

Planification opérationnelle multi-périodes du séchage du bois d'œuvre avec composition dynamique des patrons de chargement

PHILIPPE MARIER¹, JONATHAN GAUDREAU^{1,2}, THOMAS NOGUER³

¹ Consortium de recherche FORAC
1065, av. de la Médecine
Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6
philippe.marier@forac.ulaval.ca

² Département d'informatique et de génie logiciel
1065, av. de la Médecine
Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6
jonathan.gaudreault@ift.ulaval.ca

³ École polytechnique de l'université de Tours
64, avenue Jean Portalis
37200 Tours, France
thomas.noguer@etu.univ-tours.fr

Résumé – Le problème de planification et d'ordonnement des opérations de séchage du bois d'œuvre est très difficile. Des méthodes visant à minimiser les retards ont déjà été développées. Ces dernières considèrent des patrons de chargement préétablis par les entreprises pour s'assurer que les empilements de paquets de bois soient stables et que les séchoirs soient remplis au maximum de leur capacité. Cet article présente les résultats que nous avons obtenus en modifiant certaines de ces méthodes afin qu'elles utilisent un modèle mathématique en nombres entiers permettant de générer dynamiquement des patrons de chargement respectant les contraintes d'empilement et de capacité des séchoirs. Le système résultant est un hybride MIP / Programmation par contrainte et permet d'obtenir les meilleures solutions observées jusqu'à maintenant pour ce problème industriel.

Abstract – The planning and scheduling problem for wood drying is very hard to solve. In the literature, we can find methods aiming at minimizing order lateness. These take into account already established kiln loading patterns that are known to offer good stability in the kiln while allowing for full kiln space utilization. This paper shows the results we obtained by adapting some of these methods such that they make use of a mixed integer programming model that dynamically generate kiln loading patterns. The resulting system is a MIP / Constraint programming hybrid and provided the best known solution for this industrial problem.

Mots clés - Optimisation, modèle mathématique, ordonnancement, bois d'œuvre, séchage.

Keywords - Optimization, mathematical programming, kiln scheduling, lumber, drying.

1 INTRODUCTION

Le problème de planification et d'ordonnement des opérations de séchage du bois est fort complexe. Le séchage est réalisé par lot (voir Figure 1). Seuls les produits compatibles peuvent être séchés en même temps et constituer un lot. Le lot doit être constitué de manière à former un empilement (prisme

rectangulaire) qui est géométriquement stable et qui remplit le séchoir au complet. La taille des lots est telle que chaque lot contribue à satisfaire simultanément plusieurs commandes de produits finis ayant des dates différentes. On cherche donc, simultanément, à choisir/constituer des lots/empilements répondant aux commandes et à en réaliser l'ordonnement.

La combinaison et le positionnement spécifique des paquets de bois dans le séchoir forment ce qu'on appelle un *patron de chargement*. Chaque séchoir pouvant être chargé de millions de façons différentes (la Figure 1 donne un exemple de lot / empilement), la plupart des compagnies nord-américaines ont fait le choix de définir à l'avance un certain nombre de patrons de chargement standards (généralement quelques dizaines) permettant de combler la capacité des séchoirs et réputés offrir une bonne stabilité de la charge. La tâche du planificateur réalisant la planification du séchage est donc de déterminer quand (et pour quel séchoir) chaque patron devrait être employé (chaque patron pouvant être employé à plusieurs reprises pendant l'horizon de planification). À titre d'exemple, la Figure 3 présente une planification sur un horizon de deux semaines pour trois séchoirs. L'objectif du planificateur est de satisfaire les commandes avec le moins de retard possible.

Dans la plupart des entreprises, cette planification est réalisée manuellement. Le problème est extrêmement difficile à résoudre. Un modèle mathématique en nombres entiers a déjà été présenté pour ce problème (Gaudreault *et al.*, 2011). Pour les problèmes de taille industrielle, le modèle mathématique fournissait rarement de bonnes solutions même pour de grands temps de calcul. Un modèle en programmation par contraintes (PPC) a également été présenté dans le même article. Celui-ci permettait d'obtenir de très bonnes solutions pour des temps de calcul très courts. En laissant rouler le modèle plus longtemps on peut en théorie obtenir la solution optimale, mais cela n'a jamais été possible pour des problèmes de taille industrielle.

Dans le cadre des présents travaux, nous avons été approchés par une entreprise qui cherchait à déterminer si permettre un plus grand nombre de patrons de chargements des séchoirs que ceux qui étaient normalement admis permettrait d'augmenter la performance de l'entreprise. L'idée générale était qu'avec un plus grand nombre de patrons, nous aurions plus de chance de pouvoir planifier l'usage des séchoirs en collant mieux à un carnet de commandes qui évolue au fil du temps.



Figure 1 : chargement d'un séchoir et exemple d'un lot/empilement

Plutôt que d'utiliser une liste de patrons de chargement préétablis, nous permettrons donc au modèle d'optimisation de générer dynamiquement des empilements de bois afin de charger le séchoir. Bien sûr, les contraintes de stabilité géométrique des empilements doivent être intégrées au modèle. Les travaux antérieurs avaient déjà montré l'incapacité à résoudre le problème original de manière optimale. En complexifiant le problème, nous nous éloignons encore davantage de l'idée d'optimalité théorique, mais les solutions générées pourraient dans l'absolu être plus intéressantes que celles qui sont générées par les systèmes proposés antérieurement.

Dans cet article, nous présentons dans un premier temps quelques concepts liés au séchage du bois qui permettent de bien comprendre la problématique à résoudre et nous regardons les travaux faits antérieurement pour solutionner ce genre de problème. Afin d'améliorer les solutions obtenues de certaines méthodes, un modèle mathématique en nombres entiers permettant de résoudre un sous-problème du problème principal est développé. Finalement, nous présentons les résultats des expériences faites en utilisant ce modèle mathématique.

2 CONCEPTS PRELIMINAIRES – SECHAGE DU BOIS

Le séchage est la seconde étape de transformation du bois d'œuvre (Figure 2). Elle est précédée par une opération de sciage qui transforme les billots de bois en planches de différentes longueurs et dimensions. La troisième étape est le rabotage qui donne le fini au bois ainsi que ses dimensions exactes finales. Lors de cette dernière étape, la pièce de bois est parfois tronçonnée pour enlever des défauts. Selon la qualité de la pièce résultante, un grade lui sera attribué.

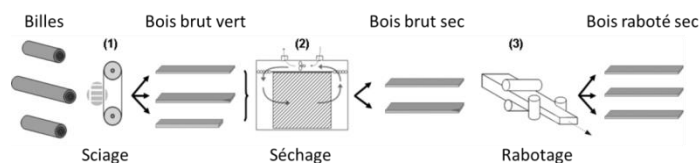


Figure 2 : Étapes de transformation du bois d'œuvre

Le séchage du bois est une opération qui permet de réduire le contenu en humidité du bois de manière à respecter les standards de l'industrie. Ce processus peut prendre plusieurs jours et se fait en lots de plusieurs paquets de bois que l'on met dans de grands séchoirs. Les paquets d'un même chargement pour un séchoir peuvent être de différentes longueurs, mais ils doivent en général être de même essence et de même dimension, requérant ainsi le même *processus de séchage*.

Il est important de distinguer le séchage du bois franc d'apparence (chêne, érable ...) de celui du bois d'œuvre résineux (bois de construction). Dans le cas du bois franc d'apparence, chaque paquet de bois contient des planches de longueurs et de dimensions variables. On sèche des dizaines de paquets en même temps dans de très grands séchoirs (hangar) qui ne sont pas nécessairement remplis au maximum de leur capacité. Dans le cas du bois d'œuvre résineux, chaque paquet est un prisme rectangulaire qui contient seulement des planches de mêmes dimensions. De très nombreux paquets doivent être assemblés pour former un lot (empilement remplissant complètement le séchoir et respectant des contraintes de stabilité architecturale).

Dans le cas du bois franc, les paquets peuvent être entrés et sortis du séchoir à tout moment alors que pour le bois résineux, le séchage est fait en entier pour un lot complet, c'est-à-dire que tous les paquets sont rentrés et sortis en même temps du séchoir.

Seuls des produits *compatibles* peuvent être séchés en même temps. Deux produits sont compatibles s'ils peuvent tous deux être soumis à un même *processus de séchage*. Chaque processus de séchage a une durée différente et des températures et teneur en humidité spécifiques y sont associées. Un même produit peut être compatible avec un seul ou plusieurs processus de séchage différents.

Sur un même site industriel, plusieurs séchoirs peuvent être utilisés en parallèle, chacun ayant ses propres dimensions, capacités et technologies de séchage. Pour chaque séchoir, on peut avoir des processus de séchage différents.

Comme la planification peut être effectuée à tout moment et que les temps de séchage sont relativement longs (de 24 à 96 heures environ), il est possible que lors de la planification, certains séchoirs soient déjà en cours de séchage et non disponibles avant une certaine période.

2.1 Patron de chargement et configuration des séchoirs de bois d'œuvre

Les paquets à sécher sont en général préparés sur des chariots, à l'extérieur des séchoirs. Ces derniers sont poussés sur des rails dans le séchoir au moment où ils sont prêts et que le séchoir devient disponible. Le nombre de rails par séchoir peut varier. Également, sur un même rail, les paquets peuvent être empilés sur différentes rangées. Le nombre de paquets pouvant être empilé dépend de la hauteur du séchoir et de la hauteur des paquets.

La planification à court terme des opérations de séchage du bois résineux consiste à trouver un plan indiquant, pour les trois ou quatre prochaines semaines, la manière dont chaque séchoir sera utilisé pour le séchage. Ainsi, pour chaque séchoir, la planification indique quels processus de séchage à appliquer à quel moment (début et fin), et quels produits compatibles mettre dans le séchoir à ce moment.

La Figure 3 donne un exemple de solution pour la planification de trois séchoirs sur un horizon de deux semaines (28 périodes de 12 heures). Chaque bloc de couleur spécifie le *processus de séchage* à utiliser. On doit également spécifier pour chaque opération comment le séchoir doit être chargé (sur la figure, on présente à titre d'exemple le chargement détaillé pour une seule des opérations). En réalité, pour chaque chargement il faut indiquer le nombre de paquets de chaque essence/dimension/longueur.

Les patrons de chargements possibles sont déterminés de manière à maximiser l'utilisation de l'espace dans le séchoir avec des produits nécessitant les mêmes paramètres de séchage. Des contraintes imposent également que tous les paquets d'une même rangée aient la même hauteur et que dans chaque rangée d'un même rail, il y ait le même nombre de paquets de chaque longueur. Ceci assure une stabilité au chargement. Les séchoirs ont également une profondeur et la longueur des paquets mis bout à bout dans une rangée ne doit pas dépasser cette profondeur. Par ailleurs, afin de maximiser l'utilisation de l'espace, la somme des longueurs des paquets d'une rangée doit être supérieure à un minimum spécifié par séchoir.

Lorsque le nombre de produits différents pouvant être séché est très grand, l'énumération des différentes combinaisons possibles de produits pour former des patrons de chargement est impensable. C'est pour cette raison que les entreprises travaillent généralement avec un petit nombre de patrons de chargement (quelques dizaines) qui sont définis à l'avance.

Il serait cependant possible de construire dynamiquement les patrons de chargement des séchoirs au moment de la planification. C'est ce que nous proposons à la section 3.

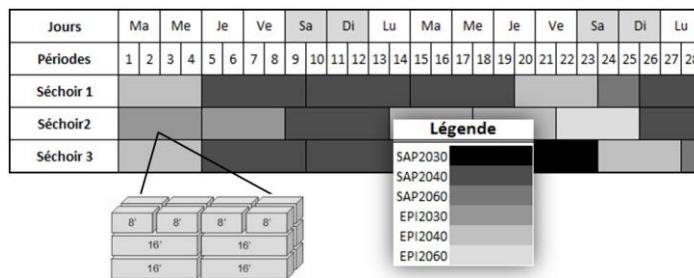


Figure 3 : Plan de production pour trois séchoirs. Chaque opération identifie le processus de séchage choisi (couleur) de même qu'un patron de chargement indiquant quels produits spécifiques compatibles seront séchés.

2.2 Travaux antérieurs

Pour la planification détaillée des opérations de séchage du résineux, Gaudreault *et al.* (2010) décrivent formellement le problème et présentent une heuristique permettant de résoudre le problème lorsque des patrons de chargements préétablis sont fournis. Une heuristique pour la planification multi-périodes de l'ensemble des séchoirs est proposée:

1. Choisir le prochain séchoir libre. Soit t , la période à laquelle ce séchoir est libre.
2. Choisir le meilleur processus/patron de chargement en fonction des besoins des clients non encore satisfaits à t , des priorités et des inventaires de bois brut vert qui seront disponibles au temps t .
3. Ajuster les besoins et les inventaires du bois brut vert en fonction du séchoir qui vient d'être planifié.
4. Indiquer que le séchoir qui vient d'être planifié sera libre à $t + \text{temps de séchage}$.
5. Aller à 1

Dans Gaudreault *et al.*, (2011) le même problème est modélisé sous la forme d'un modèle linéaire avec nombres entiers (MIP) de même qu'en programmation par contraintes (PPC).

Le modèle MIP ne permet pas d'obtenir des solutions de qualité potables même avec plusieurs heures de temps de calcul.

Le modèle PPC permet quant à lui d'obtenir de très bonnes solutions en des temps très courts. Qui plus est, en laissant rouler l'algorithme plus longtemps on peut en théorie obtenir la solution optimale (l'algorithme est dit *complet*) bien que pour les instances de taille industrielle les solutions optimales n'ont jamais pu être obtenues.

Fait intéressant, la stratégie de recherche de solution employée par le modèle PPC peut être vue comme une généralisation de l'heuristique présentée précédemment. À l'étape 2, plutôt que de choisir le meilleur processus/patron de chargement (i.e. celui réduisant davantage la valeur de la fonction-objectif) on trie tous les processus/patrons en ordre décroissant de préférence. Si l'algorithme roule jusqu'à la fin ils seront tous essayés l'un après l'autre. On peut représenter implicitement l'espace de tous ces choix imbriqués sous la forme d'un arbre de décision. La première feuille de l'arbre (à gauche) correspond à la solution

qui serait obtenue avec l'heuristique. Si le temps de calcul le permet on peut faire un retour-arrière pour explorer des branches alternatives dans l'espoir de trouver de meilleures solutions. Bien sûr, les contraintes du modèle PPC viennent élarger l'arbre de manière dynamique. La stratégie employée pour décider dans quel ordre les nœuds doivent être visités lors du retour-arrière a un impact important sur la performance de l'algorithme.

Dans leur article de 2011, Gaudreault *et al.* ont montré que la stratégie de recherche dans l'arbre appelée *Limited Discrepancy Search*, ou LDS (Harvey et Ginsberg, 1995), était beaucoup plus performante que les stratégies de base.

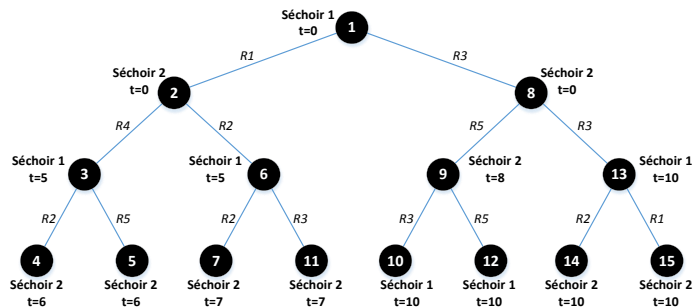


Figure 4 : Arbre de recherche représentant l'espace des solutions pour le problème de planification des séchoirs. Chaque nœud correspond à un point de choix où il faut choisir un processus de séchage / patron de chargement.

D'autres auteurs proposent des solutions partielles au problème. Gascon *et al.* (1998) ont travaillé au développement d'un système intégré pour la gestion du séchage du bois franc. Ce système inclut un module de planification de séchoirs multi-sites basé sur une heuristique. Cette dernière peut être exécutée chaque jour et permet de répondre à trois questions: 1) doit-on débiter un séchage? 2) si plus d'un séchoir est disponible, lequel utiliser? 3) quelle essence doit-on sécher? L'heuristique est basée sur les concepts de point de commande et de stock de sécurité de manière à minimiser les ruptures de stock. Dans le cas avec lequel ils ont travaillé, les problématiques de patrons de chargement ne s'appliquent pas, car il n'y a pas différentes tailles de paquets et il y a peu de produits (essence) différents.

Aggarwal *et al.* (1992) présentent également un système d'aide à la décision pour la planification des opérations de séchage pour une usine de production de meubles en bois franc. Le modèle de planification est un MIP qui inclut la possibilité d'achat de bois sec prêt à être utilisé et le besoin en bois sec pour la production de meubles doit être satisfait à coût minimum.

Comme dans le cas étudié par Gascon *et al.*, le temps de séchage est relativement long et peut varier entre 11 et 18 jours selon la période de l'année, les conditions climatiques et le temps passé au pré-séchage. À cause des temps d'opérations relativement longs, l'horizon de planification utilisé est d'une année divisée en périodes de 5 jours. Les auteurs mentionnent qu'une durée d'une journée pour les périodes aurait été plus appropriée au problème, mais le nombre de variables devenait

alors trop grand pour être résolu en un temps raisonnable. Pour l'implantation du système sur un micro-ordinateur, une version relaxée du programme linéaire a été utilisée. La problématique des patrons de chargement n'est pas présente non plus dans le cas qu'ils ont étudié.

Arman *et al.* (2001) présentent aussi un modèle de planification des séchoirs pour du bois franc utilisé dans la production de meubles. La possibilité d'acheter le bois sec ou de le sécher est considérée par le modèle dont l'objectif est la satisfaction des demandes au moindre coût. Leur modèle permet de traiter le problème plus général pour lequel il existe plusieurs combinaisons d'essences/épaisseur, différents types de séchoirs et une disponibilité limitée de ces derniers. Les auteurs mentionnent que dû à la NP-complétude du problème, l'utilisation d'un modèle mathématique en nombres entiers est peu performant. Ils ont donc développé et évalué une heuristique pour ce problème. Le modèle qu'ils présentent prend la capacité générale de chaque séchoir en considération, mais ne regarde pas la faisabilité opérationnelle des chargements.

3 MODELE MATHÉMATIQUE PROPOSÉ POUR LE CALCUL D'UN PATRON DE CHARGEMENT OPTIMAL A SECHER

Les approches déjà utilisées pour résoudre efficacement le problème de planification du séchage, que ce soit la planification manuelle, une heuristique-greedy (Gaudreault *et al.*, 2010), le modèle MIP ou le modèle en programmation par contraintes (Gaudreault *et al.*, 2011), comportent toutes un sous problème qui consiste à choisir quel patron de chargement (parmi une liste de patrons préétablis) devrait être utilisé pour remplir un séchoir précis à un moment précis.

Nous proposons dans cette section un modèle mathématique mixte en nombres entiers (MIP) qui permet de générer dynamiquement un patron de chargement / empilement optimal. Il permet d'identifier, pour un séchoir particulier qui est libre à un moment précis : 1- quel processus de séchage sera utilisé; 2- pour chaque rail, combien de paquets des différentes longueurs seront mis sur chaque rangée; 3- quelle est la hauteur des paquets de chaque rangée de chaque rail du séchoir; 4- de quels produits seront constitués les différents paquets. Le modèle prend en compte les dimensions physiques du séchoir, l'inventaire qui sera disponible à être séché au moment de débiter l'opération de séchage et la demande pour les différents produits séchés (volume requis à chaque période).

3.1 Fonction objectif

Chez le partenaire industriel du projet, une forte proportion de la production sert à satisfaire des commandes et son objectif est donc de réduire les retards. Ce besoin peut être une demande client ou un objectif de production, mais dans tous les cas, il est exprimé par une date souhaitée pour un volume spécifique d'un produit donné.

Le retard est défini comme étant le volume non livré à temps multiplié par le nombre de périodes durant lesquelles le retard est observé. Ce calcul s'effectue, pour tous les produits pour lesquels il y a un besoin, sur l'horizon de planification T .

Puisque la planification n'est pas faite globalement dans un seul modèle mathématique, l'heuristique tente à minimiser les retards en privilégiant, lors de la planification d'un séchoir, le séchage des produits qui, s'ils n'étaient pas séchés immédiatement, occasionneraient le plus de retard. On cherche donc à maximiser la réduction des retards par la fabrication des bons produits dans le temps.

Soit T , la période la plus éloignée dans l'horizon de planification, et soit t_d , la date due de la commande d . Soit également d_s , la durée de séchage lorsque le processus s est appliqué. En séchant maintenant un produit de la commande d , on réduit le retard par $\Phi_{d,s} \times \min\{T - t_d, T - d_s\}$, où $\Phi_{d,s}$ est la variable de décision représentant le volume de la commande d qui pourra être satisfait par la solution pour le chargement du séchoir suivant le processus de séchage s .

La fonction objectif de minimisation des retards peut alors s'exprimer ainsi :

$$\text{maximiser } \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \Phi_{d,s} \min\{T - t_d, T - d_s\}$$

3.2 Modèle mathématique en nombres entiers (MIP)

Ensembles :

P	Ensemble des produits verts
P_l	Ensemble des produits verts dont la longueur des paquets est l
H	Ensemble des hauteurs possibles pour les paquets $\cup \{0\}$
L	Ensemble des longueurs possibles pour les paquets
S	Ensemble des processus de séchage compatibles avec le séchoir
S_p	Ensemble des processus de séchage pouvant sécher le produit p
V	Ensemble des produits rabotés secs pour lesquels il y a de la demande
D	Ensemble des demandes
D_p	Ensemble des demandes pour le produit $p \in P$

Paramètres :

Ψ	Grand nombre (volume total des produits en inventaire)
a	Nombre de rangées maximums (en hauteur) dans le séchoir
$maxh$	Hauteur du séchoir
n	Nombre de rails dans le séchoir
n_{\max}	Longueur maximale des rails
n_{\min}	Longueur minimale des rails
i_p	Inventaire du produit p disponible pour séchage (à la date de début prévue du séchage)
u_p	Volume (PMP) d'un paquet du produit p
h_p	Hauteur d'un paquet du produit p
k_p	Priorité de séchage du produit p
w_d	Volume (PMP) de la demande d
t_d	Période à laquelle la demande d devrait être satisfaite
d_s	Durée du séchage, en nombre de périodes, lorsque le processus s est appliqué.
T	Horizon de planification

Variables de décision :

R_s	Indique si le processus s est utilisé pour le séchoir $\{0,1\}$
$N_{l,r}$	Nombre de paquets de longueur l mis sur une rangée du rail r {entier positif}
$X_{p,r,g}$	Volume (PMP) du produit p affecté au rail r dans la rangée g {réel positif}
$Q_{p,r,g}$	Nombre de paquets du produit p sur le rail r dans la rangée g {entier positif}
$I_{r,h,g}$	Indique si la hauteur h est choisie pour les produits de la rangée g du rail r $\{0,1\}$
$G_{r,g}$	Indique si la rangée g du rail r est utilisée $\{0,1\}$
$E_{r,g,l}$	Variable d'écart permettant de considérer les rangées vides {réel positif}
J_p	Volume de produit p pouvant être obtenu suite au séchage des produits dans le plan {réel positif}
$\Phi_{d,s}$	Volume comblé de la demande d à partir de la production de produits finis faite en suivant le processus de séchage s {réel positif}

Contraintes :

- Un seul processus doit être utilisé pour le séchoir.

$$\sum_{s \in S} R_s = 1 \quad (1)$$

- On remplit le séchoir dans les limites de longueur acceptable. Ainsi, pour chaque rail, la somme des longueurs des paquets sur une rangée du rail doit être entre n_{\min} et n_{\max} .

$$n_{\min} \leq \sum_{l \in L} l(N_{l,r}) \leq n_{\max} \quad \forall r \in \{1..n\} \quad (2)$$

- On ne peut utiliser que les produits qui sont compatibles avec le processus de séchage sélectionné par le modèle.

$$X_{p,r,g} \leq \Psi \sum_{s \in S_p} R_s \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\}, p \in P \quad (3)$$

- On ne peut utiliser plus de produits que ce qui est disponible en inventaire.

$$\sum_{r=1}^n \sum_{g=1}^a X_{p,r,g} \leq i_p \quad \forall p \in P \quad (4)$$

- Le modèle prévoit un nombre maximal théorique possible de rangées dans les séchoirs (paramètre a). Selon la hauteur des paquets séchés, il est possible qu'on ne puisse sécher sur autant de rangées en hauteur. Une variable d'écart ($E_{r,g,l}$) est utilisée dans la contrainte (6) pour respecter cette contrainte pour les rangées non utilisées. La contrainte (5) assure que cette variable d'écart reste nulle pour les rangées non utilisées.

$$E_{r,g,l} \leq \Psi(1 - G_{r,g}) \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\}, l \in L \quad (5)$$

- Dans chaque rangée, les paquets doivent respecter les différentes longueurs choisies pour le rail (même nombre de paquets de chaque longueur sur chaque rangée).

$$\left(\sum_{p \in P} \frac{X_{p,r,g}}{u_p} \right) + E_{r,g,l} = N_{l,r} \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\}, l \in L \quad (6)$$

- La contrainte (7) détermine le nombre (entier) de paquets utilisés de chaque produit dans le plan de chargement.

$$Q_{p,r,g} = \frac{X_{p,r,g}}{u_p} \quad \forall p \in P, r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\} \quad (7)$$

- Tous les paquets d'une même rangée sur un rail doivent avoir la même hauteur. La contrainte (8) assure qu'il n'y a bien qu'une seule hauteur choisie par rangée et par rail.

$$\sum_{h \in H} I_{r,h,g} = 1 \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\} \quad (8)$$

- Tous les produits sur une rangée d'un rail doivent être pour la hauteur choisie par le modèle.

$$X_{p,r,g} \leq \Psi I_{r,h_p,g} \quad \forall p \in P, r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\} \quad (9)$$

- Une rangée est considérée non utilisée si la hauteur choisie pour la rangée est nulle (contrainte 10). Il est assumé que les hauteurs des paquets sont toutes ≥ 1 . La contrainte (11) assure que la hauteur des rangées non utilisées est zéro.

$$G_{r,g} \leq \sum_{h \in H} h(I_{r,h,g}) \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\} \quad (10)$$

$$\sum_{h \in H} h(I_{r,h,g}) \leq \Psi G_{r,g} \quad \forall r \in \{1..n\}, g \in \{1..a\} \quad (11)$$

- Pour chaque rail, dans l'empilement des paquets par rangée, on ne peut dépasser la hauteur du séchoir qui est donnée par $maxh$.

$$\sum_{g=1}^a \sum_{h \in H} h(I_{r,h,g}) \leq maxh \quad \forall r \in \{1..n\} \quad (12)$$

- La variable de décision J_p est le volume du produit p pouvant être obtenu suite au séchage des produits dans ce plan.

$$J_p = \sum_{r=1}^n \sum_{g=1}^a \sum_{p \in P} X_{p,r,g} \quad \forall p \in P \quad (13)$$

- Soit D , l'ensemble des demandes. Chaque demande est pour un seul produit. D_p est l'ensemble des demandes pour le produit p , et t_d est la période à laquelle la demande d devrait être satisfaite. Soit la variable de décision $\Phi_{d,s}$, le volume comblé de la demande d à partir de la production possible de produits finis faite en suivant le processus de séchage s , et soit w_d , le volume de la demande d . La contrainte (14) stipule qu'on ne peut pas combler plus que la demande et la contrainte (15) qu'on ne peut satisfaire plus que la quantité produite. La contrainte (16) assure qu'aucune demande ne peut être comblée pour un processus de séchage non choisi.

$$\sum_{s \in S} \Phi_{d,s} \leq w_d \quad \forall d \in D \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{d \in D_p} \Phi_{d,s} \leq J_p \quad \forall p \in P \quad (15)$$

$$\Phi_{d,s} \leq \Psi R_s \quad \forall s \in S, d \in D \quad (16)$$

3.3 Utilisation du modèle proposé

L'heuristique-glouton rapportée dans la section 2 peut être adaptée pour exploiter le modèle proposé. À l'étape 2 de l'heuristique, plutôt que de choisir le meilleur processus/patron de chargement parmi une liste préétablie, on utilisera tout simplement le modèle mathématique.

Il en va de même pour le modèle basé sur la programmation par contraintes proposé par Gaudreault *et al.* (2011) (voir Figure 4). Chaque arc nœud correspond à un moment où il est nécessaire de choisir un processus de séchage et un patron de chargement à insérer dans le plan. Cela sera fait en utilisant le modèle mathématique proposé. Lorsqu'une première solution au problème global est obtenu (première feuille, en bas à gauche) on devra retourner à un nœud déjà visité pour choisir un processus de séchage / patron de chargement alternatif. Cela sera fait en roulant à nouveau le modèle, mais en retirant la possibilité pour le modèle de choisir pour ce nœud le même processus que ceux qui ont été choisis pour ce nœud les fois précédente. Une stratégie doit bien sûr définir vers quels nœuds on fait les retours-arrière à chaque fois qu'une solution est trouvée. Nous proposons d'utiliser la stratégie LDS puisque c'est celle qui a donné les meilleurs résultats dans le passé.

4 EXPERIMENTATIONS

Nous avons montré dans la revue de littérature que toutes les approches efficaces pour le problème comportent un sous-problème consistant à choisir un patron de chargement. Dans cette section, nous reprenons ces différentes méthodes, mais nous remplaçons l'étape de sélection du patron de chargement parmi ceux préétablis, par une étape consistant à construire dynamiquement un patron de chargement en utilisant le modèle MIP proposé à la section précédente.

Les approches comparées sont donc les suivantes : 1- heuristique avec liste de patrons préétablis (Gaudreault *et al.*, 2010) (glouton fixe), 2- fouille de l'espace des solutions alternatives avec stratégie LDS (Gaudreault *et al.*, 2011) (LDS fixe), 3- heuristique gloutonne avec génération dynamique des patrons (glouton dynamique), 4- fouille de l'espace des solutions alternatives avec stratégie LDS (LDS dynamique).

Les modèles proposés ont été testés avec des données réelles issues d'une scierie de taille moyenne représentative de la province de Québec (Canada) en utilisant les données de quatre périodes différentes (de février à avril 2005). Dans chacun des quatre cas, 40 différents produits peuvent être séchés dans n'importe lequel des deux séchoirs identiques. On cherche un plan qui minimisera les retards sur un horizon de 60 périodes de 12 heures. Pour les méthodes avec les patrons de chargement préétablis, 150 plans de chargement préétablis sont disponibles pour satisfaire entre 52 et 77 commandes.

Les graphiques de la Figure 5 présentent les résultats des différentes méthodes en fonction du temps de calcul. Rappelons que les solutions des heuristiques correspondent aux premières solutions trouvées par les méthodes de recherche dans un arbre LDS. Dans les graphiques suivants, la première valeur (à gauche) est donc également la solution de l'heuristique.

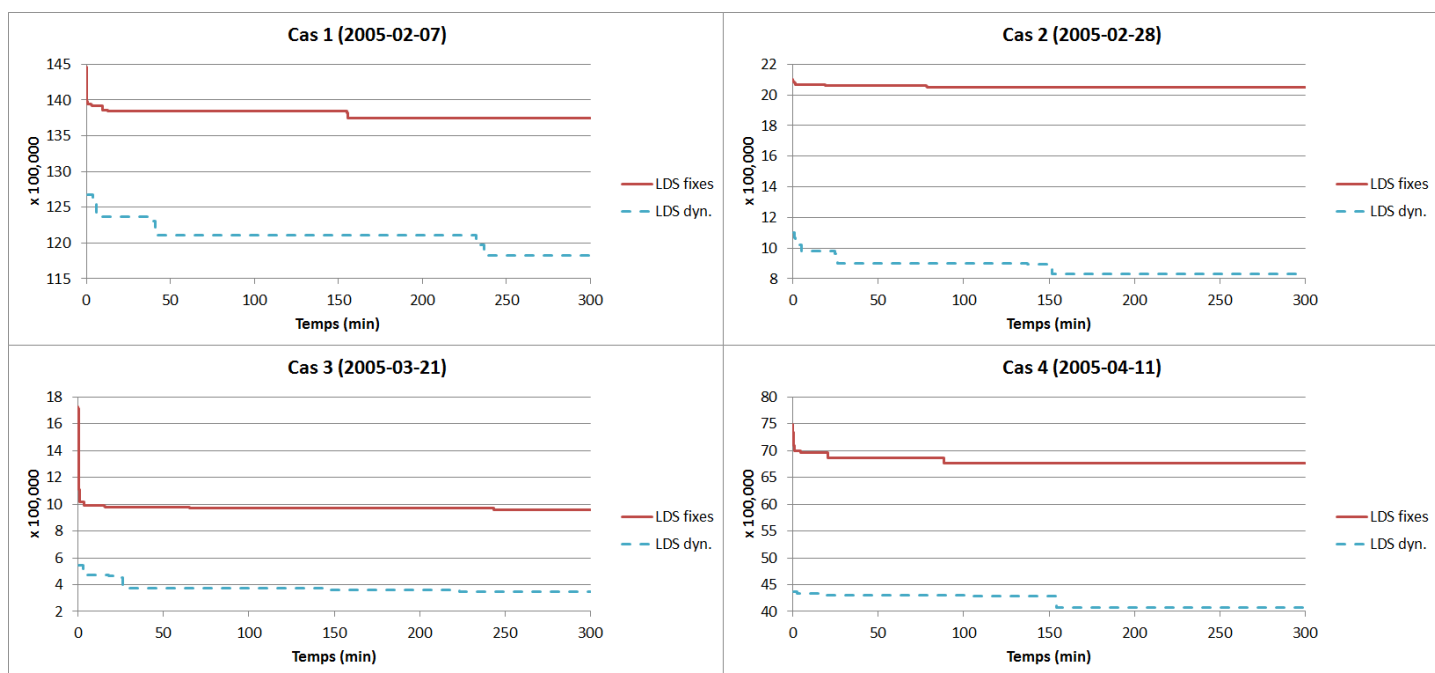


Figure 5 : Graphiques de la réduction des retards en fonction du temps d'exécution pour les différentes méthodes

Dans chaque cas, la première solution est trouvée en moins de 30 secondes. Nous avons laissé 300 minutes pour les recherches LDS et les graphiques montrent l'amélioration des solutions (réduction de la fonction objectif) dans le temps.

Pour les sous problèmes construisant les patrons de chargement (dynamique), le solveur utilisé est CPLEX (version 12.6) avec un gap de 0%.

Le Tableau 1 présente les résultats de l'heuristique et de la méthode avec recherche LDS (après 300 minutes). Le pourcentage représente la réduction des retards par rapport à la méthode de référence (heuristique fixe, i.e. avec patrons de chargement préétablis). La comparaison pour les deux méthodes avec patrons de chargement préétablis (heuristique fixe VS LDS fixe) nous montre un résultat conforme à ceux obtenus dans Gaudreault *et al.*, 2010. La méthode avec recherche LDS permet d'améliorer la solution de 5% à 10% dans les cas 1, 2 et 4 et par plus de 45% pour le cas 3. Le graphique de la Figure 5 montre que la majorité du gain de la méthode LDS est obtenu dans les premières minutes de calcul.

Si on regarde maintenant l'impact de générer les patrons dynamiquement, on remarque que l'heuristique (heuristique dyn) est bien plus performante que l'heuristique lorsqu'elle utilise les patrons fixes (elle permet de réduire les retards de 43% en moyenne) et qu'elle bat LDS fixe (réduction des retards de 33%

en moyenne) même si celui-ci calcule pendant 5 heures. Cela montre clairement l'impact industriel positif associé au fait de générer dynamiquement les patrons de chargement. Les gains sont liés au fait que notre modèle permet de créer de nouveaux patrons de chargement qui aident davantage à réduire les retards. Les patrons de chargement générés par le modèle sont axés sur le besoin de réduire au maximum les retards, et davantage de possibilités sont explorées que par l'utilisation de patrons de chargement préétablis.

Si on utilise maintenant la stratégie LDS pour explorer des solutions alternatives (LDS dynamique) on obtient alors les meilleures solutions trouvées jusqu'à maintenant pour ce problème. Cette approche permet alors un gain moyen de 51% par rapport à l'heuristique exploitant les patrons fixes prédéterminés, et de 8% par rapport à l'heuristique employant les patrons de chargement dynamiques.

Il faut mentionner que la méthode LDS dynamique demande beaucoup plus de temps pour explorer chaque nœud que la méthode LDS fixe. Ainsi, cette méthode a exploré en moyenne 14 000 nœuds en 5 heures alors que la méthode LDS fixe en a exploré 4 000 000 dans le même laps de temps. Cependant, les nœuds de l'arbre LDS fixe ne sont pas les mêmes que ceux du LDS dynamique.

Tableau 1 : Valeur de la fonction objectif (à minimiser) avec les méthodes heuristiques et recherche LDS avec patrons de chargement préétablis (fixes) et dynamiques

Méthode	Cas 1 (2005-02-07)	Cas 2 (2005-02-28)	Cas 3 (2005-03-21)	Cas 4 (2005-04-11)	Moyenne
Heuristique fixe	14 455 348	2 101 861	1 729 067	7 489 769	
LDS fixe	13 741 655 ↓ 5%	2 049 925 ↓ 2%	956 644 ↓ 45%	6 766 709 ↓ 10%	↓ 15%
Heuristique dyn.	12 678 085 ↓ 12%	1 100 762 ↓ 48%	544 041 ↓ 69%	4 367 626 ↓ 42%	↓ 43%
LDS dynamique	11 830 206 ↓ 18%	832 171 ↓ 60%	346 896 ↓ 80%	4 074 191 ↓ 46%	↓ 51%

5 CONCLUSION

Le problème de planification et d'ordonnancement à court terme des séchoirs pour le bois est un problème difficile qu'il n'est pas possible de résoudre à l'optimalité en un temps raisonnable pour les instances industrielles.

Différentes heuristiques ont été présentées dans la littérature, mais, soit elles s'appliquent au bois franc et ne traitent pas des patrons de chargement, soit elles doivent utiliser des patrons de chargement préétablis.

La méthode proposée dans cet article permet de créer de nouveaux patrons de chargement dynamiquement lors de la planification, ce qui permet d'être plus efficace considérant que l'objectif est de minimiser les retards pour les commandes.

Les industriels avec qui nous avons conduit nos expériences jugent que nos patrons de chargement et les plans obtenus pour le séchage du bois d'œuvre sont réalisables. Avec un temps de calcul relativement faible, la méthode permet de refaire rapidement une nouvelle planification suivant les aléas des temps de séchage réels, la disponibilité prévue du bois brut vert ou l'urgence de nouvelles commandes.

Nous poursuivons actuellement un projet avec une entreprise pour l'intégration du modèle de planification et d'ordonnancement à leur système ERP.

6 REFERENCES

- Aggarwal, A. K., R. R. Vemuganti, and W. Fetner. 1992. "A model-based decision support system for scheduling lumber drying operations". *Production and Operations Management*, vol. 1, no. 3., pp. 320-328.
- Arman, R. Y., T. J. Hodgson, and J. A. Joines. 2001. "Dry-or-buy decision support for dry kiln scheduling in furniture production". *IIE Transactions*, vol. 33, pp. 131-136.
- Gascon, A., P. Lefrançois, and L. Cloutier. 1998. "Computer-assisted multi-item, multi-machine and multi-site scheduling in a hardwood flooring factory". *Computers in Industry*, vol. 36, pp. 231-244.
- Gaudreault, J., JM. Frayret, A. Rousseau, and S. D'Amours. 2011. "Combined planning and scheduling in a divergent production system with co-production: A case study in the lumber industry". *Computers & Operations Research*, vol. 38, pp. 1238-1250.
- Gaudreault, J., P. Forget, J.-M. Frayret, A. Rousseau, S. Lemieux, and S. D'Amours. 2010. "Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: Models and coordination". *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice* vol. 17, no. 3, pp. 168-189.
- Harvey, W. D., and M. L. Ginsberg. 1995. "Limited discrepancy search". *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 607-615.