

CIGI 2011

Intégration de la simulation et de l'optimisation pour la planification tactique forêt-usine

MOHSEN ARABI^{1*}, JONATHAN GAUDREAU¹, MUSTAPHA NOURELFATH¹, SIMON HAMEL¹,
JEAN FAVREAU², SÉBASTIEN LACROIX², MAXIME MORNEAU-PEREIRA¹

¹ CONSORTIUM DE RECHERCHE FORAC, UNIVERSITÉ LAVAL
1065, AV. DE LA MÉDECINE, QUÉBEC (QC), G1V 0A6, CANADA

² FPINNOVATIONS
319 RUE FRANQUET, QUÉBEC (QC), G1P 4R4, CANADA

*Mohsen.Arabi@cirrelt.ca

Résumé – Ces travaux concernent la planification tactique dans l'industrie des produits forestiers. L'objectif consiste à prendre simultanément les décisions concernant la récolte (choix des blocs de coupe et modes de récolte), l'allocation des bois aux usines et la transformation des bois en usine. Nous proposons un système de planification intégré où un module d'optimisation (LogiOpt) est connecté à un simulateur des opérations de récolte (FPInterface) et à un simulateur des opérations de sciage en usine (Optitek).

Abstract - This paper addresses a tactical planning problem in a supply chain network of the forest product industry. We present a mathematical model that aims at integrating the data coming from simulation tools (FPInterface and Optitek) with an optimization module (LogiOpt). This mathematical model aims at identifying the best production, transformation and transportation strategy.

Mots clés – Chaîne logistique, planification tactique, industrie des produits forestiers.

Keywords – Supply chain, Tactical planning, Forest products industry.

1 INTRODUCTION

La planification de la récolte et de l'utilisation des bois est une activité empreinte de défis et de risques pour les gestionnaires. Elle implique la production d'un plan tactique permettant une gestion efficace des opérations dans une perspective globale. L'objectif consiste à utiliser le réseau logistique d'une manière optimale pour ainsi créer la plus grande valeur possible à partir de la ressource forestière [D'Amours et al., 2008]. Le plan élaboré doit spécifier : (1) les volumes de bois à récolter en forêt, (2) les méthodes de récolte à employer, (3) le transport réalisé, (3) les usines où transformer le bois et la méthode selon laquelle le bois sera transformé, ainsi que (4) les quantités de produits finis attendues. Cette tâche requière de nombreux calculs car une multitude d'options sont à la disposition du planificateur.

Le problème est particulièrement complexe parce que la définition des produits finis obtenus à la sortie d'une usine varie en fonction de nombreux facteurs [Rönnqvist, 2003]. Parmi ceux-ci, on retrouve : la zone forestière d'où provient la matière première, les techniques de récolte employées ainsi que le choix de l'usine utilisée pour transformer la matière.

En pratique industrielle, la planification tactique est habituellement réalisée manuellement, le gestionnaire basant ses décisions en grande partie sur son expérience. Les problèmes étant caractérisés par un très grand nombre de

scénarios possibles, le planificateur limite habituellement son analyse à un nombre restreint de scénarios.

Récemment, des outils logiciels de simulation ont été développés au Canada dans le but d'aider l'industrie forestière à prendre de meilleures décisions en permettant de prendre en compte une information plus détaillée [Cid Yanez, 2008]. Par exemple, les logiciels de simulation FPInterface et Optitek de FPInnovations permettent aux compagnies forestières d'évaluer différents scénarios de récolte de bois ainsi que divers processus de sciage en usine.

Ces simulateurs permettent d'anticiper les coûts et les niveaux de productivités, en plus d'anticiper quels produits finis pourront être obtenus en fonction de la provenance du bois, de ses caractéristiques physiques et des technologies utilisées en usine pour le transformer.

Ces données pourraient alors être utilisées pour réaliser une planification tactique. De cette façon, le plan obtenu tiendrait compte de la capacité du réseau, de la demande pour les produits et des variations au niveau des produits ressources.

De nombreuses recherches ont porté sur l'utilisation de l'optimisation pour planifier des opérations forestières (voir par exemple [Epstein et al., 1999; Martell et al., 1998; Karlsson et al., 2003]). L'utilisation de modèles mathématiques pour résoudre les problèmes d'approvisionnement en bois a débuté dans les années 1960 [Beaudoin et al., 2008].

Depuis, différents types de modèles ont été développés pour traiter différents aspects de l'approvisionnement en bois. Certains ont été conçus pour des activités spécifiques telles que le débusquage (débardage) [Carlsson et al., 1998] ou le transport [Wightman et Jordan, 1990; Weintraub et al., 1996]. Enfin, d'autres chercheurs ont intégré plusieurs activités dans un seul modèle pour capturer les synergies possibles entre eux. Par exemple, [Burger et Jamnick, 1995] ont intégré la récolte, le stockage et le transport, tandis que [Karlsson et al., 2004] ont inclus à leur approche l'allocation des équipes de la récolte en plus.

Par rapport aux travaux existants, les travaux du présent article revêtent deux caractéristiques particulières et originales.

Premièrement, le système proposé modélise le réseau industriel dans son ensemble afin de permettre une optimisation intégrée de la forêt et des opérations industrielles de transformation.

Deuxièmement, le système réalise le couplage entre un système de simulation des opérations de récolte (FPInterface), un simulateur des opérations de transformation en usine (Optitek) et un module d'optimisation qui permet d'établir le plan tactique. Sachant que le couplage simulation/optimisation a suscité beaucoup d'intérêt en recherche et par les industriels durant les dernières années, notre approche est importante aussi bien d'un point de vue académique que pratique : elle vise à intégrer des méthodes d'optimisation combinatoire avec des logiciels actuellement utilisés par nos partenaires industriels.

Cet article présente donc le modèle mathématique développé ainsi que l'architecture du système intégrant ces modules de simulation et d'optimisation. La section 2 décrit la problématique de manière détaillée. La section 3 présente brièvement l'approche de planification actuelle offerte à l'industrie de même que les simulateurs qui peuvent être utilisés. Notre solution intégrant la simulation et l'optimisation est ensuite présentée à la section 4. Les sections 5 et 6 présentent le modèle mathématique de même que les travaux de validation en cours de réalisation.

2 PROBLÉMATIQUE

2.1 Le réseau logistique

Le réseau logistique de production de bois d'œuvre est un système complexe constitué de blocs de récoltes, d'un système d'approvisionnement (récolte et transport) et de complexes de sciages de bois résineux (les usines). La figure 1 en présente un exemple simplifié (un vrai réseau peut contenir des centaines de blocs de récolte).

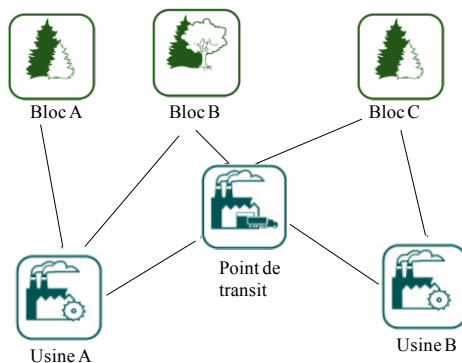


Figure 1. Exemple simplifié du réseau logistique étudié

Une bonne synchronisation des opérations dans le réseau permettra de générer une plus grande valeur. Pour opérer ce réseau, le décideur doit planifier les opérations pour chacune des activités principales du système, soit la récolte, le transport des bois et la transformation dans les usines de sciage.

2.2 Bloc de récolte

Un *bloc de récolte* est une superficie forestière contenant un certain volume de bois à récolter. Les bois disponibles à la récolte dans les blocs sont caractérisés par différentes distributions des essences, des diamètres des tiges, etc. C'est par échantillonnage que l'on caractérise les arbres de chacun des blocs.

Lors de la récolte d'un bloc, on en tire différents *produits-forêt*. Un *produit-forêt* est un volume de billes ou de tiges¹, d'une certaine essence ou groupe d'essences et qui est empilé séparément en bordure de route forestière selon des critères de longueur, diamètre ou qualité des bois. Lors de la récolte d'un bloc, on obtiendra un ou plusieurs produits-forêt. La récolte peut s'effectuer selon plusieurs *modes de récolte* possibles. Un mode récolte est défini par les techniques de coupe, de tronçonnage, d'ébranchage, etc. [Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 2009].

Pour un bloc donné, la proportion de chaque produit-forêt obtenu varie selon le mode de récolte employé, les caractéristiques dendrométriques et de qualité des essences forestières présentes dans le bloc. Le choix d'un mode aura également un impact sur les coûts de récolte et de transport et le rendement en fibre. La figure 2 montre un bloc qui a été récolté selon un certain mode de récolte. En simulant différents modes de récolte, il est possible d'anticiper la quantité de chacun des produits-forêt.

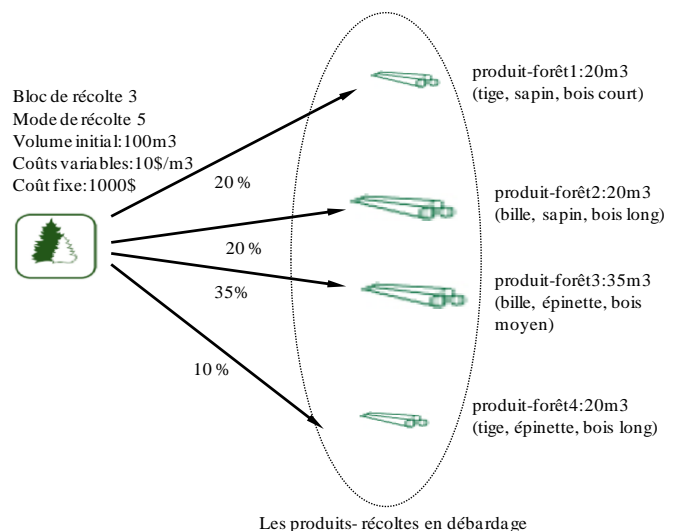


Figure 2. La récolte d'un bloc de récolte en utilisant un mode de récolte

¹ Les tiges sont des arbres complets qui ont été ébranchés. Les billots (ou billes) sont obtenus lorsque l'opération de tronçonnage est réalisée en forêt.

2.3 Transport

Lors de la récolte, les produits-forêt sont empilés en bordure du chemin forestier. Les produits-forêt issus de chaque bloc sont transportés vers les usines compatibles avec le produit et les bois d'un même bloc peuvent être transportés à plusieurs usines

2.4 Transformation en usine

L'usine de sciage consomme le produit-forêt pour générer des produits finis appelés *produits-usine*.

À partir d'un produit-forêt donné, plusieurs types de produits-usine différents sont fabriqués (flux divergents), et cela de manière simultanée (coproduction), sans que l'on ait un contrôle direct sur cette distribution. Il s'agit d'un processus automatisé dans lequel chaque bille est numérisée puis découpée de manière à générer la plus grande valeur possible.

Dans la plupart des scieries, chaque ligne de production peut être configurée selon différents *modes*. Pour chacun de ces modes, nous aurons une matrice de production différente. Cela donne un certain contrôle sur le panier de produits en sortie [Gaudreault et al., 2010].

La figure 3 présente une usine d'une seule ligne de production qui a été configurée selon un certain mode. On observe que pour un certain produit en entrée, différents produits finis sont fabriqués et vendus (à chaque produit-usine est associé un prix de vente espéré). Les quantités associées à chaque produit seront différentes selon le bloc de récolte de provenance, le mode de récolte utilisé et la configuration de l'usine.

Un complexe de sciage est généralement composé de trois unités distinctes. L'unité de sciage, l'unité de séchage et l'unité de rabotage, telles que montré à la figure 4. Chacune de ces unités possède sa propre capacité maximale théorique. La capacité totale de l'usine dépend généralement de l'unité ayant la plus faible capacité (le goulot d'étranglement). Elle peut être exprimée, selon le cas, en termes de capacité de transformation en volume (intrants), en capacité de production en volume (extrants), ou en disponibilité des ressources matérielles (unités de temps). Cette dernière option permet de tenir compte du fait qu'on n'obtient pas la même productivité en fonction des caractéristiques des billes avec lesquelles on choisit d'alimenter l'usine et des caractéristiques inhérentes à chaque ligne de production (par exemple : petit bois versus gros bois) [Gaudreault et al., 2009; Lemieux et al., 2009].

Par contre, cette dernière option suppose que l'on connaisse, pour chaque type de produit-forêt transformable par l'usine le temps de transformation nécessaire. Cette information peut être obtenue par simulation (voir section 3.2).

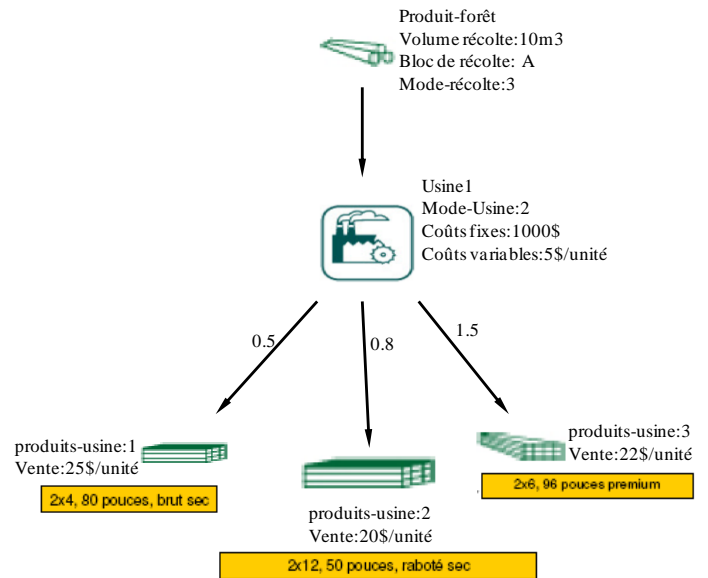


Figure 3. Exemple d'un panier de produits

2.5 Planification tactique

La planification tactique consiste à définir l'utilisation projetée de la matière, des ressources et du réseau sur un horizon allant d'un à deux ans. L'horizon de planification est généralement découpé en périodes d'un mois [Carlsson et al., 2008].

La planification spécifie quels blocs de récolte seront exploités, la façon dont ils seront récoltés (mode de récolte) et la quantité de chaque produit-forêt qui sera obtenue.

Ce plan spécifie également quels produits-forêt seront transportés vers quelles usines et comment les usines seront configurées (mode d'opération). On détermine ainsi un plan de production agrégé pour l'usine.

Compte-tenu des caractéristiques présentées à la section précédente (par exemple pour un produit-forêt, le panier de produits finis qui sera obtenu dépendra de la provenance des bois, du mode de récolte, de l'usine choisie et de sa configuration). Le problème étudié est de nature combinatoire, ce qui rend complexe la réalisation d'une telle planification. Cette dernière est cependant nécessaire dans le but de : (1) maximiser la valeur nette qui sera tirée du réseau par une allocation optimale des bois, et au besoin (2) effectuer un diagnostic dans le but de procéder à une réorganisation du réseau (par exemple, ajout de capacité à certaines usines).

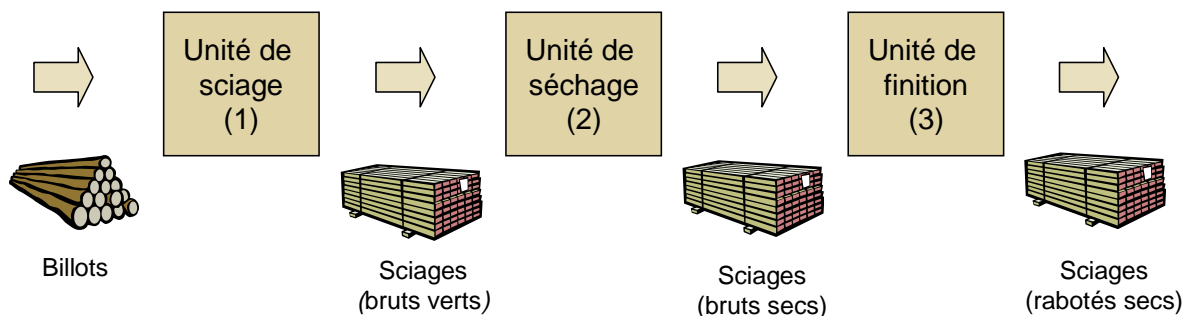


Figure 4. Complexe de sciage

3 SITUATION ACTUELLE

En industrie, la planification et l'élaboration du plan tactique sont généralement réalisées « à la main » selon une approche essai-erreur. Pour aider les décideurs dans leurs prises de décisions, FPInnovations a développé dans le cadre de projets antérieurs deux logiciels qui permettent de modéliser l'ensemble des activités liées à la consommation du bois: FPInterface et Optitek.

3.1 FPInterface

FPInterface (figure 5) est une plate-forme de simulation des activités d'approvisionnement forestier [FPInnovations, 2008].

Il permet de modéliser avec beaucoup de détails le système d'approvisionnement utilisé pour un ensemble de blocs de récolte figurant sur le plan de récolte tactique et d'importer les données d'inventaire forestier décrivant la forêt contenue dans chaque bloc. On spécifie également le mode de récolte et de transport dans chaque bloc et il est ensuite possible de prédire la productivité et le coût de l'approvisionnement en tenant compte des conditions forestières et des caractéristiques du réseau routier. On peut ainsi obtenir le coût et la quantité des différents produits-forêt provenant de chaque bloc.

3.2 Optitek

Optitek (figure 6) est un simulateur des opérations de sciage en usine. Il simule de façon très détaillée le fonctionnement d'une usine de sciage. Chaque équipement de la ligne de production et chaque ligne peuvent être modélisés grâce à différents modules. Lorsque connectée à FPInterface, toute la chaîne de production est suivie du bloc jusqu'aux produits-usine pour obtenir les valeurs nettes de produits. Optitek et FPInterface utilisent des représentations 3D des tiges et billes récoltées selon les différents produits-forêt générés sur le plan tactique. [Zhang et al., 2005; Goulet, 2006] On obtient en sortie les quantités de chacun des produits finis qui seraient fabriqués.

3.3 Limitations du système actuel

La combinaison des deux applications permet d'anticiper la valeur économique générée par un bloc de récolte advenant qu'il soit alloué à une usine. Cela aide donc le décideur à établir un plan qu'il considère acceptable dans son contexte. Il est néanmoins important de préciser que ce processus se fait par tâtonnement. L'utilisateur peut évaluer un seul plan à la fois. Si ce plan ne le satisfait pas, il doit alors changer la configuration du réseau logistique et faire une nouvelle simulation. Selon la complexité du réseau, changer la configuration peut être assez long. Essayer toutes les solutions possibles est bien évidemment impossible.

Le choix des plans à évaluer se fait sur la base de l'expérience et de l'intuition de l'utilisateur. Celui-ci peut donc négliger certaines solutions, parce qu'elles ne semblent pas bonnes intuitivement ou parce qu'il suppose que les contraintes d'opération actuelles doivent aussi s'appliquer au niveau tactique, alors qu'en réalité, elles auraient été un bon choix.

L'utilisateur n'a pas non plus d'indication quant à l'écart (en \$) qui le sépare la solution optimale.

Il est également lourd d'évaluer l'impact d'un changement (réel ou potentiel) qui pourrait survenir dans le réseau (par exemple : fermeture d'une usine, ajout d'un quart de travail, modification d'un équipement, etc.).

4 INTÉGRATION PROPOSÉE

Nous proposons d'ajouter au système de planification intégré FPInterface-Optitek (figure 7) un module d'optimisation (appelé LogiOpt). La communication entre les simulateurs et le module d'optimisation est réalisée par le biais d'une base de données partagée. LogiOpt évaluera toutes les combinaisons envisageables et permises et une solution optimale sera proposée. Le modèle tiendra compte de la capacité des usines et du fait que la provenance de la matière première influe sur les quantités produites.

L'interface utilisateur de FPInterface permet de définir les données à utiliser. Pour les différentes combinaisons de blocs et modes de récolte valides, la simulation génère le profil 3D des produits-forêt qui seraient obtenus. Optitek réalise la simulation des opérations de sciage pour les différentes scieries du réseau. Ces résultats alimentent ensuite le module d'optimisation, lequel établit un plan tactique optimal. Le plan pourra ensuite être retourné à FPInterface afin de permettre l'affichage du plan.

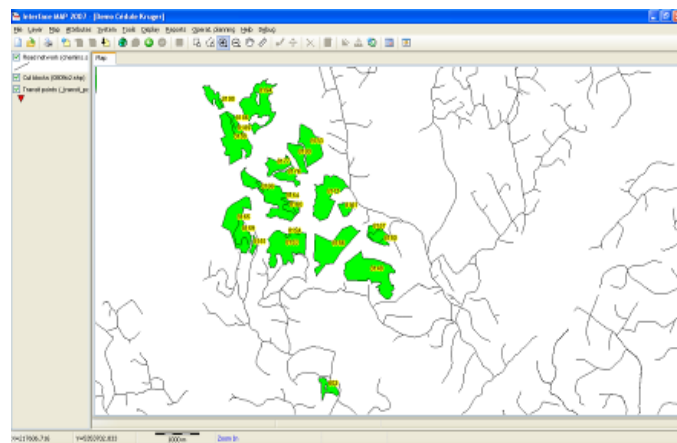


Figure 5. Le logiciel FPInterface

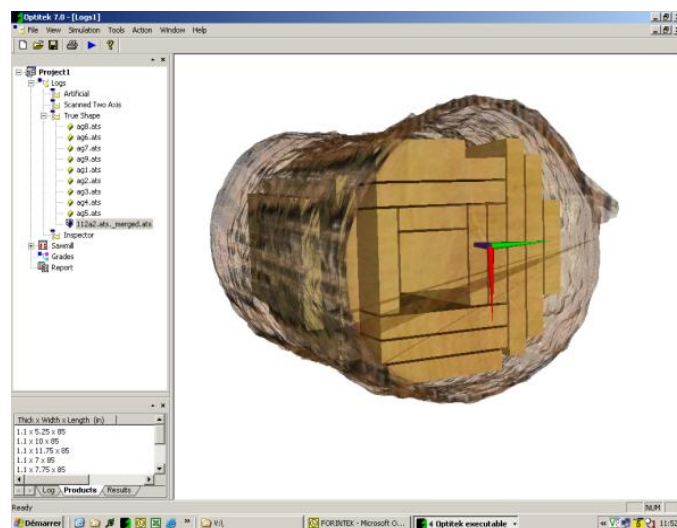


Figure 6. Le simulateur Optitek (FPInnovations)

5 MODÈLE MATHÉMATIQUE

Nous présentons un modèle mathématique général utilisé pour la planification des activités de réseau logistique incluant les décisions liées à la récolte, l'allocation des bois et les opérations de transformation.

Ensembles

B	ensemble des blocs de récoltes ($b \in B$)
R	ensemble des modes de récolte ($r \in R$)
F	ensemble des produits de la forêt ($f \in F$)
P	ensemble des produits des usines ($p \in P$)
U	ensemble des usines ($u \in U$)
M	ensemble des modes des usines $m : \{1, \dots, \text{NbM}\}$
T	nombre de périodes dans l'horizon de planification $t=1, \dots, T$

Paramètres

s_b	Volume (m^3) total de bois (<i>volume initial</i>) pouvant être extrait d'un bloc de récolte.
$k_{b,r,f}$	Volume (m^3) du produit-forêt f généré lorsqu'on récolte une unité de volume (m^3) d'un bloc de récolte b en utilisant le mode de récolte r .
$\xi_{r,b}$	Valeur des <i>ventes indirectes</i> (en \$) réalisées lors de la récolte d'un (m^3) d'un bloc de récolte b . Les ventes indirectes correspondent à des produits dérivés qui sont vendus à des tierces parties et qui n'ont pas à être transportés à une usine de sciage.

ψ_b	<i>Coûts fixes</i> associés à un bloc de récolte b pour l'horizon de planification.
$g_{b,r}$	Coût induit par la récolte d'une unité de volume (m^3) de bois dans un bloc de récolte b en utilisant le mode de récolte r (<i>coût variable</i>).
$\rho_{b,r,f,u}$	Coût pour transporter une unité de volume (m^3) de produit-forêt f entre un bloc de récolte b et une usine u . On doit le spécifier uniquement pour les couples $\langle b, u \rangle$ tels que le transport est possible.
$\mu_{b,r,f,p,m,u}$	Quantité de produits-usine p fabriquée par une usine u lorsqu'elle est en mode m et consomme le produit-forêt f récolté au bloc b selon le mode de récolte r .
$\alpha_{u,t}$	Volume maximal (m^3) consommable par l'usine (représente une <i>capacité de production</i>) à la période t .
$\beta_{u,t}$	Capacité maximal (PMP) consommable par l'usine u (représente une <i>capacité de production</i>) à la période t . Cette capacité donne le nombre maximal d'unités de volume PMP pouvant être généré par l'usine.
c_u	<i>Coûts fixes</i> de l'usine pour l'horizon de planification.
w_u	<i>Coûts variables</i> d'opération de l'usine u (par m^3).
ϕ_p	Prix de vente d'une unité de produit-usine.
$i_{b,r,f,0}$	Quantité du produit-forêt f récolté selon le mode r qui est en inventaire au bord du chemin du bloc b au début de l'horizon de planification.

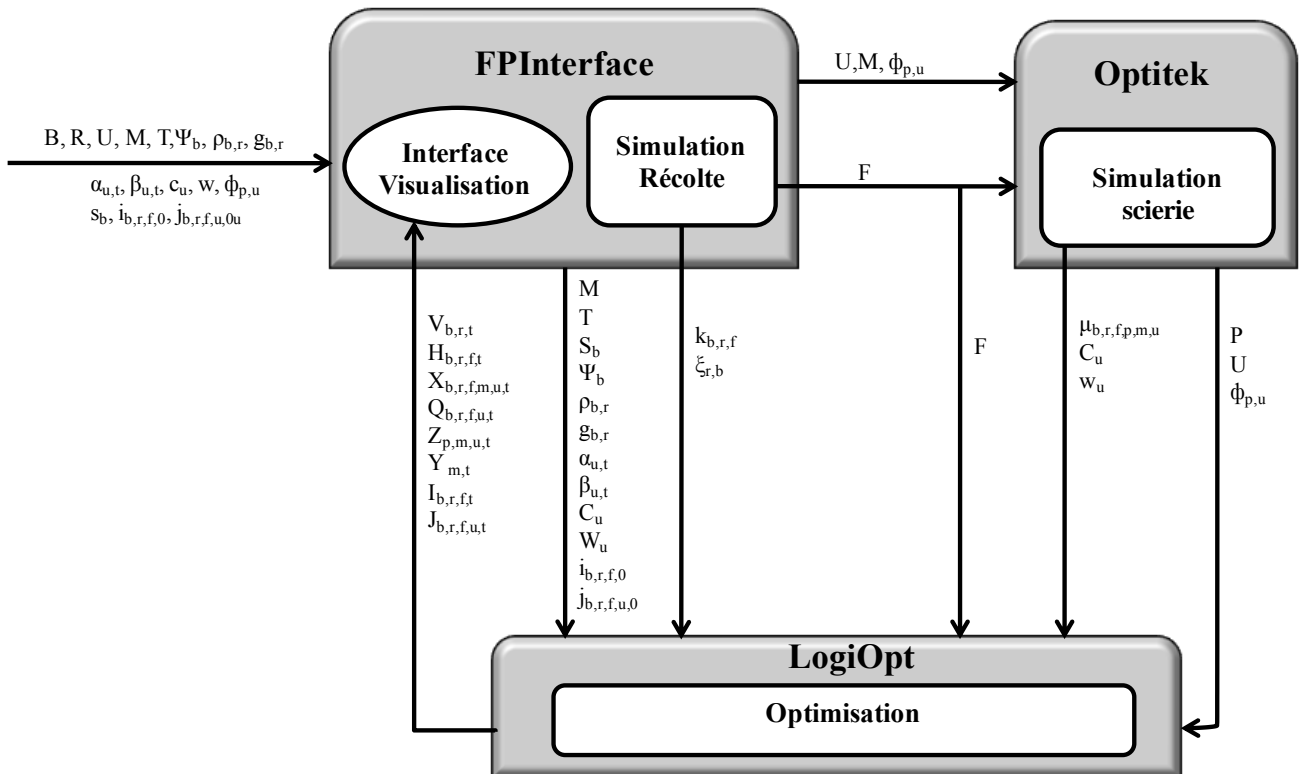


Figure 7. Intégration des simulateurs et du module d'optimisation

$j_{b,r,f,u,0}$ Quantité du produit-forêt f qui récolté selon le mode r qui est déjà en inventaire à l'usine u au début de l'horizon de planification.

Variables

$V_{b,r,t}$ Volume total (m³) de forêt récolté d'un bloc de récolte b selon le mode de récolte r pendant la période t .

$H_{b,r,f,t}$ Volume du produit-forêt f (m³) obtenu d'un bloc b récolté en mode r à la période t .

$X_{b,r,f,m,u,t}$ Volume de produit-forêt f consommé par l'usine u (configurée en mode m) à la période t . Le bois avait été récolté dans un bloc de récolte b selon d'un mode de récolte r .

$Q_{b,r,f,u,t}$ Volume de produit-forêt f récolté selon un mode r qui est transporté entre un bloc de récolte b et une usine u pendant la période t .

$Z_{p,m,u,t}$ Quantité de produits-usine p fabriquée par une usine u configurée selon un mode m lors de la période t .

$I_{b,r,f,t}$ Quantité du produit-forêt f récolté selon le mode r qui est en inventaire au bloc b à la fin de la période t .

$J_{b,r,f,u,t}$ Quantité du produit-forêt f (récolté selon le mode r) qui est en inventaire de l'usine u à la fin de la période t . selon de produit- forêt et le mode de récolte à la période t .

Fonction de l'objectif

La fonction-objectif proposée consiste à maximiser le profit en tenant compte des ventes, du coût de transport, du coût au bloc de récolte et des coûts à l'usine.

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \left[\sum_{b \in B} S_b \times \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} V_{b,r,t} \right] - \sum_{b \in B} \psi_b \\ & + \left[\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{u \in U} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} Z_{p,m,u,t} \times \Phi_p \right] \\ & - \left[\sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} V_{b,r,t} \times \left(g_{b,r} - \sum_{b \in B} \xi_b \right) \right] \\ & - \left[\sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} Q_{b,r,f,u,t} \times \rho_{b,r,f,u} \right] \\ & - \left[\sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} \sum_{u \in U} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} X_{b,r,f,m,u,t} \times w_u \right] - \sum_{u \in U} c_u \end{aligned}$$

Contraintes

Récolte maximale permise :

$$\sum_{b \in B} \sum_{t \in \{1, \dots, T\}} V_{b,t} \leq S_b \quad \forall b \in B \quad (1)$$

Volumes récoltés :

$$H_{b,r,f,t} = \beta_{b,r,f} \times V_{b,r,t} \quad \forall b \in B, \forall r \in R \quad (2)$$

$$\forall f \in F, \forall t = 1, \dots, T$$

Respect de la capacité de l'usine :

$$\sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} \sum_{m \in M} X_{b,r,f,m,u,t} \leq \alpha_{u,t} \quad \forall u \in U, \forall t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} Z_{p,m,u,t} \leq \beta_{u,t} \quad \forall u \in U, \forall t = 1, \dots, T \quad (4)$$

Transformation en usine :

$$Z_{p,m,u,t} = \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} (X_{b,r,f,m,u,t} \times \mu_{b,r,f,p,m,u}) \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\forall m = 1, \dots, M, \forall u \in U, \forall t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{m \in M} Y_{m,t} = 1 \quad \forall u \in U, \forall t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$X_{b,r,f,m,u,t} \leq Y_{m,t} \times \infty \quad \forall b \in B, \forall r \in R \quad (7)$$

$$\forall f \in F, \forall m = 1, \dots, M, \forall u \in U, \forall t = 1, \dots, T$$

Équilibre de flux (bloc de récolte) :

$$I_{b,r,f,t} = i_{b,r,f,0} + H_{b,r,f,t} - \sum_{u \in U} Q_{b,r,f,u,t} \quad (8)$$

$$\forall b \in B, \forall r \in R, \forall f \in F$$

$$I_{b,r,f,t} = I_{b,r,f,t-1} + H_{b,r,f,t} - \sum_{u \in U} Q_{b,r,f,u,t} \quad (9)$$

$$\forall b \in B, \forall r \in R, \forall f \in F, \forall t = 2, \dots, T$$

Équilibre de flux (usine) :

$$J_{b,r,f,u,t} = j_{b,r,f,u,0} + Q_{b,r,f,u,t} - \sum_{m \in M} X_{b,r,f,m,u,t} \quad (10)$$

$$\forall b \in B, \forall r \in R, \forall f \in F, \forall u \in U$$

$$J_{b,r,f,u,t} = J_{b,r,f,u,t-1} + Q_{b,r,f,u,t} - \sum_{m \in M} X_{b,r,f,m,u,t} \quad (11)$$

$$\forall b \in B, \forall r \in R, \forall f \in F, \forall u \in U, \forall t = 2, \dots, T$$

Les contraintes (1) et (2) établissent le volume récolté en forêt et obligent à respecter le volume de récolte maximal permis.

Les contraintes (3) et (4) indiquent que la capacité de production est limitée.

La contrainte (5) permet d'établir la relation entre le volume consommé à l'usine et le volume fabriqué.

Les contraintes (6) et (7) assurent qu'une usine peut être configurée selon un et un seul mode opérationnel.

Les contraintes (8) et (9) permettent de calculer l'inventaire de produits-forêt pour chaque bloc de récolte et les contraintes (10) et (11) l'inventaire en usine.

6 VALIDATION

Le modèle a été implémenté sous ILOG OPL STUDIO version 6.3 et est résolu sous CPLEX 12.1.

6.1 Validation du modèle d'optimisation avec cas simplifié

Afin de valider le modèle mathématique, nous avons d'abord développé un petit cas d'étude (voir figure 8). L'objectif était d'obtenir un cas assez simple qui permettrait de conclure à l'exactitude des résultats.

Ce réseau logistique est constitué de deux blocs de récolte (b_1 , b_2) et de deux usines (u_1 , u_2). Les volumes initiaux des blocs de récolte sont s_1 et s_2 respectivement. Les blocs ont un seul mode de récolte (respectivement m_1 et m_2). Il n'y a pas de produits-forêt f_2 dans le bloc de récolte b_2 et l'usine (u_2) ne produit pas de produits-usine (p_2) et n'accepte pas les produits-forêt (f_2).

6.2 Validation du système optimisation/simulation avec un cas industriel

Nous avons ensuite amorcé une phase de validation (toujours en cours) consistant à produire un plan tactique à partir des données fournies par une grande entreprise canadienne de l'industrie des produits forestiers.

Le cas comporte des centaines de blocs de récolte pouvant être récoltés sous la forme de tiges ou de billes; trois usines (deux usines sont à la même distance de plusieurs blocs de récolte). Des dizaines de produits-forêt et produits-usines sont impliqués. Jusqu'à maintenant, seulement un sous-cas (comportant une seule usine) a été validé, mais nous aurons bientôt accès au cas industriel complet.

7 CONCLUSION

Ces travaux ont pour objectif de permettre aux industriels et aux gestionnaires de définir des plans tactiques intégrés forêt-usine comportant une meilleure planification tactique.

Comme il a déjà été mentionné, ces travaux revêtent les caractéristiques originales suivantes :

Le système proposé modélise le réseau industriel dans son ensemble afin de permettre une optimisation intégrée de la forêt et des opérations industrielles.

La nature fortement combinatoire du problème est considérée. Par exemple, le panier de produits finis obtenu dépendra de la provenance des bois, du mode de récolte, de l'usine choisie et de sa configuration.

Plusieurs scénarios possibles peuvent ainsi être pris en considération dans le but de maximiser la valeur générée. Ceci est rendu possible par l'intégration d'outils de simulation de la récolte, de simulation de la transformation du bois ainsi que d'un modèle d'optimisation. Le couplage simulation et optimisation suscite beaucoup d'intérêt autant dans le milieu scientifique qu'industriel. Notre approche combinant FPIInterface, Optitek et LogiOpt démontre toute son importance.

Dans les travaux futurs, l'intégration au système de visualisation FPIInterface permettra une utilisation plus interactive du système. Le décideur aura la possibilité de voir la solution optimale directement sur la carte forestière, de modifier la solution proposée par le système et d'évaluer l'impact économique associé à ces modifications.

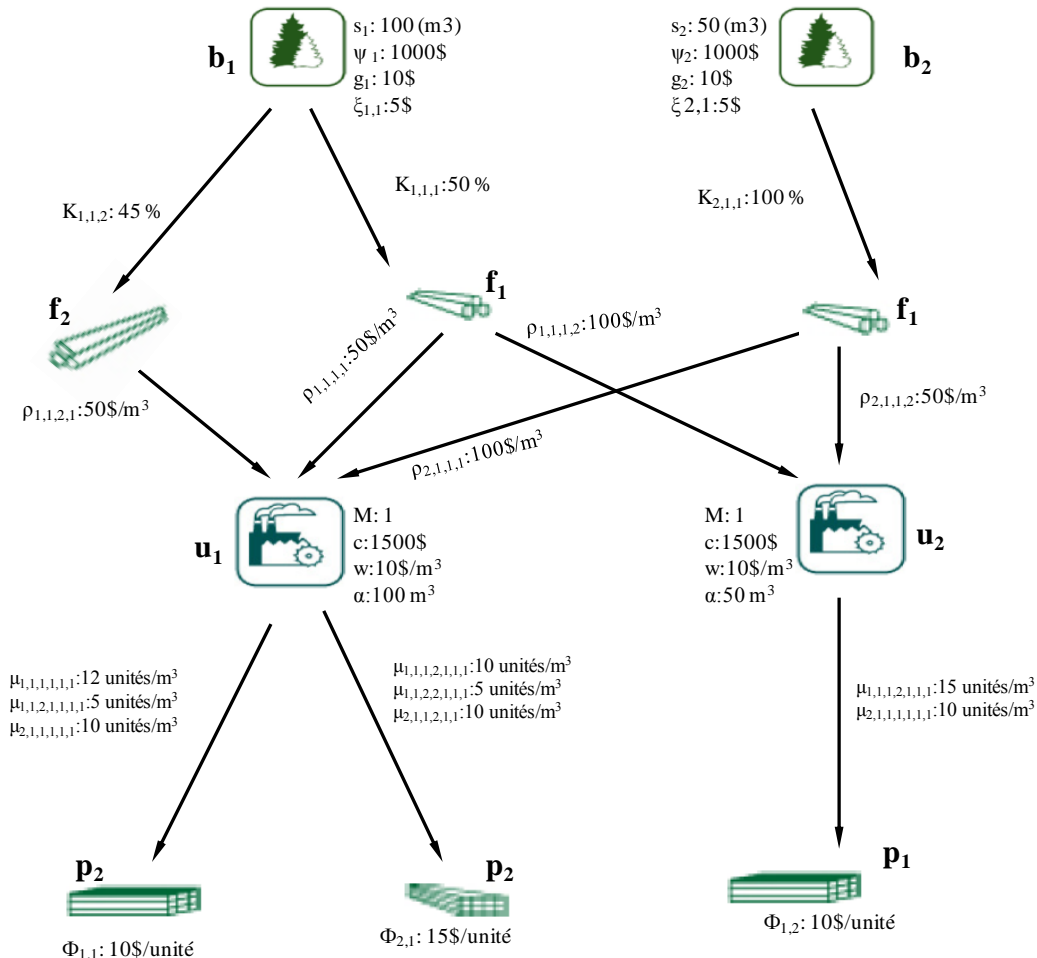


Figure 8. Exemple simplifié d'un réseau logistique

Le système aura aussi d'autres fonctionnalités. Par exemple, il sera possible d'évaluer plus aisément l'impact de l'ajout ou du retrait de capacité d'une usine du réseau logistique. On pourra par la suite recalculer rapidement comment le reste du réseau devra être ajusté pour tirer profit de ces modifications.

À plus court termes cependant, nous nous emploierons d'abord à évaluer le potentiel de l'outil proposé à l'aide de cas industriels de grande ampleur.

8 RÉFÉRENCES

- Beaudoin, D., LeBel, L., Jean-Marc Frayret, J.M., (2006) Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, **37**(1) 128-140.
- Burger, D. H., and Jamnick, M. S., 1995. Using linear programming to make wood procurement and distribution decisions. *The Forestry Chronicle*. 71(1), 89-96.
- Carlsson, D., D'Amours, S., Martel, A., Rönnqvist, M. (2008). Decisions and methodology for planning the wood fibre flow in the forest supply chain. Recent developments in supply chain management. Koster, R., Delfmann, W., (Eds.) Helsinki School of Economics: 11-39.
- Carlsson, D., Rönnqvist, M., Westerlund, M., (1998). Extraction of logs in forestry using operations research techniques, Report LiTH-MAT-R-98-17, Linköping University, Sweden.
- Cid Yanez, F., (2008) Simulation of Lumber Production Planning using Software Agents: a Case Study. Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology.
- D'Amours, S., Rönnqvist, M., Weintraub, A., (2008) Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry, *Information Systems and Operational Research*, **46** (4), 265-281.
- Epstein, R., Morales, R., Seron, J., Weintraub, A., (1999). Use of OR systems in the Chilean forest industries, *Interface*, **29**(1), 7-29.
- FPIinnovations, (2008). Guide de l'utilisateur de FPIInterface.
- Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.M., Rousseau, A., Lemieux, S., D'Amours, S., (2010). Distributed operations planning in the lumber supply chain: Models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice* **17**(3).
- Gaudreault, J., Frayret, J.M., Pesant, G. (2009). Distributed Search for Supply Chain Coordination. *Computers in Industry*, **60**(6), 441-451.
- Goulet, P., (2006) Optitek: User's Manual. Document E-4130. Forintek Canada Corp. Quebec City, QC.
- Karlsson, J., Rönnqvist, M., Bergström, J., (2003). Short-term harvest planning including scheduling of harvest crews. *International Transactions in Operational Research* **10**: 413-431.
- Karlsson, J., Rönnqvist, M., Bergström, J., (2004). An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research* **34**, 1747-1754
- Lemieux, S., D'Amours, S., Gaudreault, J., and Frayret, J.M., (2009), Agent-base simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decision-making in the lumber industry, CIRRELT, 51, working document, Canada.
- Martell, D.L., Gunn, E.A., Weintraub, A., (1998). Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*, **104**, 1-17.
- Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, (2009). Manuel de foresterie 2^e Éditions Multimonde., 1249-1290.
- Rönnqvist, M., (2003). Optimization in forestry. *Mathematical Programming*. **B**(97), 267-284.
- Weintraub, A., Epstein, R., Morales, R., Serón, J., and Traverso, P., (1996). A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forestry Industry. *Interfaces* **26**(4), 1-12.
- Wightman, R., and Jordan, G. 1990. Harvest distribution planning in New Brunswick. CPPA Woodlands Pap. August: 19-22.
- Zhang, S.Y., Tong, Q.J., (2005). Modeling lumber recovery in relation to selected tree characteristics in jack pine using sawing simulator Optitek. *Annals of Forest Science*. **62**(3), 219-228.