



Utilisation de la gestion des connaissances pour le développement d'un modèle d'optimisation de la planification des approvisionnements forestiers

Mémoire

Shaima Tilouche

Maîtrise en Génie mécanique
Maître ès Sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Shaima Tilouche, 2014

Résumé

La planification des opérations forestières est une tâche complexe. Elle nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs et la collaboration des différents intervenants. Plusieurs modèles d'optimisation mathématiques ont été développés pour soutenir les entreprises forestières dans leur processus de prise de décisions. Bien que bénéfiques et utiles, ces modèles demeurent peu implantés dans la pratique. La planification est, généralement, faite d'une manière intuitive basée sur les connaissances et l'expérience des intervenants. Cela amène à supposer que ces modèles ne prennent pas pleinement en considération certains facteurs importants comme la qualité des données et des informations ainsi que leurs disponibilités. Par ailleurs, la gestion des connaissances a été proposée comme assise pour améliorer la performance du processus de planification. En effet, elle permet à l'entreprise de mieux tirer profit des données disponibles pour la planification.

L'objectif de ce projet est d'aider les entreprises forestières à intégrer les modèles mathématiques dans leur processus de prise de décisions pour améliorer la qualité des décisions prises. Il s'agit, en effet, de développer un modèle mathématique qui reflète le processus de planification des approvisionnements et qui couvre les besoins d'une entreprise forestière québécoise. Un second objectif consiste à mesurer l'impact d'une meilleure connaissance (précision) des inventaires forestiers sur la qualité des décisions.

Une comparaison entre deux modèles d'optimisation existants et une cartographie du processus de planification d'une entreprise forestière Québécoise a été réalisée. Sur la base de cette comparaison, un modèle d'optimisation adapté a été développé. Par la suite, le modèle a été utilisé pour simuler l'impact d'une meilleure précision des inventaires forestiers sur le profit de l'entreprise partenaire. Des taux d'imprécision de 5%, 10%, 20% et 30% ont été évalués et comparés au cas où les données précises étaient connues dès le départ plutôt qu'en cours d'opérations.

Les résultats de la comparaison des modèles mathématique avec les cartographies de gestion des connaissances ont démontré plusieurs écarts. Ceci a permis d'obtenir les composantes du modèle mathématique développé qui reflète le processus industriel de planification des approvisionnements. Finalement, les résultats de l'expérimentation indiquent qu'une amélioration de la précision des inventaires de 30% résulterait en une augmentation du profit de 7%.

Abstract

Wood procurement planning is a complex activity that requires collaboration between various actors. There have been several mathematical models formulated to help practitioners in the decision making process. But, only a few of these models are actually applied in practice. Planning is still done manually, based on experience and the sum of several individuals' knowledge within the procurement department. One possible reason is that most models do not account for important factors related to data quality, information availability, and knowledge sharing within forest companies. Knowledge management has been proposed as a way to improve the performance of the planning process. Indeed, it enables companies to understand the information and knowledge required for planning.

The objective of this project is to help forestry companies integrate optimization models to improve the planning process and the decisions quality. In fact, we aim to develop a mathematical model that depicts the industrial planning process. Finally, we want to determine the impact of better knowledge on planning decisions quality.

First, a comparison between two existing mathematical models and the industrial process of a specific forestry company represented by Knowledge management mapping was done. Then, through this comparison, we developed a new mathematical model for procurement planning. Finally, this model has been used to evaluate the profit of improving the accuracy of the forestry inventory data. In order to do so, we compared the plan developed using accurate inventory data (obtained from the beginning of the planning horizon) with the plan adjusted monthly based on the accurate data.

The comparison of the models with the industrials process showed that the gap between them is important. The differences measured were used in the development of the new mathematical model. This model reflects the industrial process. It has been used to determine the profit of a better accuracy inventory data. We found an important profit increase equal to 7% through improving the accuracy inventory data of 30%.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des Tableaux.....	ix
Liste des figures	xi
Liste des abréviations.....	xiii
Remerciements.....	xv
1 Introduction	1
1.1 Introduction générale.....	1
1.2 La planification de la chaîne de création de valeur forestière.....	1
1.3 Les connaissances	3
1.4 Problématique.....	4
1.5 Objectifs.....	5
1.6 Présentation du document.....	6
2 Revue de littérature	7
2.1 La gestion de connaissances.....	7
2.1.1 Définition de la gestion des connaissances.....	7
2.1.2 Importance de la gestion des connaissances	8
2.1.3 Cartographies représentatives du processus de gestion des connaissances ..	9
2.2 Modèles mathématiques de planification dans l'industrie forestière.....	11
2.3 Incertitude des données dans les modèles d'optimisation mathématique.....	13
3 Méthodologie.....	17
3.1 Comparaison de modèles existants avec le processus industriel de planification des approvisionnements.....	17
3.2 Développement du modèle d'optimisation mathématique.....	18
3.3 Validation du modèle	18
3.4 Description de l'expérimentation.....	19
4 Résultats obtenus.....	23
4.1 Matrice Comparative entre les modèles mathématiques et le processus industriel de planification	23
4.2 Modèle d'optimisation mathématique	25
4.3 Validation du modèle	30

4.4 Mesure de l'impact de l'amélioration de la qualité des données d'inventaires forestiers sur la qualité des décisions.....	32
4.4.1 Profit.....	32
4.4.2 Inventaires de produits forêt dans les blocs de récolte.....	35
4.4.3 Volumes d'inventaire de produits finis.....	37
4.4.4 Capacité additionnelle de récolte	39
4.4.5 Satisfaction des demandes de produits finis	42
5 Conclusions.....	43
Références.....	45
Annexes	49
Annexe I : Matrice de Comparaison	49
Annexe II : Code VBA permettant la mise à jour automatique de la base de données.....	53

Table des Tableaux

Tableau 1 : Aperçu de la matrice de comparaison entre (respectivement) les modèles d'Arabi et al. (2011), Beaudoin et al (2007) et Mosconi (2011).....	23
Tableau 2: Données utilisées pour la validation du modèle.....	31
Tableau 3 : Résultats des tests de Student de comparaison des profits des PDP par rapport aux ceux du PAM pour chaque scénario	33
Tableau 4 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts de profits pour les différents scénarios (2 à 2).....	34
Tableau 5 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits forêt pour les différents scénarios.....	36
Tableau 6 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits forêt des différents scénarios (2 à 2).....	37
Tableau 7 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits finis pour les différents scénarios.....	38
Tableau 8 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits finis pour les différents scénarios (2 à 2).....	39
Tableau 9 : Résultats des tests de Student de comparaison des capacités supplémentaires de récolte pour les différents scénarios (2 à 2)	41

Liste des figures

<i>Figure 1: Planification des activités de la chaîne de création de valeur de la forêt aux usines (Source : Mosconi, 2011).....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2: Composantes de la gestion des connaissances étudiées dans ce projet</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3: Schéma descriptif de la simulation.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 4: Schéma des décisions considérées dans le modèle d'optimisation développé.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 5: Profitabilité moyenne simulées des deux plans (PDP et PAM) pour les différents taux d'imprécision (avec intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>33</i>
<i>Figure 6: Écarts moyens de profitabilité entre le PAM et le PDP exprimés en pourcentage pour les quatre taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>34</i>
<i>Figure 7: Volumes d'inventaire de produits forêt des deux plan PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 8: Écarts moyens des volumes d'inventaire de produits forêt à bordure de route entre les plans PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision avec (intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>36</i>
<i>Figure 9: Volumes d'inventaire de produits finis des deux plan PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision (avec les intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>37</i>
<i>Figure 10: Écarts moyens entre les volumes d'inventaire de produits finis du PAM et ceux du PDP pour les différents taux d'imprécision avec (intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>38</i>
<i>Figure 11: Capacité additionnelle mensuelle moyenne de récolte (m³) pour les quatre taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>40</i>
<i>Figure 12: Capacité supplémentaire annuelle de récolte en m³ (intervalles de confiance à 95%)</i>	<i>41</i>
<i>Figure 13: Volumes de demandes non satisfaite en MPMP (Intervalles de confiance à 95%).....</i>	<i>42</i>

Liste des abréviations

- GC: gestion des connaissances ;
- MOM : Modèle d'optimisation mathématique ;
- PDP : plan avec données d'inventaire forestier précises ;
- PAM : plan ajusté chaque début de mois en fonction des nouvelles données d'inventaires forestiers mises à jour.

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce mémoire de maîtrise par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette maîtrise, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de cette maîtrise un moment très profitable.

Je tiens à remercier, tout particulièrement, mon directeur, Monsieur Luc LeBel et mon codirecteur Monsieur Daniel Beaudoin pour m'avoir accordé toute leur confiance, pour tout le temps qu'ils m'ont consacré tout au long de cette période et pour leur soutien continu.

Mes remerciements s'adressent, aussi, à Monsieur Pierre-Serge Tremblay, pour toutes les connaissances qu'il m'a apprises et aussi pour avoir fait de cette maîtrise un moment très agréable.

Je remercie, également, Monsieur Anis Ben Amor et Madame Catherine Lévesque qui m'ont aidé à mener ce projet à terme dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier, également, mes collègues de bureau et particulièrement, Monsieur Shuva Gautam pour l'ambiance de travail assez conviviale qui a aidé à ce que ce projet progresse dans les délais.

Finalement, j'exprime ma gratitude à tout le personnel du Consortium de recherche FORAC pour leur accueil chaleureux. Je n'oublie pas de mentionner que ce projet n'aurait pas été mené à terme sans le support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

1 Introduction

1.1 Introduction générale

L'industrie des produits forestiers est l'une des principales industries manufacturières du Canada et le plus gros exportateur net. Par exemple, en 2005, la valeur des exportations des entreprises œuvrant dans ce domaine totalisait 41.9 milliards de dollars (Ressources Naturelles du Canada). Cependant, la concurrence s'est intensifiée avec l'apparition de plusieurs producteurs provenant de l'Amérique du Sud et de l'Asie où le bois de plantation est produit plus rapidement et à moindre prix. De plus, le secteur des produits du bois a vécu une crise sans précédent liée à l'effondrement des marchés de construction résidentielle aux États-Unis et à la baisse constante de la consommation de papier dans le monde. En 2011, les exportations totalisaient 26.3 milliards de dollars, soit une baisse de 37.23 % par rapport à 2005.

Pour garder leur compétitivité sur les marchés mondiaux, les entreprises forestières québécoises sont amenées à innover dans leurs façons de faire, à adopter de nouvelles technologies et à moderniser leurs outils de production et systèmes de planification.

1.2 La planification de la chaîne de création de valeur forestière

La chaîne de création de valeur forestière commence par l'exploitation de la forêt, inclut la transformation des arbres en divers produits du bois et les autres activités jusqu'au client final. Elle regroupe l'ensemble des activités qui contribuent à la création du produit final (figure 1). En d'autres termes, les activités faisant partie de cette chaîne sont les activités liées aux approvisionnements ainsi que les activités de transformation de bois dans les usines de sciage. La distribution et les ventes font, également, partie de la chaîne de valeur des produits forestiers mais les activités qui leur sont associées ne sont pas prises en compte dans ce projet.

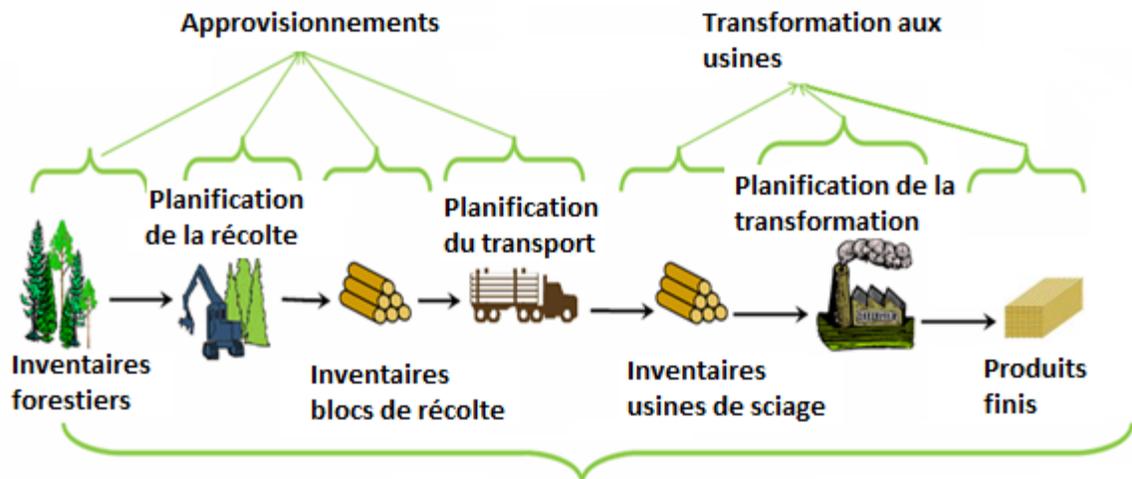


Figure 1: Planification des activités de la chaîne de création de valeur de la forêt aux usines (Source : Mosconi, 2011)

Afin d'organiser les activités de la chaîne de création de valeur forestière, une planification des différentes activités doit être faite. Pour faciliter cette tâche, une planification hiérarchique est réalisée. La planification se fait sur trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnelle. Chaque plan respecte les impératifs définis à un niveau supérieur. La planification stratégique couvre généralement un horizon de planification très long (jusqu'à une centaine d'années pour les décisions concernant la forêt). Les décisions qui y sont liées définissent les marchés visés et l'organisation de l'entreprise comme par exemple les produits, les technologies, les capacités et les localisations d'usines. Les décisions tactiques définissent, en général, les règles de jeu comme par exemple les tailles de lot de production et de distribution ou les niveaux des stocks de sécurité (D'Amours et al., 2003). Finalement, la planification opérationnelle définit le plan détaillé à exécuter, c'est-à-dire les opérations à réaliser à court terme, l'attribution des tâches détaillées aux entrepreneurs, le calendrier détaillé des travaux, etc.

Le processus ciblé par ce mémoire est le processus mensuel de planification de la chaîne de création de valeur forestière. Ce processus couvre un horizon de planification d'un an. Il est réalisé par le département des approvisionnements et la direction des usines d'une entreprise forestière. Il permet de planifier les activités liées aux approvisionnements et à la transformation de bois dans les usines de sciage. Pour ce qui concerne la forêt publique, le plan résultant doit respecter les directives du plan annuel établi et approuvé par le représentant de l'état (Le Ministère des Ressources naturelles) avant le début de l'année. Ce plan identifie les blocs à récolter pour l'année à venir. Ainsi, dans le processus mensuel, l'entreprise doit sélectionner les blocs à récolter parmi ceux identifiés au plan annuel.

Pour réaliser, efficacement, le processus de planification, les décideurs doivent prendre en compte plusieurs connaissances telles que les données d'inventaires forestiers, les coûts des opérations, le savoir-faire, l'expérience des différents intervenants.

1.3 Les connaissances

Selon le Comité Européen de Normalisation (2004), « Les connaissances représentent la combinaison entre les données et les renseignements, auxquels s'ajoutent l'opinion, les compétences et l'expérience d'experts, ce qui crée un atout précieux qui peut servir à prendre des décisions. Les connaissances peuvent être explicites ou tacites, individuelles ou collectives ».

En d'autres termes, d'après Mosconi (2011), la connaissance peut être définie comme étant :

- **des données :**

Ce sont des nombres, des faits ou des mots. Elles peuvent être mesurées et enregistrées sous forme permettant l'extraction de l'information. Pour être pertinentes, elles doivent être présentées dans un contexte bien précis. Autrement, elles deviennent obsolètes et inutiles.

- **des informations :**

C'est l'ensemble de données organisées de façon à les rendre utilisables et placées dans un contexte dans lequel elles prennent un sens. Mintzberg (1994, cité dans Mosconi, 2011) affirme que l'information est une collection de données organisées pour donner forme à un message visible, imagé, oral ou écrit.

- **des connaissances :**

C'est l'application et l'interprétation des données, des jugements, des croyances, des expériences. Elle représente, donc, le savoir-faire. Elle augmente la capacité de compréhension d'une information.

En effet, les connaissances se divisent en deux catégories :

- **Les connaissances explicites**

Elles peuvent être formulées par l'usage de codes et symboles facilitant la communication et la diffusion, par exemple, des chiffres, des formules, des documents. Autrement, ce sont des données et des informations.

- **Les connaissances tacites**

Elles ne sont pas codifiables. Elles sont difficiles à exprimer parce qu'elles ne se manifestent que dans l'action au cours de laquelle, par essai et par erreur, l'intuition aidant, les opérateurs se perfectionnent au fil du temps.

La connaissance se crée et s'assimile dans l'action, la relation, les échanges, les interactions pilotées, les dépendances assumées dynamiquement. Elle se construit socialement dans un contexte qu'on lui appliquera. Si l'on ne porte pas attention à ces conditions indispensables, la seule technique ne suffira pas et ne mènera,

probablement, pas au résultat souhaité. La connaissance permet aux individus de mieux accomplir leurs tâches quotidiennes et de prendre de meilleures décisions pour atteindre leurs objectifs stratégiques (Drucker, 1999 ; Hansen, Nohria et al., 1999, cité dans Mosconi, 2011).

Avec la complexité de la connaissance et ses caractéristiques, les organisations sont appelées à la reconnaître comme une ressource interne pouvant apporter un avantage concurrentiel (Grant, 1996, cité dans Mosconi, 2011). Les organisations sont, appelées à intégrer la gestion des connaissances (GC) dans leurs processus organisationnels. En effet, Bray et al. (2003) confirme que la GC permet de mieux utiliser les connaissances qui existent, déjà, dans les organisations, d'accroître les innovations (combinaison des savoirs, synergie), de résoudre les problèmes de coordination qui se posent du fait de la complexité et de la modularité des produits et des systèmes et de transformer les stocks de connaissances en une source directe de valeur.

1.4 Problématique

La tâche de planification des approvisionnements forestiers est très complexe. Elle nécessite la prise en compte de plusieurs données telles que les volumes d'inventaires forestiers, les demandes des produits finis, la saisonnalité des secteurs et la capacité de production. Ces données proviennent de différents intervenants de la chaîne de création de valeur comme le département des approvisionnements, les directeurs des usines, les directeurs de ventes, etc. La collaboration entre ces intervenants est indispensable pour échanger les informations et pouvoir, ainsi, faire la planification.

Plusieurs recherches ont été faites dans le but de soutenir les entreprises forestières dans leurs efforts pour améliorer le processus de planification des activités de la chaîne de création de valeur forestière et à, ainsi, prendre de meilleures décisions. Certains auteurs ont proposé l'approche de GC (GC) pour soutenir l'activité de planification (Mosconi, 2011; Nilsson, 2013). Cette approche vise à améliorer l'utilisation des données et connaissances requises pour la planification et à optimiser, par conséquent, le processus de prise de décisions. Van Horne et al. (2005) soulignent l'importance de la GC pour les organisations. Ils démontrent les avantages tacites et explicites de l'implémentation de la GC dans le processus manufacturier des organisations. Mosconi (2011) confirme que la GC est encore perfectible, parfois, même absente dans les entreprises forestières québécoises. Ainsi, d'importantes composantes de la GC influençant la prise de décisions sont négligées. Des fois, les processus de prise de décisions sont développés en négligeant certaines connaissances, leurs précisions ou leurs disponibilités. Cela peut amener à l'inefficacité de la résolution de certains problèmes et dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise. En effet, selon Cross et al. (2001) et Koh et Tan (2006), des opportunités ratées et des failles dans les solutions adoptées ont été identifiées parce que «l'organisation n'était pas au courant de toutes les connaissances qu'elle possède.»

D'autres travaux visant à soutenir les entreprises forestières dans la tâche de planification ont adopté une approche de recherche opérationnelle et de modélisation

mathématique (Rönnqvist, 2003 ; Beaudoin et al., 2007). Des travaux antérieurs réalisés au Consortium de recherche FORAC montrent que les modèles d'optimisation mathématique (MOM) peuvent être intégrés au processus manufacturier des entreprises forestières et qu'ils permettent de faire la planification d'une façon plus efficace et plus facile. En effet, ils permettent un gain important en temps de planification puisque la plupart des MOM de planification des approvisionnements, de transport, de récolte, etc. mettent uniquement quelques minutes pour la résolution. De plus, ils permettent d'améliorer le profit d'environ 5% en proposant la solution optimale en fonction des données d'entrée (Bergdahl et al., 2003 ; Burger et Jamnick, 1995).

De plus, certains auteurs définissent les systèmes d'aide à la décision, en général, et les MOM, en particulier, comme étant des outils technologiques qui permettent d'optimiser la GC, puisque le processus décisionnel est aussi défini comme un processus de GC (Holsapple, 2008). Ces modèles sont, donc, supposés aider les entreprises à mieux tirer profit des connaissances qu'elles possèdent.

Or, quoique bénéfiques et utiles, les MOM développés sont rarement implantés dans les processus manufacturiers des entreprises forestières. Leur utilisation ne semble pas satisfaire pleinement les besoins pour lesquels ils ont été conçus. En effet, jusqu'à date, la tâche de planification est faite, manuellement, selon une approche essai-erreur (Beaudoin et al., 2007 ; Arabi et al., 2011). Les personnes chargées de la tâche de planification se basent sur leurs connaissances, leurs expériences et leurs intuitions pour développer le plan des différentes activités (activités d'approvisionnement, de transformation, de ventes, etc.). Une question se pose, alors, sur les raisons qui limitent l'adoption des MOM par les entreprises forestières. En fait, à notre connaissance, il n'y a pas de travaux soulignant l'apport de la GC au développement des MOM (Johnson et al. 2007, cité dans Nilsson, 2013). Les modèles mathématiques ne favorisent pas une vision d'ensemble des problèmes et des décisions qui y sont rattachées. Cela suppose la non prise en compte de l'ensemble des connaissances nécessaires à la prise de décision éclairée (Mosconi, 2011). De plus, ces modèles négligent d'importants facteurs liés aux connaissances qui y sont utilisés tels que la disponibilité, les formats, la qualité, etc.

Une meilleure compréhension de l'impact des décisions et des indicateurs objectifs et subjectifs permettra aux chercheurs en recherche opérationnelle de concevoir des modèles qui peuvent mieux s'ajuster aux besoins du processus de planification (Mosconi, 2011).

1.5 Objectifs

Ce projet de maîtrise vise à aider les entreprises forestières à optimiser la planification des approvisionnements et de transformation du bois. En s'inspirant du contexte d'un industriel s'approvisionnant en forêt publique, le but est d'aider l'entreprise forestière partenaire à intégrer un MOM dans son processus de planification en vigueur et ainsi, à améliorer la qualité de ses décisions.

Plus particulièrement, il s'agit d'utiliser la GC pour comparer deux MOM avec les cartographies de GC représentatives du processus industriel de planification des approvisionnements. À travers cette comparaison, les connaissances requises pour la réalisation de la planification identifiées par Mosconi seront croisées avec deux formulations mathématiques développées au sein de FORAC (Beaudoin et al., 2007 et Arabi et al., 2011).

En se basant sur cette comparaison, le deuxième objectif est de développer un nouveau modèle d'optimisation qui reflète le processus industriel de planification des approvisionnements et de transformation de bois (en termes de connaissances utilisés) et qui couvre les besoins de l'entreprise forestière partenaire.

Le troisième objectif du projet consiste à évaluer l'importance d'une meilleure GC, à travers sa composante "connaissance", sur le processus de planification des approvisionnements et de transformation de bois. En fait, le but est de déterminer l'impact d'une meilleure connaissance sur la qualité des décisions liées à la planification. Comme exemple, le profit généré par l'amélioration de la précision des données d'inventaires forestiers sera mesuré. Ainsi, il s'agit de quantifier les gains d'opportunités (monétaires) associés à une meilleure GC.

1.6 Présentation du document

Le chapitre 1 visait à introduire de manière générale le contexte de l'étude. La problématique de recherche et les objectifs de travail ont été présentés. Ensuite, dans le chapitre 2, une revue de littérature est introduite. Une brève analyse de l'utilité des MOM y est présentée, en énumérant certains exemples. La dernière sous-section expose quelques travaux se penchant sur la composante "connaissance" de la GC et comment elle a été prise en compte dans les modèles mathématiques. L'exemple étudié est l'incertitude des données utilisées dans la planification en foresterie. Dans le troisième chapitre, la méthodologie de travail est décrite expliquant les étapes qui ont permis d'atteindre les objectifs du projet.

Dans le chapitre 4, les résultats de l'expérimentation sont introduits. Ce chapitre inclut les résultats de la comparaison des deux modèles mathématiques sélectionnés avec le processus industriel de planification des approvisionnements. Le modèle mathématique est décrit. Enfin, l'impact d'une meilleure GC sur la planification des approvisionnements est évalué, à travers l'exemple de la précision des données d'inventaires forestiers. Finalement, une discussion et conclusion générales sont présentées dans le dernier chapitre du mémoire.

2 Revue de littérature

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés dans le but de consolider les activités de l'industrie forestière et de soutenir les entreprises dans la réalisation de leurs processus de planification des activités de la chaîne de création de valeur forestière. Certains auteurs tels que Holsapple (2008), Mosconi (2011) et Nilsson (2013) ont proposé la GC comme approche visant à améliorer le processus de planification. D'autres ont opté pour la recherche opérationnelle pour développer des modèles d'optimisation dans le but d'aider les entreprises forestières dans leurs processus de prise de décisions

Dans ce chapitre, la revue de littérature se compose de trois sections. La première section introduit la GC et son importance dans le processus de prise de décisions, dans l'industrie forestière. Dans la deuxième section, quelques MOM de planification des activités de la chaîne de création de valeur forestière sont présentés. Finalement, la troisième section s'intéresse à l'incertitude associée à certains paramètres des modèles de planification et pouvant être étroitement liée à la composante "connaissance" de la GC.

2.1 La gestion de connaissances

2.1.1 Définition de la gestion des connaissances

Kogut et Zander (2003) définissent la GC comme étant "l'ensemble des activités dédiées à faciliter et inciter l'utilisation, le partage et la création des connaissances dans le but de contribuer à l'amélioration de la performance globale et à la création de valeur pour les divers acteurs concernés, à l'interne et à l'externe de l'organisation." D'un autre côté, Holsapple (2008) a défini la GC comme étant des pratiques permettant au décideur de mieux tirer profit de l'ensemble des données, des informations et des connaissances disponibles dans l'organisation pour améliorer sa performance.

Dépendamment du type des connaissances, Balasubramanian et al. (1999) et Van Horne et al. (2005) distinguent deux approches de GC :

- Approche de codification : il s'agit de capturer des connaissances sous forme d'objets (des chiffres, des formules) et de les sauvegarder pour les rendre accessibles à tous les intervenants. Cette approche concerne les connaissances explicites.
- Approche de personnalisation : cette approche concerne les connaissances associées à une certaine personne (expérience, savoir-faire, etc.) qui sont transférées d'une personne à une autre. La gestion de connaissances soutient le partage de ce type de connaissances en facilitant la communication entre les personnes grâce à des outils de communication. Cette approche concerne les connaissances tacites.

2.1.2 Importance de la gestion des connaissances

Plusieurs auteurs ont mis l'accent sur l'importance de la GC et sur l'avantage compétitif qu'elle permet (Holsapple, 2008 ; Nilsson, 2013). Dans ce contexte, Bray et al. (2003) confirme que la GC est un bien non-négligeable qui permet aux organisations de se distinguer des autres. En fait, la gestion de connaissances vise à identifier les connaissances de l'organisation, à les sauvegarder sous des formes utilisables et à faciliter l'accès et le partage des connaissances. De cette définition, Baskerville et Dulipovici (2006) affirment que le progrès dans la GC favorise les facteurs qui améliorent la performance : créativité organisationnelle, efficacité opérationnelle et qualité de produits et services. De plus, l'approche de gestion de connaissances est une approche intégrante qui permet une vision holistique du rôle des connaissances dans l'organisation ; et ce en considérant les facteurs humains, organisationnels et technologiques pour maximiser la création, l'utilisation et l'exploitation de la ressource « connaissance ».

Un des avantages les plus importants de la GC est qu'elle améliore la qualité des décisions et qu'elle permet une prise de décisions éclairée (Bray, 2003 ; Holsapple, 2008). Le processus décisionnel est l'un des processus fondamentaux de toute organisation. En effet, le processus de prise de décision consiste en l'identification des problèmes et la recherche de solutions. Cela suppose l'existence et la possibilité d'utilisation des connaissances. Ainsi, la personne chargée de la prise de décisions doit avoir des compétences en GC. De plus, Holsapple (2008) définit la prise de décision comme étant une activité intense de gestion de connaissances qui modifie l'état de connaissances d'une entreprise. De ce fait, la décision peut être considérée comme la création d'une nouvelle connaissance.

Pour cela, Holsapple (2008) affirme que « pour mieux gérer les facteurs déterminant la qualité de la décision, il est nécessaire de mieux gérer la connaissance, de même que, pour mieux comprendre le processus décisionnel, les organisations doivent comprendre comment gérer la connaissance ». Les activités de gestion s'articulent, donc, autour de la prise des décisions par les gestionnaires ou les décideurs.

Le contexte forestier est, particulièrement, complexe. La planification des approvisionnements est une tâche assez difficile. Elle nécessite une grande réflexion. De plus, les décideurs sont appelés à travailler en étroite collaboration avec les différents intervenants. Mosconi (2011) a démontré l'importance de la GC dans l'amélioration de la qualité de la décision liée à la planification des approvisionnements. Toutefois, malgré l'importance du processus de GC, ce processus reste toujours perfectible dans les entreprises forestières. Selon ses observations, il n'y aurait ni compréhension commune de connaissances utilisées au sein de la chaîne de création de valeur forestière ni une vue mutuelle sur l'ensemble des décisions à prendre. Dans quelques cas, il y avait une compréhension limitée de l'impact des contributions des connaissances sur l'ensemble du processus (Mosconi, 2011).

2.1.3 Cartographies représentatives du processus de gestion des connaissances

Dans les entreprises forestières, le processus de planification des approvisionnements est un processus peu codé. Il est réalisé par le département des approvisionnements forestiers qui a habituellement beaucoup d'expérience. Il est, donc, réalisé en se basant sur l'intuition et les connaissances personnelles. Il y a rarement, des codes représentatifs des étapes de ce processus. En cas de besoin, ces étapes sont souvent transmises, oralement, d'une personne à une autre.

Or, les processus décisionnels, dans le domaine forestier, sont imprécis à cause de la nature floue et désordonnée de la connaissance (Allee, 1997, cité dans Mosconi, 2011). Les travaux de Mosconi (2011) qui se sont intéressés tout particulièrement au processus mensuel de planification des approvisionnements ont confirmé cet état de fait. La planification des approvisionnements nécessite une activité cognitive intense. D'un autre côté, le cerveau humain est limité en mémoire comparativement à la croissance exponentielle du nombre de connaissances. Le cerveau humain est modeste pour pouvoir appeler les connaissances dont il a besoin instantanément sans manque ni oubli (Holsapple, 2008). Le stress et les erreurs qui peuvent résulter d'une surcharge de connaissances peuvent être tout aussi néfastes que de ne pas avoir suffisamment de connaissances (Miller, 1960 ; Miller et Starr, 1967, cité dans Holsapple, 1995). Rönqvist (2003) affirme, aussi, que les informations et les restrictions sont plus nombreuses de façon que les problèmes actuels sont plus difficiles et avec des contraintes plus complexes. Par exemple, de nos jours, les lois environnementales sont devenues, de plus en plus, restreintes.

Pour soutenir les industriels dans leurs activités de planification, Holsapple (2008) et Mosconi (2011) ont proposé de conceptualiser le processus décisionnel à l'aide de cartographies de GC représentatives du processus réel. Nilsson (2013) a, également, utilisé la GC comme outil d'analyse qui permet de comprendre comment les informations et les données sont gérées comme connaissances et comment elles sont utilisées dans le processus de planification des approvisionnements. Mosconi (2011), de son côté, a appliqué la GC pour représenter le processus de planification des approvisionnements. Le but était de favoriser le transfert et le partage des connaissances et de faciliter leur utilisation. Ces cartographies sont utiles pour mettre en lumière la connaissance pertinente à la prise de décision (Holsapple, 2008).

Dans les cartographies de GC représentatives du processus de planification des approvisionnements, Mosconi (2011) a identifié :

- Les activités du processus de planification ;
- Les points de décisions ;
- Les objectifs des activités et sous activités ;
- Les intrants et les extrants ;

- Les interactions entre les différentes activités ;
- Les outils et les technologies utilisés ;
- Les connaissances requises pour la réalisation de chaque activité et sous activité ;
- Les acteurs.

Mosconi (2011) a accordé une importance particulière à la GC. Elle a détaillé certaines composantes importantes de la GC dans les cartographies telles qu'illustrées dans la figure 2 :

- Les connaissances utilisées : comme des données, des informations et du savoir-faire;
- la source : la personne ou le département qui détient ces connaissances;
- le moyen de partage et d'échange: la manière dont une connaissance est transférée ou est partagée;
- le format : par exemple, des chiffres dans un fichier Excel, un texte dans un fichier Word ou sous forme d'information transmise de bouche à oreille;
- le moment de disponibilité : la disponibilité de l'information au moment de son utilisation sous le format souhaité.

Ces composantes permettent d'évaluer la pertinence de la connaissance ainsi que sa qualité puisque la composante source indique si la connaissance est exacte ou estimée.

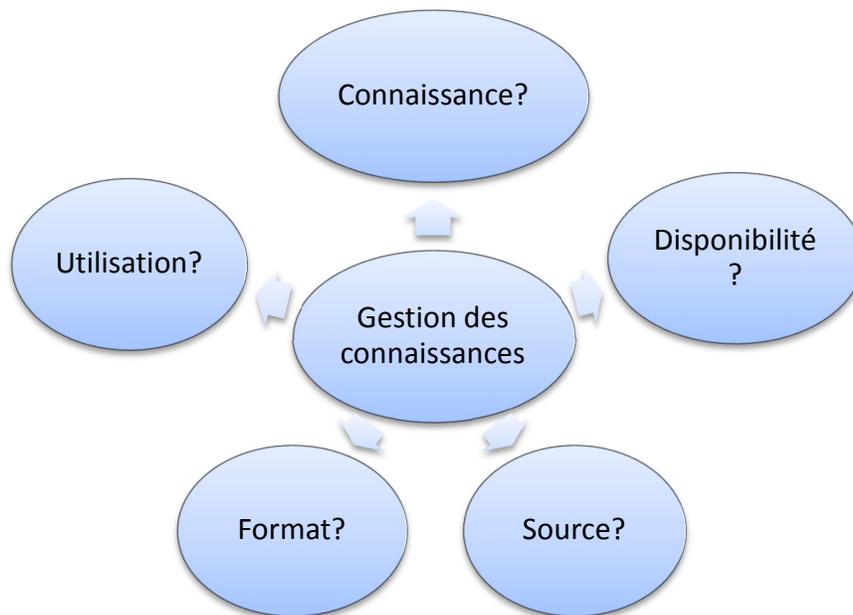


Figure 2: Composantes de la gestion des connaissances étudiées dans ce projet

Ces cartographies aident à éviter le manque et l'oubli des connaissances importantes lors de la prise de décisions. Elles aident, aussi, à les retrouver et les réutiliser au

moment opportun. Ces cartographies permettent, ainsi, une utilisation efficace des connaissances.

2.2 Modèles mathématiques de planification dans l'industrie forestière

Vu la limite des capacités humaines, la seule conceptualisation du processus de planification des approvisionnements sous forme de cartographies de GC ne serait pas suffisante pour l'optimiser. Pour cela, des auteurs ont proposé des outils et des technologies d'aide à la décision. Des outils de simulation ont été créés dans le but d'évaluer les scénarios définis par des critères choisis par les utilisateurs. Logilab est, par exemple, un outil développé par FORAC pour optimiser la planification des approvisionnements. Depuis 1960, plusieurs modèles d'optimisation ont été développés. Ces modèles sont très pratiques, ils regroupent plusieurs connaissances tacites telles que l'expérience et le savoir-faire des intervenants et explicites telles que les nombres, les chiffres et les formules. Les systèmes d'aide à la décision, en général, et les modèles mathématiques, en particulier, constituent un moyen qui permet de sauvegarder et de codifier les connaissances disponibles dans les entreprises et de les rendre réutilisables et accessibles par toutes les personnes de l'organisation.

D'importants avantages peuvent être tirés de l'utilisation de ces modèles mathématiques comme support à la prise de décision. Par exemple, Bergdahl et al. (2003), Burger et Jamnick (1995) notent une augmentation moyenne en profit de 5% en utilisant les MOM par rapport aux plans développés manuellement. RuttOpt est un système développé en Suède (Flisberg et al., 2009 ; Andersson et al., 2007) pour optimiser les activités de transport permet de réduire les coûts d'entre 5 % et 20 % par rapport aux solutions développées manuellement. Un autre avantage non-négligeable de ces modèles est que leur temps de résolution peut être très rapide, ce qui rend l'ajustement simple et presque instantané lors d'un changement d'une donnée (Beaudoin et al., 2007).

Il existe plusieurs MOM qui visent à optimiser la planification des approvisionnements, des opérations forestières, des opérations de sciage ou de la distribution. Ces modèles mathématiques diffèrent sur plusieurs plans. Ils couvrent des horizons de planification plus ou moins longs (un an, cinq ans, etc.) et par conséquent, des niveaux hiérarchiques différents (stratégique, tactique ou opérationnel). Au niveau stratégique, on cite, par exemple, Silvilab, développé par Simard et Lemieux (2011) et qui est une plateforme pour soutenir la planification de l'aménagement forestier. L'outil permet à l'utilisateur d'évaluer la performance d'un plan d'aménagement forestier en fonction de certains critères. Il permet aussi de proposer un nouveau plan en fonction des contraintes établies par l'utilisateur (rendement soutenu, accessibilité, uniformité, etc.). Beaucoup de MOM ont été développés pour optimiser la planification tactique. Par exemple, le modèle de Karlsson (2002) a été créé dans le but d'optimiser le plan tactique de récolte. Les modèles de planification opérationnelle visent à spécifier les activités à court terme, ainsi qu'à spécifier les entrepreneurs (Murray et Church, 1994).

D'un autre côté, certains modèles ont pour objectif de minimiser les coûts des opérations comme le modèle proposé par Rönnqvist (2003) visant à minimiser le coût de récolte de bois. D'autres encore proposent de maximiser le profit tel que le modèle de Könnnyű et Toth (2013) qui proposent l'aménagement forestier maximisant le profit sur un horizon d'une vingtaine d'années. D'autres modèles permettent de trouver l'ordonnancement optimal des activités forestières respectant les plans de plus haut niveau hiérarchique (Murray et Church, 1994).

De plus, les MOM diffèrent, aussi, au niveau des activités qu'ils couvrent. Certains d'entre eux ont été développés pour des activités spécifiques. Par exemple, les modèles de Karlsson et al. (2003) et de Rummunkainen (2009) ont été conçus dans le but d'optimiser la planification de la récolte. Ces modèles déterminent, alors, la période de récolte de chaque bloc et les quantités à récolter par essence. Plusieurs modèles ont été destinés à l'optimisation du problème de transport. Par exemple, Rönnqvist (2003), Palmgren (2004) et Broman et al. (2006) proposent de planifier le transport entre les blocs de récolte et les usines de sciage. Ceux-ci souhaitent, alors par le biais de leur modèle trouver les meilleurs plans de transport minimisant les coûts.

Richards et Gunn (2000) ont créé des modèles pour optimiser la construction des chemins en déterminant la date optimale de construction de chaque chemin. Certains MOM ont pour objectif d'optimiser la planification des activités du réseau d'approvisionnement forestier couvrant la récolte, le chargement, la construction des chemins et le transport. Walkers et Preiss (1988) ont regroupé plusieurs activités sous le même modèle. Leur modèle couvre la récolte et le transport. L'objectif de leur modèle est de proposer un plan minimisant le coût du bois livré à l'usine. Finalement, des modèles visent spécifiquement à planifier la production dans les usines de transformation de bois et à la planification de la distribution des produits finis tels que Gunnarsson et al. (2007) et Zanjani et al. (2010).

Récemment, deux MOM (Beaudoin et al., 2007 ; Arabi et al., 2011) ont été créés en lien avec les processus de planification des approvisionnements observés dans l'industrie forestière du Québec. Ces modèles intègrent les activités de toute la chaîne de création de valeur forestière. Ils constituent des modèles de programmation linéaire mixte et visent à résoudre le problème de planification tactique des approvisionnements forestiers et des activités de sciage d'une entreprise forestière propriétaire de plusieurs usines. L'objectif de ces deux MOM est de maximiser le profit de l'entreprise forestière, à travers ses activités, en respectant certaines contraintes. Ils permettent d'obtenir un plan annuel décrivant les activités de la chaîne de création de valeur forestière ayant lieu entre les blocs de récolte et les produits finis sortant des usines de sciage de transformation de bois. Chaque modèle permet, donc, de planifier :

- La récolte : les blocs, les essences, les modes de récolte ;
- Le transport : les blocs et les usines, les quantités ;
- L'achat de bois : les quantités, les essences, les fournisseurs ;
- La gestion des inventaires : quantité, lieu ;
- La transformation en usine : modes usine, produits forêt, quantités ;

- Les ventes : des produits finis, du bois rond et des copeaux.

Le plan généré respecte certaines contraintes telles que les demandes et les capacités et les volumes disponibles dans les blocs. Quoiqu'ils couvrent le même horizon de planification et les mêmes activités forestières, ces deux modèles diffèrent par les paramètres qu'ils prennent en considération, ainsi que par les éléments de la fonction objectif. De plus, certaines contraintes diffèrent. Par exemple, le modèle de Beaudoin et al. (2007), contrairement à celui d'Arabi et al. (2011), permet de tenir compte de la fraîcheur du bois et de la notion de qualité associée à l'âge du bois dans les demandes de billots, de copeaux et de produits finis. D'un autre côté, Arabi et al. (2011) introduisent la notion de modes de récolte et de modes d'usine. En effet, quoique ces modèles couvrent toute la chaîne de création de valeur et qu'ils tiennent en compte plusieurs éléments liés à la planification des activités de la chaîne de création de valeur, ils ne reflètent pas le processus industriel de planification. Plusieurs éléments clés reliés principalement à la qualité et à la disponibilité des données sont omis. La section suivante traite de la prise en compte de l'incertitude des données dans les MOM.

2.3 Incertitude des données dans les modèles d'optimisation mathématique

La GC a été introduite dans la section 2.1 par cinq de ses composantes qui sont la connaissance, sa disponibilité, sa source, son format et le moment de sa disponibilité. La composante principale est la connaissance. Elle englobe la pertinence et la qualité de la connaissance. En effet, il est très important de disposer de l'information, mais il est encore plus important qu'elle soit précise de manière à générer pour son utilisateur un certain niveau de confiance. Elle doit aussi être utile dans son contexte d'utilisation. La qualité de la connaissance peut être liée aux autres composantes de la GC telles que le moyen de partage la source et le format. Parfois, la connaissance précise est disponible, mais pas au bon moment. Par ailleurs, Mosconi (2011) affirme que ne pas connaître les connaissances détenues par les membres de l'organisation est l'une des principales raisons d'échec lors de la prise de décisions et dans la résolution des problèmes.

Dans le domaine forestier, plusieurs données sont incertaines vu la nature même du contexte forestier qui dépend de phénomènes naturels (feu, météo, humidité, etc.). De plus, plusieurs données sont sujettes à des erreurs d'échantillonnage ou de mesure. Cette incertitude a un impact majeur sur les décisions prises par les industriels. Par exemple, dans le cas d'un feu, la planification de récolte peut être modifiée de manière à pouvoir réagir rapidement pour limiter les dégâts. Plusieurs auteurs ont souligné l'importance de la prise en compte de l'incertitude des paramètres dans la planification (Kangas et al., 2008 ; Myers, 2002).

Beaudoin et al. (2007) évaluent l'impact de l'incertitude de plusieurs paramètres comme les volumes d'inventaires forestiers, le coût de récolte, la capacité d'usine et le coût de transport. La prise en compte de l'incertitude de ces paramètres dans le processus décisionnel leur a permis d'identifier un plan générant 8,8% plus de profit que lorsque l'incertitude était ignorée. Myers (2002), de son côté, cite plusieurs paramètres incertains tels que les volumes disponibles dans les blocs et leur opérabilité. Il trouve, ainsi, que le profit augmente, en moyenne, de 11,5 % lorsqu'on détient de l'information

parfaite. Cette augmentation du profit peut varier de 3 % à 20 %. De plus, Myers (2002) mesure, aussi, un impact important sur la satisfaction des demandes, sur le volume d'inventaires stockés et sur le plan d'intervention. Les fluctuations des demandes et des prix de produits finis constituent aussi une source importante d'incertitude qui a fait l'objet d'étude de Gong et Löfgren (2003).

Notamment, les données d'inventaires forestiers constituent une source très importante d'incertitude. Beaudoin et al. (2007) ont démontré pour leur cas d'étude que l'incertitude des données d'inventaires forestiers est la plus grande source de variation et celle qui a la plus grande influence sur le profit parmi les paramètres évalués. Ces données sont imprécises. Les directeurs des approvisionnements interviewés par Myers (2002) affirment que les volumes d'inventaires forestiers estimés peuvent varier de 2 à 200 % par rapport aux volumes d'inventaires réels. Effectivement, Thompson et al. (2007) ont montré que les données d'inventaire forêt sont imprécises d'environ 30 %. Ceci explique que les directeurs d'usines interviewés par Nilsson (2013) utilisent l'historique des données pour faire la planification des approvisionnements au lieu d'utiliser les données d'inventaires forestiers estimés. Ils expliquent ceci par un manque de précision et de détails des données forestières.

Malgré son importance, l'incertitude des données est souvent négligée. D'après Kangas et al. (2008), l'incertitude n'est, actuellement, pas prise en compte dans les MOM qui supportent la prise de décisions de planification. Les modèles mathématiques, particulièrement les modèles de programmation linéaire constituent l'approche la plus appliquée pour optimiser la planification des opérations forestières (Kangas et al., 2008). Ces modèles sont, donc, appliqués sous l'hypothèse de certitude des données. Par conséquent, la solution choisie peut être différente de la solution optimale. Dans ce cas, la valeur de la fonction objectif choisie peut être inférieure à la fonction optimale. Ce type de perte est appelé «regret». Un deuxième type de perte défini par (Bell, 1985, cité dans Kangas et al. (2008), p118) est appelé «déception». La solution optimale est alors surestimée. Ceci est dû à l'incertitude des paramètres de la fonction objectif et des paramètres de contraintes. Par ailleurs, la solution obtenue peut même être irréalisable (Pickens et Dress, 1988, cité dans Kangas et al. (2008), p118).

L'approche traditionnelle utilisée pour diminuer les problèmes liés à l'incertitude des données consiste en une analyse paramétrique de plusieurs scénarios. Un de ces plans est souvent choisi comme préférable. Or ceci est possible lorsque le nombre de paramètres incertains est limité ou s'ils sont corrélés de manière à ce que l'analyse de tous les scénarios possibles soit faisable (Hof et al., 1988). Pour affronter ces problèmes, Myers (2002) propose d'avoir recours à un plan qui permet de faire face aux incertitudes. Autrement, il propose la possibilité de pouvoir réagir durant la réalisation des opérations forestières. Les décisions peuvent, alors être modifiées et ajustées au cours de la phase de réalisation du plan des approvisionnements en fonction des événements aléatoires qui se produisent lors de la réalisation du plan. Toutefois, il démontre les bénéfices d'une planification sous information parfaite.

Kangas et al. (2008), de son côté, suggère de prendre en compte l'incertitude des données, en utilisant les modèles probabilistes ou la probabilité de satisfaction des demandes remplace les contraintes déterministes. Elle recommande l'attribution d'une probabilité pour la satisfaction des contraintes et elle va au-delà pour proposer de maximiser la probabilité de satisfaction des contraintes. Weintraub et al. (1995) évoque l'incertitude des rendements en proposant un modèle probabiliste. Les

coefficients des rendements de récolte, s'ils sont incertains, peuvent affecter les volumes de bois obtenus (par la récolte) et ainsi les volumes vendus. Les intervenants chargés de la prise de décisions peuvent, alors, préférer d'augmenter la probabilité d'avoir un profit élevé même si ceci entraîne la diminution du profit moyen.

Boyчук et al. (1996) analysent l'incertitude des risques liés à l'aménagement forestier et aux traitements sylvicoles. Ils proposent, ainsi, un modèle stochastique pour prendre en compte ces risques.

La prise en compte de l'incertitude complexifie la tâche de planification (Hunsaker, 2001, cité dans Coudé, 2010, p. 24). Une solution possible est d'améliorer la qualité des données afin de générer un environnement moins incertain. Il existe de nouvelles méthodes et technologies comme les capteurs aériens et spatiaux qui sont capables de trouver des données plus détaillées et plus précises avec des coûts raisonnables par rapport à ce qui est actuellement disponible (Packalen et al., 2008, cité dans Nilsson, 2013). Le problème rencontré dans ce cas est l'équilibrage du coût des technologies disponibles pour la collecte des données par rapport au gain potentiel (Kangas et al., 2008). Un deuxième problème est de déterminer l'information à collecter ainsi que la qualité dont on a besoin (Duvemo et al., 2012, cité dans Nilsson, 2013). Cependant, la solution d'amélioration des données peut être appréciée par les industriels qui seraient prêts à utiliser les données d'inventaire forestier au lieu de l'historique des données si elles étaient plus fiables (Nilsson, 2013). Ces derniers se disent prêts à utiliser les données forestières (du plan de plus haut niveau hiérarchique) si les informations sont totalement fiables. Il importerait aussi de fournir une information qui met en relation la valeur d'une plus grande précision des données et la qualité de la décision. Peu de modèles sont disponibles pour y arriver et aucun n'a ciblé spécifiquement la planification tactique des approvisionnements. Ce mémoire vise à combler cette carence.

3 Méthodologie

3.1 Comparaison de modèles existants avec le processus industriel de planification des approvisionnements

Dans un premier temps, une évaluation comparative de deux MOM existants avec le processus industriel de planification mensuelle des approvisionnements chez un industriel forestier est présentée. Le processus industriel a été conceptualisé avec des cartographies de GC (Mosconi, 2011). Ces cartographies couvrent tout le processus de planification des approvisionnements forestiers. Les modèles mathématiques d'optimisation qui ont été choisis pour cette étude sont les modèles de Beaudoin et al. (2007) et d'Arabi et al. (2011). Ils ont été sélectionnés parmi d'autres modèles, car ils intègrent toute la chaîne de création de valeur forestière, de la forêt jusqu'aux produits finis à la sortie de l'usine de sciage. Ces modèles couvrent les activités du processus de planification des approvisionnements et de transformation de bois aux usines de sciage des entreprises forestières québécoises.

Une analyse détaillée des trois modèles soient ; les modèles mathématiques de Beaudoin et al. (2007) et d'Arabi et al. (2011) et les cartographies de gestion de connaissances de Mosconi (2011) a été réalisée. La difficulté de cette partie vient de l'extraction des données à partir des cartographies de GC. En effet, ces cartographies ne sont pas représentées sous une forme comparable avec les modèles mathématiques. Les cartographies décrivent les processus de l'entreprise. Elles énumèrent les connaissances utilisées au cours de chaque activité. À partir des composantes « donnée » et « information », les paramètres et les variables de décisions ont été extraits. En fait, les entrées représentent les paramètres. Les décisions prises correspondent aux variables décisionnelles. Les connaissances explicites ainsi que l'enchaînement des activités permettent de comprendre la logique suivie au cours de la planification. Ceci permet de trouver les composantes à prendre en compte dans la formulation de la fonction objectif et des contraintes des modèles mathématiques. En effet, grâce aux composantes de la GC (disponibilité, source, format, moyen d'accès et moment de disponibilité), seules les composantes pertinentes et disponibles ont été retenues des cartographies de GC.

Pour les modèles mathématiques, la tâche d'analyse était plus facile. L'étude a été faite en détaillant toutes les composantes des modèles. Les points étudiés et qui ont été comparés sont :

- Les ensembles de paramètres tels que les blocs de récolte, les usines, les essences, les produits finis, etc.
- Les paramètres constituant les entrées des MOM tels que les demandes, les capacités des différentes opérations, etc. Ce sont, aussi, les données sur lesquelles se base la prise de décisions.

- Les variables de décisions qui sont les sorties des MOM qui permettent d'identifier le plan d'intervention telles que les volumes à récolter et les décisions de ventes.
- La fonction objectif qui détermine dans ce cas le profit de la chaîne de création de valeur.
- Les contraintes auxquelles est soumis le problème.

Les indices des paramètres et des variables de décision ont été également analysés. Ces indices indiquent les caractéristiques de chaque paramètre ou variable de décision. Par exemple, les volumes de produits récoltés dépendent de l'indice essence. La comparaison a été présentée sous forme matricielle. Une partie de cette matrice est illustrée dans la section 4.1 (résultats).

3.2 Développement du modèle d'optimisation mathématique

À travers la comparaison expliquée dans la section 3.1, les connaissances utilisées en entreprise chez le partenaire de l'étude ont été croisées avec les formulations mathématiques. Le résultat de ce travail est un nouveau modèle d'optimisation mathématique qui reflète mieux le processus industriel de planification étudié. Ce modèle devrait être plus facilement adoptable par l'entreprise partenaire. Une synthèse de la comparaison des modèles mathématiques de Beaudoin et al. (2007), Arabi et al. (2011) et Mosconi (2011) a été faite. Une colonne a été ajoutée dans la matrice de comparaison. Dans cette colonne, uniquement les composantes pertinentes à considérer en développant le nouveau modèle d'optimisation ont été gardées. La GC peut, alors, être considérée comme étant un filtre qui a permis d'obtenir un système plus cohérent avec le processus industriel. Le modèle d'optimisation obtenu est un résultat de la comparaison des modèles mathématiques de Beaudoin et al. (2007) et Arabi et al. (2011) et des cartographies du processus de planification (Mosconi, 2011).

3.3 Validation du modèle

Le modèle d'optimisation présenté est un modèle linéaire mixte. Dans un premier temps, le modèle a été validé par le directeur des approvisionnements de l'entreprise partenaire. Cette validation a été faite pour le modèle au complet (non pas uniquement pour la transformation de bois aux usines) en validant chacune des composantes du modèle mathématique développé. Cette étape visait à assurer une meilleure cohérence avec le processus industriel de planification.

Ce modèle a été défini sous ILOG OPL studio et résolu avec CPLEX 12.3. Pour valider le modèle et vérifier les réponses obtenues, une base de données réelles complétée avec des données hypothétiques mais réalistes a été utilisée. Cette base de données est introduite sous forme de fichiers Microsoft Access liés directement au programme d'optimisation.

La vérification du modèle vise à attester que le modèle accomplit ce pourquoi il a été conçu. Elle consiste à s'assurer que le modèle est programmé correctement, que les

algorithmes ont été implantés adéquatement et que le modèle ne contient pas d'erreurs ou n'a pas fait l'objet d'omissions.

La base de données de départ a été modifiée plusieurs fois pour valider la réponse du modèle. Les valeurs de plusieurs paramètres ont été modifiées afin de tester le modèle dans plusieurs scénarios possibles. Cette étape vise à valider le comportement du modèle. Elle consiste à s'assurer que le modèle satisfait les besoins attendus en termes de méthodes utilisées et de résultats obtenus. Le but ultime de la validation d'un modèle est de le rendre utile en adressant le bon problème, en procurant de l'information précise sur le système modelé et en rendant le modèle utilisable.

3.4 Description de l'expérimentation

L'expérimentation vise à évaluer l'impact d'une meilleure GC par l'entremise de sa composante «connaissance». Plus particulièrement, l'expérimentation vise à évaluer les gains financiers engendrés par une amélioration de la précision des données d'inventaires forestiers (bois sur pied).

Quatre scénarios de taux d'imprécision des données forestières ont été simulés. L'imprécision associée aux données d'inventaire a été représentée par des coefficients de variation de 5 %, 10 %, 20 % et 30 %. Le taux de 30 % correspond au taux généralement reconnu aux pratiques d'inventaire actuelles et servira de base comparative (Thompson et al., 2007).

L'expérimentation consiste à simuler les activités d'approvisionnement et de transformation en usine. Chacun des scénarios a été simulé 30 fois pour obtenir une taille d'échantillon acceptable. À chacune des simulations, la profitabilité engendrée par les activités a été enregistrée et a servi au calcul de l'intervalle de confiance (95%) de la profitabilité du scénario. Des tests de comparaison simples (test de t de Student) ont, ensuite, permis de vérifier si les profitabilités moyennes des scénarios sont statistiquement différentes du scénario de référence.

Description de la simulation

La figure 3 schématise la simulation d'un scénario. La simulation se déroule sur une période d'une année (12 périodes) avec une replanification mensuelle et un horizon de planification dégressif.

À chaque période, un plan opérationnel est développé à l'aide du modèle d'optimisation présenté à la section 4.2. Lors de la première période d'exécution du plan, les volumes réels sont constatés durant les opérations et cette information est transmise au niveau opérationnel. Les volumes réels ont été générés à l'aide de distributions gaussiennes ayant comme moyennes les volumes estimés et des écarts types générés en fonction du taux d'imprécision. Sur la base de cette nouvelle information précise, un recours sous forme de replanification est exercé au niveau opérationnel pour ajuster la cédule de production. Les ajustements au plan sont exécutés pour le reste de la période en cours.

Donc, chaque période simulée a fait l'objet de deux planifications tel qu'illustré à la figure 3.

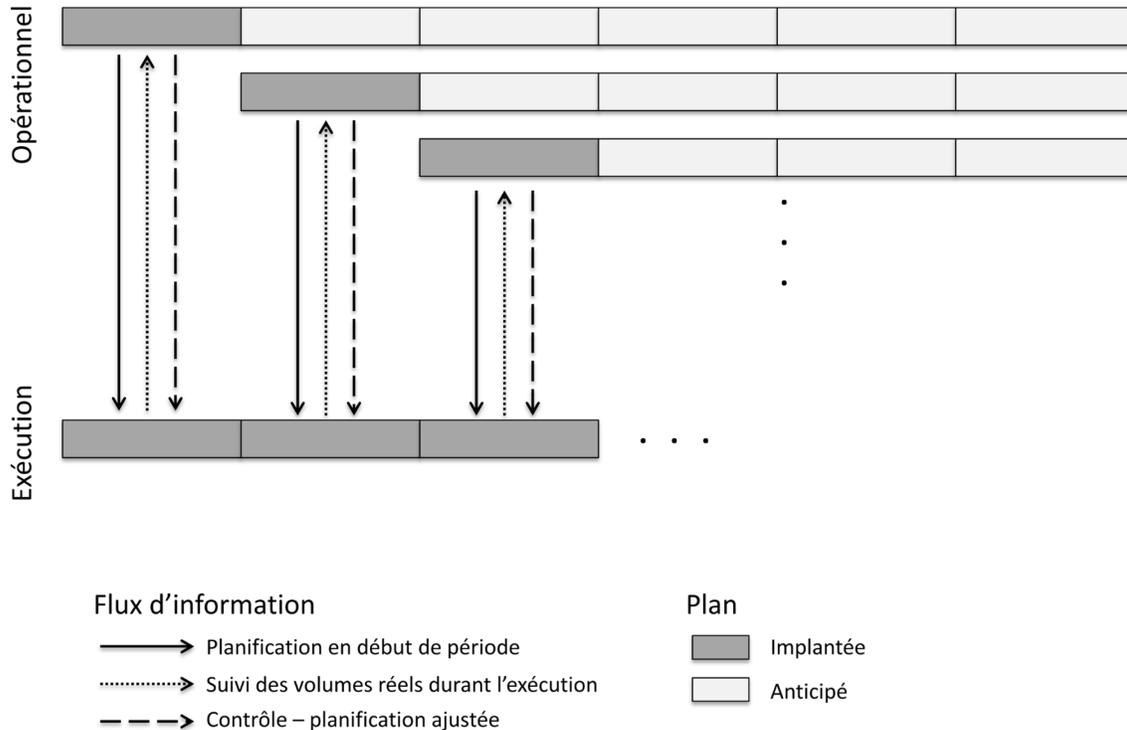


Figure 3: Schéma descriptif de la simulation

Pour la replanification en guise de recours, les blocs sélectionnés dans la planification initiale sont imposés à la récolte dans la période en cours. Cependant, les volumes à récolter peuvent changer de façon à s'adapter aux mises à jour des volumes disponibles et à respecter les demandes. La replanification permet également l'ajout de nouveaux blocs de récolte.

Une fois l'exécution des opérations de la période en cours terminée, la base de données est mise à jour pour poursuivre la simulation pour la seconde période de l'horizon de planification. Les codes VBA qui permettent la mise à jour automatique de la base de données sont disponibles en annexe (annexe II).

La procédure de simulation se poursuit en boucle jusqu'à la dernière période de l'horizon de planification où la formulation du problème est mono période. Donc, le plan ayant été exécuté est en fait une concaténation de plusieurs plans opérationnels partiels.

La profitabilité engendrée par les opérations lors de l'exécution de la première période des multiples plans partiels a été enregistrés. La sommation de ces dernières correspond à la profitabilité simulée d'un scénario.

Un cinquième scénario a fait l'objet d'une simulation, soit celui où les données d'inventaires étaient précises (niveau d'imprécision de 0%). Ce scénario permet d'évaluer la profitabilité maximale pouvant être engendrées du cas à l'étude et sert de base comparative. Comme aucune imprécision n'est présente, la simulation de ce plan se résume à développer un seul plan multi périodes à l'aide du modèle d'optimisation. Les volumes d'inventaires par bloc utilisés pour ce scénario sont ceux qui ont été constatés durant les opérations simulées dans les autres scénarios, donc générés aléatoirement d'un scénario à un autre. L'utilisation des mêmes données d'inventaire que celles générés dans les simulations permet d'associer la différence de profit au moment de la prise de connaissance des volumes réels.

Pour tous les scénarios simulés, des statistiques sur le profit, ainsi que d'autres éléments comme les volumes d'inventaire de produits forêt et de produits finis à la fin de l'horizon de planification et la satisfaction des demandes, ont été comparés avec ceux du plan ajusté mensuellement.

La description des étapes de l'expérimentation peut, aussi, être vue comme la description d'une méthode d'utilisation du modèle mathématique développé. En effet, même sans avoir les données d'inventaires précises, le modèle peut être implanté dans l'entreprise. Il ne sera, cependant, pas exécuté une seule fois, mais, une fois par mois lors de l'obtention des mises à jour des volumes d'inventaire de bois sur pied. Le modèle proposerait, alors, un plan recours ajusté en fonction des données d'inventaires forestiers précises. Ceci ne change rien par rapport à l'intérêt de ce modèle vu que son exécution prend environ 75 minutes, ce qui apparaît raisonnable pour faire une replanification mensuelle des opérations.

4 Résultats obtenus

4.1 Matrice Comparative entre les modèles mathématiques et le processus industriel de planification

Comme décrit dans la section 3.1, le premier objectif visait à réaliser une comparaison entre deux modèles mathématiques d'optimisation (Beaudoin et al., 2007 et Arabi et al., 2011) et le processus industriel de planification des approvisionnements représenté par des cartographies de GC (Mosconi, 2011). Cette comparaison est présentée sous forme d'une matrice de comparaison. Un aperçu de cette matrice est illustré dans le tableau 1. La matrice de comparaison complète est en Annexe I.

Tableau 1 : Aperçu de la matrice de comparaison entre (respectivement) les modèles d'Arabi et al. (2011), Beaudoin et al (2007) et Mosconi (2011).

	Modèle mathématique n 1	Modèle mathématique n 2	cartographie du processus industriel
Dépenses	cout de récolte = cout unitaire de récolte: <i>bloc de récolte</i> mode de récolte volume de bois à récolter : <i>bloc de récolte</i> <i>mode de récolte</i> <i>période</i>	cout de récolte = cout unitaire de récolte: <i>bloc de récolte</i> <i>période</i> volume de bois à récolter : type d'essence <i>bloc de récolte</i> <i>période</i>	cout de récolte = cout unitaire de récolte: <i>bloc de récolte</i> mode de récolte volume de bois à récolter : type d'essence <i>bloc de récolte</i> <i>période</i>
			coût de gravelage des chemins: <i>troncon</i> <i>periode (été)</i>
Revenues	ventes de produits finis: type de produit finis	ventes de produits finis: <i>type de produit finis</i>	ventes de produits finis: type de produit finis qualité
Contraintes		-	volume minimal à récolter : <i>période</i>

* Le gras représente les différences et l'italique représente les indices dans les modèles mathématiques.

Cette matrice a permis d'identifier certains points communs comme par exemple les coûts de récolte et certaines différences telles que la prise en compte des modes de récolte. En effet, certaines connaissances prises en compte par l'entreprise partenaire sont absentes dans les formulations mathématiques. D'un autre côté, certaines données utilisées dans les modèles mathématiques sont indisponibles dans les entreprises forestières. Toutefois, certains paramètres indisponibles, mais jugés pertinents ont été gardés. Par exemple, les coefficients de rendement de récolte et de transformation en usine ont été retenus. Le directeur des approvisionnements confirme qu'actuellement, ces données ne sont pas disponibles. Elles sont estimées en se basant sur l'intuition et l'expérience des industriels. Toutefois, elles sont jugées importantes pour la planification et une analyse des historiques des données permettrait de les trouver.

Les modèles mathématiques étudiés reprennent plusieurs données prises en compte chez le partenaire industriel lors de la réalisation du processus de planification. Cependant, plusieurs différences ont été identifiées entre ces modèles et les cartographies de GC ont été notées. Ceci reflète les écarts entre les modèles et l'industrie à travers un cas d'étude. Les notions importantes analysées et absentes dans au moins l'un des modèles mathématique sont :

- L'âge de bois qui permet de prendre en compte la notion de fraîcheur du bois et par conséquent la qualité du produit final obtenu ;
- Les modes de récolte : par exemple mode bois long et mode bois court ;
- Les modes usines qui sont les patrons de sciage selon lesquelles peut être configurée une usine pour donner une gamme de produits finis à partir d'un produit forêt (billes) ;
- Les coûts de stockage des différents produits, particulièrement des produits finis ;
- Des demandes strictes en produits finis : ce modèle suppose, donc, que la chaîne de création de valeur fonctionne en flux tirés et non pas en flux poussés ;
- Des demandes non-strictes en produits forêt et en copeaux ;
- L'entretien des tronçons des chemins : cet élément est souvent négligé dans les modèles mathématiques. Il permet, non seulement de prendre en considération le coût d'entretien des chemins, mais, aussi de concentrer les opérations forestières dans la même zone ;
- Le gravelage des tronçons de chemins : pendant la période d'été, certains tronçons de chemins nécessitent la pause de gravier. Grâce, à cette opération, certains blocs deviennent, alors accessibles. Actuellement, ces blocs sont considérés comme des blocs inaccessibles pendant cette période. Le gravelage des chemins donne la possibilité aux MOM de déterminer s'il est optimal d'accéder à ces blocs ou non ;
- Les volumes minimaux à récolter, transporter et transformer en usine: À notre connaissance, la contrainte des volumes minimaux n'a jamais été prise en considération dans les modèles d'optimisation de la planification malgré son importance. Ces volumes permettent à l'entreprise forestière de garder une certaine stabilité du niveau de main d'œuvre en emploi et de maintenir actifs un nombre minimal d'entrepreneurs. Jusqu'à maintenant, les modèles mathématiques, en particulier les modèles de Beaudoin et al. (2007) et Arabi et al. (2011) fonctionnent comme des interrupteurs qui s'ouvrent ou se ferment dépendamment du profit. En effet, les entreprises forestières continuent dans une certaine mesure la production, même à perte, pour garantir la disponibilité de la main d'œuvre et des entrepreneurs dans les prochaines années.

Ainsi, la comparaison entre les modèles sélectionnés et la cartographie des processus confirme l'hypothèse des écarts existants entre les modèles mathématiques et le processus industriel observé chez le partenaire. Ces écarts sont mesurés au niveau des connaissances utilisées, des caractéristiques ou des indices des connaissances (par exemple, les types d'essences pour les volumes de bois récoltés) et des contraintes

respectées. Dans la section suivante, le modèle mathématique issu de cette comparaison a été présenté.

4.2 Modèle d'optimisation mathématique

Le modèle mathématique obtenu, à travers la comparaison des modèles de Beaudoin et al. (2007), Arabi et al. (2011) et Mosconi (2011) a pour objectif de maximiser le profit de l'entreprise à travers sa chaîne de création de valeur forestière en proposant un plan d'intervention optimal et en respectant certaines contraintes telles que les capacités, demandes et les volumes disponibles. Le modèle présenté permet de planifier les activités liées aux approvisionnements forestiers telles que la récolte, le transport, l'entretien des chemins ainsi que les activités de transformation de bois en usine. Ce qui est innovant et différent par rapport aux modèles de référence est que des quantités minimales sont imposées pour les différentes activités. De plus, l'entretien et l'utilisation des chemins sont tenus en considération, ceci est dans le but de concentrer les activités dans la mesure du possible.

Ensembles

B : ensemble de blocs de récolte.

U : ensemble d'usines internes (de l'entreprise).

U' : ensemble des usines clientes, ce sont les usines auxquelles on vend des produits forêt récoltés par l'entreprise.

C : ensemble d'usines de pâtes et papiers.

S : ensemble de fournisseurs de produits forêt (bois privé ou autres mandataires d'opérations).

F : ensemble de produits forêt.

P : ensemble de produits usine (produits finis).

T : ensemble de période dans l'horizon de planification considéré.

PerÉté : ensemble de périodes d'été.

M : ensemble de modes d'usines m ; mode selon lequel une usine peut être configurée pour faire le processus de transformation. Le mode choisi détermine la gamme de produits finis obtenus en fonction des produits forêt transformés.

R : ensemble de modes de récolte. Ce sont les modes utilisées pour obtenir un certain type de produits forêt à partir du bois récolté.

A : ensemble d'âges de produits forêt.

Amax : ensemble de classes d'âge.

X : ensemble de types d'essences ou groupes d'essences.

TR (b, u) : ensemble de tronçons qui composent le chemin entre le bloc de récolte b et l'usine interne ou l'usine de clients u .

TR^{grav} (b, u) : ensemble de tronçons de chemins reliant le bloc de récolte b à l'usine interne ou de clients u et qui nécessitent le gravelage pour le transport en été.

CH(Xi) : ensemble de chemins (couples (i, j) où i est le point de départ et j est le point d'arrivée) qui contiennent le tronçon X_i .

Paramètres

- **Prix de ventes des différents produits**

z_{put} : prix unitaire de vente de produit fini par l'usine u pendant la période t (\$ par 1000 PMP).

y_{act} : prix unitaire de vente de copeaux fabriqués à partir de produits forêt d'âge a à l'usine de pâtes et papiers c pendant la période t (\$/tonne).

- **Inventaire de départ**

$ipfo^0 U_{fauc}$: inventaire de départ de produit forêt f d'âge a à l'usine u (m^3).

$ipfo^0 B_{fab}$: inventaire de départ de produit forêt f d'âge a dans le bloc de récolte b (m^3).

$ipfi^0 U_{pu}$: inventaire de départ de produit fini p à l'usine u (1000 PMP).

$icop^0_{au}$: inventaire de départ de copeaux d'âge a à l'usine u (tonnes).

- **Coûts moyens des opérations**

ch_{rb} : coût unitaire moyen de récolte du bloc b selon le mode de récolte r.

$ct_{bu}, ct_{bu'}$: coût unitaire moyen de transport de produits forêt du bloc b vers l'usine u ou u' ($\$/m^3$).

cs_{fu} : coût unitaire moyen de stockage du produit forêt f à l'usine u ($\$/m^3$).

cs_{fb} : coût unitaire moyen de stockage du produit forêt f dans le bloc b ($\$/m^3$).

cs_{pu} : coût unitaire moyen de stockage du produit fini p dans l'usine u ($\$/1000 PMP$).

cu_{fmu} : coût moyen de transformation d'une unité de produit forêt f dans l'usine u configurée selon le mode m ($\$/m^3$).

ca_{fas} : coût unitaire d'achat du produit forêt f d'âge a du fournisseur s ($\$/m^3$).

c_{Xi}^{ent} : coût d'entretien du tronçon de chemin Xi (\$).

cg_{xi} : coût de gravelage du tronçon de chemin Xi pendant la période d'été (\$).

- **Demandes**

$df_{f,amax,u't}$: demande de produit forêt f d'âge maximal amax par l'usine cliente u' pendant la période t (m^3).

dp_{put} : demande de produit fini p produit à l'usine u pendant la période t (m^3).

$d_{amax,ct}^{Cop}$: demande de copeaux produits à partir du produit forêt d'âge maximal amax pendant la période t par l'usine de pâtes et papiers c (tonnes).

- **Capacités : volumes maximaux**

cu_u^{max} : capacité de consommation de l'usine u par période : quantité de produits forêt pouvant être transformée à l'usine u pendant une période quelconque (m^3).

cs_u^{finis} : capacité globale de stockage de produits finis à l'usine u (1000 PMP).

cs_u^{PFo} : capacité de stockage de produits forêt dans la cours d'usine u (m^3).

vr_{bx}^{max} : volume maximal de bois d'essence x disponible dans le bloc de récolte b et pouvant être récolté (m^3).

cr^{max} : capacité maximale de récolte de bois par période (capacité des machineries) (m^3).

ca_{fast}^{max} : volume maximal de produits forêt f d'âge a pouvant être acheté auprès du fournisseur s pendant la période t (bois privé ou autres mandataires d'opérations) (m^3).

ct^{max} : capacité de transport, volume maximal de produits forêt pouvant être transporté par période (m^3).

nb^{max} : nombre de blocs maximal pouvant être récoltés au cours d'une même période.

- **Quantités minimales**

cr^{min} : quantité minimale de bois à récolter par période (m^3).

ct^{\min} : quantité minimale de bois à transporter par période (m^3).

cu^{\min}_u : quantité minimale de produits forêt consommés par l'usine u par période (m^3).

iv^{\min} : volume minimal d'inventaires de produits forêt dans les cours d'usine (m^3).

- **Coefficient de transformation**

α_{rxf} : coefficient de rendement de récolte, volume de produit forêt f obtenu à partir d'une unité de bois d'essence x en utilisant le mode de récolte r.

γ_{pfam} : coefficient de rendement usine, volume de produit fini p obtenu à partir d'une unité de produit forêt f d'âge a à l'usine configurée selon le mode m (de m^3 en 1000 PMP).

β_{am} : volume de copeaux produits à partir d'une unité de produit forêt d'âge a lors de la transformation en usine configurée selon le mode m (de m^3 en tonnes).

L : un grand nombre.

Variables de décision

- **Décisions de ventes**

S_{put} : volume de produit fini p vendu par l'usine u pendant la période t (1000 PMP).

SC_{acut} : volume de copeaux produits à partir de produit forêt d'âge a à l'usine u et vendus à l'usine de pâtes et papiers c pendant la période t (tonnes).

- **Décisions de récolte**

V_{brxt} : volume de bois d'essence x récolté dans le bloc b, en utilisant le mode de récolte r pendant la période t (m^3).

W_{bt} : variable binaire qui indique si la récolte est faite dans le bloc b pendant la période t ou non:

- $W_{bt}=1$ si la récolte est faite dans b pendant t;
- $W_{bt}=0$ sinon.

X_b : variable binaire égale à 1 si on récolte le bloc b tout au long de l'horizon de planification, 0 sinon.

- **Décisions de transport**

T_{fabut} : volume de produit forêt f d'âge a transporté du bloc b vers l'usine u pendant la période t (m^3).

$T_{fabu't}^{ext}$: volume de produit forêt f d'âge a transporté du bloc de récolte b vers l'usine du client u' pendant la période t (m^3).

- **utilisation des chemins**

XG_{Xi} : variable binaire qui indique si le tronçon Xi est gravelé pendant la saison d'été.

X_{Xit}^{ent} : variable binaire qui indique si le tronçon Xi est entretenu pendant la période t.

- **volumes d'inventaires**

VI_{faut} : volume d'inventaire de produit forêt f d'âge a à l'usine u à la fin de la période t (m^3).

VI_{fabt} : volume d'inventaire de produit forêt f d'âge a dans le bloc de récolte b à la fin de la période t (m^3).

VI_{put} : volume d'inventaire de produit fini p à l'usine u à la fin de la période t (1000 PMP).

$V_{inv_{aut}}^{cop}$: volume d'inventaire de copeaux d'âge a à l'usine u à la fin de la période t (tonne).

- **Consommation en usine**

U_{famut} : volume de produits forêt f d'âge a consommé par l'usine u fonctionnant selon le mode m pendant la période t (m^3).

- **Achat de bois**

A_{fasut} : volume de produits forêt f d'âge a acheté par l'usine u auprès du fournisseur s pendant la période t (m^3).

La figure 4 représente les variables décisionnelles prises en compte dans le modèle.

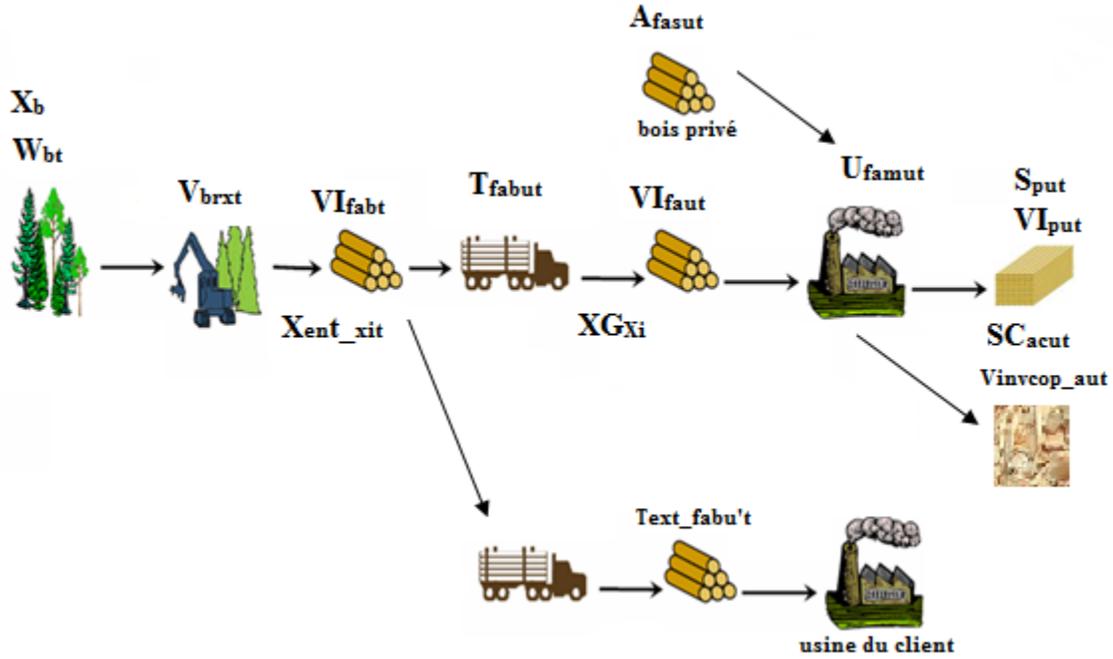


Figure 4: Schéma des décisions considérées dans le modèle d'optimisation développé

La fonction objectif

Maximiser

$$\begin{aligned} & \sum_t \sum_b \sum_{u'} \sum_a \sum_x \sum_r \frac{ch_{rb} T_{fabu't}}{a_{rxf}} + \sum_t \sum_u \sum_c \sum_a y_{act} SC_{acut} + \sum_t \sum_p \sum_u z_{put} S_{put} - \\ & \sum_t \sum_b \sum_x \sum_r ch_{rb} V_{brxt} - \sum_t \sum_f \sum_{(b,u)} \sum_a ct_{bu} T_{fabut} - \sum_t \sum_f \sum_{(b,u)} \sum_a ct_{bu} T_{fabu't}^{ext} - \\ & \sum_b \sum_u \sum_{Xi \in TR^{grav}(b,u)} cg_{Xi} XG_{Xi} - \sum_T \sum_{Xi \in TR(b,u)} c_{Xi}^{ent} X_{Xit}^{ent} - \sum_T \sum_{Xi \in TR(b,u)} c_{Xi}^{ent} X_{Xit}^{ent} - \\ & \sum_t \sum_u \sum_f \sum_a cs_{fu} VI_{faut} - \sum_t \sum_u \sum_p cs_{pu} VI_{put} - \sum_t \sum_b \sum_f \sum_a cs_{fb} VI_{fabt} - \\ & \sum_t \sum_u \sum_m \sum_f \sum_a cu_{fmu} U_{famut} - \sum_t \sum_u \sum_s \sum_f \sum_a ca_{fas} A_{fasut} \end{aligned}$$

La fonction objectif vise à maximiser le profit. Les trois premiers termes désignent les revenus de ventes de produits forêt, copeaux et produits finis. Les produits forêt ne génèrent pas de profit. Ils se vendent à un prix égal à leur coût de récolte et de

transport incluant le coût de gravelage et d'entretien des chemins. Étant donné que le coût de transport, de gravelage et d'entretien rentre dans les coûts des opérations ainsi que dans les revenus (prix de ventes de produits forêt), une simplification a été faite, ces termes ont été, alors, enlevés du profit. La vente des produits forêt constitue un moyen pour forcer la consommation des stocks générés par la récolte et qui ne sont pas consommés par les usines de l'entreprise. Les autres termes représentent les coûts des opérations, soient, le coût de récolte, le coût de transport, le coût de gravelage et d'entretien des chemins, le coût de stockage des différents produits, le coût de transformation en usines et d'achat de bois privé ou d'autres mandataires d'opérations.

Les contraintes

1. $\sum_b \sum_{a \leq a_{max}} T_{fabu't} \leq d_{f_{a_{max}u't}} \quad \forall f, a, u, t$
2. $S_{put} = dp_{put} \quad \forall p, u, t$
3. $\sum_u \sum_{a \leq a_{max}} SC_{acut} \leq d_{a_{max}ct}^{cop} \quad \forall c, t$
4. $\sum_r \sum_x V_{brxt} - LW_{bt} \leq 0 \quad \forall b, t$
5. $\sum_t W_{bt} - 2X_b \leq 0 \quad \forall b$
6. $X_b \sum_x VR_{bx}^{max} - \sum_t \sum_r \sum_x V_{brxt} = 0 \quad \forall b$
7. $\sum_b \sum_r \sum_x V_{brxt} \leq cr^{max} \quad \forall t$
8. $\sum_b w_{bt} \leq nb^{max} \quad \forall t$
9. $\sum_b \sum_r \sum_x V_{brxt} \geq cr^{min} \quad \forall t$
10. $\sum_b \sum_u \sum_f \sum_a T_{fabut} + \sum_b \sum_u \sum_f \sum_a T_{fabu't}^{ext} \leq ct^{max} \quad \forall t$
11. $\sum_b \sum_u \sum_f \sum_a T_{fabut} + \sum_b \sum_u \sum_f \sum_a T_{fabu't}^{ext} \geq ct^{min} \quad \forall t$
12. $\sum_m \sum_a \sum_f U_{famut} \leq cu_u^{max} \quad \forall u, t$
13. $\sum_m \sum_a \sum_f U_{famut} \geq cu_u^{min} \quad \forall u, t$
14. $\sum_u A_{fasut} \leq ca_{fast}^{max} \quad \forall f, a, s, t$
15. $\sum_p VI_{put} \leq cs_u^{finis} \quad \forall u, t$
16. $\sum_p VI_{put} \geq iv^{min} \quad \forall u, t$
17. $\sum_a \sum_f VI_{faut} \geq cs_u^{PFO} \quad \forall u, t$
18. $\sum_u T_{fabut} + \sum_u T_{fabu't}^{ext} + VI_{faut} - \sum_r \alpha_{rxf} V_{brxt} = 0 \quad \forall f, b, t, a = 1$
19. $VI_{f(a-1)b(t-1)} - VI_{faut} - \sum_u T_{fabut} - \sum_u T_{fabu't}^{ext} = 0 \quad \forall f, b, a > 1, t > 1$
20. $IPFO^0 B_{fab} - VI_{faut} - \sum_u T_{fabut} - \sum_u T_{fabu't}^{ext} = 0 \quad \forall f, b, a > 1, t = 1$

21. $\sum_b T_{fabut} + \sum_s A_{fasut} - VI_{faut} - \sum_m U_{famut} = 0 \quad \forall f, u, t, a = 1$
22. $IPFO^0 U_{fau} + \sum_b T_{fabut} + \sum_s A_{fasut} - VI_{faut} - \sum_m U_{famut} = 0 \quad \forall f, u, a > 1, t = 1$
23. $VI_{f(a-1)u(t-1)} + \sum_b T_{fabut} + \sum_s A_{fasut} - VI_{faut} - \sum_m U_{famut} = 0 \quad \forall f, u, a > 1, t > 1$

24. $VI_{pu(t-1)} + \sum_m \sum_a \gamma_{pfam} U_{famut} - S_{put} - VI_{put} = 0 \quad \forall p, u, t > 1$
25. $IFi^0 U_{pu} + \sum_m \sum_a \gamma_{pfam} U_{famut} - S_{put} - VI_{put} = 0 \quad \forall p, u, t = 1$

26. $Inv_{aut}^{cop} = icop_{au}^0 \quad \forall u, t = 1, a > 1$

27. $VInv_{aut}^{cop} - \sum_m \sum_f \beta_{am} U_{famut} + \sum_c SC_{acut} = 0 \quad \forall u, t, a = 1$
28. $VInv_{aut}^{cop} + \sum_c SC_{acut} - VInv_{(a-1)u(t-1)}^{cop} - \sum_m \beta_{am} U_{famut} = 0 \quad \forall u, a > 1, t > 1$
29. $\sum_f \sum_a T_{fabut} + \sum_f \sum T_{fabut}^{ent} - LX_{xit}^{ent} \leq 0 \quad \forall b, u, t, Xi \in TR_{(b,u)}$
30. $\sum_{t \in Per\acute{e}t\acute{e}} X_{xit}^{ent} - LX_{Xi} \leq 0 \quad \forall Xi \in TR^{grav}$
31. Toutes les variables sont positives.
32. $W_{bt}, X_b, X_{xit}^{ent}$ et XG_{Xi} sont binaires.

Les contraintes 1, 2 et 3 imposent le respect des demandes de produits forêt, de produits finis et de copeaux. Seules les demandes de produits finis sont des demandes strictes. Les contraintes 4 à 6 imposent le respect des volumes disponibles dans les blocs. Lorsqu'un bloc est sélectionné, la récolte du bloc doit se faire en totalité sur un maximum de deux périodes de l'horizon de planification. Les deux périodes ne doivent pas nécessairement être consécutives. La contrainte 7 définit la capacité de récolte par période. La contrainte 8 limite le nombre de blocs pouvant être récoltés au cours d'une période. Elle vise à limiter le nombre de déplacements entre blocs à l'intérieur d'une période. La contrainte 9 impose la récolte d'une quantité minimale de bois par période. Les contraintes 10 et 11 sont introduites pour respecter la capacité et la quantité minimale de transport par période. La capacité de consommation d'usine ainsi que la quantité minimale à consommer par période sont exprimées à travers les contraintes 12 et 13. La contrainte 14 impose une limite supérieure sur le volume de bois pouvant être acheté de fournisseurs (soit de source privée ou en d'autres mandataires d'opérations). Les contraintes 15, 16 et 17 assurent le respect des capacités de stockage de produits finis et de produits forêt aux usines et des inventaires minimaux dans les usines. Les contraintes de 18 à 28 assurent la conservation des flux de produits forêt aux blocs de récolte (18-20), et aux usines (21-23), et des produits finis (24-25) et copeaux aux usines (26-28). La contrainte 29 indique que lorsqu'un tronçon de chemin est utilisé pour le transport de bois pendant une période, il doit être entretenu durant la même période. La contrainte 30 exige le gravelage des tronçons de chemins qui nécessitent de la gravelle s'ils sont utilisés pour le transport de bois pendant la période d'été.

4.3 Validation du modèle

Le cas étudié est un cas hypothétique qui vise à représenter une entreprise forestière québécoise possédant trois usines de sciage. Cette entreprise approvisionne ses usines à partir de 40 blocs de récolte. Les données principales de ce cas d'étude sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2: Données utilisées pour la validation du modèle

Données	Valeurs
Nombre d'usines	3
Nombre de blocs	40
Nombre d'essences	13
Nombre total de produits forêt	13
Nombres de produits forêt consommés par les usines	7
Nombre de modes de récolte	1
Nombre de modes usine	5
Nombre de fournisseurs de bois	2
Nombre de papetières	2
Nombre de tronçons de chemins nécessitant le gravelage en été	10

La résolution de ce problème a pris 75 minutes. Le modèle comporte 1 500 000 variables dont 652 sont binaires. Il est soumis à 1 500 041 contraintes. À partir de ces données et pour pouvoir valider le modèle, plusieurs tests ont été effectués en jouant sur certaines données telles que les demandes en produits finis, les demandes en produits forêt, les coûts de gravelage, les blocs alloués à la récolte, les prix de vente des produits finis et les capacités des différentes activités.

La demande initiale annuelle en produits finis était d'environ 100000 Mpmp (mille pieds mesure de planche). Cette demande est répartie sur les 19 types de produits finis que produisent les usines de sciage. La solution optimale trouvée permet d'avoir un profit annuel d'environ 7 800 000 CAD. 29 blocs de récoltes, ayant environ 400 000 m³ de bois sur pieds disponible, ont été sélectionnés pour pouvoir satisfaire les demandes. Une partie des produits forêt générés et non consommés par les usines internes peut être vendue aux usines des clients selon la solution proposée par le modèle. Cependant, quand les demandes en produits forêt ont été diminuées, le profit annuel a diminué d'une façon remarquable, ceci est du des volumes générés au long de la chaîne de création de valeur qui n'ont pas été consommés par les usines de sciage et qui n'ont pas pu être vendus (donc, qui sont restés dans les stocks). En plus de leur coût de production (récolte et transport), ces volumes génèrent des coûts liés au stockage.

Ensuite, certaines données de la base de départ ont été modifiées. Par exemple, le cas avec des demandes nulles a été testé. Dans ce cas, les activités se mettent à leur minimum, uniquement pour satisfaire les contraintes de volumes minimaux à récolter, transporter et transformer aux usines de sciage. Le profit trouvé est négatif étant donné qu'aucun produit n'est vendu et par la suite aucun revenu n'est généré.

Un autre cas qui correspond à une demande très grande en produits finis a été testé. Le modèle n'a, alors, pas pu trouver de solutions réalisables et il a fallu réduire les demandes pour pouvoir résoudre le problème. Ceci s'explique par la non-disponibilité de ressources et de capacités de récolte, de transport et de production suffisantes pour satisfaire les demandes. De plus, les coûts associés au gravelage ont été éliminés. Dans ce cas, les blocs reliés aux usines par des tronçons de chemins nécessitant le gravelage ont été sélectionnés, contrairement, au cas où les coûts de gravelage étaient élevés.

Ainsi, plusieurs scénarios ont été testés dans le but de valider le modèle dans différents cas d'applications possibles. Le modèle performe bien et ses réponses correspondent aux objectifs pour lesquels il a été conçu. Le modèle propose un plan optimal pour les approvisionnements forestiers en respectant toutes les contraintes auxquelles il est soumis.

4.4 Mesure de l'impact de l'amélioration de la qualité des données d'inventaires forestiers sur la qualité des décisions

Le but de cette expérimentation est de mesurer l'impact de la GC sur la qualité des décisions prises par le modèle d'optimisation mathématique développé. Comme expliqué dans la section 3.4, l'impact d'une meilleure connaissance des inventaires forestiers sur les plans proposés par le modèle d'optimisation développé a été évalué. Pour ce faire, le plan ajusté mensuellement (PAM) en fonction des données mises à jour obtenues chaque début de mois (avec recours) a été comparé avec le plan développé avec les données d'inventaires forestiers précises obtenues au début de l'horizon de planification (PDP). Plusieurs points ont été comparés commençant par la comparaison des profits. Ensuite, les points suivants ont été analysés :

- Volumes d'inventaires de produits forêt en bord de route ;
- Volumes d'inventaires de produits finis ;
- Capacité supplémentaire de récolte ;
- Satisfaction des demandes de produits finis.

4.4.1 Profit

La figure 5 représente les profits moyens et les intervalles de confiance des deux plans obtenus en réalisant 30 simulations. Les profits du PAM et du PDP, pour les différents taux d'imprécision appliqués soient 30 %, 20 %, 10 % et 5 %, sont illustrés.

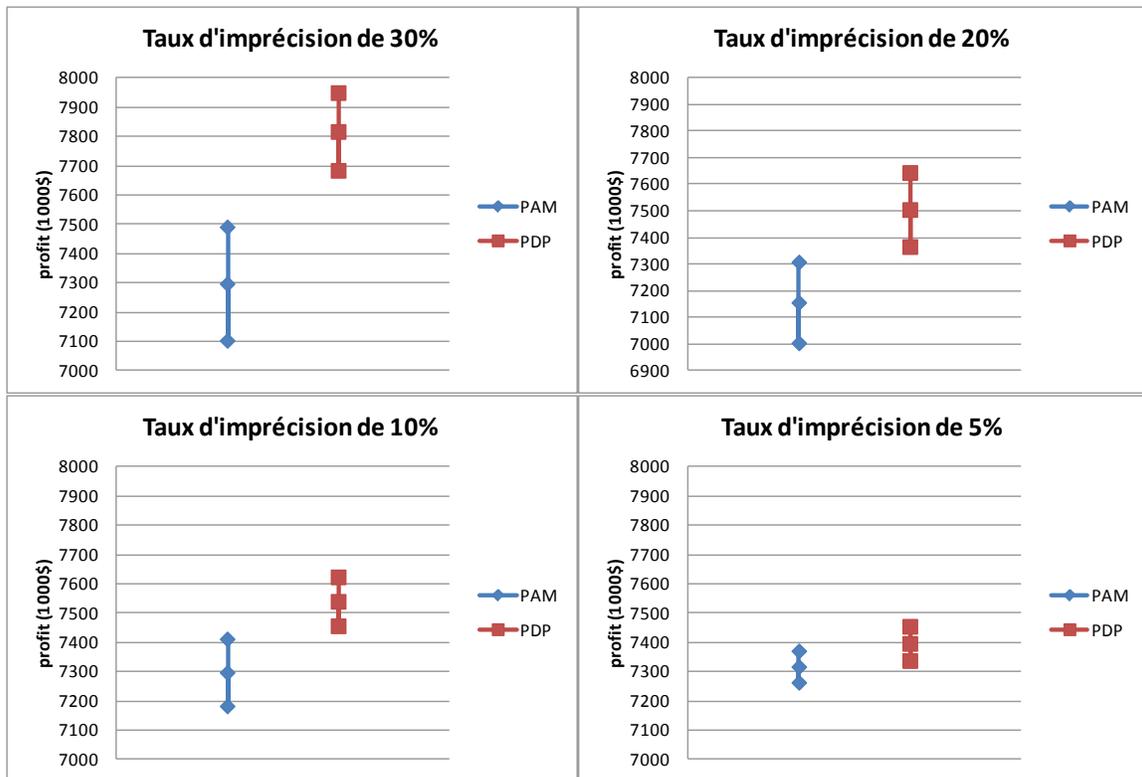


Figure 5: Profitabilité moyenne simulées des deux plans (PDP et PAM) pour les différents taux d'imprécision (avec intervalles de confiance à 95%)

Le profit du PDP est, significativement, supérieur à celui du PAM tel qu'illustré par le tableau 3.

Tableau 3 : Résultats des tests de Student de comparaison des profits des PDP par rapport aux ceux du PAM pour chaque scénario

Taux d'imprécision	Probabilité associée au test T	valeur de p critique pour la significativité	Différence significative?
30%	1,67E-05	0,05	oui
20%	7,87E-04	0,05	oui
10%	8,83E-04	0,05	oui
5%	3,24E-02	0,05	oui

L'écart de profitabilité entre le PDP et le PAM s'accroît avec le taux d'imprécision. Cette remarque est bien visible sur la figure 6 qui illustre l'écart de profitabilité du PDP par rapport au PAM exprimé en pourcentage. Une amélioration du profit supérieure à 7 % pour un taux d'imprécision de 30 % peut être observée. Cette amélioration diminue, donc, à environ 5 % et 3 % respectivement pour les taux d'imprécision de 20 % et 10 %. Pour un taux d'imprécision de 5 %, cet écart se réduit à 1%. De plus, les intervalles de confiance sont assez larges.

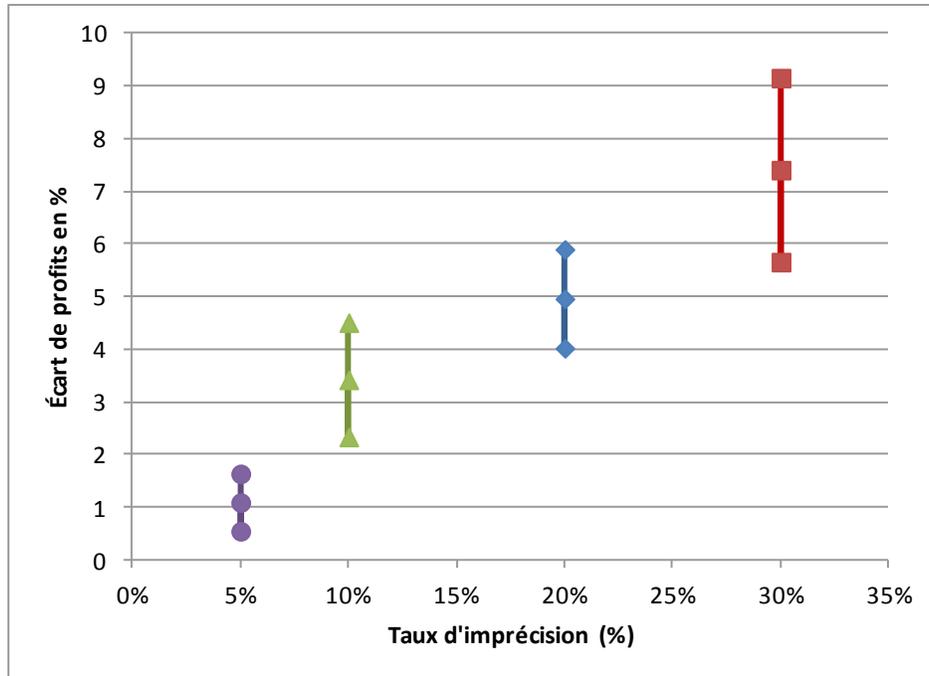


Figure 6: Écart moyen de profitabilité entre le PAM et le PDP exprimés en pourcentage pour les quatre taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%)

Ces intervalles auraient pu être réduits avec davantage de répétitions. Par exemple, pour un taux d'imprécision de 30 %, l'augmentation du profit du PDP par rapport au profit du PAM est entre 5,5 % et 9 %. Généralement, la largeur des intervalles de confiance diminue en fonction des taux d'imprécision. Le tableau 4 illustre les résultats des tests statistiques réalisés pour analyser les différences de d'écart du profit du PDP par rapport au PAM. Ce tableau confirme que, pour les simulations effectuées, l'amélioration du profit est différente d'un taux d'imprécision à un autre.

Tableau 4 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts de profits pour les différents scénarios (2 à 2)

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%-20%	9,91E-03	0,05	oui
30%-10%	2,16E-04	0,05	oui
30%-5%	4,16E-08	0,05	oui
20%-10%	2,11E-02	0,05	oui
20%-5%	5,24E-09	0,05	oui
10%-5%	4,10E-04	0,05	oui

Ces écarts de rentabilité peuvent être expliqués par une meilleure concordance entre le bois récolté et les demandes, ce qui se traduit par une diminution des inventaires de produits forêt et des produits finis et davantage de ventes (revenues).

4.4.2 Inventaires de produits forêt dans les blocs de récolte

Au cours de la récolte, des volumes de produits forêt non désirés par les usines de sciage internes à l'entreprise sont générés. Ces volumes peuvent être vendus aux usines des clients. Les volumes qui ne peuvent pas être vendus à cause de la limite de la demande ou à cause de la capacité de transport constituent les volumes d'inventaires dans les blocs de récolte. Dans le PAM, les volumes d'inventaires de produits forêt en bord de route sont supérieurs aux volumes des inventaires de produits forêt du PDP (figure 7).

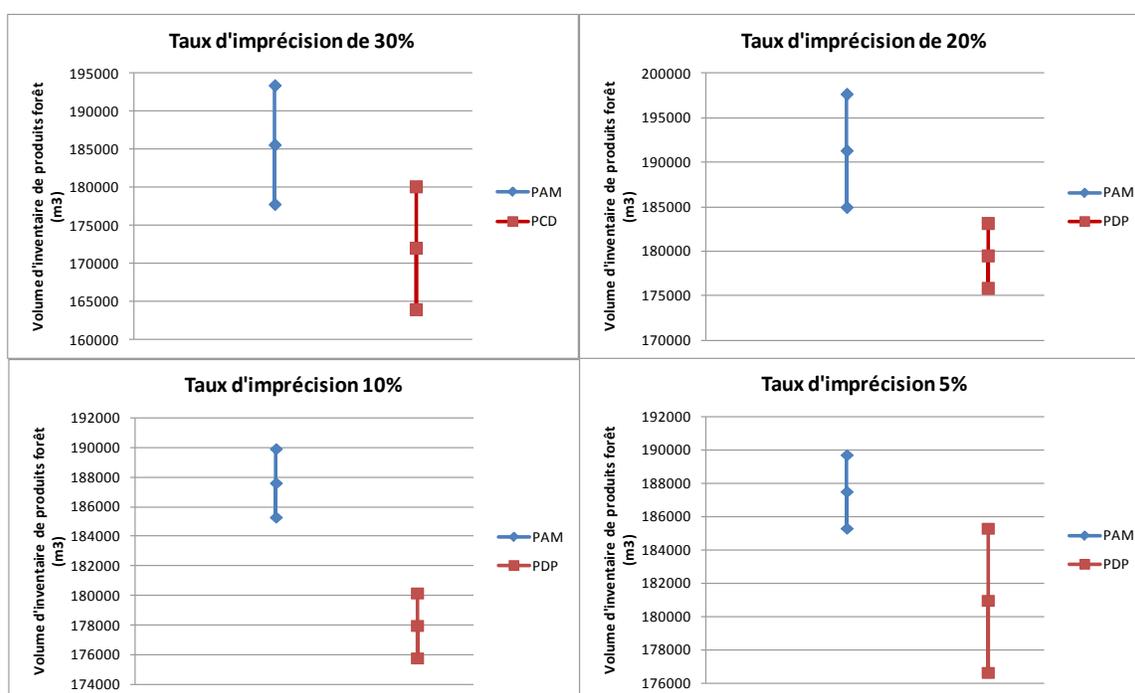


Figure 7: Volumes d'inventaire de produits forêt des deux plan PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%)

Des tests statistiques de Student ont été fait. Ces tests confirment la diminution des inventaires de produits forêts (du PDP par rapport PAM) observée sur la figure 7 (tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits forêt pour les différents scénarios

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%	1,84E-03	0,05	oui
20%	1,41E-03	0,05	oui
10%	1,49E-07	0,05	oui
5%	6,82E-03	0,05	oui

Ainsi, les inventaires de produits forêt du PDP sont, significativement, différents des inventaires de produits forêt du PAM. La figure 8 illustre les pourcentages d'écart entre les inventaires de produits forêts du PAM par rapport aux inventaires des PDP pour chaque taux d'imprécision.

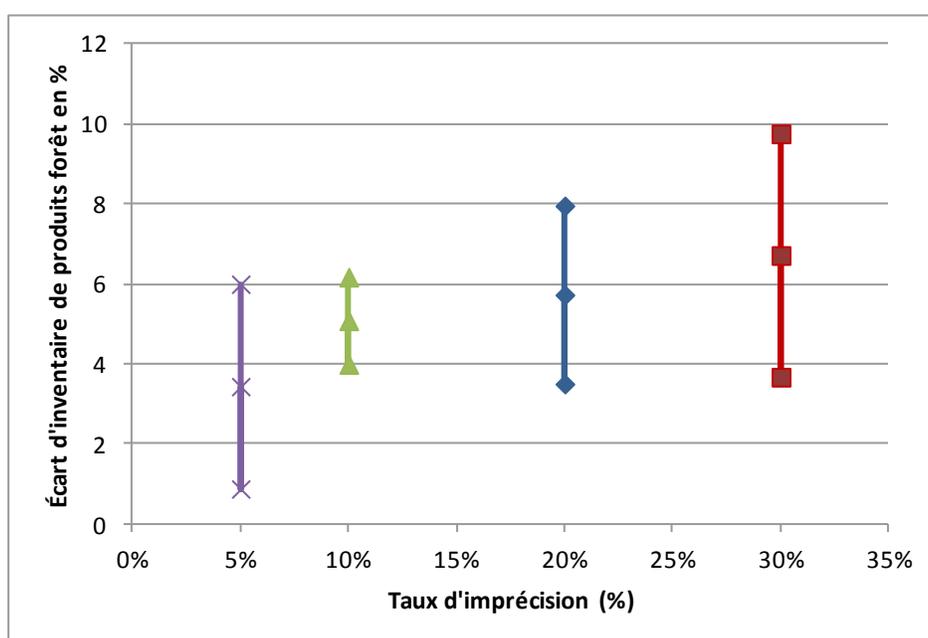


Figure 8: Écarts moyens des volumes d'inventaire de produits forêt à bordure de route entre les plans PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision avec (intervalles de confiance à 95%)

Les moyennes des écarts entre les inventaires du PDP par rapport aux inventaires du PAM ne sont pas statistiquement différentes d'un taux d'imprécision à un autre sauf pour les taux 30% et 10% et les taux 30% et 5% comme l'illustre le tableau 6.

Tableau 6 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits forêt des différents scénarios (2 à 2)

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%-20%	3,05E-01	0,05	non
30%-10%	4,95E-02	0,05	non
30%-5%	4,45E-02	0,05	oui
20%-10%	3,07E-01	0,05	non
20%-5%	2,43E-01	0,05	non
10%-5%	1,38E-01	0,05	non

Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de différence entre ces taux d'imprécision, mais qu'avec le nombre de simulations réalisées, nous n'avons pu trouver de différence statistique.

4.4.3 Volumes d'inventaire de produits finis

N'ayant pas imposé de volume minimal d'inventaire de produits finis à la fin de l'horizon de planification, le modèle d'optimisation tendra à les minimiser. En effet, la production de ces produits et leur stockage génèrent un coût. La figure 9 illustre l'écart entre les volumes d'inventaire de produits finis du PDP par rapport au PAM.

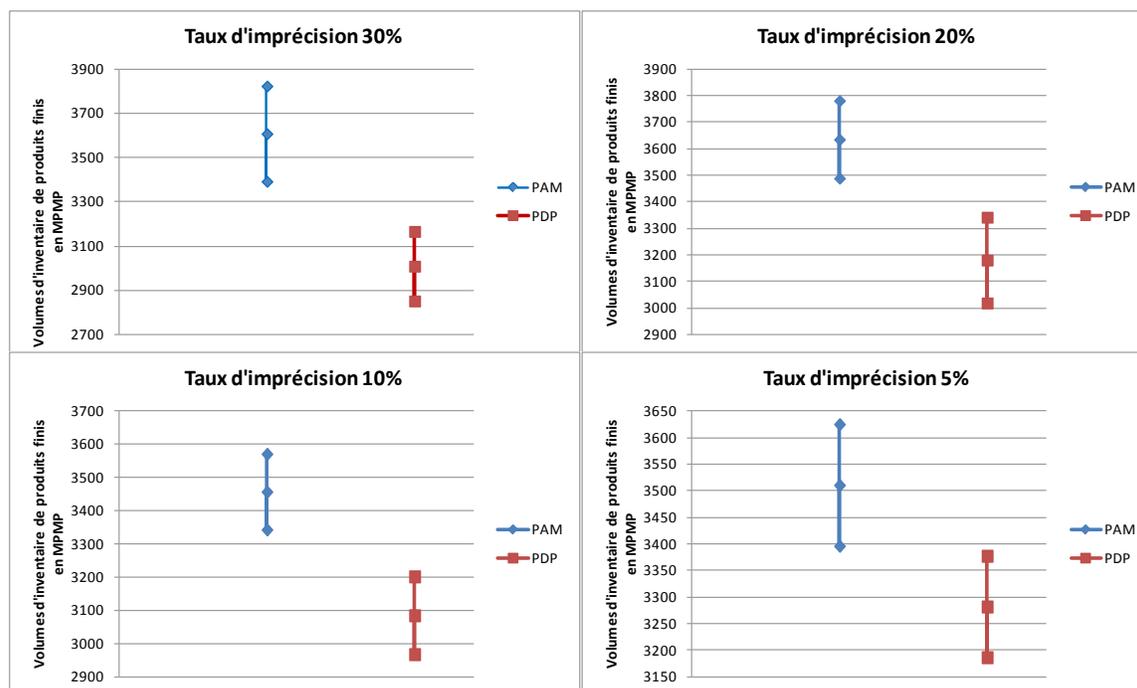


Figure 9: Volumes d'inventaire de produits finis des deux plan PAM et PDP pour les différents taux d'imprécision (avec les intervalles de confiance à 95%)

Les volumes d'inventaires de produits finis du PDP sont inférieurs aux volumes d'inventaires du PAM. La différence est statistiquement significative (tableau 7).

Tableau 7 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits finis pour les différents scénarios

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%	2,65E-05	0,05	oui
20%	6,84E-05	0,05	oui
10%	2,99E-05	0,05	oui
5%	2,95E-03	0,05	oui

Les écarts entre les inventaires des PDP et ceux du PAM sont représentés sur la figure 10 pour les quatre scénarios simulés. Ces écarts diminuent en fonction des taux d'imprécision.

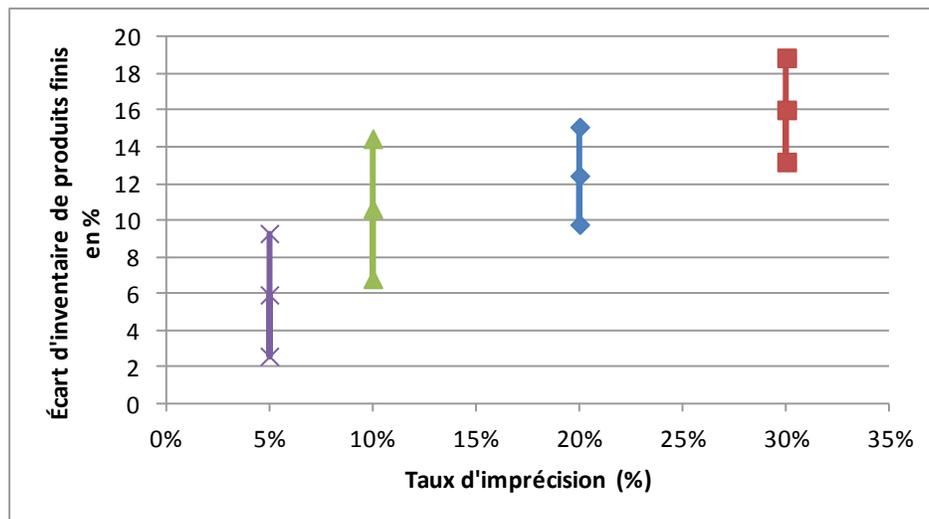


Figure 10: Écarts moyens entre les volumes d'inventaire de produits finis du PAM et ceux du PDP pour les différents taux d'imprécision avec (intervalles de confiance à 95%)

La figure 10 indique que pour un taux d'imprécision de 30 %, les inventaires de produits finis (du PDP par rapport à PAM) diminuent d'environ 16 %, alors que pour un taux d'imprécision de 5 %, ces inventaires baissent de moins de 6 %. Le tableau 8 montre que les différences entre les écarts sont significatives entre les scénarios sauf entre les scénarios 20% et 10%, ce qui peut être lié au nombre de simulations.

Tableau 8 : Résultats des tests de Student de comparaison des écarts d'inventaires de produits finis pour les différents scénarios (2 à 2)

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%-20%	3,37E-02	0,05	oui
30%-10%	1,59E-02	0,05	oui
30%-5%	2,35E-05	0,05	oui
20%-10%	2,32E-01	0,05	non
20%-5%	5,00E-02	0,05	oui
10%-5%	4,41E-02	0,05	oui

4.4.4 Capacité additionnelle de récolte

Le modèle mathématique développé est un modèle sous contraintes. Pour chaque activité, il y a des capacités limites à respecter. L'activité de récolte est soumise à une capacité maximale totale par période. Quand cette capacité est tenue en compte lors du développement du plan des approvisionnements (comme c'est le cas ici) et que ce plan est exécuté sans changements, cette capacité est respectée sans problème tout en satisfaisant les demandes (cas du PDP). Or, dans le cas du plan ajusté mensuellement (PAM), le plan exécuté avec recours permet de s'adapter aux volumes des blocs constatés en cour d'opérations. Le plan de recours est soumis à plus de contraintes puisque la récolte des blocs sélectionnés au début du mois dans le plan initial est forcée. De plus, la formulation mathématique permet la récolte partielle des blocs à une période donnée. Par contre, un bloc sélectionné doit être récoltés en totalité sur l'horizon de planification. Dans le PAM qui est ajusté chaque mois en fonction des données mises à jour, le modèle d'optimisation n'arrive pas toujours à trouver une solution réalisable. En fait, parfois, le modèle se trouve avec un problème où il a plusieurs blocs de récolte commencés au cours des périodes précédentes. Ces blocs doivent être récoltés en totalité avant la fin de l'horizon de planification. Les inventaires disponibles dans ces blocs peuvent, aussi, ne pas correspondre aux besoins des usines. Pour résoudre ce problème, une capacité supplémentaire a été ajoutée. Dans les entreprises forestières, cette capacité additionnelle peut correspondre à des quarts supplémentaires de travail. Cette capacité excédentaire requise est représentée en fonction de la période sur la figure 11.

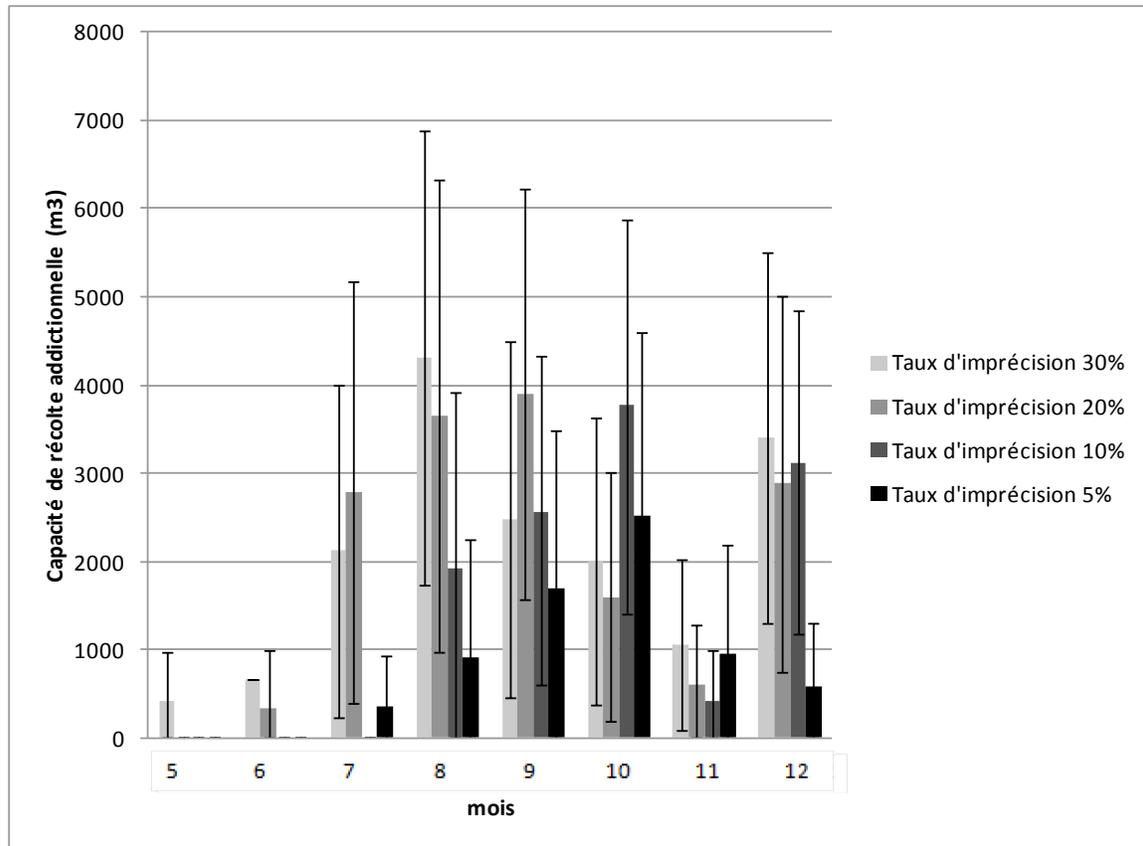


Figure 11: Capacité additionnelle mensuelle moyenne de récolte (m^3) pour les quatre taux d'imprécision (intervalles de confiance à 95%)

Les premières périodes n'apparaissent pas sur la figure 11 car il n'y a pas de besoin d'ajouter de capacité supplémentaire au cours de ces périodes. La variation de cette capacité sur les périodes de 5 à 12 ne peut pas être très bien expliquée. Les capacités supplémentaires ont un comportement presque similaire pour tous les taux d'imprécision. En effet, au cours des premières périodes (jusqu'à la période 7), il n'y a pas eu besoin de rajouter une capacité additionnelle. En effet, au cours des premières périodes, le nombre de changements réalisés avec le plan de recours par rapport au plan initial n'est pas très élevé de telle sorte qu'il est possible de trouver un plan réalisable sans l'ajout de capacité supplémentaire. Ceci est différent au cours des dernières périodes où plusieurs blocs partiellement récoltés doivent être complétés et où, avec l'ajustement des volumes d'inventaire de bois sur pied, le modèle est forcé à satisfaire la demande dans d'autres blocs. Les volumes récoltés, au cours de la 11ème période, servent uniquement à satisfaire les demandes de produits finis de la 12ème période. Ceci explique probablement la diminution de la capacité supplémentaire utilisée. Par contre, une capacité élevée est utilisée au cours de la 12ème période. Ceci peut être dû au fait que la 12ème période est la dernière période pour finir la récolte des

blocs commencés. Pour un taux d'imprécision de 30%, la capacité supplémentaire peut atteindre 7000 m³ au cours de la 7ème période, ce qui correspond à plus de 10% de la capacité mensuelle. Ceci est important à noter étant donné le coût généré par cette capacité.

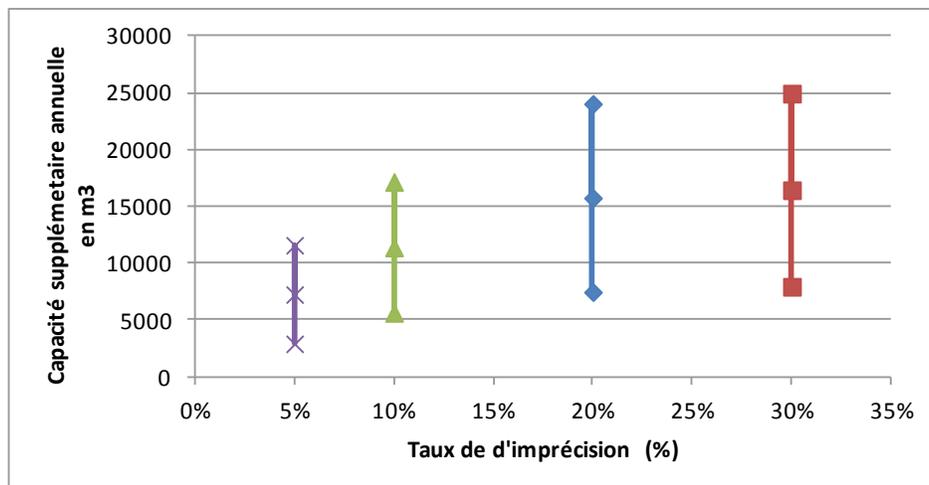


Figure 12: Capacité supplémentaire annuelle de récolte en m³ (intervalles de confiance à 95%)

La figure 12 illustre la capacité supplémentaire annuelle pour les quatre scénarios simulés. Graphiquement, les capacités supplémentaires annuelles moyennes ne varient pas beaucoup d'un scénario à un autre. Cette constatation se valide avec les tests statistiques représentés, dans le tableau 9. Les capacités supplémentaires ne sont pas différentes d'un scénario à un autre sauf pour les scénarios 30%-5% et 20%-5%. Comme pour les inventaires de produits forêt, ceci ne signifie pas forcément que les capacités supplémentaires ne sont pas différentes d'un scénario à un autre, mais, qu'avec les 30 simulations réalisés, les différences ne sont pas significatives.

Tableau 9 : Résultats des tests de Student de comparaison des capacités supplémentaires de récolte pour les différents scénarios (2 à 2)

Taux d'imprécision	Probabilité associé au test T	Valeur p critique pour la significativité	Différence signiicative?
30%-20%	4,60E-01	0,05	non
30%-10%	1,48E-01	0,05	non
30%-5%	3,10E-02	0,05	oui
20%-10%	1,72E-01	0,05	non
20%-5%	3,72E-02	0,05	oui
10%-5%	1,57E-01	0,05	non

4.4.5 Satisfaction des demandes de produits finis

La satisfaction des demandes de produits finis est un indice à surveiller pour évaluer la pertinence d'un plan. La satisfaction des demandes de produits finis est importante parce qu'elle permet de générer un revenu associé aux ventes, mais aussi, parce qu'elle permet de satisfaire les besoins clients et ainsi de maintenir de bonnes relations d'affaires.

Le PDP permet, dans tous les cas observés, de satisfaire les demandes de produits finis, alors que, dans le PAM, il n'est pas toujours possible de trouver un plan qui permet de satisfaire toutes les demandes. Le problème est relaxé avec une pénalité de 50 % des prix de vente attribués aux demandes non satisfaites.

La figure 13 représente les volumes des demandes de produits finis non-satisfaites en fonction des périodes. La non-satisfaction des demandes apparaît à partir de la période 10. En moyenne, un volume de 153 MPMP de demandes non satisfaites par année est enregistré. Ce qui représente un volume faible par rapport à la demande totale (0.15 %). Un tel volume a, probablement, peu d'inconvénients sur le profit de l'entreprise, mais il doit être évité pour maintenir les meilleures relations avec les clients.

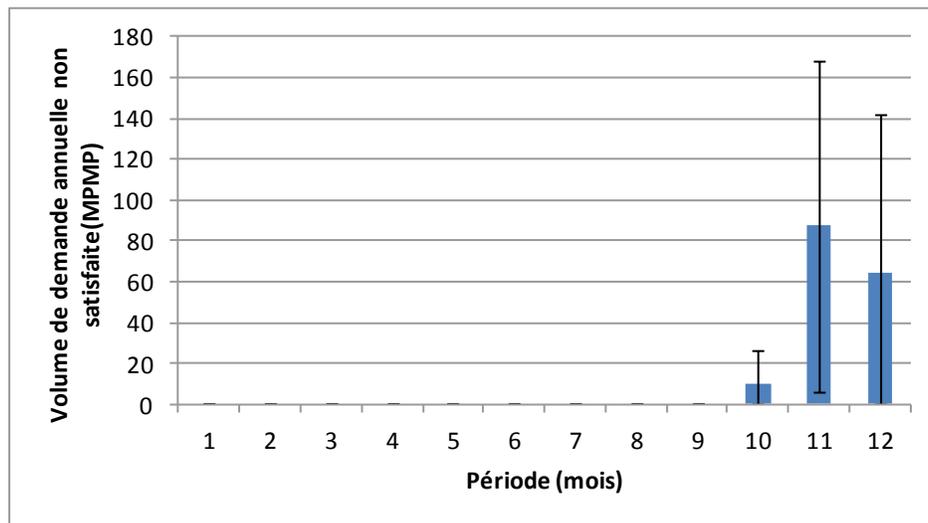


Figure 13: Volumes de demandes non satisfaites en MPMP (Intervalle de confiance à 95%)

Ce problème de demandes non satisfaites s'est manifesté uniquement dans le cas où le taux d'imprécision de 30 % était appliqué. Même si ces volumes ne sont pas élevés, il est mieux de les éviter, car le respect des demandes des clients est toujours prioritaire pour une entreprise forestière.

5 Conclusions

Ce projet a permis d'utiliser une approche de GC pour le développement d'un modèle d'optimisation mathématique (MOM) de planification des approvisionnements forestiers. Une identification des écarts entre deux MOM existants et le processus réel de planification observé chez un industriel forestier a été faite. Le MOM développé reflète le processus réel et est supposé mieux couvrir les besoins de l'entreprise partenaire. La plupart des données sont disponibles et sont utilisées par le département des approvisionnements, ce qui devrait faciliter l'intégration du modèle dans le processus manufacturier.

Une étude de cas a été réalisée dans le but de valider le modèle et de vérifier sa réponse dans différentes situations. Le MOM performe bien et sa réponse correspond aux besoins pour lesquels il a été conçu. En effet, le modèle permet de faire la planification des activités des approvisionnements forestiers. Ce MOM inclut la plupart des données prises en compte dans le processus réel.

Malgré sa performance et sa validation par un industriel forestier, certains écarts entre le MOM développé et le processus industriel peuvent toujours exister, particulièrement pour la partie concernant la planification de la production en usine. En effet, les cartographies de GC utilisées ne couvrent pas la totalité de la chaîne de création de valeur, en particulier, le processus de transformation de bois en usine.

Certaines données du processus industriel de planification ont été introduites dans le MOM même si l'information les concernant était incomplète. Ces données sont considérées comme indispensables même par le département des approvisionnements de l'entreprise partenaire. Les coefficients de rendement forêt et usines sont parmi ces données. En fait, actuellement, ces coefficients sont déterminés d'une façon assez intuitive basée sur l'expérience des intervenants. Toutefois, il serait possible de les déterminer en se basant sur l'historique des données.

En somme, quoique le MOM développé se rapproche, d'une façon notable, du processus réel, des efforts sont encore requis du côté de l'entreprise pour qu'il puisse être implémenté dans le processus de planification. Ces efforts consistent en mieux adapter certaines données, ainsi qu'en quantifier d'autres utilisées sous forme de connaissances tacites dans les entreprises.

De plus, le MOM a été développé en se basant sur les cartographies de Mosconi (2011). Ces cartographies conceptualisent la façon de faire de l'entreprise partenaire. Il est, donc, actuellement, valable uniquement pour le cas de cette entreprise. Des travaux futurs pourraient généraliser la validité des cartographies de Mosconi (2011) pour l'industrie forestière Québécoise ou même Canadienne. De tels travaux permettraient d'utiliser le modèle par d'autres entreprises forestières.

Le dernier objectif du projet visait à déterminer l'impact d'une meilleure connaissance des données d'inventaires forestiers sur la qualité des décisions prises. Pour ce faire, deux plans ont été comparés. Le premier plan est établi en fonction de données d'inventaires forestiers estimés et ajustés chaque mois en fonction des données constatées en cours d'opérations. Le deuxième est le plan développé avec des données précises obtenues dès le début de l'horizon de planification. Les coefficients d'imprécision appliqués sont 30 %, 20 %, 10 % et 5 %. Pour un coefficient d'imprécision de 30 %, une augmentation moyenne de 7 % du profit du plan développé avec les données précises a été notée. Cette augmentation diminue proportionnellement en fonction du taux d'imprécision sur les données d'inventaires forestiers. En effet, le plan ajusté chaque mois se rapproche du plan avec les données ayant un meilleur niveau de précision lorsque le taux d'imprécision des données d'inventaires forestiers est faible.

Les résultats obtenus permettent d'aider les entreprises forestières à déterminer les investissements qu'elles peuvent faire pour améliorer la qualité des données d'inventaires forestiers dépendamment du taux d'imprécision qu'elles souhaitent tolérer. En effet, connaissant la précision qu'elle souhaite obtenir, l'entreprise peut déterminer le gain en profit qu'elle peut espérer et ainsi jauger son niveau d'investissement.

Les techniques d'amélioration de la qualité des données d'inventaires forestiers n'ont pas été analysées. Mais, dans le but de mieux soutenir les entreprises forestières dans le choix de techniques appropriées à cette fin, une étude qui résume ces techniques, le taux de précision qu'elles permettent d'obtenir et leurs coûts peut être faite. Une telle étude compléterait les résultats obtenus dans le présent projet.

Références

Andersson, G., Flisberg, P., Liden, B. et Rönnqvist, M. (2007), RuttOpt – A Decision Support System for Routing of Logging Trucks. Scandinavian Working Papers in Economics. NHH Discussion Paper.

Arabi, M., Gaudreault, J. et al (2011). Intégration de la simulation et de l'optimisation pour la planification tactique forêt-usine. CIGI.

Balasubramanian, P., Nochur, K., Henderson, J.C., Kwan, M.M. (1999). Managing process knowledge for decision support. *Decision Support Systems* : 145-162.

Baskerville, R. et Dulipovici, A. (2006). The theoretical foundations of knowledge management. *Knowledge Management Research and practice* 4(2) : 83.

Beaudoin, D., Frayet, J.-M. et Lebel, L. (2007). Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research* 37(1): 128-140.

Bergdahl, A., Örtendahl, A. et Fjeld, D. (2003). The economic potential for optimal destination of roundwood in North Sweden—Effects of planning Horizon and delivery precision. *International Journal of Forest Engineering* 14(1) : 81-88.

Bray, D.B., Merino-Perez, L., Negreros-Castillo, P., Segura-Warnholtz, G., Torres-Rojo, J.M., Vester, H.F.M. (2003) Mexico's community-managed forests as a global model for sustainable landscapes. *Conservation Biology* 17 : (3)672–677.

Broman, H., Frisk, M. et Rönnqvist, M. (2006). Usage of OR-tools for logistics support in forest operations at sveaskog after the storm Gudrun. *Information Control Problems in Manufacturing* 12 (1) : 145-150.

Boyчук, D. et Martell, D.L. (1996). A multistage stochastic programming model for the analysis of risks in forest management and silvicultural investments. *Forest Science* 42: 10–26.

Burger, D.H., et Jamnick, M.S. (1995). Harvest and distribution decisions. *Forestry Chronicle* 71 : 89-96 .

Coudé, V. (2010). Amélioration de la planification opérationnelle par une connaissance plus précise des stocks forestiers (produits spécifiques) et de leur localisation en forêt. Thèse de maîtrise. Université Laval.

Cross, R., Parker, A., Prusak, L. et Borgatti, S. P. (2001). Knowing what we know : Supporting knowledge creation and sharing in social networks. *Organizational dynamics* 30(2): 100-120.

D'Amours, S., Frayret, J. M. et Rousseau, A. (2003). De la forêt au client-Pourquoi viser une gestion intégrée du réseau de création de valeur?. Consortium FOR@C, Québec: Université Laval.

Gong, P. et Löfgren, K. G. (2003). Timber supply under demand uncertainty: welfare gains from perfect competition with rational expectations. *Natural Resource Modeling* 16(1) : 69-97.

Gunnarsson, H., Rönnqvist, M. et Carlsson, D. (2007). Integrated production and distribution planning for Södra Cell AB. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 6(1) : 25-45.

Holsapple, C. (1995). Knowledge management in decision making and decision support. *Knowledge, Technology and Policy* 8(1) : 5-22.

Holsapple, C. W. (2008). Decisions and knowledge. *Handbook on Decision Support Systems* 1. Springer Berlin Heidelberg : 21-53.

Hof, J. G., Robinson, K. S. et Betters, D. R. (1988). Optimization with expected values of random yield coefficients in renewable resource linear programs. *Forest science* 34(3) : 634-646.

KANGAS, A., KANGAS, J. et KURTTILA, M. (2008). Decision support for forest management. *Managing forest ecosystems*. Springer Science Business Media, New York, NY (16) : 101-124.

Karlsson, J. (2002). Optimization models and methods for tactical and operative harvest planning. Thèse de doctorat. Université de Linköping.

Karlsson, J., Rönnqvist, M. et Bergström, J. (2003). Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews. *International Transactions in Operational Research* 10 (5) : 413-431

Kogut, B. et Zander, U. (1992). Knowledge of the firm, combinative capabilities and the replication of technology. *Organization science* 3(3) : 383-397.

Koh, S. C. L. et Tan, K. H. (2006). Operational intelligence discovery and knowledge-mapping approach in a supply network with uncertainty. *Journal of Manufacturing Technology Management* 17(6) : 687-699.

Könnyű, N. et Toth S.F. (2013). A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions. *European Journal of Operational Research*. 228(1) : 236-248.

Mosconi, E. (2011). L'apport d'une approche multidimensionnelle de gestion des connaissances à la performance décisionnelle des organisations. Thèse de doctorat. Université Laval.

Murray, A. T. et Church, R. L. (1995). Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. *Operations-Research-Spektrum*, 17(2-3) : 193-203.

Myers, A.J. (2002). Analysis of Robustness of Operational Plans. Thèse de Maîtrise. Université du New Brunswick.

Nilsson, M. (2013). Knowledge in the forest planning process. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences Forestières de Umeå.

Ressources Naturelles du Canada. Exportations de produits forestiers, [En ligne]. <http://scf.rncan.gc.ca/pages/278> (Page consultée le 15 Février 2012).

Palmgren, M., Rönnqvist, M. et Värbrand, P. (2004). A near- exact method for solving the log-truck scheduling problem. *International Transactions in Operational Research* 11(4) : 447-464.

Richards, W. et Gunn, A. (2000). A model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. *Forest Science* 46(2) : 188-203.

Rönnqvist, M. (2003). Optimization in forestry. *Mathematical Programming. B* (97): 267-284.

Rummukainen, H., Kinnari, T., Laakso, M. (2009). Optimization of wood transportation. Papermaking Research Symposium, Kuopio, Finland. Kuopio : Université de Kuopio.

Simard, M. et Lemieux, S. (2011). Les applications de Logilab et Silvilab. Intégrer l'aménagement forestier à un réseau industriel optimisé. Section spéciale.

Thompson, I.D., Maher, S.C., Rouillard, D.P., Fryxell, J.M. et Baker, J.A. (2007). Publications du Service canadien des forêts, sur le site Ressources Naturelles Canada. Consulté le 08 Juin 2013.

http://scf.rncan.gc.ca/publications?id=28734&lang=fr_CA

Van Horne, C., Frayret, J. M. et Poulin, D. (2005). Knowledge management in the forest products industry : the role of centres of expertise. *Computers and electronics in agriculture* 47(3), 167-184.

Walkers, H.D. et Preiss, S.W. (1988). Operational Planning Using Mixed Integer Programming. *The forestry chronicle* : 485-488.

Weintraub, A., & Abramovich, A. (1995). Analysis of uncertainty of future timber yields in forest management. *Forest Science* 41(2) : 217-234.

Zanjani, M., Ait-Kadi, D., & Nourelfath, M. (2010). Robust production planning in a manufacturing environment with random yield : A case in sawmill production planning. *European Journal of Operational Research* 201(3) : 882-891.

Annexes

Annexe I : Matrice de Comparaison

	Modèle Arabi	Modèle Mosconi	Modèle Beaudoin	Mon modèle
Revenues	<p>prix de ventes des produits finis (fabriqués en usine) = prix de vente unitaire selon type de produit fini *quantité de produit type de produit fini mode de configuration de l'usine usine période</p>	--	<p>profit net des produits finis = revenue -coût de transformation = prix net unitaire moyen de vente de produit type d'essence age de bois (à partir du quel le pfinis est fabriqué) usine valuation level période *quantité de produits finis type d'essence classe d'age usine valuation level période</p>	<p>revenue de ventes des produits finis = prix de vente unitaire des produits finis type de produit fini usine période *quantité de produits finis type de produit usine p usine u valuation level n période t</p>
	--	<p>prix de ventes des copeaux produits en forêts qui seront livrés aux usines de pâtes et papiers</p>	<p>revenue des copeaux produits en usine = volume de copeaux produits type d'essence age usine période papetière *prix de vente des copeaux type d'essence classe d'age période</p>	<p>revenue des copeaux produits en usine = volume de copeaux produits type de produits forêt age usine période papetière * prix de vente des copeaux produits forêt age période papetière</p>
	<p>prix de ventes indirectes réalisées au cours de la récolte (vente de bois avant la transformation) = prix de vente bloc de récolte mode de récolte période t * volume de bois produit forêt bloc de récolte mode de récolte période</p>	<p>revenue du bois fourni au client (vendu avant la transformation) = volumes bloc de récolte type d'essence usine du client période * prix de vente unitaire produit foret usine du client période</p>	<p>inclus dans le revenu</p>	<p>revenue du bois fourni au client (avant la transformation) = volumes bloc de récolte age type de produit forêt usine du client période * prix de vente unitaire produit foret age usine du client période</p>

	frais fixe de récolte	frais fixes de divisions ou taux de droit	taux de droit de coupe	inclus dans les coûts de récolte
dépenses	coût de récolte = coût unitaire de récolte : bloc de récolte mode de récolte volume récolté bloc de récolte mode de récolte période	coût de récolte selon mode + coût de chargement : entrepreneur	coût de récolte = coût unitaire de récolte : bloc de récolte période volume récolté type d'essence bloc de récolte période	coût de récolte = volume de bois récolté bloc de récolte type d'essence mode de récolte (ce qui implique le type de produit forêt) produit forêt période *taux unitaire de récolte bloc de récolte type d'essence mode de récolte période
	coût de transport = cout de transport bloc de récolte mode de récolte type de produit forêt usine quantité de produits forêt transportée cout de transport bloc de récolte mode de récolte type de produit forêt usine période	le coût horaire unitaire de transport + cout d'entretien des infrastructure + coût d'utilisation	cout de transport vers les usines de la compagnie = coût unitaire de transport du bois type d'essence bloc usine periode * volume de bois transporté type d'essence age bloc usine période	coût de transport vers les usines interne volume de bois bloc type de produit forêt usine age période * cout unitaire de transport bloc usine période + coût d'entretien bloc usine + coût d'utilisation bloc usine
			coût de transport vers les usines des clients type d'essence bloc usine période * volume de bois vendu type d'essence age bloc usine période	coût de transport vers les usines du client volume de bois bloc type de produit forêt usine du client période * (cout unitaire de transport bloc usine du client + coût d'entretien bloc usine du client + coût d'utilisation) bloc usine du client

	--	--	<p>coût de stockage de bois dans les usines de transformation de bois = volume de bois type d'essence age usine période * coût unitaire de stockage ressource usine période</p>	<p>coût de stockage de bois dans les usines= volume type de produits forêt age usine période * coût unitaire de stockage type de produit forêt usine</p>
	--	<p>coût de stockage de bois dans les blocs de récolte = volume de bois type de produit forêt age bloc période * coût unitaire de stockage type de produit forêt bloc</p>	<p>coût de stockage de bois dans les blocs de récolte = volume de bois type d'essence age bloc période * coût unitaire de stockage type d'essence bloc b période t</p>	<p>coût de stockage de bois dans les blocs de récolte = volume de bois type de produit forêt age bloc période * coût unitaire de stockage type de produit forêt bloc</p>
dépenses				<p>coût de transformation du bois = coût unitaire de transformation de bois type du produit-forêt age usine mode d'usine * quantité de produits forêt consommés type du produit-forêt age usine mode d'usine periode</p>
	coût d'opérations à l'usine u		Non car du prix de vente des produits on soustrait coût d'usinage	
	Non	<p>coût d'achat de bois privé = coût unitaire de bois privé type de produit forêt age fournisseur * volume de bois acheté type de produit forêt age fournisseur usine période</p>	Non	<p>coût d'achat de bois privé = coût unitaire de bois privé type de produit forêt age fournisseur * volume de bois acheté type de produit forêt age fournisseur usine période</p>

	Modèle Arabi	usine u	Modèle Beaudoin	Mon modèle
Contraintes	non	volume de bois transporté = volume de bois demandé usine du client produit forêt age usine cliente période	oui demandes de clients en bois avant la transformation type d'essence age usine cliente période	volumes de bois transporté <= demandes de bois usine du client produit forêt age période
	non		demandes de produits finis type d'essence age usine cliente période	quantité de produits finis vendus = demandes usine type de produit usine période
	non	demande en copeaux age usine période	demandes de copeaux type de ressource age a usine u période t	Volumes de copeaux livré <= demandes de copeaux age usine période
	Non	capacité de récolte période	Capacité total de récolte par période	volume de bois récolté <= Capacité de récolte période
	Volumes récolté <= volumes disponibles bloc type de produit forêt	Volumes récoltés = volumes disponibles type d'essence bloc	propotion récolté du bloc <= volume disponible bloc	Volumes récoltés = volumes disponibles type d'essence bloc
		besoins des usines type d'essence usine periode	volume maximal pouvant être livré à l'usine type d'essence usine bloc	résulte des équation d'équilibrage de flux et de la capacité de consommation de l'usine
	non	non	nombre maximal de périodes de récolte d'un bloc	--
	non	nombre maximal de blocs récoltés pendant une même période	nombre maximal de blocs récoltés pendant une même période	nombre maximal de blocs récoltés pendant la même période
	Non	capacité de transport période	quantité transportée vers les usines internes et les usines clientes inférieure à la capacité de transport période	Capacité de transport période
	capacité de l'usine volume maximale consommable par usine période	Partie non étudiée par Mosconi (2011)	capacité de l'usine volume maximale consommable par usine période	capacité de l'usine volume maximale consommable par usine période
nombre maximal d'unités de produits finis pouvant être générés usine période	assuré à l'aide des autres contraintes		assuré à l'aide des autres contraintes	
Non	capacité de stockage des produits forêt aux usine usine période		volume d'inventaire en usine <= capacité de stockage usine u période t	
Non	niveaux d'inventaire minimal de produits forêt usine période	Non	volume d'inventaire désiré dans l'usine bloc b produit forêt f période t	
non	niveaux d'inventaires désirés (pour les 12 prochains mois) dans l'usine	quantité minimale de bois stockée dans l'usine u type d'essence usine période	volume d'inventaire minimal dans l'usine usine u période t	
	Volume maximal de bois acheté produit forêt age fournisseur période		Volume maximal de bois acheté produits forêt age fournisseur période	

Annexe II : Code VBA permettant la mise à jour automatique de la base de données

Option Compare Database

Private Declare Function OpenProcess Lib "kernel32" _

(ByVal dwDesiredAccess As Long, ByVal bInheritHandle As Long, _

ByVal dwProcessId As Long) As Long

Private Declare Function GetExitCodeProcess Lib "kernel32" _

(ByVal hProcess As Long, lpExitCode As Long) As Long

Private Const PROCESS_QUERY_INFORMATION As Long = &H400

Private Const STILL_ACTIVE As Long = &H103

Sub simulation(i)

Dim IIDApp As Long

Dim IPtrProcess As Long

Dim IExitCode As Long

Dim IResult As Long

,

Dim fso As Object, strDest As String

,

'DoCmd.TransferSpreadsheet acExport, , "Zdecisionsw",
"C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\blocsw" & i, -1

,

' macro excel selectionner les blocs à finir et les nouveaux volumes

Set appExcel = CreateObject("Excel.Application")

appExcel.Visible = True

With appExcel

```

        .Workbooks.Open
("C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\traitement.xlsm")

        .Run "traitement_blocs"

End With

DoCmd.TransferSpreadsheet acImport, , "blocs_a_finir",
"C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\traitement.xlsm", -1, "blocs_finir!"

DoCmd.TransferSpreadsheet acImport, , "Volumes_dispo_blocs",
"C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\traitement.xlsm", -1,
"volumes_dispo!"

DoCmd.TransferSpreadsheet acImport, , "mois_courant",
"C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\traitement.xlsm", -1, "periode!"

With appExcel

    ' .Workbooks.Open
("C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise\Excel\traitement.xlsm")

    .Run "Macro_Supprim"

.Workbooks.Close

End With

'appExcel.Quit

' ' Exécution de l'application externe.

' IIDApp = Shell("C:\Program
Files\IBM\LOG\CPLEX_Studio123_new2\opl\bin\x86_win32\oplrun.exe -p
C:\Users\Shaima\Desktop\Plan_opt_maîtrise", vbNormalFocus)

' ' Récupère le Handle du processus de l'application externe.

' IPtrProcess = OpenProcess(PROCESS_QUERY_INFORMATION, 0&, IIDApp)

' 'Attend la fin de l'exécution du processus.

' Do

' IResult = GetExitCodeProcess(IPtrProcess, IExitCode)

```

```
' DoEvents

' Loop While IExitCode = STILL_ACTIVE

'strDest = "C:\Users\Shaima\Desktop\Analyse\Experimentation\base_donnees" & i &
".mdb"

'Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")

'fso.CopyFile CurrentProject.FullName, strDest

'Set fso = Nothing

End Sub

Sub simulation_test()

For j = 1 To 1

'j = 12

Call simulation(j)

Next j

End Sub
```