

Titre: Intégration de l'incertitude sur les tournées de véhicules et sur
Title: l'horaire de chargement dans le milieu forestier

Auteur: Alexandre Carrier
Author:

Date: 2016

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Carrier, A. (2016). Intégration de l'incertitude sur les tournées de véhicules et sur
l'horaire de chargement dans le milieu forestier [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2114/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2114/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Louis-Martin Rousseau
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DE L'INCERTITUDE SUR LES TOURNÉES DE VÉHICULES
ET SUR L'HORAIRE DE CHARGEMENT DANS LE MILIEU FORESTIER

ALEXANDRE CARRIER

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE EN SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AVRIL 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

INTÉGRATION DE L'INCERTITUDE SUR LES TOURNÉES DE VÉHICULES ET SUR
L'HORAIRE DE CHARGEMENT DANS LE MILIEU FORESTIER

présenté par : CARRIER Alexandre

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

Mme LAHRICHI Nadia, Ph D., présidente;

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

M. GENDREAU Michel, Ph D., membre

REMERCIEMENTS

Dans le cadre de ce projet de recherche, j'aimerais soumettre mes premiers remerciements à Louis-Martin Rousseau. C'est grâce à ce dernier si j'ai pu développer mes connaissances en programmation ainsi qu'en recherche opérationnelle. Ce fut un grand honneur de travailler à ses côtés et je ressors de ce projet de recherche grandi!

Deuxièmement, j'aimerais remercier Christopher Beck, professeur au département de Génie Mécanique et Industriel de l'Université de Toronto. Ce dernier m'a offert la chance et le privilège de séjourner ainsi que de travailler en sa compagnie pendant quatre mois à Toronto. Ce fut une expérience extrêmement enrichissante tant au niveau pédagogique que personnel.

J'aimerais aussi remercier Gregory Rix, étudiant au doctorat au CIRRELT. Gregory m'a beaucoup aidé dans tous les aspects de mon projet et il a toujours été disponible pour me supporter ainsi que pour m'épauler au niveau de la programmation.

Pour conclure, j'aimerais remercier les responsables du réseau VCO (*Value Chain Optimization*) pour leur grand dévouement dans cette organisation qui m'a permis d'en apprendre énormément sur le milieu forestier.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de maîtrise traite d'une partie spécifique de la chaîne de valeur du secteur forestier canadien, soit le transport des billots de bois entre les sites forestiers et les usines de transformation. Cette étude traite, plus spécifiquement, de l'obtention des horaires de tournées de véhicules, selon plusieurs méthodologies combinant la génération de colonnes, l'utilisation de programmes linéaires en nombres entiers (PLNE) ainsi que d'un simulateur. Le générateur de colonnes sert à l'obtention d'un ensemble initial de tournées, tandis que les programmes linéaires en nombres entiers servent à obtenir un horaire final avec des valeurs entières, selon les différentes variables du problème. Le simulateur a comme fonctionnalité la création d'imprévus dans la planification des camions de livraison, selon certains scénarios. La nature de ces imprévus est définie par deux catégories: la première correspond à des imprévus causés par des conditions routières difficiles, lors de perturbations météorologiques. Ces situations de mauvais temps engendrent des désynchronisations sur la planification des tournées de véhicules au niveau des chemins empruntés par les camions forestiers. La deuxième catégorie d'imprévus produite par le simulateur met l'emphase sur la création d'achalandage aux usines de transformation ainsi qu'aux sites forestiers, causés par des camions d'autres compagnies externes œuvrant dans le secteur du bois. L'objectif de cette recherche est d'analyser l'impact de la création d'imprévus sur les horaires de tournées de véhicules, soit la désynchronisation de la planification du transport routier via les outils énumérés ci-haut.

Trois méthodologies ont été utilisées dans cette analyse afin de tester la performance des planifications face aux événements imprévus. La première consiste à générer l'horaire final des tournées des camions entre les sites forestiers et les usines de transformation, par l'entremise du générateur de colonnes et d'un PLNE, qui sont conjointement programmés dans un même modèle en C++. Ensuite, le simulateur ajoute des délais aléatoirement, selon les deux types d'imprévus cités ci-haut, modifiant ainsi, dépendamment de la valeur des paramètres stochastiques, l'horaire final de tournées de véhicules. La seconde méthodologie consiste à utiliser le générateur de colonnes afin d'obtenir un horaire initial, suivi immédiatement de l'ajout d'imprévus par le simulateur, et ce avant l'utilisation du même PLNE programmé en C++. Ce dernier sera ensuite utilisé afin d'obtenir un horaire basé sur la moyenne des temps de passage des camions aux localisations et contenant des valeurs en nombres entiers. Puis, la troisième méthodologie consiste toujours à utiliser, dans le même ordre, le générateur de colonnes ainsi que le simulateur.

Par contre, un PLNE programmé dans le logiciel *AIMMS* servira de solveur, afin de déterminer l'horaire final des tournées de véhicules. De plus, plusieurs réalisations ont été exécutées par le simulateur, créant ainsi des probabilités de passage des camions, selon l'ajout aléatoire de conditions routières difficiles. Le PLNE programmé dans *AIMMS* utilise ces probabilités de passage afin de déterminer un horaire de tournées de véhicules final avec des valeurs entières.

Les imprévus créés par le simulateur ont comme objectif de reproduire certains scénarios conçus pour représenter, le plus fidèlement possible, la réalité observée sur le terrain. Afin de recréer des scénarios réalistes à propos du milieu forestier canadien, les valeurs des paramètres du simulateur ont été modifiées en conséquence. Les paramètres du simulateur en question ont été calibrés selon des hypothèses basées sur des sources d'informations provenant de la compagnie *FPIInnovations* ainsi que du Ministère des Ressources Naturelles du Québec.

L'objectif de cette recherche est d'analyser les conséquences de la génération d'imprévus dans l'horaire de tournées de véhicules, soit le nombre de retards total ainsi que le temps total de délais sur l'ensemble de la flotte de camions. Le but est de comparer les trois méthodologies par l'entremise des délais générés sur les horaires finaux des camions, impactant ainsi la livraison des billots de bois.

Suite à l'obtention des résultats des trois méthodologies, la génération d'imprévus en lien avec des activités externes n'a eu aucun impact significatif sur la planification des tournées de véhicules ainsi que sur la synchronisation de la machinerie, excepté pour la troisième méthodologie, où de l'achalandage aux usines de transformation est à priori présent dans les horaires finaux de tournées de véhicules. Par contre, la création de conditions routières difficiles a engendré des délais de l'ordre de plusieurs heures par période de simulation et par camion.

Sommairement, au niveau des trois méthodologies étudiées dans ce projet de recherche, la deuxième approche, qui consiste à ajouter des délais dans la planification avant la génération des horaires finaux avec le PLNE en C++, a démontré qu'elle réagit mieux face aux imprévus. La première approche démontre des résultats où les délais engendrés par les conditions météorologiques difficiles sont plus considérables. La troisième approche démontre des résultats similaires à la seconde approche, mais après la génération d'imprévus, la moyenne de délais périodiques par camion est légèrement plus élevée que ceux de la seconde approche.

ABSTRACT

The context of this study is concerning one part of the forest sector supply chain: the log-truck planning. This research project is studying different methodologies to generate log-truck schedules, by using a column generation program, two different mixed integer programs and a simulator. The column generation program and the mixed integer programs are used to create feasible schedules for the whole truck fleet, while respecting the different constraints of the log-truck scheduling problem. The simulator is used to generate two different types of delays: the first type is concerning the generation of difficult road conditions. The second type of delay is about the creation of traffic at mills and forest sites, caused by trucks from other companies. These two types of delays generate disturbance on the initial log-truck schedule planning. In order to analyze these disturbances on the log-truck network, three methodologies have been developed to generate delays in the log-truck schedule planning. The first methodology relates the use of the column generation program, follow by a mixed integer program in C++ to generate feasible schedules with integer values. After, the simulator is used to insert delays in the schedules. The second methodology relates also the use of the column generation program, but followed this time by the simulator, that inserts delays before using the mixed integer program (MIP) in C++ and having an integer schedule. And the third methodology is also using the column generation program, follow by the simulator. However, instead of using the MIP in C++, a new MIP in the software *AIMMS* is used to find an integer solution. The objective here is to analyze the different results of each methodology, that is to say the total amount of delays for each type, the total delay time and the disturbance on the initial schedules. The analysis of these three methodologies is made on several scenarios that reflect the reality observed in the forest sector as much as possible. The results of this research show that the generation of external jobs at mills and forests doesn't have a significant impact on the initial log-truck planning, only on the third methodology, where there's already some congestion at locations in the schedules. But, the generation of difficult road conditions by the simulator affects significantly the round trip schedules, with a few hours of delays per truck in their activities, regardless the approach. If we compare the three methodologies, the second one shows better results for the total average time delays per truck, with a smaller number of delays in the truck schedules, but this model needs more round trips to satisfy the demand.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| REMERCIEMENTS | III |
| RÉSUMÉ..... | IV |
| ABSTRACT | VI |
| TABLE DES MATIÈRES | VII |
| LISTE DES ANNEXES | IX |
| LISTE DES TABLEAUX..... | X |
| LISTE DES FIGURES | XII |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS | XIII |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Étude de cas dans le milieu forestier..... | 2 |
| 1.2 Les objectifs | 3 |
| 1.3 Revue de la littérature | 5 |
| 1.3.1 Problèmes de transport | 5 |
| 1.3.2 La recherche opérationnelle dans le milieu forestier | 12 |
| CHAPITRE 2 PROGRAMMES UTILISÉS..... | 17 |
| 2.1 Le générateur de colonnes..... | 17 |
| 2.1.1 Le modèle mathématique | 18 |
| 2.2 Le programme linéaire en nombres entiers (C++) | 22 |
| 2.3 Le simulateur..... | 23 |
| 2.4 Le programme linéaire en nombre entier (<i>AIMMS</i>) | 27 |
| 2.4.1 Le modèle mathématique | 28 |
| CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIES..... | 31 |
| 3.1 La première approche | 31 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.2 | La deuxième approche | 33 |
| 3.3 | La troisième approche | 34 |
| CHAPITRE 4 LES SCÉNARIOS DE SIMULATION | | 36 |
| 4.1 | Les valeurs des paramètres de simulation | 37 |
| CHAPITRE 5 RÉSULTATS | | 39 |
| 5.1 | Les horaires initiaux | 39 |
| 5.2 | La première approche..... | 40 |
| 5.3 | La deuxième approche | 41 |
| 5.4 | La troisième approche | 42 |
| CHAPITRE 6 ANALYSES | | 44 |
| CHAPITRE 7 RECOMMANDATIONS..... | | 51 |
| CHAPITRE 8 CONCLUSION | | 54 |
| 8.1 | Contribution du mémoire | 54 |
| 8.2 | Limites et contraintes du projet de recherche..... | 54 |
| 8.3 | Nouvelles voies de recherche | 55 |
| BIBLIOGRAPHIE | | 57 |
| ANNEXES | | 63 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|---|----|
| ANNEXE A – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA SIMULATION DES HORAIRES INITIAUX SANS GÉNÉRATION D’IMPRÉVUS | 63 |
| ANNEXE B – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA PREMIÈRE APPROCHE | 64 |
| ANNEXE C – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA DEUXIÈME APPROCHE | 69 |
| ANNEXE D – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA TROISIÈME APPROCHE | 74 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 4.1 - Résumé des caractéristiques des scénarios de simulation..... | 36 |
| Tableau 4.2 - Valeurs des paramètres selon les scénarios de simulation | 37 |
| Tableau 5.1 - Résumé des résultats périodiques par camion de la simulation des horaires initiaux sans génération d'imprévus | 39 |
| Tableau 5.2 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la première approche | 40 |
| Tableau 5.3 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la deuxième approche | 41 |
| Tableau 5.4 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la troisième approche | 42 |
| Tableau 6.1 - Détails du nombre de camions utilisés pour les tournées de véhicules par période | 45 |
| Tableau 6.2 - Délais moyens périodiques causés par l'achalandage aux localisations, par camion (minutes)..... | 47 |
| Tableau 6.3 - Délais moyens périodiques causés par les conditions météorologiques difficiles, par camion (heures) | 48 |
| Tableau 6.4 - Moyenne du nombre de tournées de véhicules par période | 48 |
| Tableau 7.1 - Délais moyens périodiques cumulés pour le 3 ^e scénario (heures) | 52 |
| Tableau A.1 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour la simulation des horaires initiaux sans imprévu..... | 63 |
| Tableau B.1 – Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario .. | 64 |
| Tableau B.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario | 65 |
| Tableau B.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario | 66 |
| Tableau B.4 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario. | 67 |

| | |
|--|----|
| Tableau B.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario..... | 68 |
| Tableau C.1 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario ... | 69 |
| Tableau C.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario | 70 |
| Tableau C.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario | 71 |
| Tableau C.4 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario. | 72 |
| Tableau C.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario..... | 73 |
| Tableau D.1 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario ... | 74 |
| Tableau D.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario | 75 |
| Tableau D.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario | 76 |
| Tableau D.4- Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario.. | 77 |
| Tableau D.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario..... | 78 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 - Camion forestier (Source: coloriages.ws) | 2 |
| Figure 1.2 - Les éléments de la chaîne d'approvisionnement du secteur forestier (D'Amours et al. 2008)..... | 13 |
| Figure 2.1 - Équation du calcul de la fréquence pour la génération d'activités externes..... | 25 |
| Figure 2.2 - Équation permettant de déterminer la prochaine occurrence d'imprévu pour une usine de transformation..... | 25 |
| Figure 2.3 - Équation permettant de déterminer la prochaine occurrence d'imprévu pour un site forestier ou de conditions routières difficiles | 25 |
| Figure 2.4 -Équation du calcul de la fréquence pour la génération de conditions routières difficiles..... | 26 |
| Figure 3.1 – Description des étapes de la première approche | 32 |
| Figure 3.2 – Description des étapes de la deuxième approche..... | 34 |
| Figure 3.3 - Description des étapes de la troisième approche | 35 |
| Figure 6.1 - Nombre de camions utilisés pour les tournées de véhicules à chaque période | 44 |
| Figure 6.2 - Temps moyen de délais reliés à l'achalandage aux localisations périodiquement par camion | 46 |
| Figure 6.3 - Temps moyen de délais reliés aux conditions routières périodiquement par camion | 47 |
| Figure 6.4 - Nombre total de tournées de véhicules par période..... | 49 |
| Figure 7.1 - Temps moyen total des délais générés dans le scénario 3 par période..... | 51 |

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|------|---------------------------------------|
| PLNE | Programme linéaire en nombres entiers |
| SÉP | Séparation et évolution progressive |
| PTV | Problème de tournées de véhicules |

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le secteur forestier représente un maillon important au Québec, autant au niveau de l'économie de cette province canadienne qu'au niveau de l'espace géographique occupé par ce dernier. Selon le Ministère des Ressources Naturelles du Québec, la forêt québécoise occupe plus de 750 000 kilomètres carrés, soit plus de 40% de la superficie du territoire de la province. Toujours selon ce dernier, le volume de bois récolté au Québec pendant la période 2012-2013 s'est élevé à plus de 24 millions de mètres cubes ainsi que des ventes totalisant plus de 200 millions de dollars. Cette commodité se vend à environ 10\$/m³¹. De plus, l'exploitation forestière au Québec possédait, en 2011, un chiffre d'affaires de plus de 2 milliards de dollars, générant ainsi plus de 9 000 emplois directs et indirects dans ce secteur industriel².

Comme dans tout secteur économique, les opportunités d'affaires sont nombreuses, et le milieu forestier n'y fait pas exception. Par contre, autant les défis logistiques que technologiques caractérisent l'exploitation forestière, et ce à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement. Ce projet de recherche traite d'une partie de la chaîne de valeur du secteur forestier, soit la planification des tournées de véhicules entre les sites d'exploitation forestière et les usines de transformations, plus spécifiquement des temps d'activités effectuées par les camions transportant les billots de bois entre ces deux types d'emplacements. Ces horaires de tournées de véhicules seront sujets à l'ajout d'imprévus pendant leurs quarts de travail. Ces imprévus en question sont séparés en deux catégories, soit la première représentant des conditions routières difficiles, rallongeant ainsi leurs temps de parcours. La deuxième catégorie d'imprévu est représentée par de l'achalandage aux différents sites forestiers et usines de transformation. Cet achalandage est causé par le flux de camions des autres compagnies forestières qui s'approvisionnent aux mêmes sites forestiers et qui acheminent eux aussi leurs produits aux mêmes usines de transformation. La présence de ces camions forestiers n'était pas considérée dans l'horaire initial des tournées de véhicules, ce qui peut occasionner un prolongement au niveau des temps d'opération et de traitement sur les quarts de travail.

¹ Statistiques pour l'année 2013

² Source : Conseil de l'industrie forestière du Québec

1.1 Étude de cas dans le milieu forestier

Le prochain paragraphe décrit les différentes étapes et processus que les camions doivent exécuter tout au long de leurs tournées de véhicules. Premièrement, un camion amorce toujours sa tournée à une usine de transformation, puis ce dernier finira sa journée de travail au même type d'emplacement. Par la suite, le camion prend la route vers un site forestier. Lorsque ce dernier est arrivé au site d'exploitation forestière, un chargeur est nécessaire afin de remplir le camion du type de billots de bois désiré, jusqu'à sa pleine capacité. Le temps de chargement d'un camion est fixé à 42 minutes dans le cadre de cette recherche, commençant à l'instant où le chargeur est libre jusqu'au moment où le camion reprend la route vers une usine de transformation. Si le ou les chargeurs à la forêt sont occupés avec d'autres camions, ce dernier devra attendre qu'un d'entre eux soit libre afin de procéder au chargement de sa cargaison. Ensuite, le camion reprendra la route vers une usine de transformation. Son temps de parcours dépendra de la distance séparant le site forestier et l'usine de transformation. Lorsque ce dernier est arrivé à destination, il doit utiliser un déchargeur afin de déposer sa cargaison de billots de bois. De même qu'aux sites forestiers, le camion devra attendre en file d'attente avant de repartir vers un nouveau site d'exploitation forestière si les déchargeurs sont occupés avec d'autres camions. Chaque camion exécute des tournées de véhicules de la sorte, et ce pour la totalité de la période étudiée.



Figure 1.1 - Camion forestier (Source: coloriages.ws)

Le scénario étudié dans ce projet comporte 43 sites d'exploitations forestières, où l'on recueille les arbres et les transforme en billots, à l'aide d'une tailleuse industrielle. Au total, il existe 5 variétés d'arbres différents, réparties dans les forêts en question, ayant des caractéristiques particulières influençant les propriétés du produit fini. Par la suite, les billots sont transportés jusqu'à l'une des 7 usines de transformation. C'est à une de ces usines que les billots seront coupés et traités afin d'en produire des planches de différentes grosseurs, selon la dimension du billot en question.

Dans un contexte réel d'activités forestières, au niveau du transport de billots de bois, il est normal de présager qu'il y aura des imprévus qui perturberont l'horaire initialement proposé au niveau des temps de parcours ainsi qu'au niveau des temps d'opération aux emplacements. Ces perturbations dans la logistique du transport forestier sont observables majoritairement pour deux raisons. La première constitue la situation météorologique défavorable qui crée des conditions routières difficiles pour les camionneurs. Que ce soit une tempête de neige ou un autre type de précipitation, ces dernières occasionnent un ralentissement de la vitesse de déplacement des camions sur les routes empruntées.

La deuxième raison concernant les possibilités de perturbations dans la logistique de transport forestier provient de l'achalandage aux localisations. La concentration de camions est particulièrement plus prononcée au niveau du déchargement des billots de bois aux usines de transformation, puisqu'il n'y a que 7 emplacements de la sorte. Il est usuel de voir des camions de compétiteurs transportant des billots et qui acheminent ces derniers aux mêmes usines de transformation, créant ainsi de l'attente afin de décharger les camions. Les usines ont un nombre limité de déchargeurs pouvant traiter les camions. Étant donné que les camions des compétiteurs n'étaient pas envisagés dans l'horaire de base, il y a création de congestion aux localisations. Cet achalandage engendre des répercussions sur l'ensemble du réseau du transport routier en milieu forestier, étant donné que les véhicules exécutent plusieurs tournées de chargements et de déchargements.

1.2 Les objectifs

L'objectif de ce projet de recherche consiste à analyser les perturbations sur la planification initiale des tournées de véhicules lors d'ajout d'imprévus aux activités exécutées par les camions

forestiers. Afin d'y parvenir, trois méthodologies ont été utilisés afin d'intégrer des niveaux d'incertitude à différents moments dans la réalisation de la planification des tournées de véhicules. La première concerne la génération d'horaires de tournées de véhicules pour le transport des billots de bois. La création de cette planification routière se fait par l'entremise d'un programme de génération de colonnes ainsi que d'un PLNE, programmés en C++ et conçus par Gregory Rix (2013). Ce programme de génération de colonnes se focalise sur le problème de tournées de véhicules, ayant comme objectif de déterminer la quantité de billots de bois voyageant entre chaque site forestier et chaque usine de transformation, pour l'ensemble des périodes ainsi que pour chacun des 5 spécimens d'arbre. Ce programme détermine aussi l'inventaire nécessaire pour chacune des localisations à chacune des périodes, toutes les routes empruntées par les camions afin d'acheminer les billots de bois aux usines de transformation, l'assignation des chargeurs aux sites forestiers ainsi que la synchronisation de la machinerie aux localisations avec les camions. Ce programme de génération de colonnes utilise le solveur *Gurobi Optimizer 6.0*, de la compagnie *Gurobi Optimization*.

Le deuxième volet de ce projet porte sur l'utilisation de la simulation comme outil afin de générer les deux différents types d'imprévus, décrits plus haut, ainsi qu'à l'introduction de ces derniers dans la planification des horaires de tournées de véhicules. La création et l'insertion des imprévus dans les horaires de tournées de véhicules se font à l'aide d'un simulateur, programmé en C++ et conçu par Amir H. Sepasi (2012).

À ce niveau, la contribution de ce projet de recherche réside dans l'intégration des deux premiers volets, cités plus haut, par l'entremise de nouveaux modules programmés en C++. Ces derniers permettent de conditionner l'échange d'information entre les deux modèles, afin que les données soient compatibles pour les programmes. Les modules permettent aussi l'extraction des données probantes à des fins d'analyses.

Le dernier volet est consacré à la conception et à la mise en œuvre d'un PLNE alternatif à celui programmé en C++, décrit ci-haut. Ce nouveau PLNE est programmé à l'aide du logiciel *AIMMS*. Ce dernier utilise des probabilités de passages des camions aux différentes usines et forêts comme données d'entrée, puis détermine des tournées de véhicules réalisables en nombre entiers. Ce nouveau PLNE a été réalisé dans le cadre de ce projet.

1.3 Revue de la littérature

Depuis le début des années 1990, plusieurs études ont contribué à améliorer la logistique de transport dans le milieu forestier, que ce soit au niveau de l'efficience des coûts ou de l'optimisation des parcours effectués par les camions. Cette revue de la littérature est séparée en deux grands volets : le premier concerne les problèmes de transport, puis le second fait référence à la recherche opérationnelle dans le milieu forestier.

1.3.1 Problèmes de transport

1.3.1.1 Problèmes de tournées de véhicules

Les problèmes de tournées de véhicules (PTV) représentent, dans plusieurs activités industrielles telles que les opérations d'entreposage, la distribution et le transport, des défis logistiques. L'objectif des PTV est de livrer un produit à l'ensemble des clients, avec une flotte de véhicules. Chaque véhicule commence sa livraison à un dépôt initial et termine sa tournée à un dépôt final. De plus, l'intention du transporteur est de minimiser les coûts reliés aux activités de transport. Les PTV peuvent s'appliquer à toutes les situations de flottes de camions, y compris les circonstances où il n'y a qu'un seul véhicule, tel que le problème du commis voyageur (Garey and Johnson, 1979).

Les PTV impliquent aussi le paramétrage de caractéristiques à définir, tel que la longueur des routes empruntées et la capacité des camions. Dans le cas d'une flotte de camions où la capacité de chargement du produit à livrer aux clients est identique, cette situation de contrainte de capacité a été étudiée pour la première fois par Dantzig et Ramser (1959). Depuis, plusieurs recherches ont été entamées sur les PTV avec contrainte de capacité homogène de la flotte de camions, travaillant sur de nombreuses heuristiques. Pour plus de détails, Toth et Vigo (2014) ainsi que Laporte (2009) représentent des références dans ce domaine.

Plusieurs heuristiques sont en lien avec les PTV. Il y a premièrement les heuristiques constructives, soit la recherche d'une solution complète en procédant à des itérations à partir d'une solution partielle. Clarke et Wright (1964) ont proposé une heuristique constructive qui est devenue une référence dans ce domaine. Le principe de leur heuristique est de classer les clients à visiter par paire et de calculer les coûts sauvés en visitant ces derniers successivement plutôt que

de les visiter sur des routes séparées. Ce classement est par la suite utilisé pour modifier la solution initiale, soit en ajoutant les routes qui maximisent les coûts sauvés par paire de client. L'heuristique la plus connue afin de décomposer ce problème en deux sous-problèmes est celle de Bramel et Simchi-Levi (1995).

Par contre, une heuristique a la caractéristique de trouver comme solution un optimum local, et non un optimum global, ce qui peut représenter, dans certaines situations, une solution de qualité médiocre. Ainsi, l'usage d'une mét-heuristique permettant de détériorer la fonction objectif pendant l'exploration des solutions réalisables est plus favorable. Gendreau et al. (1994) ont conçu TABROUTE afin de résoudre des PTV avec contraintes de capacité. Cette dernière utilise la méthode de recherche tabou comme heuristique (Glover et Laguna, 1993) où une liste de mouvements tabous est utilisée afin de contrer les mouvements cycliques dans la recherche des valeurs optimales de la solution. Aussi, Pisinger et Ropke (2007) ont développé une heuristique permettant d'explorer un plus grand voisinage au niveau des variables. L'objectif est d'explorer l'espace de solution tout en analysant la performance de chacune des méthodes utilisées, dans le but d'arriver à une solution optimale. Cordeau et al. (2005) ont travaillé sur la comparaison des différentes heuristiques en lien avec les PTV avec contraintes de capacité.

Plusieurs méthodes exactes sont basées sur la formulation que Dantzig et Ramser ont proposée en 1959. Par la suite, plusieurs méthodes ont été proposées par maints auteurs (Letchford et al., 2002), (Lysgaard et al., 2004) telles des algorithmes de séparation avec l'intégration d'algorithmes « branch-and-cut ». Par contre, ces nouveaux algorithmes de « branch-and-cut » présentent certaines lacunes face aux problèmes de grande échelle. Plusieurs auteurs se sont donc tournés vers des approches différentes, soit des algorithmes de « branch-and-price », présentant une formulation du problème plus robuste. Ce type d'approche a commencé avec Balinski et Quandt (1964). Puis en 2006, Fukasawa et al. ont développé une méthode, soit le « branch-and-cut-and-price », profitant ainsi de l'avantage des deux approches.

Il y a plusieurs variations des problèmes de tournées de véhicules. Les variations de ces problèmes en question peuvent comprendre une multitude de contraintes dépendamment des caractéristiques des études de cas. Dans les prochaines lignes, il sera question des problèmes les plus communs dans les analyses des tournées de véhicules. La première situation est un problème de tournées de véhicules avec plusieurs dépôts initiaux, c'est-à-dire que les camions commencent

leur tournée respective à des dépôts différents, à la place d'un seul dépôt initial. De plus, chaque dépôt initial est associée à une quantité maximale de produits que les camions peuvent livrer en partance de cet endroit. En général, ce type de contraintes, en lien avec plusieurs dépôts initiaux, des capacités des camions, ainsi que des quantités limitées en entrepôts, rendent la recherche d'une solution plus compliquée qu'un problème de tournées de véhicules conventionnel. Baldacci, Christofides et Mingozi (2009) ont travaillé sur une méthodologie permettant de modéliser et de résoudre plusieurs types de problèmes de tournées de véhicules, y compris les problèmes comprenant des contraintes de dépôts initiaux multiples. De plus, Cordeau, Gendreau et Laporte (1997) ont résolu des problèmes de tournées de véhicules avec contraintes de dépôts initiaux multiples par l'entremise d'une heuristique de recherche tabous.

Dans plusieurs compagnies, les flottes de véhicules comprennent des camions avec des capacités différentes. Golden et al. (1984) ont été les premiers à travailler sur des PTV avec contraintes de capacités différentes pour les camions. Depuis, la majorité des travaux exécutés dans ce domaine ont été fait avec des approches heuristiques, soit des méthodes de recherche tabous (Gendreau et al., 1999). Aussi, Choi and Tcha (2006) ont résolu ce type de problème avec une méthode de génération de colonnes, par l'entremise de la programmation dynamique pour le sous-problème, puis l'usage d'un PLNE afin d'obtenir une réponse en nombres entiers.

Pour ce qui est des PTV avec contraintes de fenêtres de temps, ce type de problème implique que les clients doivent être visités à l'intérieur de fenêtres de temps précises. Ainsi, un véhicule arrivant chez un client trop tôt pourra attendre jusqu'au moment de l'ouverture. Par contre, si un camion arrive trop tard, il ne pourra pas procéder à la livraison. Plusieurs études portent sur ce sujet. L'ouvrage le plus récent vient de Baldacci et al. (2012) à propos de méthodes exactes. Les méthodes présentant les meilleurs résultats proviennent de l'usage du « branch-and-price », ce que Desrochers et al. (1992) ont étudié. De plus, plusieurs heuristiques ont été utilisées pour cette problématique, tel que la recherche tabous (Cordeau et al., 2001) ainsi que le « branch-and-price » basé sur l'usage d'une recherche étendue sur le voisinage des variables (Prescott-Gagnon et al., 2009).

Généralement, dans les PTV, il est sous-entendu que la demande pour chaque client est égale ou inférieure à la capacité maximale du véhicule de livraison. Par contre, dans certaines situations, le client devra être visité plus d'une fois afin de répondre à sa demande. Dror et

Trudeau (1990) ont défini un PTV avec livraison partagée, proposant une heuristique de recherche locale. Ils ont par la suite étudié les résultats de leur méthode avec ceux d'un PTV typique, comparant l'impact d'une demande grandissante des clients sur la flotte de camions. Aussi, Ho et Haugland (2004) ont travaillé sur une heuristique utilisant la recherche avec tabous pour des PTV avec des demandes-clients supérieures à la capacité des camions ainsi que des fenêtres de temps pour les livraisons.

Une autre catégorie importante des PTV est celle incluant de la livraison ainsi que de la réception lors du passage chez les clients. Des produits sont donc livrés chez le client et ce dernier redonne une certaine cargaison dans le véhicule en question. Berbeglia et al. (2007) ont travaillé sur ce type de problème en créant une certaine classification. Ils ont séparé cette problématique en trois catégories, en lien avec le nombre de produits expédiés et reçus à chaque client: « un à plusieurs à un », « plusieurs à plusieurs » et « un à un ». Dans les problèmes de « un à plusieurs à un », les produits sont expédiés de l'entrepôt vers le client et/ou du client vers l'entrepôt. Dans le cas d'un problème « plusieurs à plusieurs », les entrepôts et les clients peuvent être une source ou une destination pour les produits. Puis, pour un problème de « un à un », chaque produit a une origine et une destination fixe. Les problèmes de type « un à un » sont utilisés dans plusieurs types d'applications, tel que la livraison et le ramassage de colis lors des services de porte à porte (Cordeau et Laporte, 2007).

Ropke et al. (2007) ont travaillé sur des PTV avec livraison et ramassage de produits chez les clients, mais en plus avec des fenêtres de temps. Ils ont réussi à résoudre ce type de problèmes avec une technique de « branch-and-cut ». Xu et al. (2003) ont non seulement étudié des PTV avec ramassage et livraison de produits ainsi qu'avec des fenêtres de temps, mais ils ont considéré aussi une flotte de camions où la capacité de ces derniers varie entre eux. Ils ont proposé un ensemble de routes initiales puis ils ont utilisé un algorithme de génération de colonnes afin de résoudre le problème. De plus, Bent et VanHentenryck (2006) ont développé une heuristique en deux temps, où ils utilisent la technique de recuit-simulé afin de réduire le nombre de véhicules nécessaires, suivi d'une recherche de voisinage afin de minimiser les coûts de transport.

Pour conclure sur cette thématique, Vidal et al. (2012) ont élaboré un algorithme permettant de résoudre des PTV périodiques caractérisés par des dépôts multiples. Cette étude

inclut aussi des contraintes de capacité au niveau des véhicules de livraison, ainsi que des contraintes en lien avec la durée de vie des routes. La métaheuristique utilisée dans le cadre de cet article combine une méthode de recherche exploratoire et de recherche à voisinage, ainsi qu'une évaluation des solutions selon des critères reliés à la diversité de la population.

1.3.1.2 Problèmes de tournées avec inventaires

Il existe des problèmes où le fournisseur doit tenir compte du niveau de réapprovisionnement d'inventaire de ses clients, forçant ainsi ce dernier à agir et à prendre des décisions qui respecteront ce type de contraintes. Ces types de problèmes, soit une extension des PTV, représentent des problématiques où les fournisseurs doivent respecter des directives strictes au niveau de l'inventaire de leurs clients, afin que ces derniers ne soient pas en rupture de stock. La modélisation de ce type de problème se fait sur un horizon de plusieurs périodes, où l'inventaire est géré pour chaque période. Bell et al. (1983) ont été les premiers à étudier ce type de problème et à développer des modèles pour des situations commerciales.

Coelho et al. (2013) ont travaillé, lors des dernières années, sur les situations de gestion d'inventaire par les fournisseurs aux clients, et ils ont classifié les modèles les plus courants, en les distinguant par plusieurs critères. Les scénarios les plus récurrents dans la littérature concernent des flottes de camions où ces derniers ont tous la même capacité. Par contre, dans leur travail, ils ont aussi considéré des scénarios avec une flotte de camion hétérogène, au niveau de la capacité de livraison. De plus, les scénarios typiques de PTV avec contraintes de gestion d'inventaire comprennent aussi des exigences au niveau du réapprovisionnement. Normalement, les clients tolèrent une certaine flexibilité au niveau de leur inventaire à maintenir, mais des limites maximales et minimales sont communes dans ce genre de situation. Par contre, lors de la recherche de la solution optimale dans ce genre de contexte, il est possible de procéder à une relaxation des contraintes et d'instaurer une politique de pénalités si le niveau d'inventaire ne respecte pas les bornes du problème.

Coelho et Laporte (2012) ont formulé un PTV avec contraintes de réapprovisionnement, utilisant une méthode « branch-and-cut » lors de la recherche de solutions. L'utilisation de ce genre de méthode exacte permet d'obtenir une solution dans un délai raisonnable si le scénario à l'étude ne dépasse pas 25 clients, 3 périodes et 3 véhicules. De plus, Desaulniers et al. (2014) ont

travaillé sur une méthodologie de type « branch-and-price-and-cut » qui permet d'obtenir une solution optimale.

Coelho et al. (2013) ont classifié ce genre de problème en 3 catégories : soit le type « un-à-un », « un-à-plusieurs » et « plusieurs-à-plusieurs ». Le modèle « plusieurs-à-plusieurs » dans les PTV représente une variante beaucoup moins étudiée que les 2 autres. Par contre, Ramkumar et al. (2012) ont étudié ce type de modèle en considérant plusieurs catégories de produits à livrer et ont formulé un PLNE. De plus, Christiansen et Nygreen (2005) ont développé un algorithme de génération de colonnes pour ce genre de problème de type « plusieurs-à-plusieurs ».

Michel et Vanderbeck (2012) ont travaillé sur une approche en deux étapes. Dans la première phase, soit la planification à haut niveau, ces derniers minimisent les coûts de transport en assignant des camions à des clients spécifiques. Par après, une heuristique de type « branch-and-price-and-cut » est utilisée pour résoudre ce problème.

Il est normal de présumer que l'intégration de plusieurs maillons de la chaîne d'approvisionnement dans ce type de projet pourrait mener à de meilleurs résultats au niveau de la synchronisation des activités. C'est en partie ce que Chandra et Fisher (1994) ont réussi en étant les premiers à intégrer des décisions au niveau de la production avec des PTV avec contraintes de réapprovisionnement. Leurs études ont permis de diminuer de plus de 15% les coûts d'opérations dans le contexte analysé. Adulyasak et al. (2013) ont eux aussi travaillé sur ce type de problème en lien avec la production, en plus de modifier le contexte en ajoutant plusieurs camions de livraisons. Ils ont réussi à résoudre leur problème en utilisant une heuristique par recherche de voisinage afin de trouver un ensemble de solutions initiales, suivi d'une analyse de type « branch-and-cut » pour trouver une solution optimale.

1.3.1.3 Synchronisation des tournées de véhicules

Dans la plupart des PTV, les véhicules utilisés sont indépendants. Dans ce genre de situation, peu importe les activités exécutées par les camions, ces derniers n'ont aucune influence sur les autres véhicules de la flotte. Par contre, ce n'est pas toujours le cas dans un contexte réel. Un exemple concret pourrait s'appliquer à un PTV avec utilisation de remorques. Une remorque doit alors absolument être jumelée à un véhicule afin d'être utilisée. C'est le genre de problème que Drexel (2013) a étudié. Bredström et Rönnqvist (2008) ont travaillé sur un PTV incluant des contraintes au niveau de la priorisation des clients et de la synchronisation des activités. Leurs

travaux ont porté sur plusieurs domaines variés, tel que les horaires des infirmières pour les soins à domicile (chaque client doit être visité par deux infirmières en même temps afin de procéder aux levées du patients, ainsi que la synchronisation de leurs visites à des heures de repas fixes) ainsi que dans les domaines des horaires des avions commerciaux (des destinations qui doivent avoir un avion réservé à la même heure tous les jours). De plus, Salazar-Aguilar et al. (2012) ont présenté des travaux sur un PTV avec synchronisation de la machinerie lors des opérations de déneigement.

Les PTV incluant des contraintes de synchronisation des ressources représentent un domaine relativement nouveau, où la documentation est moins abondante que certains autres domaines. Hempsch et Irnich (2008) ont travaillé sur des problèmes comprenant des contraintes de synchronisation des ressources afin de maximiser le nombre nécessaire de quais de déchargement dans une situation d'entrepôt commercial. Ils ont utilisé une heuristique de recherche locale afin d'obtenir une solution optimale. De plus, Ebben et al. (2005) ont travaillé sur une application visant les systèmes de transport automatique pour des véhicules télécommandés dans les aéroports. Ils ont utilisé un outil de simulation à événements discrets lors de la résolution de leurs travaux.

1.3.1.4 Modélisation de tournées avec un niveau d'incertitude

Pour commencer, Borodin et coll. (2013) ont procédé à l'élaboration d'un modèle de simulation stochastique à événement discret pour les différentes activités de la chaîne de valeur pour un milieu agricole. Leur modèle comprend plusieurs paramètres interagissant avec la performance des activités telle que l'incertitude météorologique. Leur objectif est d'évaluer la performance de la chaîne d'approvisionnement de ce système agricole envers ces imprévus.

Aussi, Deyi et coll. (2013) ont procédé à l'analyse d'un problème de transport, où le temps des tournées de véhicules ainsi que les coûts de transports contiennent des variables aléatoires. Ils ont décortiqué ce problème en deux fonctions objectifs, soit une qui minimise les temps des tournées de véhicules, et l'autre minimise les coûts totaux de transport.

1.3.2 La recherche opérationnelle dans le milieu forestier

Il existe plusieurs ouvrages de références concernant la résolution de problèmes opérationnels dans le milieu forestier. Premièrement, D'Amours et al. (2008) ont présenté une vue d'ensemble, tel qu'observé à la figure 1.2, des problématiques en lien avec la chaîne d'approvisionnement dans le secteur forestier, en incluant dans leurs analyses les contributions de la recherche opérationnelle dans ce type de problèmes. Les auteurs ont séparé en trois volets les problèmes de planification : soit le niveau opérationnel, le niveau tactique, ainsi que le niveau stratégique. La chaîne d'approvisionnement dans le milieu forestier peut s'avérer être très complexe, où plusieurs éléments sont à considérer. C'est entre autres pour cette raison que l'horizon de planification peut se calculer autant en minutes qu'en dizaines d'années. Normalement, la planification au niveau opérationnel s'étale sur un horizon de moins de 6 mois, la planification de type tactique sur un horizon variant entre 6 mois et 5 ans, tandis que la planification au niveau stratégique inclut un horizon de plus de 5 ans.

Ainsi, l'horizon de la planification aura un rôle crucial sur l'analyse des problèmes en recherche opérationnelle, faisant ainsi varier considérablement le temps de résolution pour l'obtention de résultats, dépendamment de l'approche utilisée. C'est pour cette raison que les heuristiques, les mét-heuristiques ainsi que les analyses réseaux sont normalement utilisées pour de la planification opérationnelle, tandis que les PLNE et les programmes stochastiques sont plus utilisés pour résoudre des problèmes au niveau de la planification tactique ou stratégique.

Dans le milieu forestier, il existe plusieurs intermédiaires ainsi que de nombreux processus à tous les niveaux de la chaîne de valeur, entre la collecte du bois dans la forêt jusqu'au produit fini que les consommateurs achètent. Par contre, dans les pages qui suivent, nous nous limiterons aux recherches qui sont en lien avec le transport des produits forestiers ainsi que la synchronisation dans la planification des récoltes de bois.

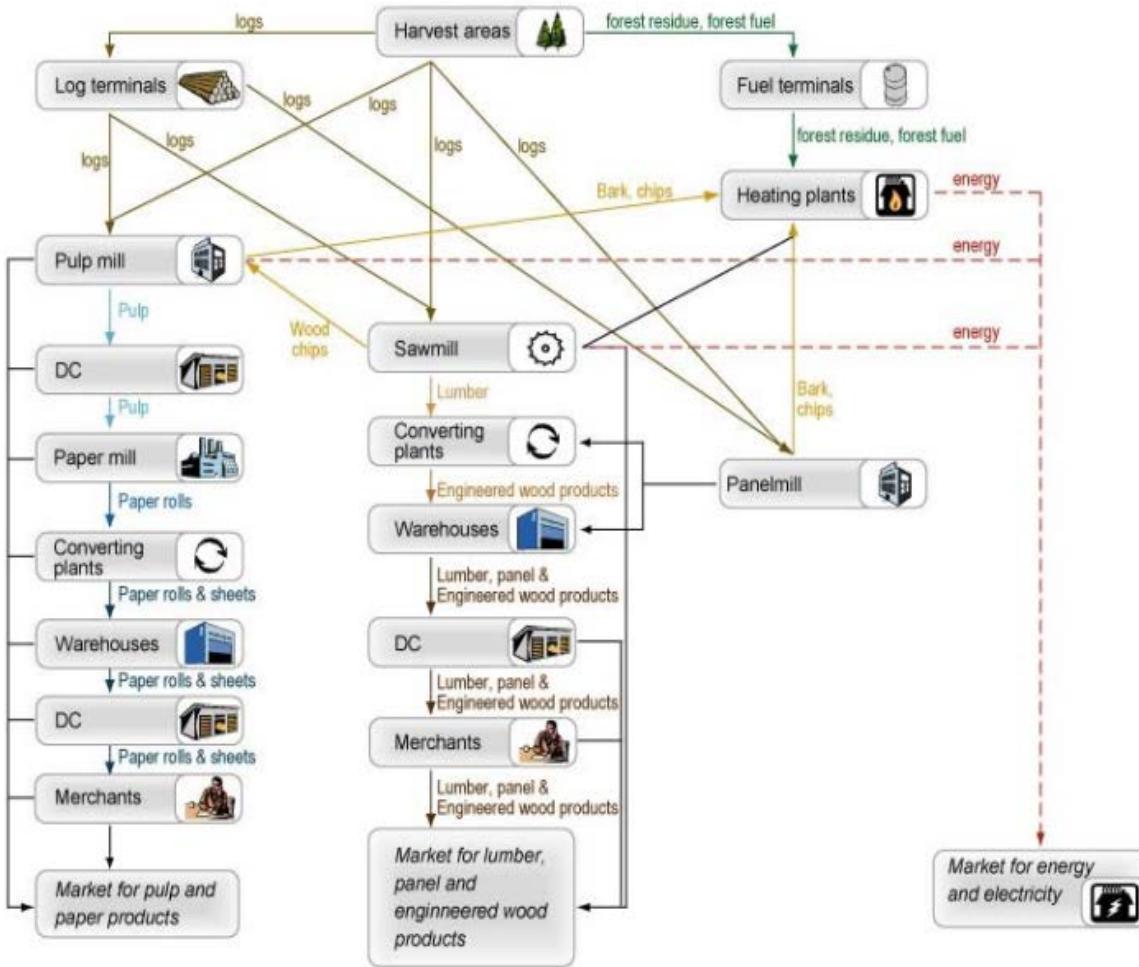


Figure 1.2 - Les éléments de la chaîne d'approvisionnement du secteur forestier (D'Amours et al. 2008)

1.3.2.1 La planification de la récolte

Les modèles de planification, au niveau tactique, dans le milieu forestier impliquent un nombre considérable de décisions à prendre de la part des gestionnaires, soit tout ce qui est en lien avec l'ordonnancement des camions, de la récolte et de l'entreposage. Rönnqvist (2003) a travaillé sur un PLNE impliquant les éléments décisionnels cités plus haut, où la fonction objectif calcule les coûts sur deux volets : les coûts en lien avec la récolte du bois pour une période spécifique, puis les coûts de transport entre le site forestier et les usines de transformation. Beaudoin et al. (2007) ont travaillé sur un PLNE, servant de support décisionnel au niveau tactique pour le réapprovisionnement en matière première d'une compagnie forestière. L'objectif était de maximiser les profits de la compagnie en question, en tenant compte de la variation du

produit, influençant ainsi le volume de matière première récolté. L'auteur de l'étude a utilisé un processus de décision multi-critères relié à un modèle déterministe impliquant des paramètres variables, ayant ainsi un impact sur les profits de la compagnie. De plus, Brëdstrom et al. (2010) ont étudié un problème, au niveau tactique, où ils ont synchronisé l'usage de la machinerie dans leur plan de gestion de la coupe du bois, tout en considérant dans leur fonction objectif la minimisation des mouvements de la machinerie. Par contre, leur étude ne tient pas compte des coûts reliés au transport de la matière ainsi qu'à la gestion de l'inventaire. Leur analyse consiste en premier lieu à assigner la machinerie au secteur de coupe en question, suivi de la minimisation des mouvements de cette dernière.

Bajgiran et al. (2014) ont travaillé sur un plan de récolte où le réapprovisionnement en matière première est synchronisé avec l'inventaire, la distribution ainsi que les ventes. Ils utilisent une fonction objectif qui maximise les profits. Par contre, leur étude n'inclut pas la gestion de l'équipe de la coupe du bois, mais considère la gestion des aires de récolte. Ils ont développé un PLNE et ont utilisé une heuristique de relaxation lagrangienne afin de résoudre leur problème.

D'autres études, en lien avec les plans de récolte, portent sur la planification à plus court terme. Ce type de planification se situe habituellement à un niveau opérationnel, afin d'augmenter l'efficacité et l'efficience des activités de récolte. Karlsson et al. (2003) se sont penchés sur l'étude d'un modèle de plan de récolte avec un horizon de temps de quelques semaines, portant sur la gestion du transport, de l'inventaire ainsi que sur l'horaire des équipes de travail au niveau de la récolte. Ils ont considéré aussi la maintenance des routes afin de rendre leur étude plus réaliste. De plus, Mitchell (2004) a décrit en détail le contexte du secteur forestier de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande, plus précisément des horaires des opérations de récolte. Son étude ne tient pas compte de la maintenance des routes, mais la fonction objectif de son modèle vise la maximisation des revenus tout en considérant le type de billot produit selon la nature du bois récolté. L'usage d'un « branch-and-price » a été appliqué dans ce contexte en octroyant un coût à chacune des variables en lien avec les horaires des équipes de travail.

1.3.2.2 Problème de tournées de véhicules

Le problème de tournées de véhicules en lien avec le secteur forestier fait l'objet d'études depuis plusieurs dizaines d'années. L'objectif dans les analyses de transport, dans un contexte forestier, est d'obtenir une gestion de la flotte de véhicules qui minimisera le nombre de

déplacements, entre les sites forestiers et les usines de transformation, afin de minimiser les coûts de transport, tout en gardant un niveau de réapprovisionnement convenable. Palmgren et coll. (2003) ont travaillé sur la minimisation des coûts totaux de transport pour ce type de problème. Leur méthodologie consiste à utiliser la génération de colonnes afin de créer un ensemble de routes suivie d'un algorithme de type « branch and price » pour l'obtention de réponses en nombres entiers.

Par la suite, El Hachemi et al. (2011) ont développé une méthode hybride pour ce type de problème, soit un modèle incluant un volet de programmation par contraintes ainsi qu'un aspect programmation en nombres entiers, liés mutuellement par des contraintes globales. Leur objectif est de minimiser les coûts d'exploitation reliés aux activités à non-valeur ajoutée telles que les temps d'attente et les tournées de véhicules sans cargaison. De plus, El Hachemi et al. (2013) ont élaboré une méthodologie qui consiste à résoudre ce problème, pour une période hebdomadaire, à partir d'un programme mixte en nombres entiers, afin de déterminer les trajets des camions entre les sites forestiers et les usines de transformation. Ensuite, ils ont expérimenté deux options au niveau de l'obtention d'un horaire complet de tournées de véhicules: la première consiste à utiliser un algorithme de recherche locale et la seconde représente une option hybride entre la recherche locale et l'utilisation de la programmation par contraintes. Le logiciel COMET 2.0 fut le solveur utilisé pour cette recherche.

Également, Rix (2013) a étudié la planification et l'optimisation des activités de gestion d'inventaire dans le milieu forestier, au niveau tactique et opérationnel. Ses travaux sont détaillés au chapitre suivant.

1.3.2.3 Outils de simulation

Tout d'abord, McCormack (1990) a développé un modèle de simulation, intitulé *TRUCKSIM*, permettant de prévoir la performance du transport forestier, soit en calculant les coûts d'opération au niveau du transport du bois et aussi au niveau de l'entretien des routes empruntées.

Aussi, Acuna et coll. (2011) ont travaillé sur un logiciel intitulé *FastTRUCK* qui optimise les horaires de tournées de véhicules pour les camions transportant des copeaux de bois en Australie, afin de répondre à la demande des clients. Leur analyse s'est étendue sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des copeaux de bois.

De plus, Haridass et coll. (2014) avaient comme objectif de minimiser le nombre de kilométrages effectués par les camions dans le milieu forestier lorsque ces derniers ont une cargaison vide. À l'aide de la méthode du recuit simulé, soit une métaheuristique, cette dernière interagit avec un simulateur déterministe sur le transport des billots de bois. Leurs résultats ont démontré que pour un petit réseau forestier ne comprenant que quelques sites forestiers et usines de transformation, il était possible d'obtenir une réponse optimale, à l'aide de leur méthodologie, en moins de deux minutes de simulation.

CHAPITRE 2 PROGRAMMES UTILISÉS

2.1 Le générateur de colonnes

La génération de colonnes est une technique qui permet de résoudre de nombreux problèmes dans un large éventail d'applications de la recherche opérationnelle, dont notamment la planification de tournées de véhicules entre les sites forestiers et les usines de transformation. L'objectif de l'usage de ce type d'algorithme consiste à déterminer la taille nécessaire de la flotte de camions ainsi que l'ordonnancement des activités qui satisferont les objectifs et les contraintes du problème, telles que les demandes aux usines de transformation ainsi que la capacité des camions, pour ne nommer que celles-ci.

Les modèles mathématiques résolus par la génération de colonnes partent d'un ensemble partiel de tournées de véhicules qui recouvrent l'ensemble des sites forestiers et des usines de transformation. Cet ensemble partiel de tournées potentielles représente une solution à notre problème, mais pas nécessairement une solution optimale, puisqu'il existe un nombre excessif de tournées possibles qu'il est impossible de toutes énumérer. L'approche est donc de travailler avec cet ensemble partiel de tournées représentant une solution viable et d'enrichir celle-ci avec d'autres tournées possibles qui l'améliorent, puis de déterminer les tournées qui constituent la meilleure solution dans cet ensemble. Il suffit de répéter ce sous-problème d'optimisation jusqu'à ce que nous ne trouvions plus de tournées permettant d'améliorer la solution du problème maître restreint.

En lien avec le contexte forestier de cette étude, le programme de génération de colonnes permet de déterminer la quantité de bois transité entre les sites forestiers et les usines de transformation ainsi que les routes empruntées par les camions. De plus, l'algorithme permet de définir le niveau d'inventaire périodiquement maintenu aux différentes localisations.

2.1.1 Le modèle mathématique

Voici la liste des données d'entrée pour le modèle mathématique de l'algorithme de génération de colonnes :

| | |
|-------------------------|---|
| b_{flp} | la quantité de bois au site forestier f pour un produit l pour une période p |
| d_{ulp} | la demande de bois à l'usine de transformation u pour un produit l pour une période p |
| i_{fl} | la quantité initiale d'inventaire au site forestier f pour un produit l |
| i_{ul} | la quantité initiale d'inventaire à l'usine de transformation u pour un produit l |
| e_{flp} | le temps d'entreposage maximal au site forestier f pour un produit l pour une période p |
| q_l | la capacité de chargement d'un camion pour un produit l |
| c_{flp} | le coût unitaire d'entreposage au site forestier f pour un produit l pour une période p |
| c_{ulp} | le coût unitaire d'entreposage à l'usine de transformation u pour un produit l pour une période p |
| c_r | le coût unitaire pour emprunter une route r |
| t | le coût fixe journalier pour l'utilisation d'un camion |
| v_{fulr} | le nombre de voyages à partir du site forestier f jusqu'à l'usine de transformation u pour un produit l sur une route r |
| g_{up} | le nombre de camions disponibles situés à l'usine de transformation u pour une période p |
| m_p | le nombre de chargeurs disponibles à assigner pour une période p |
| n_{up} | le nombre de déchargeurs disponibles à l'usine de transformation u pour une période p |
| $\varepsilon \in [0,1]$ | la variation acceptable par période selon la moyenne du nombre de routes |
| h_{rfi} | $= \begin{cases} 1, & \text{si un camion emprunte une route } r \text{ et charge au site forestier } f \text{ pendant l'intervalle } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| k_{rui} | $= \begin{cases} 1, & \text{si un camion emprunte une route } r \text{ et décharge à l'usine } u \text{ pendant l'intervalle } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |

Voici la liste des variables composant le modèle mathématique de l'algorithme de génération de colonnes :

| | |
|------------|---|
| y_{rjp} | le nombre de fois où une route r a été traversée durant un jour j pour une période p |
| s_{ujp} | le nombre de camions partant de l'usine de transformation u durant un jour j pendant une période p |
| w_{ulp} | la quantité de bois entreposé à l'usine de transformation u pour un produit l à la période $p \leq P + 1$ |
| w_{flp} | la quantité de bois entreposé au site forestier f pour un produit l à la période $p \leq P + 1$ |
| x_{fulp} | la quantité de bois à partir du site forestier f jusqu'à l'usine de transformation u d'un produit l livré pendant une période p |
| a_{fp} | $= \begin{cases} 1, & \text{si un chargeur est assignée au site forestier } f \text{ pour la période } p \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |

Voici la fonction objectif du modèle mathématique de l'algorithme de génération de colonnes :

$$\text{MIN} \sum_{r \in R} \sum_{j \in J_p} \sum_{p \in P} c_r y_{rjp} + \sum_{u \in U} \sum_{j \in J_p} \sum_{p \in P} t s_{ujp} + \sum_{f \in F} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} c_{flp} w_{flp} + \sum_{u \in U} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} c_{ulp} w_{ulp} \quad (1)$$

sous les contraintes :

$$w_{ul0} = i_{ul}, \forall u \in U, l \in L, \quad (2)$$

$$w_{fl0} = i_{fl}, \forall f \in F, l \in L, \quad (3)$$

$$w_{ulp} + \sum_{f \in F} x_{fulp} - d_{ulp} = w_{ul(p+1)}, \forall u \in U, l \in L, p \in P, \quad (4)$$

$$w_{flp} + b_{flp} - \sum_{u \in U} x_{fulp} = w_{fl(p+1)}, \forall f \in F, l \in L, p \in P, \quad (5)$$

$$\sum_{p'=0}^p \mathbb{I}(p' + e_{flp} \geq p) b_{flp} \geq w_{flp}, \forall f \in F, p \leq |P+1|, l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R} q_l v_{fulr} \sum_{j \in J_p} y_{rjp} \geq x_{fulp}, \forall f \in F, u \in U, l \in L, p \in P, \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R} y_{rjp} = s_{ujp}, \forall u \in U, p \in P, j \in J_p, \quad (8)$$

$$s_{ujp} \leq g_{up}, \forall u \in U, p \in P, j \in J_p, \quad (9)$$

$$\sum_{u \in U} s_{ujp} \geq \frac{1-\varepsilon}{\sum_{p' \in P} |J_{p'}|} \sum_{u \in U} \sum_{j' \in J_p} \sum_{p' \in P} s_{ujp}, \forall j \in J_p, \quad (10)$$

$$\sum_{u \in U} s_{ujp} \leq \frac{1+\varepsilon}{\sum_{p' \in P} |J_{p'}|} \sum_{u \in U} \sum_{j' \in J_p} \sum_{p' \in P} s_{ujp}, \forall j \in J_p, \quad (11)$$

$$\sum_{f \in F} a_{fp} \leq m_p, \forall p \in P, \quad (12)$$

$$\sum_{r \in R} k_{rui} y_{rjp} \leq n_{up}, \forall u \in U, j \in J_p, p \in P, i \in I, \quad (13)$$

$$\sum_{r \in R} h_{rfi} y_{rjp} \leq a_{fp}, j \in J_p, p \in P, i \in I, f \in F, \quad (14)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{l \in L} x_{fulp} \leq M a_{fp}, \forall f \in F, p \in P, \quad (15)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{r \in R_u} \sum_{i \in I} k_{rui} y_{rjp} \leq \sum_{u \in U} \sum_{r \in R_u} \sum_{i \in I} k_{rui} y_{r(j+1),p}, \forall p \in P, j \leq |J_p| - 1, \quad (16)$$

$$a_{fp} \in \{0,1\}, \forall f \in F, p \in P. \quad (17)$$

$$y_{rjp}, s_{upj} \in \mathbb{Z}^+, \forall r \in R_u, p \in P, j \in J_p. \quad (18)$$

$$w_{ulp}, w_{flp}, x_{fulp} \in \mathbb{R}^+, \forall f \in F, u \in U, l \in L, p \in P. \quad (19)$$

La fonction objectif (1) de ce modèle mathématique minimise les coûts reliés à l'exploitation de la flotte de camions dans le transport ainsi que l'entreposage des billots de bois. Les contraintes (2) et (3) assurent le bon nombre initial des différents types de billots de bois dans l'inventaire de chaque usine de transformation et de chaque site forestier lors des débuts de période. Les contraintes (4) et (5) garantissent l'équivalence des flux de billots de bois entre les sites forestiers et les usines de transformation pour chaque période. La contrainte (6) empêche les quantités de billots de bois entreposés aux sites forestiers de dépasser leur date de péremption. Cette contrainte force la quantité d'un type spécifique de billots de bois entreposé à un site forestier, pour une période p , à ne pas excéder en volume la quantité d'autres billots de bois plus frais, pour cette même période p . Le principe est d'instaurer une mesure de « premier arrivé, premier sorti » selon le niveau d'âge du billot, forçant ainsi les camionneurs à récolter les billots de bois plus vieux, selon le type de produit désiré. La contrainte (7) assure que le flux transigeant entre un site forestier et une usine de transformation, pour une période et pour un type de billot de bois donné, n'excède pas l'ensemble des capacités des camions transportant le produit. La contrainte (8) certifie que chaque route empruntée n'excède pas le nombre de tournées de véhicules provenant de chaque usine de transformation, et ce pour chaque période. La contrainte (9) force les tournées de véhicules à ne pas excéder le nombre de camions disponibles à chaque période. Les contraintes (10) et (11) assurent un lissage au niveau du nombre de tournées de véhicules exécutées par les camions quotidiennement. Ce lissage se situe au niveau d'une moyenne d'un nombre spécifique de routes empruntées par jour, ayant des bornes de $\epsilon \pm 1$. La contrainte (12) limite, périodiquement, le nombre de chargeurs par site forestier dépendamment de la disponibilité de ces derniers. Les contraintes (13) et (14) certifient le respect de l'utilisation des chargeurs et des déchargeurs par les camions, soit un seul camion à la fois peut utiliser cette machinerie, et ce à chaque intervalle. La contrainte (15) force l'assignation d'un chargeur aux sites forestiers dès qu'un camion désire en faire usage, et ce pour chaque période. La variable M représente une très grande valeur. Afin de briser la symétrie qui existe entre les jours des différentes périodes, la contrainte (16) assure une augmentation du nombre de camions déchargeant aux usines de transformation au fil des jours, et ce d'une période à l'autre. Ainsi, les jours de travail dans l'horaire généré ne deviennent plus interchangeables, assurant l'unicité de l'horaire, et non un nombre exponentiel d'horaires possibles. La contrainte (17) force la binarité de la variable d'assignation des chargeurs aux sites forestiers. Pour conclure, les contraintes (18)

et (19) assurent la non-négativité des autres variables du modèle mathématique, entre des valeurs intégrales et des valeurs réelles.

L'algorithme de génération de colonnes utilise un plan de récolte annuel pour l'ensemble des forêts exploitées comme données d'entrée, séparé en 26 périodes de deux semaines. Ce plan de récolte correspond à l'offre périodique pour chaque site forestier. L'objectif de ce dernier est de déterminer la valeur des flux de bois circulant entre les localisations ainsi que l'entreposage de la matière première, et ce pour chaque période. Dans le cadre de ce projet, les valeurs de demande de bois aux usines de transformations varient périodiquement, mais sont déterminées d'avance pour chaque intervalle de deux semaines

Afin de résoudre ce problème linéaire à partir du modèle de génération de colonnes, ce dernier doit déterminer un ensemble initial de colonnes représentant une solution réalisable. Par contre, étant donné le nombre de contraintes restreignant l'ensemble de solutions réalisables, le programme procède à une relaxation linéaire du modèle. Cette relaxation s'avère être profitable pour les contraintes (13) et (14) en lien avec la synchronisation des machineries aux usines de transformation ainsi qu'aux sites forestiers avec les camions. Par conséquent, après la création d'un ensemble de tournées de véhicules représentant une solution réalisable, le programme analyse les différentes valeurs potentielles des variables ayant la capacité d'améliorer le résultat de la fonction objectif du modèle mathématique.

2.2 Le programme linéaire en nombres entiers (C++)

Auparavant, le modèle a trouvé un ensemble de tournées de véhicules réalisables, mais les variables y et s n'ont pas nécessairement une valeur entière, étant donné qu'une relaxation linéaire a été effectuée. Afin d'obtenir un horaire de tournées de véhicules réalisable, les contraintes (13) et (14) concernant la synchronisation des machineries avec les camions sont rétablies comme contraintes à respecter et l'intégralité des deux variables y et s , touchant la fréquence des routes utilisées ainsi que du nombre de tournées de véhicules démarrant à chaque usine de transformation, est rétablie. Un algorithme de type SÉP, connu sous le nom « branch-and-bound », est utilisé afin de résoudre ce problème en nombres entiers et d'obtenir une solution réalisable. La méthodologie d'un algorithme de type SÉP commence par l'assignation d'une valeur entière à une de nos deux variables, soit y ou s , qui représente la première valeur entière

inférieure ou égale à la réponse optimale obtenue pour cette même variable pendant la relaxation linéaire. Ensuite, une étape d'exploration est effectuée afin de comparer cette valeur entière à la meilleure solution connue et réalisable.

2.3 Le simulateur

Dans le cadre de ce projet, le simulateur est employé pour différentes raisons, dépendamment des approches utilisées. Au niveau de la première approche, le simulateur représente un outil afin de tester la performance des horaires de tournées de véhicules générés par le programme de génération de colonnes, par l'entremise d'imprévus insérés aléatoirement dans la planification. Le programme de génération de colonnes a créé comme fichiers sortants 26 horaires de tournées de véhicules, d'une période de deux semaines respectivement, générant ainsi un horaire de transport pour l'année entière. Ces horaires en question sont utilisés comme données d'entrée au simulateur. L'objectif de l'utilisation de ce simulateur est d'ajouter des imprévus à la planification initiale des tournées de véhicule, donnant ainsi une vision plus réaliste sur l'échéancier des livraisons de billots de bois. L'ajout de ces imprévus dans les horaires de livraison tend à rendre l'analyse plus cohérente avec ce qui se passe sur le terrain. Afin de créer ces imprévus dans la planification des tournées de véhicules, le simulateur comprend six différents paramètres, dont il est possible de contrôler la valeur, influençant ainsi la création et l'importance des délais.

Premièrement, il y a trois paramètres contrôlant les imprévus reliés aux conditions météorologiques difficiles, rallongeant ainsi les parcours routiers des camions. Ces trois paramètres sont *road_delay_percent*, *road_delay_width* et *road_delay_severity*. Le premier paramètre énuméré ci-haut, *road_delay_percent*, représente la moyenne d'apparition de délais sur l'ensemble des tournées de véhicules. *Road_delay_width* désigne la durée moyenne des conditions routières générées pour la période de deux semaines. Puis, *road_delay_severity* signifie la durée d'allongement du trajet du camion si ce dernier emprunte une route avec des conditions routières difficiles. Par exemple, si les valeurs de *road_delay_percent* sont fixées à 20, *road_delay_width* à 10 et *road_delay_severity* à 50, on aura lors de la simulation une moyenne de 20% des tournées de véhicules qui subiront un délai causé par des conditions météorologiques non clémentes à chaque unité de temps. Chaque condition routière créée par le simulateur durera en moyenne 10 unités de temps (60 minutes). Puis, si un camion emprunte une route pendant des

conditions routières difficiles, son temps de parcours sera rallongé d'en moyenne 50% comparativement à son temps de voyage normal.

Les deux paramètres suivants concernent la création de délais au niveau du chargement des billots de bois dans les camions aux sites forestiers. Avec le simulateur, il est possible d'étendre le temps des processus de chargement aux forêts avec *load_delay_percent* ainsi que *load_delay_severity*. *Load_delay_percent* constitue une valeur moyenne d'occurrence de délai associé à l'ensemble des chargements de billots dans les camions, pour la période de la simulation. Puis, *load_delay_severity* représente le temps supplémentaire ajouté au temps de chargement, par rapport au temps standard de ce processus. Par exemple, si le paramètre *load_delay_percent* a une valeur de 15 et que *load_delay_severity* a une valeur de 40, il y aura en moyenne 15% des chargements effectués lors de la période de simulation qui auront un délai de 40% comparativement au temps de processus régulier pour charger un camion de billots de bois aux sites forestiers. Cette fonctionnalité du simulateur n'est pas utilisée dans le cadre de ce projet.

Finalement, le dernier paramètre vise la création d'activités non prévues, soit des chargements et des déchargements de camions d'autres compagnies aux différentes localisations. Ces activités non anticipées provoquent de l'achalandage aux localisations, générant ainsi des délais sur la planification initiale de transport. Ce paramètre se nomme *external_perday* et il contrôle le nombre journalier moyen d'activités créées à chaque localisation. Par exemple, si la valeur d'*external_perday* est fixée à 4, le simulateur générera en moyenne quatre activités non prévues par jour, sur la période de deux semaines, et ce pour chaque emplacement.

Lorsque l'utilisateur a identifié au simulateur les valeurs des différents paramètres ainsi que la période de simulation pour un horaire de tournées de véhicules donné, la phase d'initialisation débute. Cette dernière représente toutes les étapes de création des types d'imprévus, soit les conditions routières difficiles ainsi que les activités externes de chargement aux sites forestiers et de déchargement aux usines de transformation.

Au niveau de la génération d'activités externes de déchargement aux usines de transformation, le simulateur utilise la valeur *d'external_perday* afin de déterminer une fréquence de création (figure 2.1). Dans cette équation, nous divisons *external_perday* par 240, puisque cette valeur représente une journée de travail dans les unités de temps du simulateur. Cette fréquence est ensuite utilisée pour déterminer l'intervalle de temps employé jusqu'à la prochaine

création d'activité externe (figure 2.2). De plus, le simulateur utilise une fonction aléatoire, soit U , représentant une valeur probabiliste entre 0 et 1. Ainsi, la fréquence et la valeur de U seront employées comme variables dans une équation de loi de Poisson, déterminant ainsi l'intervalle en question. La création de ce type d'imprévu est exécutée par le simulateur pour chaque usine de transformation, et ce pour chaque période de deux semaines.

$$\text{fréquence} = \frac{\text{external_perday}}{240}$$

Figure 2.1 - Équation du calcul de la fréquence pour la génération d'activités externes

$$\text{PoissonNextInterval} = \frac{-\log(U)}{\text{fréquence}}$$

Figure 2.2 - Équation permettant de déterminer la prochaine occurrence d'imprévu pour une usine de transformation

Pour ce qui est de la génération d'activités externes de chargement aux sites forestiers, le calcul de la fréquence reste le même qu'au niveau de la génération d'activités de déchargement aux usines de transformation. Par contre, les valeurs de fréquence et de U seront utilisées dans une équation de loi uniforme afin de déterminer le temps d'intervalle entre deux créations de ce type d'imprévu (figure 2.3). L'objectif ici est de générer plusieurs activités de chargements à chaque site forestier et le simulateur, selon les intervalles entre chaque activité externe, crée ces dernières jusqu'au moment où la limite de temps de la période de simulation est atteinte, soit 2 semaines de travail.

$$\text{UniformNextinterval} = \frac{2 * U}{\text{fréquence}}$$

Figure 2.3 - Équation permettant de déterminer la prochaine occurrence d'imprévu pour un site forestier ou de conditions routières difficiles

$$\text{fréquence} = \frac{100}{\text{TimeSpan} (100 - \text{road_delay_percent})}$$

Figure 2.4 -Équation du calcul de la fréquence pour la génération de conditions routières difficiles

Ensuite, la génération de conditions routières difficiles dépend des trois paramètres suivants : *road_delay_percent*, *road_delay_width* et *road_delay_severity*. Il faut premièrement calculer la fréquence, telle que réalisé lors de la création d'activités externes. Par contre, la formule de fréquence est différente pour la génération de conditions routières difficiles (figure 2.4). La valeur du paramètre *TimeSpan* est de 3360, représentant 14 journées de travail, soit une période de simulation. Après avoir calculé la valeur de la fréquence, le simulateur utilise cette dernière afin de trouver le temps d'intervalle avant la prochaine création d'une condition routière difficile. Ce type d'imprévu utilise l'équation de la loi uniforme, décrite précédemment, soit la même formule que pour déterminer la prochaine occurrence d'activités externes pour un site forestier (figure 2.3). Ainsi, le simulateur répète cette séquence pour chaque route entre les localisations, pour un total de 301 routes, sur la totalité de la période de deux semaines de travail.

Après la génération de tous les types d'imprévus pour la période de deux semaines par le simulateur, ce dernier procède à la simulation des activités de transport, selon l'horaire des tournées de véhicules. Le simulateur commence par initialiser les tournées de véhicules, pour chaque camion, ainsi que pour les chargements et déchargements des autres camions externes générés par le simulateur auparavant. Par la suite, pour chaque activité de chargement et de déchargement, le simulateur analyse si les chargeurs ou les déchargeurs en question sont occupés. S'ils sont occupés et qu'ils ne peuvent prendre en charge le camion en question, ce dernier ira se mettre en ligne d'attente. Le traitement des camions en file d'attente se fait selon le principe du *premier arrivé, premier servi* (FIFO). Aussi, pour ce qui est des activités de déplacements des camions sur les routes, le simulateur analyse si le camion en question emprunte une route pendant une condition routière difficile, générée plus tôt dans le processus de simulation. Si un camion traverse une route pendant une condition routière difficile, son temps de parcours sera rallongé selon les différents paramètres expliqués plus haut.

Lorsque le simulateur a terminé le traitement des informations à propos de l'horaire des tournées de véhicules, ce dernier procède à l'écriture des résultats dans différents fichiers de données.

2.4 Le programme linéaire en nombre entier (*AIMMS*)

Le PLNE programmé dans le logiciel *AIMMS* représente un outil permettant d'obtenir une planification finale des tournées de véhicules entre les sites forestiers et les usines de transformation, similairement au PLNE programmé en C++. Par contre, la grande distinction entre les deux programmes se situe au niveau des données d'entrées. Le PLNE en C++ utilise des moyennes de temps de passage des camions afin de déterminer un horaire réalisable. Par contre, le PLNE programmé dans *AIMMS* utilise plutôt des probabilités de temps de passage des camions aux sites forestiers ainsi qu'aux usines de transformation.

Les données sur la probabilité qu'un camion soit de passage à une localisation donnée, lors d'un moment précis ainsi que lors d'une période spécifique, constituent les informations primaires du PLNE dans *AIMMS* permettant à ce dernier de déterminer la taille nécessaire de la flotte de camions ainsi que l'ordonnancement des activités qui satisferont les objectifs et les contraintes du problème, telles que les demandes aux usines de transformation, l'offre des produits aux sites forestiers ainsi que la capacité des camions.

Contrairement au PLNE en C++, qui détermine l'ensemble de 26 périodes de la planification des tournées de véhicules dans une même résolution, le PLNE dans *AIMMS* calcule un horaire de tournée de véhicules une période à la fois. Le fait de trouver un ensemble de tournées de véhicules pour une seule période par résolution empêche le modèle de compenser pour la fluctuation périodique de l'offre et de la demande des produits, ce que le PLNE en C++ peut corriger.

2.4.1 Le modèle mathématique

Voici la liste des données d'entrée pour le modèle mathématique du programme linéaire en nombre entiers dans AIMMS :

| | |
|-----------|--|
| x_{it} | la valeur de la probabilité du passage i au temps t |
| b_{ci} | $= \begin{cases} 1, & \text{si le camion } c \text{ est utilisé au passage } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| d_{ui} | $= \begin{cases} 1, & \text{si l'usine de transformation } u \text{ est utilisée au passage } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| e_{fi} | $= \begin{cases} 1, & \text{si le site forestier } f \text{ est utilisé au passage } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| h_i | $= \begin{cases} 1, & \text{si le voyage est effectué avec une cargaison pleine au passage } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| g_{fu} | le temps de parcours d'un camion avec une cargaison vide entre le site forestier f et l'usine de transformation u |
| k_{fu} | le temps de parcours d'un camion avec une cargaison pleine entre le site forestier f et l'usine de transformation u |
| m_{ul} | l'inventaire de départ d'une usine de transformation u pour un produit l |
| n_{ful} | l'offre d'un site forestier f pour une usine de transformation u pour un produit l |
| q_{ulf} | la demande d'une usine de transformation u pour un produit l provenant d'un site forestier f |
| s_{cl} | la capacité de chargement d'un camion c pour un produit l |

Voici les variables composant le modèle mathématique du programme linéaire en nombre entiers dans AIMMS:

| | |
|----------|--|
| y_i | $= \begin{cases} 1, & \text{si le passage } i \text{ est choisie pour l'horaire de tournées de véhicules} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |
| v_{li} | $= \begin{cases} 1, & \text{si le produit } l \text{ est choisi au passage } i \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$ |

Voici la fonction objectif du modèle mathématique du programme linéaire en nombre entiers dans *AIMMS*:

$$\text{MIN} \sum_{i \in I} y_i \left[h_i \sum_{u \in U} \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} d_{ui} e_{fi} k_{fu} \right] \quad (1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{i \in I} d_{ui} * e_{fi} * y_i * x_{it} \leq 1, \forall u \in U, f \in F, t \in T, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} v_{li} * d_{ui} * b_{ci} * s_{cl} + m_{ul} \geq q_{ulf}, \forall u \in U, l \in L, f \in F, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} v_{li} * e_{fi} * d_{ui} * b_{ci} * s_{cl} \leq n_{ful}, \forall u \in U, l \in L, f \in F, \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L} v_{li} = 1 - (1 - y_i), \forall i \in I. \quad (5)$$

La fonction objectif (1) de ce modèle mathématique minimise les distances parcourues par les camions lors des tournées de véhicules. La contrainte (2) force le modèle à utiliser les probabilités de passages, obtenues par les réalisations exécutées dans le simulateur, afin de déterminer si une tournée de véhicule peut faire partie de l'horaire final. Ainsi, le modèle peut considérer une activité de transport forestier définie par la probabilité qu'un camion se trouve à un endroit précis ainsi qu'à un instant particulier. La contrainte (3) maintient le respect de la demande en approvisionnement des usines de transformation, et ce pour chaque période. La contrainte (4) assure que l'offre des sites forestiers ne dépasse pas les quantités de billots approvisionnés aux usines de transformations, pour toutes les périodes du modèle. Pour conclure, la contrainte (5) force les camions à ne transporter qu'un type de billot de bois, et ce pour chaque tournée de véhicules.

Les probabilités de passages des camions, soit la probabilité qu'un camion soit de passage à un endroit spécifique, à un moment donné, durant une période en question, représentent les données d'entrées du modèle. L'objectif de ce PLNE programmé dans *AIMMS* consiste à déterminer la valeur des flux de billots de bois circulant entre les localisations, soit en minimisant

les distances parcourues par les camions lors des tournées de véhicules ainsi qu'en maintenant un niveau d'inventaire positif de la matière première à chaque localisation. L'objectif doit être respecté pour chaque période du modèle. Les périodes du modèle sont divisées en 26 intervalles de deux semaines, représentant ainsi une planification annuelle du transport des billots de bois.

De plus, différents paramètres composent ce modèle : les valeurs de demande de bois aux usines de transformations ainsi que d'offre de bois aux sites forestiers sont non constantes, mais déterminées d'avance pour chaque période. Aussi, la charge utile des camions varie selon le type de billot de bois transporté. Les temps de parcours des camions fluctuent selon le type de billot de bois transporté ainsi que selon l'activité exécutée (camion avec cargaison pleine ou vide). L'inventaire de départ des localisations est spécifié à chacune des périodes du modèle.

Suite à l'usage de ce modèle mathématique, il est possible de déterminer plusieurs informations en lien avec le problème de planification de tournées de véhicules, entre autres la taille de la flotte de camions, l'ordonnancement des activités accomplies par les camions ainsi que la synchronisation de la machinerie aux localisations.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIES

Les prochaines pages feront l'objet d'explications sur les trois approches utilisées dans le cadre de ce projet de recherche, représentant des démarches distinctes, afin d'obtenir une planification de transport incluant des imprévus. La méthodologie de ces trois approches est différente, mais les résultats finaux permettront de les analyser sur une même base.

3.1 La première approche

Afin de créer un horaire de tournées de véhicules, un programme de génération de colonnes est utilisé comme planificateur de départ, permettant d'obtenir un ensemble initial de tournées de véhicules. Après l'obtention d'une solution en nombre entiers, par l'entremise du PLNE en C++, une fonction a été ajoutée au PLNE en C++, permettant de générer un fichier de sortie décrivant toutes les activités que chaque camion effectue pendant la période de deux semaines. Ce fichier de planification de transport servira comme données d'entrées pour le simulateur. Dépendamment des valeurs des paramètres, variant selon les différents scénarios de simulation (chapitre suivant), le simulateur crée des fenêtres de temps correspondant à des conditions routières difficiles ainsi qu'à de l'achalandage externe aux localisations, par le biais de camions d'autres compagnies. Ces deux types d'imprévus impacteront l'horaire initial utilisé comme données d'entrées, soit en créant des délais dans les temps d'opération des camions. De plus, toutes les fonctions servant à générer les variables aléatoires du simulateur ont été adaptées selon les unités de temps utilisées dans les horaires de tournées de véhicules, afin de générer des fenêtres de temps respectant les unités de ces derniers. Après la génération des délais, un module externe au simulateur, programmé en C++, a été créé dans le cadre de ce projet, afin de simuler simultanément plusieurs réalisations d'horaires de tournées de véhicules. Ainsi, pour un même scénario, il est possible d'obtenir plusieurs temps de passages, fluctuant selon les variables aléatoires du simulateur. Dans le cadre de ce projet, un échantillon de 30 réalisations a été analysé, et ce, par scénario. Par la suite, nous obtenons un ensemble de h_{rfi} et de k_{rui} pour lequel nous pouvons calculer une moyenne (\bar{h}_{rfi} et \bar{k}_{rui}). L'ensemble de ces deux types de valeurs correspondent à la moyenne du temps de passage d'un camion à un endroit précis dans le temps. Ce sont ces nouvelles valeurs de moyennes qui permettront de savoir si l'horaire obtenu par le générateur de colonnes et le PLNE en C++ a subi des retards considérables dans sa planification

de tournées de véhicules, en lien avec les événements imprévus et aléatoires générés à chaque période. Afin d'analyser les différents délais subis par les horaires de tournées de véhicules, une fonction a été ajoutée au simulateur permettant de générer un fichier indiquant plusieurs informations pertinentes à l'analyse des résultats pour chaque activité des camions utilisés périodiquement (Nombre de délais pour chaque type de retard, temps total reliés aux retards pendant les tournées de véhicules, etc).

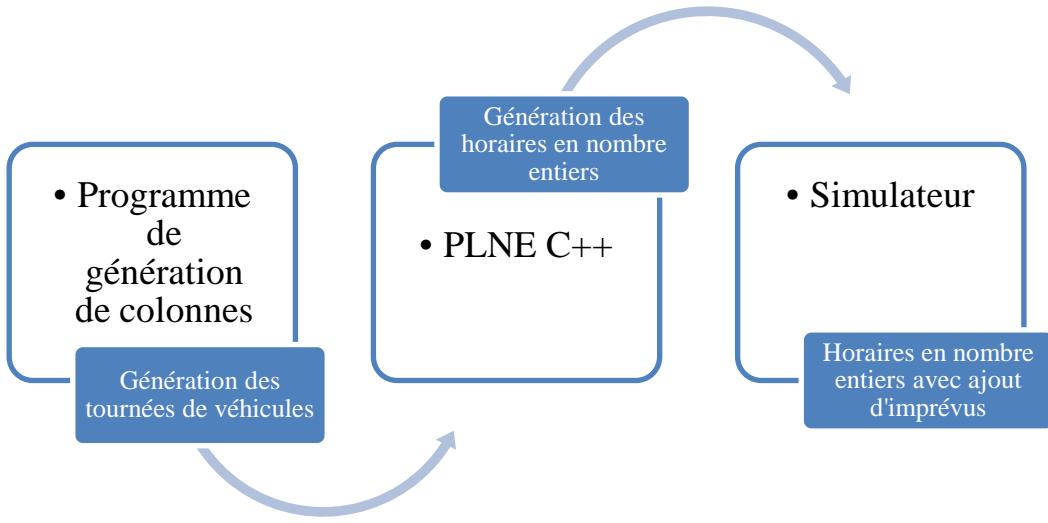


Figure 3.1 – Description des étapes de la première approche

Voici la liste des éléments d'information générés par le simulateur. Ces données permettent d'analyser la performance des horaires :

- # du camion
- Le type d'activité effectué
- L'origine et la destination du camion
- Le temps de départ de l'activité selon l'horaire initial
- La durée de l'activité selon l'horaire de départ
- Le temps de départ de l'activité dans le simulateur
- La durée de l'activité dans le simulateur

Dépendamment si un camion emprunte une route pendant une condition routière difficile ou rencontre de l'achalandage aux localisations, il y aura une distinction entre les temps d'activités selon l'horaire initial et les temps d'activités générés par le simulateur (h_{rfi} et k_{rui}). Ce sont ces types d'information qui permettent de déterminer le retard engendré par les événements imprévus pour chacun des camions utilisés pendant la simulation.

3.2 La deuxième approche

La deuxième approche consiste à introduire des imprévus dans les horaires de tournées de véhicules, créés pas le générateur de colonnes, avant que ce dernier procède à l'utilisation du PLNE en C++. Des tournées de véhicules sont obtenus avant l'usage du PLNE en C++, par l'entremise d'une nouvelle fonction du programme de génération de colonnes exportant toutes les informations sur les tournées de véhicules que les camions doivent exécuter pendant la période en question. Ces données représentent les données d'entrées pour le simulateur. Par contre, c'est le PLNE en C++ qui a la tâche de décider de l'ordonnancement des camions dans le temps, soit les temps de passage de ces derniers dans les périodes de deux semaines. De plus, l'organisation des tournées de véhicules réalisée par le PLNE en C++ permet de synchroniser l'utilisation de la machinerie aux localisations avec les livraisons des camions. Ces caractéristiques démontrent l'utilité du PLNE, puisque les tournées de véhicules résultantes de la génération de colonnes ne répondent pas nécessairement à tous les critères et exigences du modèle. Ainsi, un horaire généré par cet outil contient uniquement une liste exhaustive d'activités exécutables par les camions pour une période donnée, soit une énumération de possibilités de tournées de véhicules réalisables, et non une planification complète.

L'objectif de cette deuxième approche est d'ajouter des délais, via le simulateur, dans cette liste exhaustive d'activités de transport, avant que le PLNE en C++ ait trouvé un horaire final pour la période en question. Après l'obtention de cette liste exhaustive, le simulateur lit les données obtenues avant l'usage du PLNE en C++ et y ajoute des événements imprévus, à raison de 30 réalisations. L'usage de ces 30 réalisations permet de calculer une moyenne de temps de passages des camions (\bar{h}_{rfi} et \bar{k}_{rui}) aux différentes localisations. Ces temps moyens sont utilisés pour la création de nouveaux horaires. Ces horaires sont, par la suite, introduits dans le PLNE en C++, par l'entremise d'une nouvelle fonction de lecture. Le PLNE en C++ est ainsi utilisé afin d'obtenir une solution réalisable contenant des valeurs entières. Pour conclure, tel qu'exécuté

pour la première approche, un fichier de sortie décrivant toutes les activités que chaque camion effectue pendant la période de deux semaines est généré et utilisé comme données d'entrées dans le simulateur. Ainsi, de nouveaux imprévus seront introduits dans la planification, à l'aide du simulateur, à des fins de comparaison entre cette méthodologie et les autres approches. Les mêmes éléments d'information qu'à la première approche sont recueillis à la fin de cette démarche.

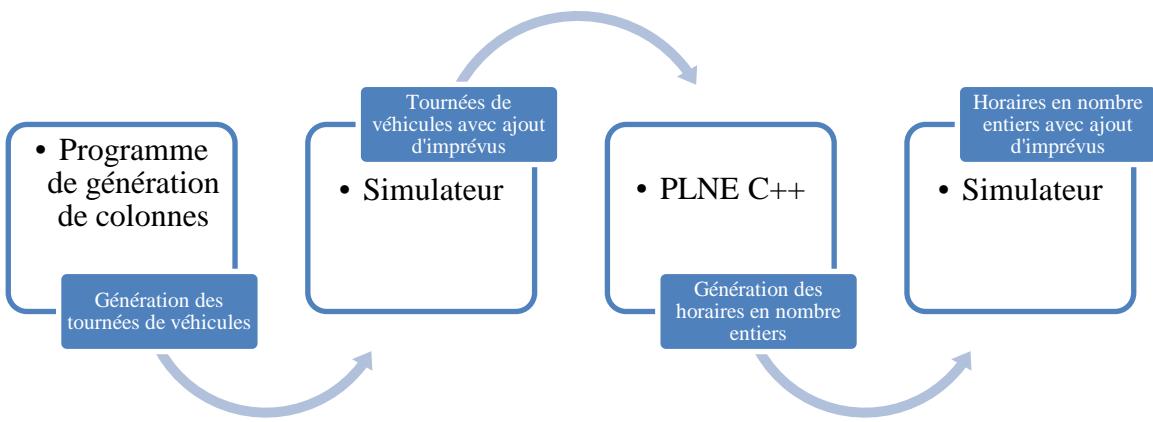


Figure 3.2 – Description des étapes de la deuxième approche

3.3 La troisième approche

La troisième approche consiste, tel qu'exécuté dans les méthodologies précédentes, à introduire des imprévus dans les horaires de tournées de véhicules. Par contre, au lieu d'utiliser le PLNE en C++, le PLNE programmé dans *AIMMS* sera l'outil permettant d'obtenir une planification finale des tournées de véhicules. L'introduction de ces événements imprévus se fait entre la création de tournées de véhicules par le générateur de colonnes, et l'utilisation du PLNE dans *AIMMS*. Tel qu'expliqué dans le chapitre précédent, un ensemble de tournées de véhicules est obtenu avant l'usage du PLNE dans *AIMMS*, par l'entremise d'une nouvelle fonction du programme de génération de colonnes. Cette liste de tournées de véhicules représente les données d'entrées pour le simulateur. Avec ces dernières, le simulateur ajoute des événements imprévus dans les tournées de véhicules, toujours à raison de 30 réalisations. Les résultats engendrés par les 30 réalisations vont permettre de calculer les probabilités de temps de passage des camions (x_{it}) aux différentes localisations. Ce sont ces nouvelles valeurs de probabilité (x_{it}) qui sont utilisés par

le PLNE dans *AIMMS* afin de créer la planification finale des tournées de véhicules, contenant des valeurs entières. Ces valeurs de probabilité (x_{it}), qui sont utilisées dans la contrainte (2) du PLNE dans *AIMMS*, influencent la prise de décision du modèle au niveau des choix des routes employées dans l'horaire final, ce qui n'est pas le cas dans la seconde approche. Pour conclure, tel qu'exécuté pour les approches précédentes, la planification de tournées de véhicules proposé par le PLNE dans *AIMMS* est utilisée comme données d'entrées dans le simulateur. Ainsi, de nouveaux imprévus seront introduits dans la planification, à l'aide du simulateur, à des fins de comparaisons entre cette méthodologie et les autres approches. Les mêmes éléments d'information qu'aux approches précédentes sont recueillis à la fin de cette démarche.

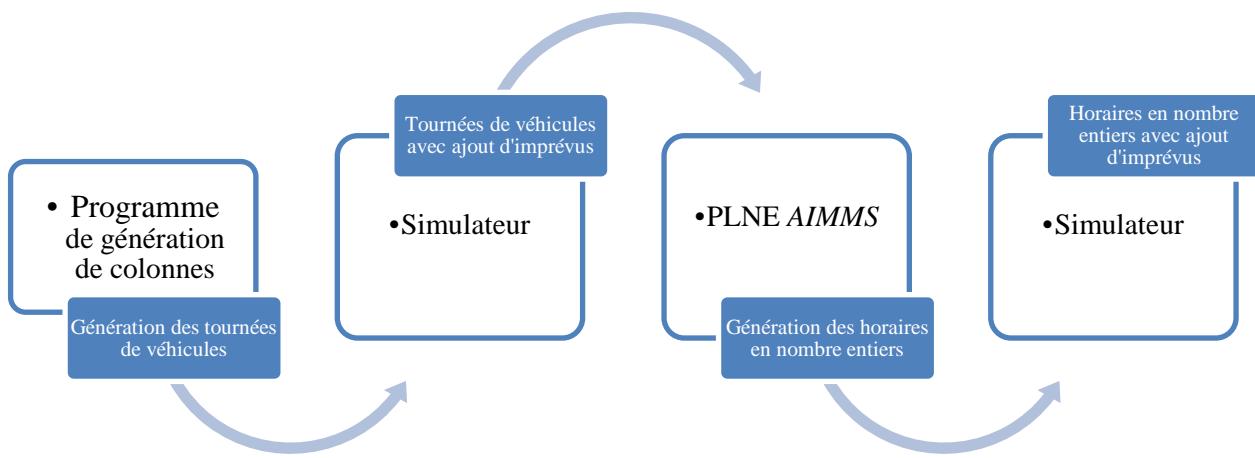


Figure 3.3 - Description des étapes de la troisième approche

CHAPITRE 4 LES SCÉNARIOS DE SIMULATION

Étant donné que le simulateur est doté de paramètres, énumérés précédemment, pour lesquels il est possible de modifier leurs valeurs respectives, la définition de scénarios de simulation s'impose. Dans le cadre de ce projet, les scénarios représentent l'environnement dans lequel les camions transportent les billots de bois, c'est-à-dire les hypothèses météorologiques utilisées dépendamment des saisons ainsi que les hypothèses d'achalandage employées aux localisations dues à l'affluence causée par les camions des autres compagnies forestières. Trois scénarios avec différentes valeurs au niveau des paramètres ont été expérimentés (tableau 4.1) : le premier constitue une situation hivernale avec des précipitations de neige survenant durant la période de deux semaines, sans toutefois inclure d'activités externes aux localisations. Le second scénario représente un contexte où des activités externes d'autres compagnies du milieu forestier seront générées pendant la simulation, tout en excluant la génération de conditions routières difficiles dans cette période de deux semaines. Puis, le dernier scénario inclut les deux types d'imprévus dans une même simulation. Le simulateur sert donc à générer ces types de scénarios comprenant des perturbations au niveau des activités de transport forestier.

Tableau 4.1 - Résumé des caractéristiques des scénarios de simulation

| Scénarios | Description des scénarios de simulation |
|-----------|---|
| 1 | Conditions routières hivernales sans activité externe |
| 2 | Conditions routières normales avec activités externes |
| 3 | Conditions routières hivernales avec activités externes |

4.1 Les valeurs des paramètres de simulation

Pour chacun des trois scénarios énumérés ci-haut, le tableau 4.2 résume les valeurs des paramètres utilisés afin de reproduire des événements engendrant des délais sur la planification des tournées de véhicules.

Tableau 4.2 - Valeurs des paramètres selon les scénarios de simulation

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| <code>road_delay_percent</code> | 85 | 0 | 85 |
| <code>road_delay_width</code> | 240 | 0 | 240 |
| <code>road_delay_severity</code> | 40 | 0 | 40 |
| <code>external_perday</code> | 0 | 5 | 5 |

Dans les scénarios pour lesquels la création de conditions routières difficiles est reproduite, trois paramètres contrôlent la génération de ce type d'événement: soit `road_delay_percent`, `road_delay_width` et `road_delay_severity`. En accord avec les données météorologiques recueillies sur les conditions hivernales historiques du Nord québécois³, pendant le mois de janvier et février, il y a en moyenne 14 jours par mois où des précipitations surviennent, soit un jour sur deux. Donc, pour les horaires de tournées de véhicules, lors des périodes de deux semaines, l'objectif hypothétique retenu dans ce contexte est de recréer une tempête de neige tous les deux jours. Afin d'y parvenir, une valeur de 85 est fixée au paramètre `road_delay_percent`.

Aussi, les conditions routières difficiles générées dans le simulateur, représentées par les précipitations hivernales, ont comme caractéristiques de se déclencher en moyenne tous les deux

³ www.currentresults.com

jours, se répétant à intervalle de un à trois jours. Les valeurs des bornes de cet intervalle de création proviennent d'une hypothèse qui est exploitée pour l'ensemble des routes simulées, tout au long de la période. Afin de restreindre l'intervalle de création entre deux tempêtes hivernales, les valeurs obtenues par l'équation de la loi uniforme (figure 2.3) sont limitées selon une borne supérieure égale à 720 unités de temps (3 jours) ainsi qu'à une borne inférieure à 240 unités de temps (1 jour).

Au niveau de la durée moyenne des tempêtes générées pendant la simulation, l'hypothèse suggérant une valeur de 24 heures est exploitée. Alors, la valeur de 240 est utilisée pour le paramètre *road_delay_width*. Puisque le simulateur fonctionne avec des unités de temps de 6 minutes, 240 unités de temps représentent une durée de 24 heures.

Pour ce qui est de la durée de rallongement du temps de parcours des camions utilisant une route pendant une tempête hivernale, une hypothèse suggérant un ralentissement de la vitesse de parcours des camions de 40% sera utilisée. Donc, une valeur de 40 est appliquée au paramètre *road_delay_severity*.

De plus, le paramètre *external_perday* est fixé à 5, puisque selon David Lepage, chercheur en maximisation de la valeur/aide à la décision chez *FPIInnovations*, il y a environ 5 camions de différentes compagnies par jour qui affluent à chaque localisation, créant ainsi de l'achalandage dans la planification puisque la présence de ces camions n'était pas prévue dans l'horaire initial.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Ce chapitre porte sur les résultats obtenus à la fin de la réalisation des trois approches. Lors de chacune des étapes de simulation, indépendamment de l'approche, les horaires de tournées de véhicules ont été simulés à 30 reprises, et ce pour chaque période, permettant ainsi l'obtention d'un échantillon considérable. Par la suite, avec les informations pertinentes des horaires de chaque période, un calcul de moyenne a de nouveau été fait afin d'obtenir un résultat global sur les données ci-dessous. Ce résultat d'ensemble représente des informations sur les délais moyens obtenus sur une planification annuelle. En procédant à la simulation d'un nombre considérable de réalisations pour les horaires de chaque période, l'incertitude et la variation des données recueillies diminuent considérablement. Cette méthodologie a donc permis d'obtenir un échantillon de données fiables, servant à acquérir des moyennes ainsi que des écarts-types pour les différentes informations ci-bas.

5.1 Les horaires initiaux

Tableau 5.1 - Résumé des résultats périodiques par camion de la simulation des horaires initiaux sans génération d'imprévus

| | |
|--|------|
| Nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,44 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,55 |
| Temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 3,24 |
| Écart type du temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 4,05 |

L'analyse des horaires de tournées de véhicules sans création d'imprévus par le simulateur (Scénario 0) a été exécutée à des fins de comparaisons avec les 3 autres scénarios. Il est pertinent de connaître le temps ainsi que le nombre initial de délais reliés à l'achalandage que ces horaires de tournées de véhicules impliquent afin de bien comparer les résultats des scénarios entre eux. Dans le cas de l'analyse du scénario 0, il a été nécessaire de faire qu'une seule réplication des horaires de tournées de véhicules par période, puisque les valeurs obtenues par le simulateur ne varient pas, en l'absence d'imprévus générés par ce dernier. Après l'obtention des résultats, la moyenne du nombre de délais engendrés par l'achalandage aux localisations est d'environ une demie occurrence d'imprévu par camion, et ce pour une période de deux semaines. De plus, le temps d'attente moyen aux sites forestiers ainsi qu'aux usines de transformation est

inférieur à 5 minutes par camion, toujours pour une période de deux semaines. On peut donc conclure que les horaires de tournées de véhicules générés par le programme de générations de colonnes et le PLNE en C++ sont en pratique optimaux, puisque les résultats obtenus au niveau des délais représentent des valeurs très minimes.

5.2 La première approche

Tableau 5.2 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la première approche

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,42 | 0,84 | 0,73 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,67 | 1,07 | 1,03 |
| Nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 6,69 | - | 6,71 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 6,27 | - | 6,29 |
| Temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 6,88 | 12,76 | 13,00 |
| Écart type du temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 13,72 | 19,05 | 20,80 |
| Temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 8,07 | - | 8,10 |
| Écart type du temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 8,25 | - | 8,20 |

Dans le cas du premier scénario, après avoir généré des conditions routières difficiles selon les valeurs des paramètres cités plus haut, nous obtenons un temps moyen de délais reliés à l'achalandage plus élevé de quelques minutes comparativement aux résultats du scénario 0, pour un total moyen de 7 minutes de délais par camion. De plus, le nombre moyen d'occurrences de délais reliés à l'achalandage aux localisations est le même entre les scénarios 0 et 1, soit approximativement un imprévu par tranche de deux périodes. Par contre, la génération de conditions routières difficiles sur les routes entre les sites forestiers et les usines de transformation a créé un nombre de retards moyens se dénombrant à environ 7, pour un total moyen d'environ 8 heures de délais sur les routes par période et par camion.

Pour ce qui est du deuxième scénario, en produisant uniquement des délais au niveau de l'achalandage aux usines de transformations ainsi qu'aux sites forestiers, on peut observer que le nombre ainsi que le temps total moyen des retards engendrés par l'achalandage augmente légèrement, soit environ un retard par camion périodiquement pour ce type d'imprévu, produisant un total moyen de 13 minutes de retard par camion.

Pour conclure avec le troisième scénario, en générant les deux types de délais, soit un scénario qui s'apparente le plus au contexte réel du milieu forestier, nous obtenons des valeurs moyennes, en lien avec l'achalandage aux localisations, d'environ un imprévu par camion périodiquement, pour un total de 13 minutes de délais par camion. De plus, les valeurs en termes de quantité ainsi qu'en temps moyens de délais au niveau des conditions routières difficiles sont respectivement d'environ 7 retards enregistrés par période et par camion, pour un total d'environ 8 heures de délais par camion.

5.3 La deuxième approche

Tableau 5.3 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la deuxième approche

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 2,16 | 2,29 | 2,28 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,15 | 0,23 | 0,29 |
| Nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 3,89 | - | 3,91 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 1,76 | - | 1,76 |
| Temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 14,03 | 16,02 | 15,96 |
| Écart type du temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 2,68 | 3,84 | 5,01 |
| Temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 3,58 | - | 3,57 |
| Écart type du temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 2,03 | - | 2,03 |

Pour ce qui est du premier scénario, la méthodologie d'ajout d'imprévus en lien avec les conditions routières difficiles dans la planification a contribué à retarder les tournées de véhicules d'en moyenne 3,5 heures par période par camion, réparties sur une moyenne de 4 intempéries par camion. De plus, indirectement, la création d'imprévus météorologiques sur les routes a engendré en moyenne 14 minutes d'achalandage aux localisations, par camion périodiquement, répartis sur une moyenne de 2 occurrences par camion.

Pour le deuxième scénario, en générant uniquement des imprévus en lien avec l'achalandage aux localisations par l'entremise de camions d'autres compagnies forestières, on obtient sensiblement les mêmes résultats qu'au premier scénario, soit une moyenne de 2 imprévus par période par camion, engendrant en moyenne 16 minutes de retard sur la planification initiale par camion.

Dans le cas du troisième scénario, nous obtenons significativement les mêmes résultats du nombre et du temps moyen engendrés par les imprévus qu'aux deux premiers scénarios précédents. Au niveau de l'achalandage aux localisations, nous obtenons en moyenne 2 délais par période et par camion, pour un total moyen de 16 minutes de retard par camion. Pour ce qui est des conditions météorologiques difficiles, ces dernières ont provoqué en moyenne 4 délais par camion périodiquement, pour un total moyen de 3,5 heures de retard par camion.

5.4 La troisième approche

Tableau 5.4 - Résumé des résultats périodiques par camion des trois scénarios pour la troisième approche

| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,52 | 0,64 | 0,56 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés à l'achalandage | 0,48 | 0,49 | 0,48 |
| Nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 1,47 | - | 1,46 |
| Écart type du nombre moyen de délais reliés aux conditions routières | 0,75 | - | 0,73 |
| Temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 58,54 | 89,08 | 65,69 |
| Écart type du temps de délai moyen relié à l'achalandage (en minutes) | 75,68 | 100,68 | 82,17 |
| Temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 1,38 | - | 1,38 |
| Écart type du temps de délai moyen relié aux conditions routières (en heures) | 0,96 | - | 0,96 |

Au niveau du premier scénario, la création de conditions routières difficiles sur les routes a engendré un retard périodique moyen de 1,4 heures par camion, et ce à raison d'un délai et demi par camion. Pour ce qui est de l'achalandage aux localisations, on peut observer le retard périodique moyen à raison d'une heure de retard par camion, et ce pour un nombre moyen d'occurrence d'un demi délai par camion.

Pour ce qui est du deuxième scénario, la génération de nouveaux camions externes dans le réseau a su augmenter le temps moyen de retards par camion à raison de 90 minutes périodiquement, et ce pour une moyenne d'occurrence du nombre de délais à 0,6 par camion.

Pour conclure avec le troisième scénario, le nombre moyen de délais engendrés par l'achalandage aux usines de transformations ainsi qu'aux sites forestiers s'élève à 65 minutes périodiquement par camion, à raison de 0,6 délais dénombrés par camion. Au niveau de la création de conditions météorologiques difficiles, on peut observer des résultats similaires au

premier scénario, soit une moyenne de 0,6 délais moyens périodiques par camion, et ce générant en moyenne 1,4 heures de retards par camion et par période.

CHAPITRE 6 ANALYSES

Premièrement, après avoir recueilli toutes les informations pertinentes à ce projet de recherche, il est intéressant de comparer, tel que montré à la figure et au tableau 6.1, le nombre de camions utilisés à chaque période, selon les trois différentes approches. Tel que mentionné plus haut, ce sont les PLNE qui décident du nombre de camions à utiliser pour la planification, selon l'ensemble de tournées de véhicules générées par le générateur de colonnes. À chaque période, le nombre de camions pour la deuxième approche, avec une moyenne de 41, est supérieur au nombre de camions de la première méthodologie, avec un nombre moyen de 25. Par contre, la troisième approche a nécessité une moyenne de 70 camions, ce qui est largement supérieur aux méthodologies précédentes. Étant donné l'ajout d'imprévus dans les tournées de véhicules avant l'utilisation des PLNE pour la deuxième et troisième approche, le nombre de camions optimal trouvé par ces modèles périodiquement, est minimisé par la fonction objectif, comparativement à la première approche. Avec l'insertion des deux types d'imprévus avant l'usage des PLNE, l'augmentation du nombre de camions utilisés entre la première méthodologie et les deux autres est sans aucun doute non négligeable. De plus, pour la première approche, le programme a réussi à trouver une solution optimale ne nécessitant aucune tournée de véhicules lors de la deuxième période, tandis que le programme de la deuxième approche engendre une solution optimale nécessitant l'usage de 8 camions lors de la deuxième période. Par contre, la troisième approche ne nécessite aucun camion aux périodes 1, 2, 3, 24, 25 et 26 puisque leur demande périodique respective de produits aux usines de transformation est nulle.

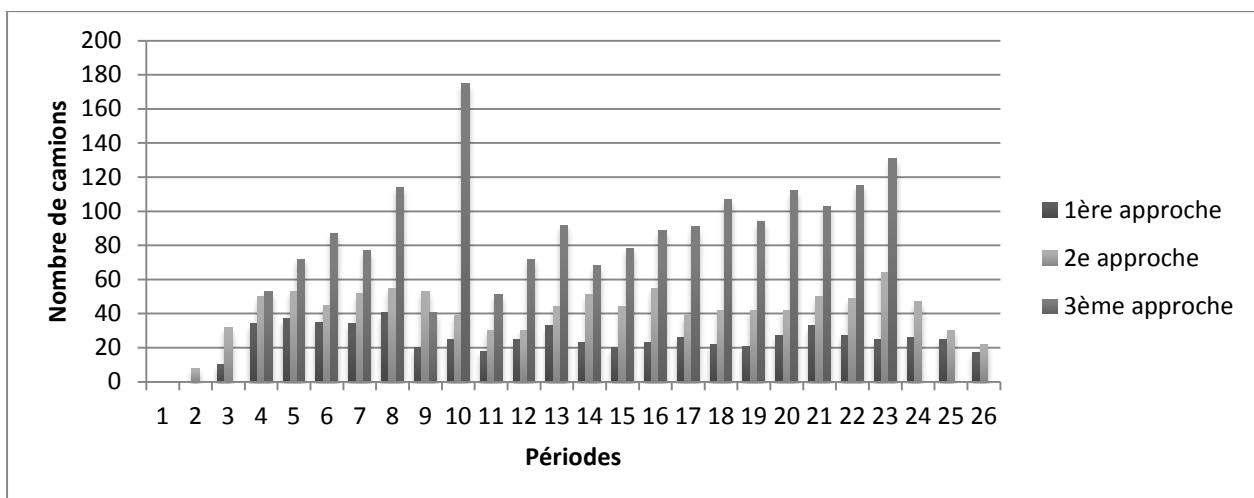


Figure 6.1 - Nombre de camions utilisés pour les tournées de véhicules à chaque période

Tableau 6.1 - Détails du nombre de camions utilisés pour les tournées de véhicules par période

| Période | 1 ^{ère} approche | 2 ^e approche | 3 ^e approche |
|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 8 | 0 |
| 3 | 10 | 32 | 0 |
| 4 | 34 | 50 | 53 |
| 5 | 37 | 53 | 72 |
| 6 | 35 | 45 | 87 |
| 7 | 34 | 52 | 77 |
| 8 | 41 | 55 | 114 |
| 9 | 20 | 53 | 41 |
| 10 | 25 | 39 | 175 |
| 11 | 18 | 30 | 51 |
| 12 | 25 | 30 | 72 |
| 13 | 33 | 44 | 92 |
| 14 | 23 | 51 | 68 |
| 15 | 20 | 44 | 78 |
| 16 | 23 | 55 | 89 |
| 17 | 26 | 39 | 91 |
| 18 | 22 | 42 | 107 |
| 19 | 21 | 42 | 94 |
| 20 | 27 | 42 | 112 |
| 21 | 33 | 50 | 103 |
| 22 | 27 | 49 | 115 |
| 23 | 25 | 64 | 131 |
| 24 | 26 | 47 | 0 |
| 25 | 25 | 30 | 0 |
| 26 | 17 | 22 | 0 |
| Moyenne | 24 | 41 | 70 |

Ensuite, si on analyse la création de camions externes dans la planification, générant ainsi de l'achalandage aux localisations, il est pertinent de regarder s'il y avait déjà des délais reliés à l'achalandage aux usines de transformations ainsi qu'aux sites forestiers dans les horaires initiaux. Selon la figure et le tableau 6.2, avant l'ajout de ce type d'imprévu, les horaires avaient en moyenne des délais au niveau de l'achalandage de l'ordre de 3 minutes périodiquement par camion. Par la suite, pour ce qui est de la première et de la deuxième approche, la moyenne des temps de délais reliés à ce type d'imprévu varie entre 7 et 16 minutes par camion, et ce pour des périodes de deux semaines de travail, indépendamment du scénario en question. Cependant, pour ce qui est de la troisième méthodologie, qu'il y ait génération de camion externes ou non, cette approche engendre des délais d'achalandage considérablement élevés aux localisations. Cet achalandage se situe entre 60 et 90 minutes périodiquement par camion, ce qui représente une augmentation très significative comparativement aux approches précédentes.

Par contre, nous pouvons conclure que l'insertion, peu importe le type de méthodologie, de 5 activités externes aux localisations en moyenne par jour n'a qu'un effet minime sur la planification annuelle des tournées de véhicules de la première et de la seconde méthodologie. De plus, si on observe le scénario le plus pessimiste, soit des délais s'élevant jusqu'à 90 minutes en moyenne par camion pour la troisième approche, ces temps d'imprévus sont présents, que ce soit avec ou sans la génération d'activités externes par le simulateur. Les horaires finaux de cette approche renferment déjà, a priori, des temps d'achalandage sur le réseau.

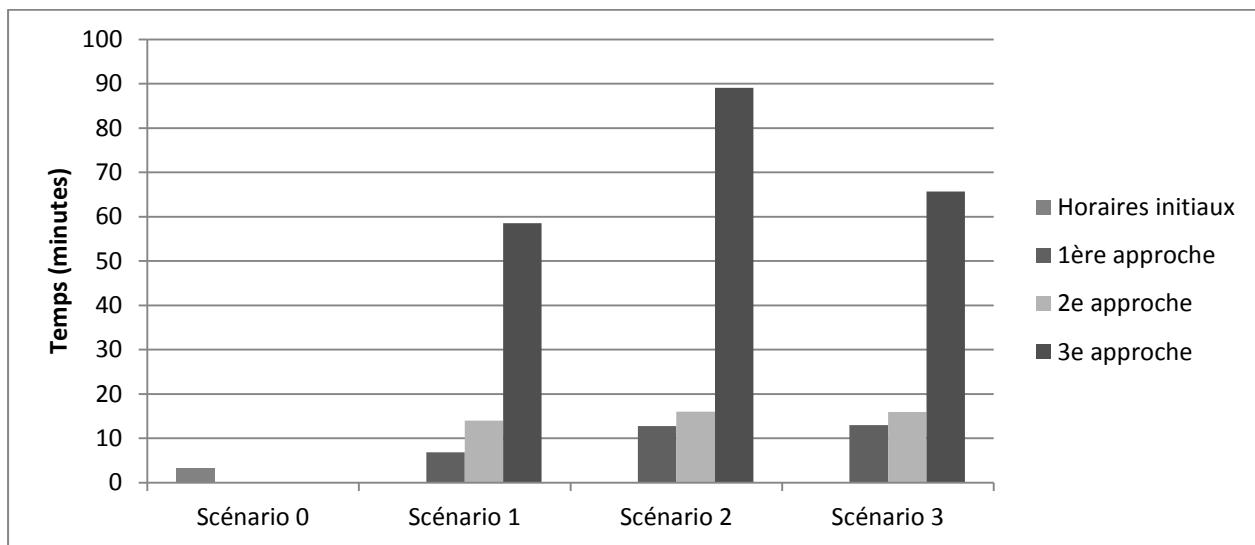


Figure 6.2 - Temps moyen de délais reliés à l'achalandage aux localisations périodiquement par camion

Tableau 6.2 - Délais moyens périodiques causés par l'achalandage aux localisations, par camion (minutes)

| Scénario | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|
| Horaires initiaux | 3,24 | - | - | - |
| 1 ^{ère} approche | - | 6,88 | 12,76 | 13,00 |
| 2 ^e approche | - | 14,03 | 16,02 | 15,96 |
| 2 ^e approche | - | 58,54 | 89,08 | 65,69 |

Pour ce qui est des délais en lien avec les conditions routières difficiles, ce type d'imprévu a été introduit dans la planification uniquement pour les scénarios 1 et 3. Selon la figure et le tableau 6.3, pour les mêmes paramètres de création de conditions routières difficiles, il y a un écart significatif entre les résultats de la première approche et les deux dernières. Un écart de plus de 4 heures en moyenne par camion sépare la première et la seconde méthodologie, ainsi que de plus de 6 heures en moyenne par camion entre la première et la troisième approche.

Il est pertinent de conclure que le fait d'ajouter des imprévus avant l'utilisation d'un PLNE, tel que fait dans la seconde et la troisième méthodologie, prévient les délais de cet ordre, soit des imprévus pouvant survenir dans le contexte forestier. L'introduction de conditions routières difficiles après la génération des horaires finaux du programme engendre des délais sur la planification qui sont non négligeables, occasionnant ainsi des coûts à non-valeur ajoutée de la part des camions transportant les billots de bois.

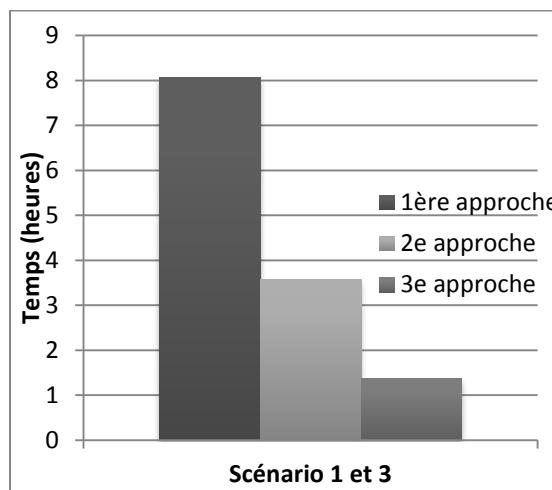


Figure 6.3 - Temps moyen de délais reliés aux conditions routières précaires périodiquement, par camion

Tableau 6.3 - Délais moyens périodiques causés par les conditions météorologiques difficiles, par camion (heures)

| Scénario | 1 & 3 |
|---------------------------|-------|
| 1 ^{ère} approche | 8,07 |
| 2 ^e approche | 3,58 |
| 3 ^e approche | 1,38 |

Par la suite, en analysant la figure et le tableau 6.4, soit le nombre de tournées de véhicules nécessaires pour les différentes approches, on peut observer des écarts éloquents entre les résultats des méthodologies étudiées. En comparant les PLNE utilisés dans ce projet de recherche, le PLNE dans *AIMMS* représente une meilleure alternative en termes de minimisation des distances parcourues par les camions lors de la planification des tournées de véhicules, tout en respectant les contraintes du modèle. À noter que la fonction objectif du PLNE dans *AIMMS* consiste à minimiser les déplacements de la flotte de camions.

Nous pouvons donc conclure que la troisième approche présente, à chacune des périodes, des économies considérables en termes de kilométrages parcourus par les camions, comparativement aux deux autres méthodologies. Il y a manifestement un lien plausible entre le fait que ce sont les camions de la troisième méthodologie qui parcourent le moins de distances pour répondre à la demandes des usines de transformation et que ce sont les camions de la même approche qui subissent le moins les contrecoups de la génération de conditions routières difficiles.

Tableau 6.4 - Moyenne du nombre de tournées de véhicules par période

| | |
|---------------------------|-----|
| 1 ^{ère} approche | 236 |
| 2 ^e approche | 545 |
| 3 ^e approche | 80 |

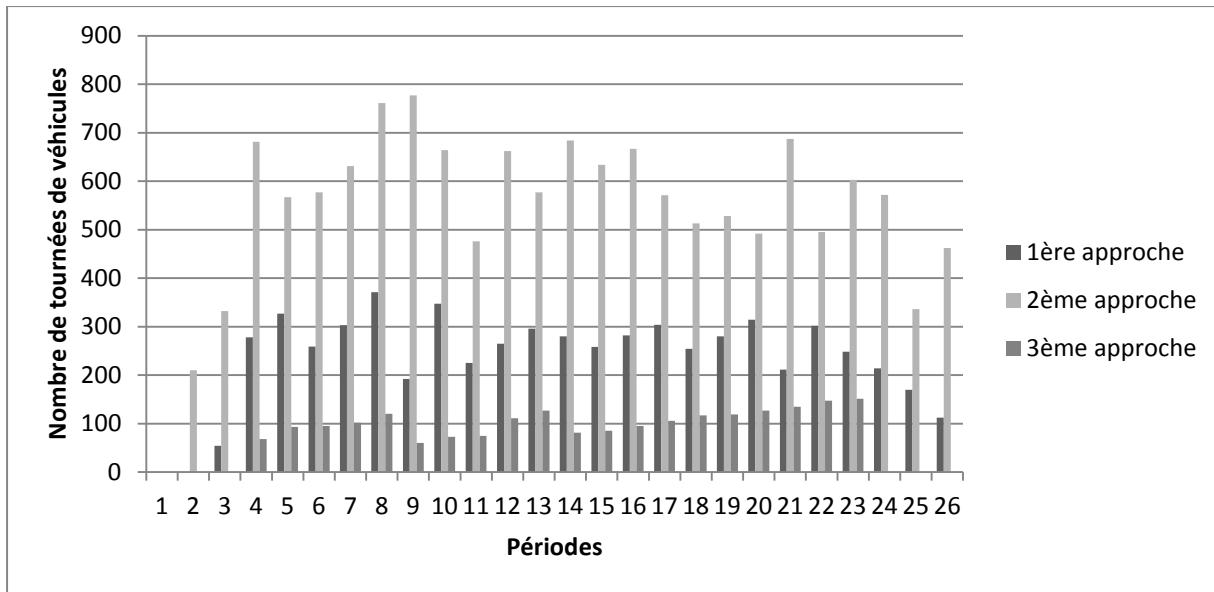


Figure 6.4 - Nombre total de tournées de véhicules par période

D'ailleurs, il est intéressant d'observer que les temps des délais reliés aux activités externes pour les scénarios 2 et 3, peu importe la méthodologie, sont pratiquement identiques, tout comme les temps des délais reliés aux conditions routières difficiles pour les scénarios 1 et 3. On peut donc conclure que pour les scénarios étudiés dans ce projet de recherche, les deux types d'imprévus générés par le simulateur sont indépendants. Les valeurs obtenues des deux types d'imprévus en question n'ont eu aucune influence sur la valeur d'autrui. En d'autres mots, même si le simulateur génère des imprévus en lien avec les conditions routières difficiles, si le temps de parcours d'un camion est ralenti par les conditions météorologiques problématiques, ces retards n'ont eu aucun effet sur la synchronisation de la machinerie aux localisations, n'engendrant pas de délais supplémentaires aux activités de chargement et de déchargement.

De plus, en observant les résultats finaux des délais engendrés par la création d'imprévus, les conditions routières difficiles ont eu un impact significatif et notoire sur la planification des tournées de véhicules, particulièrement pour les deux premières approches de cette étude, occasionnant en moyenne plusieurs heures de délais périodiques par camion. Par contre, la troisième méthodologie présente les résultats les plus intéressants à ce sujet, minimisant les conséquences des conditions routières difficiles sur la planification initiale.

Aussi, l'ajout de 5 camions de compagnies externes par jour à chaque localisation, et ce, à des moments aléatoires, n'a pas d'impact significatif sur l'horaire initial des tournées de véhicules dans l'analyse des deux premières approches. L'ajout de ces camions en question a généré des délais de l'ordre de quelques minutes par camion, ce qui est très peu significatif comparativement à la plage de temps de deux semaines des périodes de simulation. Cependant, que ce soit pour un scénario avec ou sans la génération de camions externes aux sites forestiers ainsi qu'aux usines de transformation, la troisième approche présente des temps de retard considérablement plus élevés que les autres méthodologies, en terme d'achalandage aux localisations.

Pour conclure, l'analyse des tournées de véhicules a démontré que le nombre de voyages nécessaires afin de répondre à la demande des usines de transformations est drastiquement inférieur pour la troisième approche que pour les autres méthodologies. Le fait que la fonction objectif du PLNE dans *AIMMS* soit de minimiser les distances parcourues par la flotte de camions se transmet favorablement sur les résultats analysés dans cet aspect, en comparaison avec les autres approches. Par contre, il est pertinent de rappeler que le PLNE en C++ a comme fonction objectif de minimiser les coûts d'opérations en termes de livraison des produits et d'entreposage. Cet algorithme doit donc minimiser les distances parcourues par la flotte de camions, mais aussi minimiser les quantités en réserve des produits en entrepôt, d'où la distinction entre les résultats de ces deux méthodologies.

CHAPITRE 7 RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet de recherche consiste à analyser les perturbations sur la planification initiale des tournées de véhicules lors d'ajout d'imprévus aux activités exécutées par les camions forestiers. Cette analyse porte sur les résultats obtenus par l'entremise des trois approches utilisées. Si l'on compare les trois méthodologies au niveau des perturbations engendrées sur la planification des tournées de véhicules, la seconde approche réagit mieux à l'addition d'imprévus, comme le démontre la figure et le tableau 7.1.

Si l'on compare la première ainsi que la seconde approche, la moyenne des temps de l'ensemble des délais sont plus élevés d'au moins 4 heures périodiquement par camion, ce qui n'est pas négligeable lorsqu'on fait la somme de ces retards sur l'ensemble de la planification, tel qu'illustré à la figure 7.1. Par contre, si l'on refait le même exercice, mais cette fois-ci entre la seconde et la troisième méthodologie, l'écart entre la somme des délais est beaucoup moins évident. On peut observer un écart beaucoup moins prononcé, soit une différence sur l'ensemble des temps de retards répertoriés du réseau d'environ 9 heures, en faveur de la seconde approche.

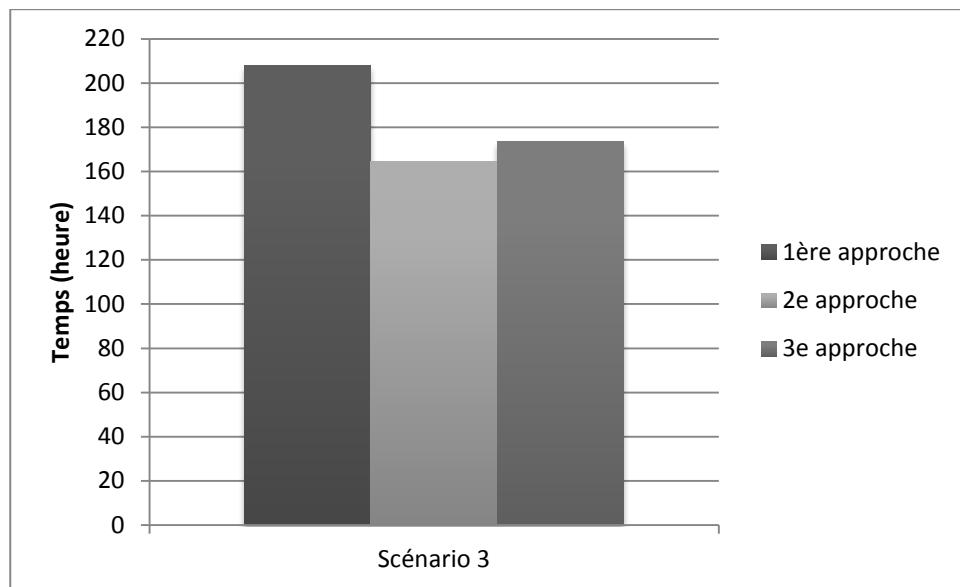


Figure 7.1 - Temps moyen total des délais générés pour le scénario 3 par période

Tableau 7.1 - Délais moyens périodiques cumulés pour le 3^e scénario (heures)

| Scénario | 3 |
|---------------------------|-----|
| 1 ^{ère} approche | 208 |
| 2 ^e approche | 164 |
| 3 ^e approche | 173 |

Les deux méthodologies appliquant le principe d'insertion de délais dans les tournées de véhicules avant la génération de la planification d'horaires finaux en nombres entiers procurent une meilleure adaptation face aux imprévus. Le fait d'engendrer des zones tampons dans les activités effectuées par les camions avant l'obtention d'une solution par le modèle permet d'obtenir une certaine flexibilité dans les horaires lorsque des imprévus surviennent. Cette flexibilité permet de mieux anticiper les intempéries pouvant survenir sur le terrain, et ainsi de diminuer les risques de perturbations importantes dans la planification des activités de transport.

Suivant les explications ci-haut, il est donc logique de considérer la seconde et la troisième approche comme des modèles plus intéressants afin de coordonner une planification de tournées de véhicules dans un domaine tel que celui du forestier. Par contre, ces deux approches de résolution présentent leurs lots d'avantages et d'inconvénients. Même si la deuxième approche occasionne moins de délais par camion et réagit mieux aux imprévus, la seconde méthodologie nécessite un plus grand nombre de tournées de véhicules dans le réseau, afin de respecter les contraintes du modèle. Et inversement, même si la troisième approche démontre un résultat qui requiert moins de tournées de véhicules pour satisfaire les exigences du modèle, cette dernière occasionne l'usage d'une plus grande flotte de camions afin de répondre aux demandes des clients.

Au final, même si le nombre de tournées de véhicules utilisé dans la deuxième approche est plus grand que dans les autres méthodologies, le temps total moyen périodique des délais générés pour le scénario 3, dans lequel les deux types d'imprévus sont introduits dans la planification, est inférieur à ce qui est observé, toutes méthodologies confondues. La méthodologie utilisée pour la seconde approche procure une meilleure adaptation de la planification générale des tournées des camions lorsque des imprévus surviennent.

En revanche, l'analyse des coûts globaux des différentes approches n'a pas été effectuée dans ce projet de recherche, étant donné que le simulateur ne tient pas compte de l'aspect

comptable des activités des camions. Il est donc impossible de chiffrer et de comparer au niveau financier les trois approches utilisées dans ce projet. Par contre, le programme de génération de colonnes considère l’aspect financier dans sa fonction objectif, donc la production des horaires finaux est toujours produite dans une optique de minimiser les coûts d’exploitation, au niveau de la première et de la seconde approche.

L’emphase de ce projet de recherche porte sur la comparaison des trois méthodologies, à savoir laquelle réagit le mieux à l’insertion d’imprévus dans la planification globale des tournées de véhicules du milieu forestier. Pour cet aspect, la deuxième approche procure des résultats plus concluants.

CHAPITRE 8 CONCLUSION

8.1 Contribution du mémoire

Les méthodologies étudiées dans ce projet de recherche, soit l'utilisation d'un programme de génération de colonnes, d'un simulateur, ainsi que de deux PLNE, peuvent s'avérer être des outils appropriés afin de tester la flexibilité des horaires de tournées de camions face à différents types d'imprévus pouvant se produire. Le contexte de cette étude demeure le secteur forestier, mais l'utilisation de cette méthodologie d'analyse de la planification de tournées de véhicules pourrait s'adapter à d'autres types de milieu industriel, tel que la distribution dans les produits alimentaires ou les produits pharmaceutiques, pour ne nommer que ceux-ci. Les perturbations dans une planification de tournées de véhicules peuvent engendrer des dépenses excédentaires non négligeables, d'où l'importance de prévenir ces dernières dès la création des horaires. La seconde ainsi que la troisième approche étudiées dans ce projet de recherche, montrant de meilleurs résultats que la première méthodologie, correspondent à des outils pertinents permettant d'optimiser un certain nombre de dépenses au niveau de la logistique de transport ainsi que de minimiser l'impact d'imprévus en générant des horaires d'activités plus flexibles.

8.2 Limites et contraintes du projet de recherche

Ce projet de recherche utilise comme données d'entrée des constantes obtenues par l'entremise de la compagnie *FPIinnovations*, intermédiaire entre les projets de recherche universitaires et l'industrie forestière. Les données recueillies au départ concernent la charge utile des camions, dépendamment du produit transporté, la demande annuelle, l'inventaire de départ pour les usines de transformations, l'offre annuelle des sites forestiers ainsi que les temps de parcours entre les localisations, dépendamment de la charge des camions.

Aussi, lors de certains aspects du projet de recherche, tel que la création de scénarios de simulation, il a été nécessaire de procéder à l'élaboration d'hypothèses, telles que l'impact de précipitations hivernales sur la vitesse de déplacement des camions ou encore la durée d'une tempête de neige. Par contre, l'objectif de cette étude consiste à comparer les trois approches décrites lors des chapitres précédents, afin de comparer la rigidité des méthodologies face à l'insertion d'imprévus dans la planification initiale des tournées de véhicules. Ainsi,

indépendamment des valeurs octroyées aux différents paramètres du simulateur, les trois approches ont été analysées sur une même base, permettant ainsi la comparaison de ces dernières.

De plus, il existe plusieurs aspects faisant partie du contexte du secteur forestier qui n'ont pas été considérés dans ce projet de recherche, limitant ainsi la pertinence des résultats obtenus sur les horaires de tournées de véhicules. Dans un contexte de transport, l'aspect de la main d'œuvre, soit les chauffeurs de camion, ne doit pas être négligé lors de l'élaboration de la planification logistique. En pratique, ces derniers commencent et terminent leur journée à la même usine de production et doivent avoir des interruptions de leurs activités à l'heure des repas venu, ce dont les horaires utilisés dans ce projet ne tiennent pas compte. Aussi, les camions utilisés dans les tournées de véhicules exigent un niveau de maintenance adéquat afin que ces derniers opèrent de façon régulière. Par exemple, lorsque les camions ont un entretien mécanique ou un remplissage de carburant à faire, il est pertinent de le prévoir dans la planification initiale. Cet aspect de l'entretien n'est pas considéré dans l'élaboration des horaires de tournées de véhicules de cette étude. De plus, d'autres types d'imprévus non traités dans ce projet peuvent survenir, tels un bris d'équipement au niveau des chargeurs ou des camions. Un dernier élément non respecté dans ce projet de recherche constitue les heures d'opération des localisations. Ces dernières peuvent ne pas présenter des heures d'ouvertes de 24 heures par jour, et ce tout au long de l'année. Cette caractéristique peut affecter considérablement la réalisation de la planification finale des tournées de véhicules.

Tous ces éléments qui n'ont pas été traités dans cette analyse mettent en perspective les résultats obtenus dans cette étude ainsi que son intégration comme outil à utiliser dans le secteur forestier.

8.3 Nouvelles voies de recherche

Il serait intéressant d'explorer certaines avenues de recherche alternatives en lien avec ce projet d'études, afin d'enrichir l'analyse de la planification des tournées de véhicules dans le milieu forestier. Premièrement, l'intégration du programme de génération de colonnes avec le simulateur pourrait s'avérer très pertinente. Dans le cadre de ce projet, ces deux programmes informatiques utilisés sont indépendants et la combinaison de ces derniers afin de créer une plate-forme pourrait se révéler être un outil plus convivial. De plus, toujours dans l'optique de

rendre ces outils plus intuitifs, il serait approprié de créer une interface usager, permettant l'utilisation de ces programmes par des personnes qui n'ont pas nécessairement de connaissances approfondies en informatique ou en programmation.

Dans un autre ordre d'idées, il serait judicieux d'inclure la notion de coûts dans le simulateur, afin d'obtenir des informations sur l'ensemble des dépenses engendrés par les imprévus que subissent les camions des tournées de véhicules. Pour cela, il faudrait chiffrer en termes monétaires les coûts reliés aux retards causés par les conditions météorologiques difficiles ainsi que par les temps d'attente aux localisations. Grâce à cet aspect financier, il serait pertinent d'analyser les trois approches utilisées dans ce projet en lien avec ce niveau budgétaire. Il serait intéressant de savoir quelle approche est la plus économique à exploiter.

BIBLIOGRAPHIE

M. Acuna, M. Brown, and L. Mirowski, “Improving forestry transport efficiency through truck schedule optimization: a case study and software tool for the Australian industry,” presented at the FORMEC, Austria, 2011, pp. 9–13.

Y. Adulyasak, J.-F. Cordeau, and R. Jans. Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1):103–120, 2013. doi:10.1287/ijoc.2013.0550.

O.S. Bajgiran, M.K. Zanjani, and M. Noureldath. A langrangian relaxation based heuristic for integrated lumber supply chain tactical planning. Technical Report CIRRELT-2014-34, CIRRELT, July 2014. <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2014-34.pdf>.

R. Baldacci, N. Christofides, and A. Mingozzi. An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*, 115(2):351–385, 2008. doi:10.1007/s10107-007-0178-5.

R. Baldacci, A. Mingozzi, and R. Roberti. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, 218(1):1–6, 2012. doi:10.1016/j.ejor.2011.07.037.

M.L. Balinski and R.E. Quandt. On an integer program for a delivery problem. *Operations Research*, 12(2):300–304, 1964. doi:10.1287/opre.12.2.300.

D. Beaudoin, L. LeBel, and J.-M. Frayret. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1):128–140, 2007. doi:10.1139/x11-175.

W.J. Bell, L.M. Dalberto, M.L. Fisher, A.J. Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R.G. Mack, and P.J. Prutzman. Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, 13(6):4–23, 1983. doi:10.1287/inte.13.6.4.

R. Bent and P. Van Hentenryck. A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 33(4): 875–893, 2006. doi:10.1016/j.cor.2004.08.001.

- G. Berbeglia, J.-F. Cordeau, I. Gribkovskaia, and G. Laporte. Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP*, 15(1):1–31, 2007. doi:10.1007/s11750-007-0009-0.
- V. Borodin, F. Hnaien, N. Labadie, J. Bourtembourg, “A discrete event simulation model for harvest operations under stochastic conditions,” presented at the IEEE 2013, 2013, pp. 708–713.
- J. Bramel and D. Simchi-Levi. A location based heuristic for general routing problems. *Operations Research*, 43(4):649–660, 1995. doi:10.1287/opre.43.4.649.
- D. Bredström, P. Jönsson, and M. Rönnqvist. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. *International Transactions in Operational Research*, 17(2):155–177, 2010. doi:10.1111/j.1475-3995.2009.00749.x.
- D. Bredström and M. Rönnqvist. Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1):19–31, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2007.07.033.
- P. Chandra and M.L. Fisher. Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, 72(3):503–517, 1994. doi:10.1016/0377-2217(94)90419-7.
- E. Choi and D.-W. Tcha. A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(7):2080–2095, 2007. doi:10.1016/j.cor.2005.08.002.
- M. Christiansen and B. Nygreen. Robust inventory ship routing by column generation. In G. Desaulniers, J. Desrosiers, and M.M. Solomon, editors, *Column generation*, pages 197–224. Springer, 2005. doi:10.1007/0-387-25486-2_7.
- G. Clarke and J. W. Wright. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4):568–581, 1964. doi:10.1287/opre.12.4.568.
- L.C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte. Thirty years of inventory-routing. *Transportation Science*, 48(1):1–19, 2013. doi:10.1287/trsc.2013.0472.

L.C. Coelho and G. Laporte. The exact solution of several classes of inventory- routing problems. *Computers & Operations Research*, 40(2):558–565, 2012. doi:10.1016/j.cor.2012.08.012.

J.-F. Cordeau, M. Gendreau, A. Hertz, G. Laporte, and J.-S. Sormany. New heuristics for the vehicle routing problem. In A. Langevin and D. Riopel, editors, *Logistics Systems: Design and Optimization*, pages 279–297. Springer US, 2005. doi:10.1007/0-387-24977-X_9.

J.-F. Cordeau and G. Laporte. The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1):29–46, 2007. doi:10.1007/s10479-007-0170-8.

J.-F. Cordeau, G. Laporte, and A. Mercier. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 52(8): 928–936, 2001.

S. D'Amours, M. Rönnqvist, and A. Weintraub. Using operational research for sup- ply chain planning in the forest products industry. *INFOR*, 46(4):265–281, 2008. doi:10.3138/infor.46.4.265.

G.B. Dantzig and J.H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6 (1):80–91, 1959. doi:10.1287/mnsc.6.1.80.

G. Desaulniers, J.G. Rakke, and L.C. Coelho. A branch-price-and-cut algorithm for the inventory-routing problem. Technical Report G-2014-19, GERAD, April 2014. <http://www.gerad.ca/fichiers/cahiers/G-2014-19.pdf>.

M. Desrochers, J. Desrosiers, and M. Solomon. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research*, 40(2):342–354, 1992. doi:10.1287/opre.40.2.342.

M. Deyi, Z. Wanlin, and C. Xiaoding, “A Transportation Problem with Uncertain Truck Times and Unit Costs,” University of China, Tianjin, China, pp. 30–35, 03-Apr-2013.

M. Drexl. Applications of the vehicle routing problem with trailers and trans- shipments. *European Journal of Operational Research*, 227(2):275–283, 2013. doi:10.1016/j.ejor.2012.12.015.

M. Dror and P. Trudeau. Split delivery routing. *Naval Research Logistics (NRL)*, 37(3): 383–402, 1990. doi:10.1002/nav.3800370304.

M.J.R. Ebben, M.C. Van Der Heijden, and A. Van Harten. Dynamic transport scheduling under multiple resource constraints. *European Journal of Operational Research*, 167(2): 320–335, 2005. doi:10.1016/j.ejor.2004.03.020.

R. Fukasawa, H. Longo, J. Lysgaard, M.P. de Aragão, M. Reis, E. Uchoa, and R.F. Werneck. Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 106(3):491–511, 2006. doi:10.1007/s10107-005-0644-x.

M.R. Garey and D.S. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1979.

M. Gendreau, A. Hertz, and G. Laporte. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, 40(10):1276–1290, 1994. doi:10.1287/mnsc.40.10.1276.

M. Gendreau, G. Laporte, C. Musaraganyi, and É.D. Taillard. A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26(12): 1153–1173, 1999. doi:10.1016/S0305-0548(98)00100-2.

Glover, F. and M. Laguna (1993). Tabu Search. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, C. Reeves, ed., Blackwell Scientific Publishing, pp. 71-140.

B. Golden, A. Assad, L. Levy, and F. Gheysens. The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1):49–66, 1984. doi:10.1016/0305-0548(84)90007-8.

N. El Hachemi, Mi. Gendreau, and L.-M. Rousseau, “A Heuristic to Solve the Synchronized Log-Truck Scheduling Problem,” pp. 666–673, 2013.

N. El Hachemi, Mi. Gendreau, and L.-M. Rousseau, “A Hybrid Constraint Programming Approach to the Log-Truck Scheduling Problem,” pp. 163–178, 09-Feb-2010.

K. Haridass, J. Valenzuela, A. D. Yucekaya, and T. McDonald, “Scheduling a log transport system using simulated annealing,” pp. 302–316, Apr-2014.

C. Hempsch and S. Irnich. Vehicle routing problems with inter-tour resource constraints. In B. Golden, S. Raghavan, and E. Wasil, editors, *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, volume 43 of *Operations Research/Computer Science Interfaces*, pages 421–444. Springer US, 2008. doi:10.1007/978-0-387-77778-8_19.

J. Karlsson, M. Rönnqvist, and J. Bergström. Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews. *International Transactions in Operational Research*, 10(5): 413–431, 2003. doi:10.1111/1475-3995.00419.

G. Laporte. Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4):408–416, 2009.

A.N. Letchford, R.W. Eglese, and J. Lysgaard. Multistars, partial multistars and the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 94(1):21–40, 2002. doi:10.1007/s10107-002-0336-8.

J. Lysgaard, A.N. Letchford, and R.W. Eglese. A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 100(2):423–445, 2004. doi:10.1007/s10107-003-0481-8.

R. J. McCormack, “TRUCKSIM - A Log Truck Performance Simulator,” pp. 31–37, 1990.

S. Michel and F. Vanderbeck. A column-generation based tactical planning method for inventory routing. *Operations Research*, 60(2):382–397, 2012. doi:10.1287/opre.1110.1015.

S.A. Mitchell. Operational forest harvest scheduling optimisation: A mathematical model and solution strategy. PhD thesis, University of Auckland, December 2004. <http://hdl.handle.net/2292/1761>.

M. Palmgren, M. Rönnqvist, and P. Värbrand, “A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound,” pp. 433–447, Sep-2003.

D. Pisinger and S. Ropke. A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34(8):2403–2435, 2007. doi:10.1016/j.cor.2005.09.012.

E. Prescott-Gagnon, G. Desaulniers, and L.-M. Rousseau. A branch-and-price-based large neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Networks*, 54(4):190–204, 2009. doi:10.1002/net.20332.

N. Ramkumar, P. Subramanian, T.T. Narendran, and K. Ganesh. Mixed integer linear programming model for multi-commodity multi-depot inventory routing problem. OPSEARCH, 49(4):413–429, 2012. doi:10.1007/s12597-012-0087-0.

M. Rönnqvist. Optimization in forestry. Mathematical Programming, 97(1-2):267–284, 2003. doi:10.1007/s10107-003-0444-0.

S. Ropke, J.-F. Cordeau, and G. Laporte. Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. Networks, 49(4):258–272, 2007. doi:10.1002/net.20177.

J. G. Rix, L.-M. Rousseau and G. Pesant. A Column Generation Algorithm for Tactical Timber Transportation Planning. Technical Report CIRRELT-2013-40, CIRRELT, 2013

M.A. Salazar-Aguilar, A. Langevin, and G. Laporte. Synchronized arc routing for snow plowing operations. Computers & Operations Research, 39(7):1432–1440, 2012. doi:10.1016/j.cor.2011.08.014.

A. H. Sepasi. A study of optimization in forestry logistics. University of Toronto, 2012.

P. Toth and D. Vigo. Vehicle routing: problems, methods, and applications. Siam, Philadelphia, PA, USA, 2014.

S.C. Ho and D. Haugland. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. Computers & Operations Research, 31(12):1947–1964, 2004. doi:10.1016/S0305-0548(03)00155-2.

T. Vidal, T. G. Crainic, M. Gendreau, N. Lahrichi, and W. Rei, “A Hybrid Genetic Algorithm for Multidepot and Periodic Vehicle Routing Problems,” *Operations Research*, pp. 611–624, 01-Jun-2012.

H. Xu, Z.-L. Chen, S. Rajagopal, and S. Arunapuram. Solving a practical pickup and delivery problem. Transportation Science, 37(3):347–364, 2003. doi:10.1287/trsc.37.3.347.16044.

ANNEXE A – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA SIMULATION DES HORAIRES INITIAUX SANS GÉNÉRATION D’IMPRÉVUS

Dans les quatre prochaines annexes, il sera question des informations recueillies par le simulateur à la complétion des différentes approches. Les données extraites sont séparées par approche ainsi que par type de scénario. À noter que les périodes 1 et 2 n’apparaissent pas dans certains résultats ci-dessous, ce qui sous-entend que dans ces circonstances, le programme a résolu ce problème sans utilisation nécessaire de camions de livraison pour ces périodes en question. Ainsi, aucun horaire de tournées de véhicules n’existe pour ces périodes.

Tableau A.1 - Résultats des délais reliés à l’achalandage par camion pour la simulation des horaires initiaux sans imprévus

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps moyen de délais (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 3 | 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 34 | 0,82 | 5,29 | 0,86 | 5,59 |
| 5 | 37 | 0,78 | 6,97 | 0,93 | 7,83 |
| 6 | 35 | 0,34 | 3,60 | 0,47 | 6,28 |
| 7 | 34 | 0,50 | 3,18 | 0,61 | 3,91 |
| 8 | 41 | 0,20 | 1,17 | 0,40 | 2,38 |
| 9 | 20 | 0,25 | 1,50 | 0,43 | 2,60 |
| 10 | 25 | 0,76 | 5,28 | 0,86 | 5,71 |
| 11 | 18 | 0,17 | 1,00 | 0,37 | 2,24 |
| 12 | 25 | 0,44 | 3,12 | 0,70 | 5,12 |
| 13 | 33 | 0,09 | 0,55 | 0,29 | 1,72 |
| 14 | 23 | 1,00 | 9,13 | 0,98 | 7,89 |
| 15 | 20 | 1,00 | 7,20 | 0,84 | 6,18 |
| 16 | 23 | 0,43 | 2,61 | 0,50 | 2,97 |
| 17 | 26 | 0,27 | 2,08 | 0,52 | 4,06 |
| 18 | 22 | 0,50 | 3,27 | 0,50 | 3,49 |
| 19 | 21 | 0,62 | 5,71 | 0,65 | 6,54 |
| 20 | 27 | 0,56 | 3,56 | 0,68 | 4,40 |
| 21 | 33 | 0,39 | 2,36 | 0,49 | 2,93 |
| 22 | 27 | 0,41 | 2,44 | 0,56 | 3,37 |
| 23 | 25 | 0,12 | 0,72 | 0,32 | 1,95 |
| 24 | 26 | 0,04 | 0,23 | 0,19 | 1,15 |
| 25 | 25 | 0,36 | 2,88 | 0,48 | 4,20 |
| 26 | 17 | 0,47 | 3,88 | 0,50 | 4,57 |
| Moyenne | 24 | 0,44 | 3,24 | 0,55 | 4,05 |

ANNEXE B – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA PREMIÈRE APPROCHE

Tableau B.1 – Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 3 | 10 | 0,02 | 0,36 | 0,13 | 2,79 |
| 4 | 34 | 0,54 | 11,40 | 0,82 | 19,15 |
| 5 | 37 | 0,59 | 10,01 | 0,84 | 16,65 |
| 6 | 35 | 0,28 | 5,67 | 0,60 | 14,07 |
| 7 | 34 | 0,39 | 5,76 | 0,68 | 12,65 |
| 8 | 41 | 0,37 | 6,93 | 0,66 | 14,27 |
| 9 | 20 | 0,25 | 3,89 | 0,57 | 11,17 |
| 10 | 25 | 0,74 | 13,34 | 0,86 | 20,93 |
| 11 | 18 | 0,23 | 4,68 | 0,54 | 12,88 |
| 12 | 25 | 0,35 | 6,24 | 0,63 | 13,08 |
| 13 | 33 | 0,29 | 6,64 | 0,64 | 15,84 |
| 14 | 23 | 0,78 | 14,15 | 1,12 | 23,20 |
| 15 | 20 | 0,75 | 11,02 | 1,03 | 18,75 |
| 16 | 23 | 0,57 | 8,77 | 0,78 | 15,88 |
| 17 | 26 | 0,39 | 6,50 | 0,67 | 13,03 |
| 18 | 22 | 0,53 | 7,15 | 0,79 | 14,87 |
| 19 | 21 | 0,41 | 5,64 | 0,71 | 12,11 |
| 20 | 27 | 0,50 | 5,93 | 0,72 | 11,85 |
| 21 | 33 | 0,27 | 3,73 | 0,50 | 9,21 |
| 22 | 27 | 0,39 | 6,94 | 0,66 | 14,39 |
| 23 | 25 | 0,11 | 2,26 | 0,33 | 7,72 |
| 24 | 26 | 0,10 | 1,81 | 0,31 | 6,77 |
| 25 | 25 | 0,62 | 8,38 | 0,77 | 14,15 |
| 26 | 17 | 0,57 | 8,04 | 0,76 | 13,97 |
| Moyenne | 24 | 0,42 | 6,88 | 0,67 | 13,72 |

Tableau B.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 3 | 10 | 2,92 | 4,65 | 2,95 | 4,90 |
| 4 | 34 | 5,91 | 8,77 | 5,46 | 8,07 |
| 5 | 37 | 5,88 | 7,72 | 5,99 | 8,02 |
| 6 | 35 | 5,01 | 5,84 | 5,66 | 6,99 |
| 7 | 34 | 6,21 | 8,72 | 5,66 | 8,60 |
| 8 | 41 | 5,98 | 7,21 | 5,37 | 6,97 |
| 9 | 20 | 6,52 | 6,92 | 5,91 | 7,70 |
| 10 | 25 | 8,90 | 8,73 | 9,16 | 10,09 |
| 11 | 18 | 8,78 | 8,91 | 7,79 | 9,29 |
| 12 | 25 | 6,68 | 7,39 | 6,90 | 8,23 |
| 13 | 33 | 6,46 | 6,51 | 6,62 | 7,18 |
| 14 | 23 | 8,17 | 7,95 | 6,89 | 7,40 |
| 15 | 20 | 8,98 | 11,16 | 7,77 | 9,66 |
| 16 | 23 | 8,25 | 9,77 | 6,96 | 9,69 |
| 17 | 26 | 8,10 | 10,10 | 6,54 | 9,99 |
| 18 | 22 | 8,03 | 9,59 | 7,22 | 10,32 |
| 19 | 21 | 9,01 | 10,69 | 8,85 | 10,66 |
| 20 | 27 | 7,97 | 9,49 | 7,73 | 9,38 |
| 21 | 33 | 4,32 | 5,42 | 4,72 | 6,14 |
| 22 | 27 | 7,52 | 8,75 | 6,72 | 8,28 |
| 23 | 25 | 6,77 | 7,93 | 5,60 | 7,17 |
| 24 | 26 | 5,50 | 7,12 | 6,18 | 8,18 |
| 25 | 25 | 4,48 | 7,02 | 4,07 | 7,60 |
| 26 | 17 | 4,23 | 7,33 | 3,85 | 7,48 |
| Moyenne | 24 | 6,69 | 8,07 | 6,27 | 8,25 |

Tableau B.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 3 | 10 | 0,21 | 4,08 | 0,53 | 10,55 |
| 4 | 34 | 1,31 | 20,58 | 1,40 | 25,72 |
| 5 | 37 | 1,20 | 18,03 | 1,39 | 24,40 |
| 6 | 35 | 0,68 | 12,45 | 0,90 | 18,62 |
| 7 | 34 | 0,87 | 12,02 | 1,07 | 17,57 |
| 8 | 41 | 0,72 | 12,31 | 1,04 | 21,17 |
| 9 | 20 | 0,64 | 10,12 | 0,97 | 17,97 |
| 10 | 25 | 1,28 | 21,06 | 1,37 | 26,76 |
| 11 | 18 | 0,57 | 8,68 | 0,91 | 16,04 |
| 12 | 25 | 0,86 | 12,28 | 1,10 | 18,37 |
| 13 | 33 | 0,57 | 10,28 | 0,88 | 17,32 |
| 14 | 23 | 1,20 | 17,07 | 1,51 | 24,73 |
| 15 | 20 | 1,48 | 20,67 | 1,57 | 25,65 |
| 16 | 23 | 1,09 | 14,64 | 1,14 | 18,86 |
| 17 | 26 | 0,81 | 12,72 | 1,10 | 18,68 |
| 18 | 22 | 0,91 | 13,08 | 1,14 | 18,95 |
| 19 | 21 | 1,01 | 14,78 | 1,14 | 20,25 |
| 20 | 27 | 1,00 | 14,42 | 1,23 | 20,18 |
| 21 | 33 | 0,70 | 11,24 | 0,97 | 19,08 |
| 22 | 27 | 0,75 | 9,97 | 1,02 | 16,11 |
| 23 | 25 | 0,38 | 4,60 | 0,74 | 10,62 |
| 24 | 26 | 0,42 | 7,86 | 0,75 | 14,50 |
| 25 | 25 | 0,79 | 11,78 | 0,96 | 17,58 |
| 26 | 17 | 0,76 | 11,58 | 0,92 | 17,46 |
| Moyenne | 24 | 0,84 | 12,76 | 1,07 | 19,05 |

Tableau B.4 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 3 | 10 | 0,17 | 3,52 | 0,42 | 9,34 |
| 4 | 34 | 0,93 | 17,92 | 1,19 | 25,13 |
| 5 | 37 | 0,86 | 16,26 | 1,15 | 23,93 |
| 6 | 35 | 0,62 | 12,74 | 0,98 | 21,30 |
| 7 | 34 | 0,72 | 11,87 | 0,99 | 19,92 |
| 8 | 41 | 0,75 | 14,41 | 1,07 | 22,89 |
| 9 | 20 | 0,53 | 9,86 | 0,95 | 19,11 |
| 10 | 25 | 1,21 | 23,35 | 1,33 | 30,30 |
| 11 | 18 | 0,65 | 11,98 | 1,09 | 22,54 |
| 12 | 25 | 0,78 | 13,72 | 1,20 | 22,22 |
| 13 | 33 | 0,67 | 14,32 | 0,98 | 21,27 |
| 14 | 23 | 1,06 | 18,33 | 1,51 | 28,30 |
| 15 | 20 | 0,99 | 15,81 | 1,23 | 22,09 |
| 16 | 23 | 0,90 | 14,56 | 1,13 | 21,59 |
| 17 | 26 | 0,73 | 12,44 | 1,08 | 19,79 |
| 18 | 22 | 0,80 | 13,07 | 1,06 | 21,25 |
| 19 | 21 | 0,66 | 10,41 | 1,00 | 18,35 |
| 20 | 27 | 0,86 | 13,10 | 1,10 | 20,38 |
| 21 | 33 | 0,54 | 9,53 | 0,82 | 16,69 |
| 22 | 27 | 0,66 | 11,25 | 0,95 | 18,60 |
| 23 | 25 | 0,23 | 4,16 | 0,50 | 10,10 |
| 24 | 26 | 0,32 | 6,87 | 0,62 | 14,54 |
| 25 | 25 | 0,98 | 17,42 | 1,24 | 27,17 |
| 26 | 17 | 0,91 | 15,07 | 1,14 | 22,32 |
| Moyenne | 24 | 0,73 | 13,00 | 1,03 | 20,80 |

Tableau B.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 3 | 10 | 3,46 | 5,79 | 3,24 | 5,71 |
| 4 | 34 | 5,86 | 8,42 | 5,41 | 8,40 |
| 5 | 37 | 5,89 | 7,67 | 6,43 | 8,40 |
| 6 | 35 | 5,17 | 6,38 | 5,91 | 7,36 |
| 7 | 34 | 5,94 | 8,07 | 5,54 | 8,25 |
| 8 | 41 | 6,00 | 6,88 | 5,44 | 6,58 |
| 9 | 20 | 6,58 | 6,82 | 6,10 | 7,46 |
| 10 | 25 | 8,91 | 8,52 | 8,96 | 9,50 |
| 11 | 18 | 8,29 | 8,96 | 7,70 | 10,16 |
| 12 | 25 | 6,91 | 6,87 | 6,89 | 7,56 |
| 13 | 33 | 6,32 | 6,32 | 6,43 | 6,74 |
| 14 | 23 | 8,82 | 8,52 | 7,11 | 7,67 |
| 15 | 20 | 9,41 | 11,81 | 7,88 | 9,90 |
| 16 | 23 | 8,39 | 10,33 | 7,19 | 10,19 |
| 17 | 26 | 7,88 | 9,78 | 6,64 | 9,11 |
| 18 | 22 | 7,59 | 9,03 | 6,87 | 9,58 |
| 19 | 21 | 8,12 | 9,49 | 8,12 | 9,72 |
| 20 | 27 | 8,21 | 9,99 | 7,74 | 9,58 |
| 21 | 33 | 4,27 | 5,67 | 4,47 | 6,05 |
| 22 | 27 | 7,89 | 8,90 | 6,86 | 8,23 |
| 23 | 25 | 6,98 | 8,93 | 5,62 | 7,69 |
| 24 | 26 | 5,47 | 7,37 | 6,35 | 8,47 |
| 25 | 25 | 4,49 | 6,79 | 4,14 | 6,98 |
| 26 | 17 | 4,30 | 7,13 | 3,95 | 7,46 |
| Moyenne | 24 | 6,71 | 8,10 | 6,29 | 8,20 |

ANNEXE C – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA DEUXIÈME APPROCHE

Tableau C.1 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 2 | 8 | 3,52 | 21,35 | 0,06 | 1,37 |
| 3 | 32 | 1,96 | 13,51 | 0,26 | 4,50 |
| 4 | 50 | 1,55 | 12,19 | 0,40 | 7,11 |
| 5 | 53 | 1,79 | 13,22 | 0,28 | 5,19 |
| 6 | 45 | 2,25 | 13,61 | 0,04 | 0,53 |
| 7 | 52 | 2,91 | 17,97 | 0,14 | 2,21 |
| 8 | 55 | 2,68 | 19,20 | 0,33 | 6,54 |
| 9 | 53 | 2,68 | 17,88 | 0,22 | 4,04 |
| 10 | 39 | 2,18 | 13,13 | 0,01 | 0,26 |
| 11 | 30 | 2,66 | 16,58 | 0,11 | 2,23 |
| 12 | 30 | 4,41 | 26,85 | 0,08 | 1,12 |
| 13 | 44 | 0,68 | 6,16 | 0,17 | 2,60 |
| 14 | 51 | 2,78 | 17,04 | 0,06 | 1,32 |
| 15 | 44 | 4,16 | 26,08 | 0,19 | 3,17 |
| 16 | 55 | 2,26 | 14,20 | 0,14 | 2,47 |
| 17 | 39 | 1,14 | 7,24 | 0,12 | 1,93 |
| 18 | 42 | 2,30 | 14,38 | 0,10 | 2,24 |
| 19 | 42 | 1,42 | 8,76 | 0,06 | 1,16 |
| 20 | 42 | 1,99 | 12,10 | 0,08 | 1,13 |
| 21 | 50 | 1,13 | 6,88 | 0,04 | 0,72 |
| 22 | 49 | 1,97 | 11,93 | 0,03 | 0,61 |
| 23 | 64 | 1,80 | 12,10 | 0,11 | 2,38 |
| 24 | 47 | 1,21 | 7,86 | 0,13 | 1,92 |
| 25 | 30 | 0,97 | 7,59 | 0,27 | 4,23 |
| 26 | 22 | 1,63 | 13,04 | 0,33 | 6,15 |
| Moyenne | 41 | 2,16 | 14,03 | 0,15 | 2,68 |

Tableau C.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 2 | 8 | 6,68 | 8,72 | 2,56 | 4,67 |
| 3 | 32 | 4,92 | 5,20 | 2,23 | 2,99 |
| 4 | 50 | 3,97 | 4,05 | 1,92 | 2,49 |
| 5 | 53 | 2,50 | 2,41 | 1,45 | 1,76 |
| 6 | 45 | 2,92 | 2,71 | 1,44 | 1,57 |
| 7 | 52 | 3,90 | 3,73 | 1,59 | 1,98 |
| 8 | 55 | 4,05 | 3,66 | 1,60 | 1,84 |
| 9 | 53 | 4,02 | 3,34 | 1,84 | 1,84 |
| 10 | 39 | 3,58 | 2,31 | 1,53 | 1,26 |
| 11 | 30 | 4,20 | 3,46 | 2,28 | 2,28 |
| 12 | 30 | 3,66 | 2,49 | 1,93 | 1,72 |
| 13 | 44 | 3,63 | 2,34 | 2,13 | 1,60 |
| 14 | 51 | 2,41 | 1,70 | 1,09 | 0,91 |
| 15 | 44 | 3,76 | 2,84 | 1,50 | 1,46 |
| 16 | 55 | 3,25 | 2,62 | 1,50 | 1,54 |
| 17 | 39 | 4,53 | 3,50 | 1,82 | 1,71 |
| 18 | 42 | 3,75 | 3,29 | 1,46 | 1,74 |
| 19 | 42 | 3,84 | 3,65 | 1,68 | 1,97 |
| 20 | 42 | 3,84 | 3,38 | 1,64 | 1,76 |
| 21 | 50 | 3,21 | 2,86 | 1,51 | 1,83 |
| 22 | 49 | 2,89 | 2,35 | 1,51 | 1,51 |
| 23 | 64 | 3,55 | 3,17 | 1,65 | 1,84 |
| 24 | 47 | 3,28 | 2,98 | 1,51 | 1,84 |
| 25 | 30 | 3,95 | 4,62 | 1,81 | 2,62 |
| 26 | 22 | 7,02 | 8,04 | 2,76 | 4,07 |
| Moyenne | 41 | 3,89 | 3,58 | 1,76 | 2,03 |

Tableau C.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 2 | 8 | 3,83 | 26,35 | 0,26 | 3,41 |
| 3 | 32 | 2,04 | 13,95 | 0,28 | 4,80 |
| 4 | 50 | 1,74 | 14,04 | 0,37 | 5,73 |
| 5 | 53 | 1,86 | 13,52 | 0,23 | 3,78 |
| 6 | 45 | 2,34 | 15,11 | 0,16 | 2,26 |
| 7 | 52 | 3,01 | 19,24 | 0,18 | 2,94 |
| 8 | 55 | 2,76 | 20,80 | 0,34 | 5,96 |
| 9 | 53 | 2,84 | 20,69 | 0,27 | 4,95 |
| 10 | 39 | 2,27 | 14,56 | 0,16 | 3,03 |
| 11 | 30 | 2,79 | 18,67 | 0,22 | 3,35 |
| 12 | 30 | 4,53 | 28,98 | 0,21 | 3,42 |
| 13 | 44 | 0,83 | 8,14 | 0,22 | 3,27 |
| 14 | 51 | 2,86 | 18,65 | 0,18 | 3,33 |
| 15 | 44 | 4,33 | 28,90 | 0,27 | 4,92 |
| 16 | 55 | 2,36 | 15,28 | 0,19 | 3,43 |
| 17 | 39 | 1,26 | 10,06 | 0,20 | 3,63 |
| 18 | 42 | 2,40 | 16,13 | 0,18 | 3,35 |
| 19 | 42 | 1,50 | 9,60 | 0,16 | 2,48 |
| 20 | 42 | 2,08 | 13,48 | 0,17 | 2,54 |
| 21 | 50 | 1,19 | 7,52 | 0,15 | 1,81 |
| 22 | 49 | 2,00 | 12,32 | 0,08 | 1,25 |
| 23 | 64 | 1,91 | 14,44 | 0,16 | 3,76 |
| 24 | 47 | 1,32 | 9,52 | 0,16 | 2,52 |
| 25 | 30 | 1,10 | 9,17 | 0,35 | 5,47 |
| 26 | 22 | 2,02 | 21,36 | 0,56 | 10,63 |
| Moyenne | 41 | 2,29 | 16,02 | 0,23 | 3,84 |

Tableau C.4 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 2 | 8 | 3,93 | 28,00 | 0,29 | 3,92 |
| 3 | 32 | 2,12 | 16,38 | 0,42 | 8,20 |
| 4 | 50 | 1,71 | 14,47 | 0,46 | 8,09 |
| 5 | 53 | 1,96 | 15,90 | 0,37 | 7,27 |
| 6 | 45 | 2,33 | 14,60 | 0,18 | 2,80 |
| 7 | 52 | 2,99 | 19,23 | 0,24 | 4,16 |
| 8 | 55 | 2,93 | 23,72 | 0,53 | 10,19 |
| 9 | 53 | 2,82 | 20,48 | 0,37 | 6,89 |
| 10 | 39 | 2,25 | 14,48 | 0,20 | 3,88 |
| 11 | 30 | 2,78 | 18,36 | 0,25 | 4,09 |
| 12 | 30 | 4,53 | 28,42 | 0,24 | 3,56 |
| 13 | 44 | 0,82 | 8,47 | 0,30 | 4,91 |
| 14 | 51 | 2,84 | 18,14 | 0,17 | 3,02 |
| 15 | 44 | 4,27 | 27,79 | 0,32 | 5,39 |
| 16 | 55 | 2,34 | 15,78 | 0,27 | 5,09 |
| 17 | 39 | 1,23 | 8,61 | 0,25 | 4,36 |
| 18 | 42 | 2,40 | 15,90 | 0,23 | 4,25 |
| 19 | 42 | 1,47 | 9,68 | 0,16 | 3,00 |
| 20 | 42 | 2,06 | 13,21 | 0,21 | 3,29 |
| 21 | 50 | 1,18 | 7,52 | 0,17 | 2,26 |
| 22 | 49 | 2,00 | 12,36 | 0,10 | 1,75 |
| 23 | 64 | 1,87 | 13,47 | 0,23 | 4,56 |
| 24 | 47 | 1,30 | 9,23 | 0,25 | 3,96 |
| 25 | 30 | 1,12 | 9,47 | 0,44 | 6,93 |
| 26 | 22 | 1,80 | 15,34 | 0,53 | 9,34 |
| Moyenne | 41 | 2,28 | 15,96 | 0,29 | 5,01 |

Tableau C.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 2 | 8 | 6,79 | 8,56 | 2,54 | 4,30 |
| 3 | 32 | 4,93 | 5,14 | 2,29 | 2,94 |
| 4 | 50 | 3,81 | 3,85 | 1,94 | 2,51 |
| 5 | 53 | 2,36 | 2,25 | 1,48 | 1,77 |
| 6 | 45 | 2,95 | 2,62 | 1,45 | 1,52 |
| 7 | 52 | 3,92 | 3,53 | 1,61 | 1,86 |
| 8 | 55 | 4,09 | 3,49 | 1,72 | 1,83 |
| 9 | 53 | 4,14 | 3,54 | 1,81 | 1,89 |
| 10 | 39 | 3,36 | 2,19 | 1,53 | 1,24 |
| 11 | 30 | 4,10 | 3,22 | 2,14 | 1,97 |
| 12 | 30 | 3,75 | 2,61 | 2,07 | 1,80 |
| 13 | 44 | 3,62 | 2,43 | 1,89 | 1,60 |
| 14 | 51 | 2,46 | 1,78 | 1,08 | 1,00 |
| 15 | 44 | 3,64 | 2,77 | 1,54 | 1,48 |
| 16 | 55 | 3,29 | 2,60 | 1,48 | 1,46 |
| 17 | 39 | 4,50 | 3,50 | 1,75 | 1,75 |
| 18 | 42 | 3,60 | 3,06 | 1,48 | 1,65 |
| 19 | 42 | 3,67 | 3,41 | 1,59 | 1,98 |
| 20 | 42 | 3,94 | 3,56 | 1,70 | 1,93 |
| 21 | 50 | 3,35 | 3,03 | 1,48 | 1,74 |
| 22 | 49 | 3,06 | 2,53 | 1,49 | 1,61 |
| 23 | 64 | 3,41 | 3,00 | 1,60 | 1,79 |
| 24 | 47 | 3,58 | 3,42 | 1,59 | 1,85 |
| 25 | 30 | 4,08 | 5,00 | 1,78 | 2,94 |
| 26 | 22 | 7,27 | 8,12 | 2,89 | 4,26 |
| Moyenne | 41 | 3,91 | 3,57 | 1,76 | 2,03 |

ANNEXE D – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DE LA TROISIÈME APPROCHE

Concernant les résultats de la troisième approche, il n'y a aucune donnée en lien avec les périodes 1, 2, 3, 24, 25 ainsi que 26, puisque les demandes des usines de transformations pour ces périodes sont nulles. Ainsi, aucun horaire de tournée de véhicules n'a été attribué à ces périodes.

Tableau D.1 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 4 | 53 | 0,53 | 29,76 | 0,55 | 41,28 |
| 5 | 72 | 0,57 | 105,06 | 0,54 | 153 |
| 6 | 87 | 0,73 | 59,70 | 0,65 | 80,78 |
| 7 | 77 | 0,78 | 114,73 | 0,62 | 122,38 |
| 8 | 114 | 0,75 | 77,62 | 0,74 | 141,10 |
| 9 | 41 | 0,83 | 77,34 | 0,69 | 83,82 |
| 10 | 175 | 0,70 | 57,05 | 0,55 | 72,12 |
| 11 | 51 | 0,62 | 59,00 | 0,69 | 90,75 |
| 12 | 72 | 0,95 | 90,79 | 0,65 | 96,95 |
| 13 | 92 | 0,76 | 106,81 | 0,62 | 113,96 |
| 14 | 68 | 0,43 | 24,28 | 0,57 | 41,72 |
| 15 | 78 | 0,88 | 86,88 | 0,73 | 96,53 |
| 16 | 89 | 0,57 | 62,13 | 0,52 | 84,67 |
| 17 | 91 | 0,63 | 71,26 | 0,61 | 106,12 |
| 18 | 107 | 0,66 | 104,20 | 0,66 | 146,76 |
| 19 | 94 | 0,62 | 63,19 | 0,67 | 113,19 |
| 20 | 112 | 0,54 | 46,79 | 0,56 | 72,07 |
| 21 | 103 | 0,71 | 80,10 | 0,58 | 109,60 |
| 22 | 115 | 0,69 | 75,37 | 0,55 | 100,69 |
| 23 | 131 | 0,71 | 71,35 | 0,67 | 100,24 |
| Moyenne | 70 | 0,52 | 58,54 | 0,48 | 75,68 |

Tableau D.2 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le premier scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 4 | 53 | 2,01 | 2,58 | 1,03 | 1,61 |
| 5 | 72 | 1,58 | 2,16 | 0,96 | 1,62 |
| 6 | 87 | 1,88 | 1,82 | 0,69 | 1,05 |
| 7 | 77 | 1,85 | 1,82 | 1,10 | 1,38 |
| 8 | 114 | 1,77 | 1,45 | 0,64 | 0,96 |
| 9 | 41 | 2,15 | 1,15 | 1,81 | 1,08 |
| 10 | 175 | 1,78 | 0,98 | 1,08 | 0,84 |
| 11 | 51 | 2,11 | 1,89 | 1,18 | 1,45 |
| 12 | 72 | 2,31 | 2,1 | 1,45 | 1,45 |
| 13 | 92 | 1,89 | 1,66 | 1,15 | 1,40 |
| 14 | 68 | 1,96 | 1,54 | 1,01 | 1,25 |
| 15 | 78 | 1,78 | 1,57 | 0,77 | 1,09 |
| 16 | 89 | 1,63 | 1,61 | 0,78 | 1,04 |
| 17 | 91 | 1,79 | 1,65 | 0,87 | 1,26 |
| 18 | 107 | 1,67 | 1,45 | 0,77 | 1,09 |
| 19 | 94 | 1,98 | 2,21 | 0,83 | 1,43 |
| 20 | 112 | 1,98 | 2,09 | 0,73 | 1,22 |
| 21 | 103 | 2,02 | 2,05 | 0,91 | 1,33 |
| 22 | 115 | 2,06 | 2,14 | 0,91 | 1,31 |
| 23 | 131 | 1,96 | 2,04 | 0,73 | 1,22 |
| Moyenne | 70 | 1,47 | 1,38 | 0,75 | 0,96 |

Tableau D.3 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le second scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 4 | 53 | 0,77 | 62,67 | 0,64 | 76,01 |
| 5 | 72 | 0,71 | 140,83 | 0,59 | 192,11 |
| 6 | 87 | 0,89 | 92,35 | 0,70 | 111,03 |
| 7 | 77 | 0,88 | 167,05 | 0,60 | 164,25 |
| 8 | 114 | 0,91 | 98,67 | 0,75 | 156,00 |
| 9 | 41 | 0,97 | 127,20 | 0,66 | 128,07 |
| 10 | 175 | 0,89 | 82,33 | 0,48 | 83,84 |
| 11 | 51 | 0,95 | 98,36 | 0,77 | 120,35 |
| 12 | 72 | 1,19 | 156,79 | 0,70 | 133,41 |
| 13 | 92 | 0,80 | 157,23 | 0,64 | 153,74 |
| 14 | 68 | 0,61 | 46,43 | 0,63 | 65,11 |
| 15 | 78 | 1,00 | 111,21 | 0,73 | 117,75 |
| 16 | 89 | 0,65 | 95,54 | 0,50 | 115,69 |
| 17 | 91 | 0,77 | 111,13 | 0,58 | 140,95 |
| 18 | 107 | 0,72 | 135,20 | 0,66 | 182,68 |
| 19 | 94 | 0,81 | 98,22 | 0,71 | 147,19 |
| 20 | 112 | 0,66 | 84,10 | 0,57 | 107,78 |
| 21 | 103 | 0,85 | 129,28 | 0,61 | 147,04 |
| 22 | 115 | 0,77 | 123,92 | 0,55 | 147,18 |
| 23 | 131 | 0,85 | 108,58 | 0,70 | 127,58 |
| Moyenne | 70 | 0,64 | 89,08 | 0,49 | 100,68 |

Tableau D.4 - Résultats des délais reliés à l'achalandage par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en minutes) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en minutes) |
|----------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 4 | 53 | 0,59 | 37,07 | 0,58 | 49,45 |
| 5 | 72 | 0,63 | 109,70 | 0,56 | 158,97 |
| 6 | 87 | 0,76 | 68,74 | 0,67 | 90,51 |
| 7 | 77 | 0,78 | 130,24 | 0,59 | 138,56 |
| 8 | 114 | 0,78 | 79,87 | 0,77 | 143,33 |
| 9 | 41 | 0,90 | 102,70 | 0,67 | 108,09 |
| 10 | 175 | 0,76 | 68,90 | 0,53 | 80,53 |
| 11 | 51 | 0,73 | 70,19 | 0,73 | 100,69 |
| 12 | 72 | 0,97 | 104,88 | 0,68 | 106,53 |
| 13 | 92 | 0,75 | 112,53 | 0,63 | 119,96 |
| 14 | 68 | 0,51 | 32,19 | 0,60 | 51,96 |
| 15 | 78 | 0,94 | 92,73 | 0,74 | 101,50 |
| 16 | 89 | 0,60 | 73,04 | 0,52 | 97,66 |
| 17 | 91 | 0,69 | 79,20 | 0,60 | 108,13 |
| 18 | 107 | 0,66 | 108,03 | 0,63 | 154,88 |
| 19 | 94 | 0,67 | 66,80 | 0,68 | 113,13 |
| 20 | 112 | 0,57 | 52,56 | 0,56 | 76,06 |
| 21 | 103 | 0,73 | 89,77 | 0,60 | 118,92 |
| 22 | 115 | 0,71 | 87,58 | 0,56 | 112,67 |
| 23 | 131 | 0,75 | 75,58 | 0,68 | 104,97 |
| Moyenne | 70 | 0,56 | 65,69 | 0,48 | 82,17 |

Tableau D.5 - Résultats des délais reliés aux conditions routières difficiles par camion pour le troisième scénario

| Période | Nombre de camions | Nombre moyen de délais | Temps de délai moyen (en heures) | Écart type du nombre moyen de délais | Écart type du temps de délai moyen (en heures) |
|----------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| 4 | 53 | 1,96 | 2,46 | 1,06 | 1,60 |
| 5 | 72 | 1,62 | 2,10 | 0,96 | 1,59 |
| 6 | 87 | 1,85 | 1,71 | 0,74 | 1,07 |
| 7 | 77 | 1,81 | 1,79 | 1,06 | 1,37 |
| 8 | 114 | 1,76 | 1,48 | 0,63 | 0,95 |
| 9 | 41 | 2,08 | 1,07 | 1,75 | 1,08 |
| 10 | 175 | 1,67 | 0,95 | 1,09 | 0,86 |
| 11 | 51 | 2,15 | 1,96 | 1,17 | 1,44 |
| 12 | 72 | 2,38 | 2,25 | 1,32 | 1,45 |
| 13 | 92 | 1,99 | 1,85 | 1,05 | 1,37 |
| 14 | 68 | 1,92 | 1,39 | 1,03 | 1,19 |
| 15 | 78 | 1,74 | 1,49 | 0,76 | 1,06 |
| 16 | 89 | 1,64 | 1,54 | 0,73 | 1,03 |
| 17 | 91 | 1,81 | 1,73 | 0,89 | 1,29 |
| 18 | 107 | 1,69 | 1,52 | 0,74 | 1,10 |
| 19 | 94 | 2,01 | 2,32 | 0,81 | 1,44 |
| 20 | 112 | 1,95 | 2,12 | 0,71 | 1,19 |
| 21 | 103 | 1,96 | 2,11 | 0,87 | 1,36 |
| 22 | 115 | 1,99 | 2,12 | 0,92 | 1,34 |
| 23 | 131 | 1,94 | 1,94 | 0,72 | 1,19 |
| Moyenne | 70 | 1,46 | 1,38 | 0,73 | 0,96 |