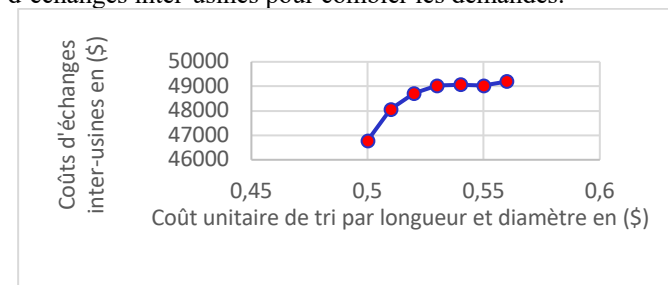
**Figure 4. Coût de transport forêt-usines en fonction du coût de la méthode de tri par longueur et diamètre**

*Coût de transport forêt-usines :*

D'après la figure 4, la diminution du nombre d'applications de la méthode de triage par longueur et diamètre suite à l'augmentation de son coût permet de diminuer le coût de transport du bois de la forêt aux usines de 2 074\$. Cette diminution est directement liée à la diminution de l'application de la méthode de triage en forêt.

*Coût de transport inter-usines :*

Tel que le montre la courbe de la figure 5, l'augmentation du coût de la méthode de triage par longueur et diamètre engendre une augmentation du coût d'échange de bois inter-usines de 2 414\$. Ceci s'explique par le fait que lorsqu'on diminue l'application de la méthode de triage qui génère le plus de piles en forêt, on diminue le niveau de détail de tri et, par conséquent, on augmente l'envoi de piles aux usines qui ne correspondent pas parfaitement à leur demande. Ceci engendre plus d'échanges inter-usines pour combler les demandes.

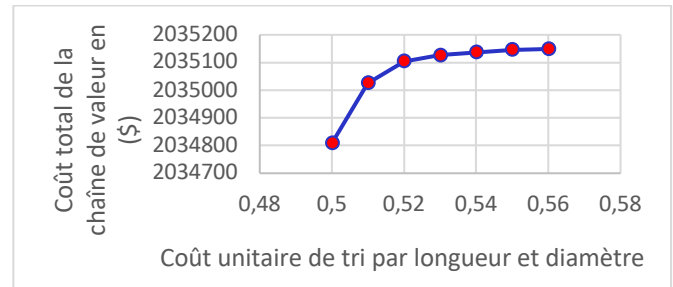


**Figure 5. Coût d'échange de bois inter usines**

*Coût total de la chaîne :*

La valeur de la fonction objectif correspond au coût de la chaîne de valeur considérée dans notre étude. Le coût total comprend

le coût de tri en forêt, le coût de transport de bois de la forêt aux usines et le coût de transport de bois inter-usines. La figure 6 montre l'impact du coût de tri sur le coût total de la chaîne. Le caractère ascendant de la courbe du coût total de transport (voir figure 6) s'explique par le fait que l'augmentation du coût de transport inter-usine est plus importante que la diminution du coût du transport forêt-usines. Le caractère non linéaire de la courbe s'explique par l'élimination non linéaire de l'application de la méthode de tri par longueur et diamètre en forêt.



**Figure 6. Coût de la chaîne en fonction du coût de la méthode de triage par longueur et diamètre**

## 6 DISCUSSION

Cette étude a pour objectif de minimiser les coûts de transport du bois de la forêt aux usines et les opérations d'échange de bois inter-usines, grâce à une sélection optimisée des modes de tri en forêt. Les méthodes de triage considérées se différencient selon le nombre de piles qu'elles peuvent générer, les caractéristiques de bois prises en compte dans le tri, ainsi que le nombre de classes associées à ces caractéristiques.

L'augmentation du nombre de classes a permis d'avoir un tri plus détaillé, optimisant ainsi davantage les opérations de transport et diminuant les échanges inter-usines. Ceci est illustré dans le test de scénario SC3 dans le cas des usines non-spécialisées dont une augmentation du nombre de classes de la caractéristique « longueur » dans la méthode de triage par longueur et diamètre a engendré une augmentation du nombre de piles de bois formées en forêt. L'augmentation du nombre de piles a ainsi permis d'avoir des piles plus détaillées.

Les opérations de tri en forêt sont aussi apparues plus efficaces dans le cas d'usines spécialisées. En effet, lorsque les usines étaient non-spécialisées, les échanges de bois étaient faibles puisque la plupart des usines étaient en mesure de traiter du bois présentant les mêmes caractéristiques. Dans le cas des usines spécialisées, les échanges de bois sont apparus plus élevés en raison des besoins en bois spécifiques à chacune d'elles.

L'importance de la méthode de triage par longueur et diamètre a également pu être observée en incrémentant son coût et en suivant le nombre de fois qu'elle était appliquée en forêt. Plus elle était employée, plus elle était efficace pour minimiser le coût de transport. La diminution de son application en forêt engendrait au contraire une augmentation du coût total de transport et, par conséquent, une augmentation du coût total de la chaîne de valeur. Cette étude a eu recours à des données réelles provenant d'une compagnie forestière québécoise afin d'étudier les effets de diverses stratégies de tri en forêt sur la chaîne de valeur. Les résultats ont notamment démontré que l'application du triage par longueur et diamètre réduit le volume de bois échangé entre les usines par rapport au cas sans triage. En se basant sur cette analyse, il semble donc que cette compagnie aurait tout avantage à considérer l'utilisation d'un

outil comme celui mis sur pied durant cette étude. De cette façon, elle pourrait générer virtuellement diverses possibilités de piles de bois pouvant être formées en forêt et ainsi mieux choisir ses stratégies de triage et de transport suivant la nature de ses usines et les caractéristiques de ses sites d'approvisionnement. De telles informations, combinées avec d'autres données sur les forêts et les usines tels que leurs nombres ou leurs localisations, lui permettrait de bien supporter la prise de décision quant à l'approvisionnement forestier et d'ainsi tendre vers une chaîne de valeur encore plus efficiente.

## 7 CONCLUSIONS

Cet article visait à étudier et à optimiser le transport et le triage du bois dans la chaîne de valeur forestière. Pour ce faire, une revue de la littérature a été menée pour connaître les stratégies et les techniques utilisées à ce jour afin d'optimiser les opérations de transport du bois. Un modèle d'optimisation a ensuite été créé dans le but de connaître la bonne distribution des méthodes de triage dans les forêts à retenir, le volume et le type de bois à envoyer de la forêt aux usines ainsi que le bois à échanger entre les usines pour satisfaire la demande. Le modèle reposait sur un réseau constitué de 18 forêts et de 3 usines. Quatre scénarios furent testés à l'aide du modèle pour le cas d'usines non-spécialisées et d'usines spécialisées. Le scénario de base sans triage SC0 pour le cas des usines non-spécialisées a entraîné un volume de bois échangé inter-usine de 3 137 m<sup>3</sup> de bois. Le scénario SC3 considérant quatre possibilités de méthodes de triage en forêt avec le plus grand nombre de types de piles a quant à lui mené à un volume de bois échangé inter-usines de 2 147 m<sup>3</sup>. La même logique a pu être observée pour le cas d'usines spécialisées. Pour les mêmes données d'approvisionnement de bois, les opérations de triage en forêt étaient par ailleurs plus bénéfiques pour les usines spécialisées que pour les usines non-spécialisées.

Le modèle proposé pourrait agir comme outil d'aide à la décision pour les entreprises forestières afin de trouver la bonne distribution des méthodes de triage en forêt qui permettraient de satisfaire efficacement la demande de leurs usines et de minimiser les coûts de transport. Une prochaine étape à l'étude pourrait consister à ajouter d'autres forêts et usines dans le réseau. La notion d'incertitude sur les données d'approvisionnement du bois pourrait également être considérée, permettant d'avoir plus de possibilités de piles à former en forêt.

## 8 RÉFÉRENCES

Abbas, D., Handler, R., Dykstra, D., Hartsough, B., & Lautala, P. (2013). Cost Analysis of Forest Biomass Supply Chain Logistics. *Journal of Forestry*, 111(4), 271–281.

Alam, M. B., Shahi C., Pulkki R. (2014). Impact économique de l'amélioration de l'information sur les inventaires forestiers et des chantiers de marchandisage dans la chaîne d'approvisionnement de l'industrie des produits forestiers. *Plan socio-économique Sci.* 48(3): 189 – 197

Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J., & Palmer, H. (1998). Gestion logistique et coûts d'approvisionnement en combustible biomasse. *Int J Phys Distribution Logistique Manag.* 28 : 463-477 .

Audy, J.F., D'Amours, S., & Rönnqvist, M. (2012). Méthodes de planification et systèmes d'aide à la décision dans les problèmes de tournées de véhicules pour le transport du bois : une revue. Montréal : CIRRELT .

Chauhan, S. S., Frayret, J. M., & LeBel, L. (2009). Supply

network planning in the forest supply chain with bucking decisions anticipation. *Annals of Operations Research*, 190(1), 93–115. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0621-5>

Dramm, J.R., Jackson, G.L., Wong, J. (2002). *Examen des chantiers de triage de journaux*. Rapport technique général du Service forestier de l'USDA, FPL-GTR-132., Laboratoire des produits forestiers, Madison, WI, 39 pages.

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.

El Hachemi, N., El Hallaoui, I., Gendreau, M., & Russeau, L. M. (2015). Flow-based integer linear programs to solve the weekly log-truck scheduling problem. *Ann. Oper. Res.* 232(1) :87-97.

Flisberg, P., Liden, B., & Rönnqvist, M. (2009). A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks. *Comput. Oper. Res.* 36(4) : 1122-1144.

Gronalt, M., & Rauch, P. (2018). Analyzing railroad terminal performance in the timber industry supply chain – a simulation study. *International Journal of Forest Engineering*, 29(3), 162–170.

Han, Han-Sup, E M Ted Bilek, John Rusty Dramm, Dan Loeffler, Dave Calkin. (2011). Financial Feasibility of a Log Sort Yard Handling Small-Diameter Logs: A Preliminary Study. *Western Journal of Applied Forestry*, 26(4): 174–82. <http://cfs.nrcan.gc.ca/entrepotpubl/pdfs/39337.pdf>

Lehoux, N., Marier, P., D'Amours, S., Ouellet, D., Beaulieu, J. 2012. *Le réseau de création de valeur de la fibre de bois canadienne*, rapport CIRRELT, 228 pages.

Palmgren, M., Rönnqvist, M., & Värbrand, P. (2004). A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem. *Int. Trans. Operational. Res.* 11(4) : 447.

Perić, M., Antonijević, D., Komatina, M., Bugarski, B., & Rakin, M. (2020). Life cycle assessment of wood chips supply chain in Serbia. *Renewable Energy*, 155, 1302–1311.

Pichler, G., Sandak, J., Picchi, G., Kastner, M., Graifenberg, D., Stampfer, K., & Kühmaier, M. (2022). Timber Tracking in a Mountain Forest Supply Chain : A Case Study to Analyze Functionality, Bottlenecks, Risks, and Costs. *Forests*, 13(9), 1373.

Ressources naturelles Canada (2021-2022) : L'état des forêts au Canada – Rapport annuel 2018,

Rix, G., Russeau, L.M., & Pesant, G. (2015). A Column generation algorithm for tactical timber transportation planning. *J. Oper. Res. Soc.* 66(2) : 278-287.

Rönnqvist, M., D'Amours, S., Weintraub, A., Jofre, A., Gunn, E., & Haigh, R.G. (2015). Operations research challenges in forestry : 33 open problems. *Ann. Oper. Res.* 232(1) : 11-40.

Rönnqvist, M., (2003). Optimization in forestry. *Mathematical Programming*, vol. 97, n°1-2, pp. 267-284.

Sessions, J., Kevin, B., Roger, S. 2005. Décisions relatives à l'emplacement du tri des journaux dans des conditions d'incertitude. *Pour Prod J.* 55(12): 53 – 57

Widmer, A. (2012). Vancomycin-resistant enterococci : an ongoing challenge for infection control. *Swiss Medical Weekly*.

Zhang, A., & Huang, G. Q. (2010). A multi-period mixed integer programming model for the problem of relocating a global manufacturing facility. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 27(6), 407–417. <https://doi.org/10.1080/10170669.2010.512772>