

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Liste des sigles.....	xiv
Remerciements	xvi
Avant-propos	xviii
Chapitre 1 : Introduction générale	1
1.1. Le contexte de la production de bois d’œuvre	1
1.2. Problématique de recherche.....	4
1.3. Organisation de la thèse.....	7
Chapitre 2 : Concepts préliminaires.....	8
2.1. La planification des opérations	8
2.1.1. Planification hiérarchique des opérations	9
2.1.2. Autres aspects reliés à la décomposition du problème de planification	15
2.1.3. La coordination des activités de production.....	18
2.1.4. Les modèles tactique et opérationnels pour la planification de la production dans un contexte divergent avec coproduction.....	20
2.1.5. Les politiques d’acceptation des commandes	22
2.1.6. Environnement d’affaires et importance du contexte de marché	23
2.2. La simulation.....	25
2.3. Les modèles de planification dans le secteur forestier	27
Chapitre 3 : Méthodologie.....	29
3.1. Rappel des objectifs.....	29
3.2. Établissement du modèle de simulation	30

3.2.1. Éléments du modèle de simulation.....	32
3.2.2. Vérification et validation du modèle	35
3.3. Études de simulation.....	35
Chapitre 4 : Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with co- production.....	40
Résumé	41
Abstract:	42
4.1. Introduction.....	43
4.2. Preliminary notions	44
4.2.1 Divergent processes with co-production.....	44
4.2.2 The case of the lumber industry	45
4.2.3 Evaluating order acceptance policies.....	46
4.2.4 Assessment with simulation.....	47
4.2.5 Summary	48
4.3. Proposed simulation framework	48
4.3.1 Configuring the framework.....	49
4.3.2 Verification and validation of the model	50
4.4. Using the framework to select the best policy according to market conditions	54
4.4.1 Experiments.....	54
4.4.2 Results and analysis.....	55
4.4.3 Managerial insights.....	60
4.5. Conclusion	62
4.6. Références.....	64
Chapitre 5 : Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction	69
Résumé	70
Abstract.....	71
5.1. Introduction.....	72
5.2. Preliminary concepts	73
5.2.1. North American lumber industry.....	73

5.2.2. Supply chain coordination	76
5.3. Assessing coordination mechanisms in a dynamic context	79
5.3.1. Experiments.....	82
5.3.2. Results.....	83
5.3.3. Impact of the coordination mechanism on the average inventory.....	87
5.4. Conclusion	89
5.5. Références.....	89
Chapitre 6 : Simulating and Evaluating Tactical-Operational Coordination Mechanisms for a Divergent Production System with Coproduction	94
Résumé	95
Abstract.....	96
6.1. Introduction.....	97
6.2. Preliminary concepts	98
6.2.1. Hierarchical planning.....	98
6.2.2. Production planning for the North-America lumber industry.....	100
6.3. Simulation framework	103
6.3.1. Configuring the framework.....	103
6.3.2. Tactical-operational coordination.....	107
6.4. Experimentations.....	108
6.4.1. Results.....	111
6.4.2. Discussion	116
6.5. Conclusion	116
6.6. Acknowledgements	119
6.7. References.....	119
Chapitre 7 : Discussion et conclusion.....	123
7.1. Les applications industrielles.....	125
7.2. Les limites de la recherche.....	126
7.3. Pistes de recherche	126
Bibliographie	129

Liste des tableaux

Table 1 Full-factorial design for the validation purpose.....	51
Table 2 Scenarios of coordination mechanisms and order acceptance policies.....	82
Table 3 Description of the planning approaches evaluated.....	109

Liste des figures

Figure 1.	Description de la production de bois d'œuvre	2
Figure 2.	Exemple d'un patron de coupe (Adapté de Gaudreault <i>et al.</i> (2010)).....	3
Figure 3.	Pyramide des trois niveaux de planification	9
Figure 4.	Les intrants et extrants du plan industriel et commercial	11
Figure 5.	Les intrants et extrants du PDP	12
Figure 6.	Création de sous plans synchronisés pour chaque agent	15
Figure 7.	Planification distribuée pour des plans centralisés.....	16
Figure 8.	Capture d'écran du modèle de simulation dans Simio	31
Figure 9.	Méthodologie suivie	36
Figure 10.	Conceptual representation of the model.	49
Figure 11.	Impact of the length of the planning horizon (demand intensity = 130%, replanning frequency = 1 week).....	52
Figure 12.	Impact of the demand intensity (length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).....	54
Figure 13.	Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 100%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).	56
Figure 14.	Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 100%; inaccurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).	57
Figure 15.	Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 70%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).	58
Figure 16.	Average inventory over the year according to the demand intensity and the associated number of sales (Commodity product = 90%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).	59
Figure 17.	Revenues for each policy (commodity product = 70%, accurate forecasts; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).	61

Figure 18.	Decision graph taking into account the margin for a market with an accurate forecast (length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).....	62
Figure 19.	Description of the lumber production process.....	73
Figure 20.	Example of a production matrix (Adapted from Gaudreault <i>et al.</i> (2010)).....	74
Figure 21.	Two-phase coordination mechanism.....	78
Figure 22.	Bottleneck-first coordination mechanism.....	79
Figure 23.	Conceptual representation of the simulation framework (adapted from Dumetz <i>et al.</i> (2016)).....	80
Figure 24.	Push planning system.....	82
Figure 25.	Number of sales according to the demand intensity (Push system, Two-phase planning and Bottleneck-first planning, using Stock, ATP and CTP order acceptance policies; confidence interval 95%).....	84
Figure 26.	Decoupling point before the drying stage.....	85
Figure 27.	Number of sales according to the demand intensity (Push system, Bottleneck first mechanism, push/pull system with decoupling point using Stock, ATP, and CTP order acceptance policies) when the bottleneck is at the drying activity; confidence interval level 95%.....	86
Figure 28.	Number of sales according to the demand intensity when the bottleneck is at the finishing unit; confidence interval level 95%.....	87
Figure 29.	Average inventory for each scenario for sawn products, dried products, and final products (Demand intensity = 300% of the maximal production capacity) when the bottleneck is at the drying stage; confidence interval 95%.....	88
Figure 30.	Conceptual representation of the simulation framework (adapted from Dumetz <i>et al.</i> , 2016 and 2018).....	104
Figure 31.	Inputs and outputs used in the S&OP model.....	105
Figure 32.	Inputs and outputs used in the sawing model.....	106
Figure 33.	Inputs and outputs used in the drying model.....	106
Figure 34.	Inputs and outputs used in the finishing model.....	106
Figure 35.	Tactical-operational coordination.....	107
Figure 36.	Seasonal amplification process.....	111

Figure 37.	Income according to demand intensity, type of targets transmitted from the tactical level to the operational level and order acceptance policy used (no seasonality).....	112
Figure 38.	Income according to demand intensity, type of targets transmitted from tactical level to operational level and order acceptance policy (low seasonality)	114
Figure 39.	Income according to demand intensity, type of targets transmitted from the tactical level to the operational level and order acceptance policy (high seasonality).....	116

Rapport-Gratuit.com

Liste des sigles

AATP: Advanced available-to-promise
ATP: Available-to-promise
CBN: Calcul des besoins nets
CTP: Capable-to-promise
ERP: Enterprise resource planning
FCFS: First come first serve
HPP: Hierarchical production planning
MFBM: Thousand board-feet
MIP: Mixed-integer programming
MPMP: Mille pieds mesure de planche
NLGA: National lumber grades authority
PDP: Plan directeur de production
PIC: Plan industriel et commercial
PTP: Profitable-to-promise

La perfection n'est jamais dans les hommes, mais parfois dans leurs intentions.
- Anonyme

Remerciements

Ce projet a été bien plus qu'un simple projet de doctorat. Cela a été pour ma famille et moi un projet de vie. Nous sommes partis de France pour vivre cette aventure tous ensemble et la rédaction de ce mémoire a cette saveur particulière de nouvelle vie pour nous. J'aimerais donc tout d'abord remercier mon directeur, le professeur Jonathan Gaudreault, qui a su me faire confiance lors de ce projet de doctorat. Lors de mon stage de fin d'étude il y a 4 ans, Jonathan a su me convaincre de rester faire un doctorat et je l'en remercie. Ce doctorat s'est exceptionnellement bien passé et travailler avec vous a été un réel plaisir.

Ce travail n'aurait jamais été possible sans le professeur André Thomas, qui a codirigé ces travaux de doctorat. Vous avez su m'apporter les conseils nécessaires au bon déroulement de cette thèse. Je vous remercie sincèrement pour toutes ces rencontres passées à travailler sur ce projet, à confronter nos idées. Je vous remercie également pour tous ces bons moments passés en dehors du cadre de ce doctorat, comme cette magnifique balade au Lac vert.

Je remercie tout spécialement la professeure Nadia Lehoux, également codirectrice de cette thèse, qui a su se rendre disponible quand j'en avais besoin. Vous avez toujours été à mon écoute, tant sur le plan professionnel que personnel et j'ai pris un immense plaisir à travailler avec vous.

Je souhaite également remercier la professeure Hind Bril-El Haouzi d'avoir pris part à ce projet en tant que superviseur et de m'avoir conseillé tout au long de ce doctorat. Nous avons pu partager d'agréables moments lors de ma visite en France et je vous en remercie.

J'aimerais également remercier Philippe Marier, professionnel de recherche au consortium de recherche FORAC. Philippe Marier a fait preuve de beaucoup d'investissement pour m'aider dans ce projet. Nous avons par ailleurs partagé de bonnes parties de squash ensemble. Je remercie également Caroline Cloutier qui a su se rendre disponible pour me donner de nombreux conseils. Je tiens également à remercier les professeurs Jean-Marc Frayret, Luis Antonio De Santa-Eulalia et Jean-François Audy, d'avoir accepté d'évaluer cette thèse.

Je remercie aussi Catherine Lévesque pour tout le soutien logistique lors de ce doctorat, mais également pour toutes les discussions qu'on a pu avoir ensemble et qui étaient très appréciées.

Je tiens à remercier toute l'équipe du Consortium FORAC pour toute l'aide que j'ai reçu et pour tous ces instants partagés ensemble. Je remercie également tous les étudiants avec lesquels j'ai pu échanger, comme Yassin, Marc-André, Alexis et tous ceux de mon bureau (et j'en oublie). Je remercie tout particulièrement Jean Wery, avec qui j'ai passé près de 3 ans pendant nos doctorats respectifs, Zuzanna et Marta avec qui j'ai passé de bons moments.

Enfin, je remercie toute ma famille et plus particulièrement mon épouse, Isabelle et mon fils Imanol, qui m'ont soutenu durant ce gros projet. Je sais à quel point ce n'était pas tous les jours facile et je vous en suis très reconnaissant. Finalement, merci à mon petit nouveau, Esteban, qui est né quelques jours avant ma soutenance.

Avant-propos

Ce travail intitulé « Simulation combinée des processus de production et des processus de pilotage : Analyse comparative des stratégies de pilotage pour la production de bois d'œuvre », présenté dans ce mémoire, a été réalisé sous la direction de Jonathan Gaudreault, professeur à l'Université Laval, et sous la co-direction de Nadia Lehoux, professeure à l'Université Laval et de André Thomas, professeur à l'Université de Lorraine (France). Ce travail a été financé par le Consortium de recherche FORAC.

Ce mémoire de thèse est présenté par article. Trois articles sont ainsi introduits. Pour chacun de ces articles, j'ai agi à titre de chercheur principal et de premier auteur.

Le premier article, intitulé *Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with coproduction*, est une version étendue de la conférence INCOM en 2015. Il a été publié en 2016 dans le journal IJPR (*International Journal of Production Research*). Il a été écrit sous la supervision de Jonathan Gaudreault, André Thomas, Nadia Lehoux et Hind Bril-El Haouzi, avec la collaboration de Philippe Marier.

Le second article, intitulé *Simulation and evaluation of coordination mechanisms for a decentralized lumber production system with coproduction* a été soumis en février 2018 au journal IJIE (*International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*). Il a été écrit sous la supervision de Jonathan Gaudreault, André Thomas, Nadia Lehoux et Hind Bril-El Haouzi, avec la collaboration de Philippe Marier.

Le troisième article, intitulé "Simulating and evaluating tactical / operational coordination mechanisms for a divergent production system with coproduction" a été soumis en mai 2018 au journal IJPE (*International Journal of Production Economics*). Il a également été écrit sous la supervision de Jonathan Gaudreault, André Thomas, Nadia Lehoux et Hind Bril-El Haouzi, tout en bénéficiant de la collaboration de Philippe Marier.

Enfin, ces travaux ont également fait l'objet de diverses communications lors de colloques et de conférences.

Chapitre 1 : Introduction générale

Une entreprise ou une organisation se doit de planifier efficacement l'ensemble de ses activités. Le besoin d'optimiser sa planification vient en partie d'un environnement d'affaires propice à l'émergence de nombreuses organisations où la concurrence est grandissante. Cela nécessite de la part de ces entreprises un travail de qualité et de la réactivité, dans le but de satisfaire le client. Toutes les activités d'une entreprise (par exemples les processus de transformation, les relations entre clients, les fournisseurs et les revendeurs, les objectifs généraux, etc.) doivent donc être organisés dans le temps.

Dans cette thèse, nous présentons une plateforme de simulation permettant l'évaluation comparative de stratégies de pilotage au niveau tactique et opérationnel en fonction du contexte de marché. Le pilotage des opérations consiste à planifier, suivre et gérer toutes les opérations liées à la mise en œuvre des flux physiques dans un objectif d'excellence opérationnelle. Les stratégies de pilotage, quant à elles, sont nombreuses et définies par divers paramètres. Elles permettent une meilleure planification de la production. Le contexte étudié concerne le secteur forestier et plus particulièrement les scieries en Amérique du Nord. La planification de la production de bois d'œuvre cherche à livrer le bon bois, au bon client, au bon moment. Elle apparaît néanmoins très difficile à faire, en raison des nombreuses particularités propres au secteur forestier comme par exemple le phénomène de coproduction, où lorsqu'un produit est fabriqué, d'autres produits « non souhaités immédiatement » sont également fabriqués en même temps.

1.1. Le contexte de la production de bois d'œuvre

De manière générale, l'organisation d'une entreprise de sciage est semblable à celle d'un autre secteur (approvisionnement, transformation, vente aux clients). Le contexte des usines de sciage fait toutefois face à certaines particularités. La production de bois d'œuvre est réalisée en trois étapes (sciage, séchage et rabotage), comme illustré à la figure 1. Les billots de bois proviennent de différentes zones forestières et sont sciés selon plusieurs patrons de coupe (1). Le patron de coupe représente une façon de débiter la bille. Il en existe une multitude, tenant compte des caractéristiques naturelles de la bille. Le bois scié possédant différentes longueurs,

épaisseurs et qualités est ensuite regroupé en fonction de ses caractéristiques physiques et séché à l'aide de séchoirs de grande capacité (2). Le bois est dès lors raboté, coupé et trié à l'unité (3). Le bois est finalement gardé en stock jusqu'à sa livraison aux clients. Chaque étape de production est donc très différente des autres et repose sur son propre processus de production. De plus, à chaque étape, un inventaire de produits semi-finis est généralement construit pour assurer la continuité du processus.

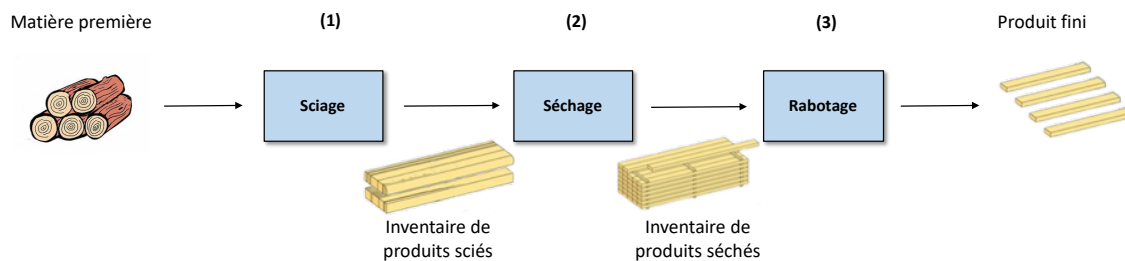


Figure 1. Description de la production de bois d'œuvre

Ce processus est dit « à flux divergent » : à partir d'une seule matière première, plusieurs produits finaux sont obtenus. De plus, de nombreux produits sont obtenus en même temps et cela ne peut être évité (coproduction) (voir Öner et Bilgiç (2008)). Finalement, il y a également fabrication de *sous-produits* tels que les copeaux ou la sciure. On note une différence importante entre un coproduit et un sous-produit. Un coproduit est un produit de valeur que l'on produit par choix mais qui ne correspond pas forcément à un besoin express. En revanche, les sous-produits sont inexorablement produits lors de la production. De plus, les sous-produits s'avèrent souvent être des produits à plus faible valeur marchande. De manière générale, la coproduction génère donc des stocks pour des produits qui peuvent être difficiles à vendre et/ou de valeur moindre.

Les caractéristiques du billot et du patron de coupe sélectionné sont utilisés pour obtenir différents produits (voir la figure 2 adaptée de Gaudreault *et al.* (2010)). Les scieries utilisent généralement des données historiques pour prévoir les quantités de divers produits pouvant être obtenues à partir d'une catégorie spécifique de billots.

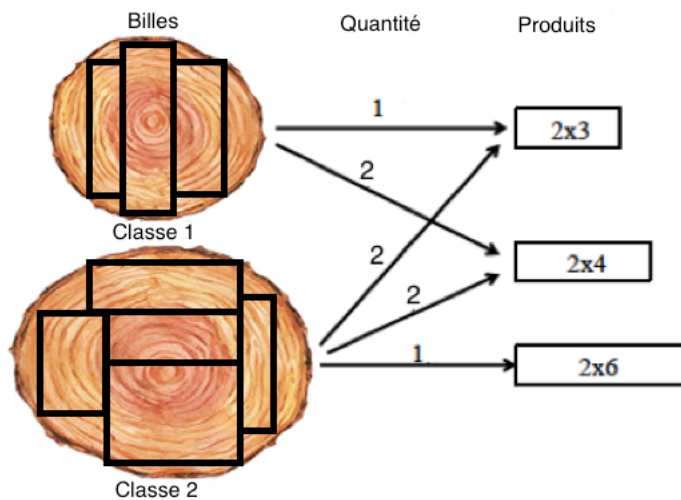


Figure 2. Exemple d'un patron de coupe (Adapté de Gaudreault *et al.* (2010))

Bien qu'à chacune de ces étapes, des outils sont utilisés pour optimiser la planification et la production de bois d'œuvre, il est difficile de planifier la production sans l'utilisation de grands stocks de produits semi-finis et finis. Dans ce contexte, et parce que l'industrie nord-américaine du bois est un marché de commodités¹, les scieries nord-américaines ont typiquement adopté un système de flux poussés qui consiste à produire du bois d'œuvre sur stock en tenant compte de contraintes opérationnelles (volume d'approvisionnement, capacité de production, etc.), au lieu de prendre en compte la demande du client et de produire sur commande. Bien que ces pratiques puissent convenir à un marché orienté « produits de commodité », l'évolution vers des marchés de produits dits « spéciaux » où ceux-ci ne peuvent être fabriqués qu'à la demande, force les entreprises à mettre en place des approches de pilotage plus avancées.

¹ Le système de bois d'œuvre nord-américain repose sur un processus de normalisation mené par la NLGA qui définit des dimensions et des qualités strictes. Cela fait du bois d'œuvre un marché de commodité. La situation est différente en Europe où la plupart des pièces sont fabriquées sur commande selon des caractéristiques spécifiques.

1.2. Problématique de recherche

La recherche proposée ici a pour but d'aider les entreprises de l'industrie forestière (en particulier les scieries) à mieux faire face à un tel contexte en adoptant des stratégies de pilotage adaptées à leur marché.

Une stratégie de pilotage est notamment définie par les éléments suivants :

- Le choix des modèles et algorithmes de planification utilisés à chaque étape de la production de bois d'œuvre et par le niveau de centralisation/décentralisation ;
- Les mécanismes de coordination utilisés, permettant de planifier les opérations de plusieurs entités distinctes ; on parle notamment d'échange d'information circulant entre les niveaux de planification tactique et opérationnel ou encore entre les entités/modèles utilisés au niveau opérationnel pour planifier la production de bois d'œuvre ;
- Les politiques d'acceptation des commandes, permettant d'accepter ou de refuser une commande en fonction de règles mises en place ;
- Le choix des horizons de planification et des périodes de replanification.

Ces stratégies peuvent être évaluées pour différents environnements d'affaires, par exemple un marché composé essentiellement de produits de commodité ou inversement un marché composé de produits spéciaux. Il en va de même pour un marché présentant une saisonnalité plus ou moins forte dans les prix de vente ou encore un marché présentant un volume de demande variable.

Pour un industriel, il existe plusieurs stratégies de pilotage alternatives. Bien qu'il existe de nombreux outils de planification, optimisant par exemple les différentes activités de la transformation du bois, il est difficile de les sélectionner et de les mettre en œuvre. Le besoin industriel est donc sur la création d'outil permettant d'agencer ces modèles et les politiques décisionnelles, afin de définir la stratégie de pilotage la plus adaptée à son environnement d'affaires. Le but de la thèse est donc de proposer un cadre décisionnel reposant sur la simulation permettant d'évaluer l'impact du déploiement de stratégies de pilotage adaptées au marché. Les industriels pourront alors répondre à des questions telles que :

- Quelle devrait être la politique d'acceptation des commandes de la scierie ?
- Quelle devrait être la taille de l'horizon de planification ?
- Quel outil de planification devrait-on utiliser ? Et pour quelles activités (approvisionnement, sciage, séchage, rabotage, vente) ?
- Comment configurer cet outil de planification pour que cela convienne à l'entreprise ?
- Utilise-t-on les mêmes outils si le marché est différent ?
- Quels sont les avantages à utiliser des outils de planification avancée ?
- Comment mettre en œuvre des mécanismes pour obtenir une bonne coordination dans la planification des opérations ?
- Quelles informations, transmises du niveau tactique au niveau opérationnel, doit-on prendre en compte pour fournir au niveau opérationnel une bonne vision des possibles ventes futures ?

Ainsi, au travers des réponses données à ces questions, l'industriel sera capable de choisir la bonne stratégie de pilotage à mettre en place pour gérer efficacement la planification de la production en tenant compte de son environnement d'affaires.

Ce projet demandait donc d'être en mesure d'évaluer et de comparer différentes stratégies de pilotage dans divers contextes de production, de marché incluant des processus d'affaires. De cet objectif général ont découlé quatre objectifs spécifiques.

Le premier visait à réaliser une plateforme de simulation permettant l'évaluation de stratégies de pilotage. Ainsi, un modèle de simulation a été construit en utilisant notamment l'environnement Simio. Ce modèle simule la génération, le traitement et la vente des commandes. Il est couplé à un module de planification de la production responsable de la gestion des stocks et de la génération des plans de production.

Le second objectif spécifique visait l'évaluation de l'impact de politiques d'acceptation des commandes telles que Available-to-promise (ATP) ou encore Capable-to-promise (CTP) sur les performances en termes de volume de commandes acceptées dans un environnement

divergent avec co-production. Ces politiques d'acceptation des commandes ont été largement étudiées dans un contexte manufacturier traditionnel (Slotnik, 2011), mais dans un tel contexte de divergence, le choix d'une politique plutôt qu'une autre est loin d'être trivial. Nous avons notamment montré que le choix d'une politique d'acceptation des commandes dépendait grandement de son contexte de marché et que certaines politiques d'acceptation de commandes bien connues pour leurs performances en milieu manufacturier traditionnel (*capable-to promise*, CTP) s'avéraient moins efficaces que d'autres plus classiques (*available-to-promise*, ATP).

Le troisième objectif spécifique visait à évaluer la coordination au niveau opérationnel entre les différentes activités du processus de transformation de bois d'œuvre. Le niveau opérationnel est alors décentralisé et nous utilisons des mécanismes de coordination pour rendre cohérentes les actions de planification. Nous avons notamment montré que des mécanismes de coordination précédemment publiés pour la planification décentralisée des opérations de production de bois d'œuvre peuvent conduire à un taux d'acceptation des commandes faible lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement aussi dynamique. Un mécanisme de coordination *push / pull* avancé basé sur le concept de point de découplage a donc été proposé, révélant qu'il pourrait être plus approprié face aux caractéristiques du marché considérées dans l'étude; tout cela conduisant à une augmentation des ventes et à une réduction des stocks.

Enfin, le quatrième objectif spécifique visait à mesurer l'impact sur les revenus générés de la transmission d'informations du niveau tactique au niveau opérationnel. Le niveau de planification tactique est alors pris en compte pour établir une planification à plus long terme. Nous avons pu montrer que le choix de l'information à transmettre du niveau tactique au niveau opérationnel dépend de plusieurs facteurs, tels que : la politique d'acceptation des commandes qui sera utilisée lors des ventes, l'importance de la saisonnalité au niveau des prix de vente des produits (variation du prix de vente d'un même produit au cours l'année), ou le fait d'être ou non dans un marché où la demande est très grande.

Lors de chacune des études de simulation, nous avons utilisé une méthodologie considérée comme un processus rationnel comportant quatre étapes (El Haouzi *et al.* (2013)) : la collecte et la génération de données, le développement (ou l'adaptation) du modèle, la validation et la vérification et enfin les expérimentations.

1.3. Organisation de la thèse

Cette thèse est une thèse par articles. Trois articles y sont présentés, chacun apportant à la fois des contributions à portée scientifiques et industrielles. Nous présenterons d'abord au chapitre 2 les concepts préliminaires nécessaires à la réalisation des travaux. La planification d'un point de vue général, le système de planification de la production en général, les trois niveaux de planification et la coordination entre les différents niveaux de planification seront abordés. Le chapitre 3 rappellera l'objectif général de cette thèse, ainsi que les différents objectifs spécifiques ayant permis de l'atteindre. La méthodologie employée sera également présentée. Le chapitre 4 introduira le premier article intitulé « *Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with coproduction* ». Cet article a été publié dans l'*International Journal of Production Research* en 2016. Dans ce premier article, une plateforme de simulation permettant l'évaluation comparative de politique d'acceptation des commandes en tenant compte du contexte de marché de l'entreprise est proposée. Le chapitre 5 présentera le deuxième article, soumis à l'*International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*. Cet article, intitulé « *Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction* », utilise la plateforme de simulation de Dumetz *et al.* (2016) pour évaluer des mécanismes de coordination dans le contexte décentralisé de la production de bois d'œuvre au niveau opérationnel. Le chapitre 6 introduira le troisième article, intitulé « *Simulating and Evaluating Tactical / Operational Coordination Mechanisms for a Divergent Production System with Coproduction* ». Cet article a été soumis au journal *International Journal of Production Economics*. Dans cet article, un processus de planification des opérations intégrant les niveaux de planification tactique et opérationnel est proposé. Enfin, le Chapitre 7 conclura cette thèse en synthétisant les contributions qui ont été faites tant scientifiques qu'industrielles et en évoquant de possibles pistes de recherche futures.

Chapitre 2 : Concepts préliminaires

Ce chapitre a pour but de couvrir les différents thèmes abordés dans cette thèse, pour en donner une définition et mentionner de façon non exhaustive les principaux travaux qui ont déjà été effectués dans le domaine. Ainsi, ce chapitre traitera de la planification des opérations, en abordant les différentes approches de planification (hiérarchique, centralisée, décentralisée). Différents modèles de planification en rapport avec notre contexte d'étude seront alors présentés ainsi que la coordination nécessaire à mettre en place pour garantir une bonne planification. Nous présenterons l'environnement d'affaires qu'il faut prendre en compte lors de chaque planification ainsi que la simulation, puisque celle-ci a été utilisée tout au long de ce projet pour évaluer plusieurs scénarios. Enfin, nous reviendrons sur le secteur forestier en expliquant pourquoi il est difficile mais nécessaire d'établir les stratégies de pilotage mentionnées dans le Chapitre 1 pour bien gérer la planification des opérations dans ce secteur.

2.1. La planification des opérations

Chaque entreprise de biens ou de services doit générer du profit pour pouvoir se développer sereinement et faire face à la concurrence. Il n'y a donc plus de place pour le hasard et les dirigeants doivent prévoir ce qui sera fait lors des prochains jours, semaines, mois et mêmes années dans l'entreprise, afin d'être suffisamment réactif face à la demande (Stevenson *et al.* (2006)).

Il y a de nombreuses étapes entre la production (ou l'extraction) de la matière première jusqu'à la livraison du produit fini destiné aux consommateurs, formant ainsi une chaîne de valeur : l'approvisionnement, la fabrication et la distribution jusqu'au consommateur final (Chopra et Meindl, (2007)). À chacune de ces étapes, une planification des opérations est nécessaire pour permettre aux dirigeants une vision à long terme d'une part, mais aussi à court et à moyen terme, d'autre part. Blackstone (2008) définit d'ailleurs la planification comme « un processus permettant de paramétrer les objectifs d'une organisation et de choisir les différentes manières d'utiliser les ressources de cette organisation pour atteindre les objectifs établis ».

2.1.1. Planification hiérarchique des opérations

Parmi plusieurs méthodes de planification, la planification hiérarchique est largement utilisée lors de problème de planification de la production pour les industries. Celle-ci permet de planifier des activités et de prendre des décisions à des niveaux d'horizon différents. Cela a de nombreux avantages. D'une part, elle permet de différencier différents niveaux de planification où les horizons de planification sont différents (1) (Vollmann *et al.* (1997)) et d'autre part, elle permet à une entreprise de rendre le problème de planification plus simple à solutionner lorsque celui-ci est trop grand (2) (Simchi-Levi (2003)).

Concernant ce premier point (1) la planification au sein d'une entreprise se fait selon trois différents niveaux de planification (Vollmann *et al.* (1997)) : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Ces trois niveaux sont souvent représentés par une pyramide, qui symbolise d'une part le système hiérarchique, et d'autre part la variation du degré de détail de l'objet sur lequel porte les décisions (du plus détaillé en bas au plus global en haut) (figure 1).

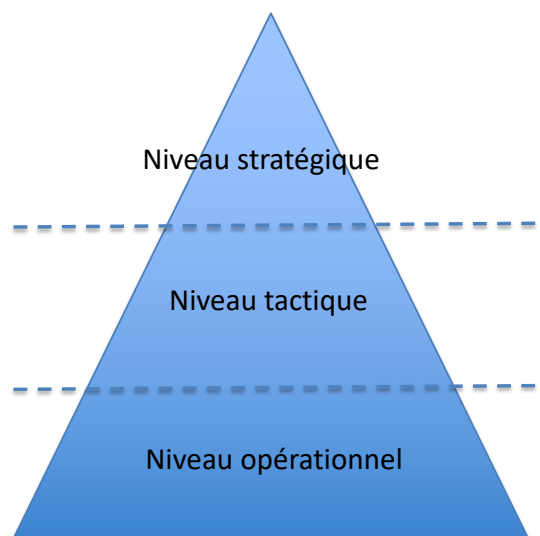


Figure 3. Pyramide des trois niveaux de planification

- Le niveau stratégique : le niveau stratégique concerne la direction. Ce sont des décisions stratégiques, à long terme (plus de 2 ans), prenant en compte beaucoup de ressources. On cherche à connaître le positionnement de l'entreprise face à un nouveau marché, on s'occupe de l'agrandissement de l'entreprise ou encore de l'abandon de la fabrication d'un produit par exemple. Les informations utilisées seront plutôt externes, diversifiées, très agrégées. L'environnement d'affaires occupe alors une place importante à ce niveau.
- Le niveau tactique : ce niveau entre plus dans les détails et offre à l'entreprise un impact à moyen terme (quelques mois à 2 ans). On peut alors préparer le budget le calendrier de production, le calendrier des ventes, etc. C'est le seul niveau où on peut optimiser et rendre cohérents le budget et la planification des opérations. On essaye de répondre aux questions « comment » faire et « quand » le faire.
- Le niveau opérationnel : ce niveau est encore plus précis puisqu'il permet le pilotage au jour le jour (les actions). Il s'agit là d'un plan d'action, spécifique à chaque service. L'horizon est généralement très court, de l'ordre de la journée à quelques semaines, tout dépendant des enjeux. On peut par exemple faire une demande pour de la matière première, utiliser les machines pour la fabrication en suivant le plan préparé par le responsable des opérations pour la journée ou la semaine.

Notre étude porte sur la planification tactique et opérationnel d'une entreprise de sciage. Plus précisément, la planification tactique peut être assimilée à un plan industriel et commercial (PIC) alors que la planification opérationnelle est assimilée à un plan directeur de production (PDP) (Arnold *et al.* 2008). Pour chacun de ces niveaux, les objectifs, les horizons, les niveaux de détails et les cycles de planification sont différents.

Le niveau tactique : le plan industriel et commercial (PIC)

Le plan industriel et commercial est établi en fonction du plan stratégique. Il définit pour chaque famille de produits les volumes devant être produits à chaque période, le niveau des stocks pour ces familles de produits, les différents équipements, le matériel et la main-d'œuvre qui seront utilisés à chaque période. Ce plan définit également la disponibilité des ressources nécessaires. Le niveau de détail est encore très macroscopique (le plan est encore agrégé) et l'horizon couvre généralement une période de 1 an à 18 mois. Grâce à différents indicateurs,

comme la précision des prévisions de ventes, le niveau des stocks ou la précision de la planification de la production période par période, des décisions peuvent être prises pour fixer les quantités liées aux ventes et à la production, famille par famille et période par période. Ces différents indicateurs font appel à diverses notions telles que les techniques de prévisions de la demande (moyennes simple et mobile, lissages exponentiels simple et double, etc. (Voir Stevenson et Beneditti, (2006)) pour plus de précisions sur ces techniques) et les stratégies de production.

La réalisation du PIC s'appuie donc d'une part sur les données du marché, et d'autre part sur les ressources disponibles dans l'entreprise (la capacité) pour respecter les objectifs financiers établis par le plan stratégique. La figure ci-dessous permet de mieux comprendre quels sont les intrants et les sortants liés au PIC.

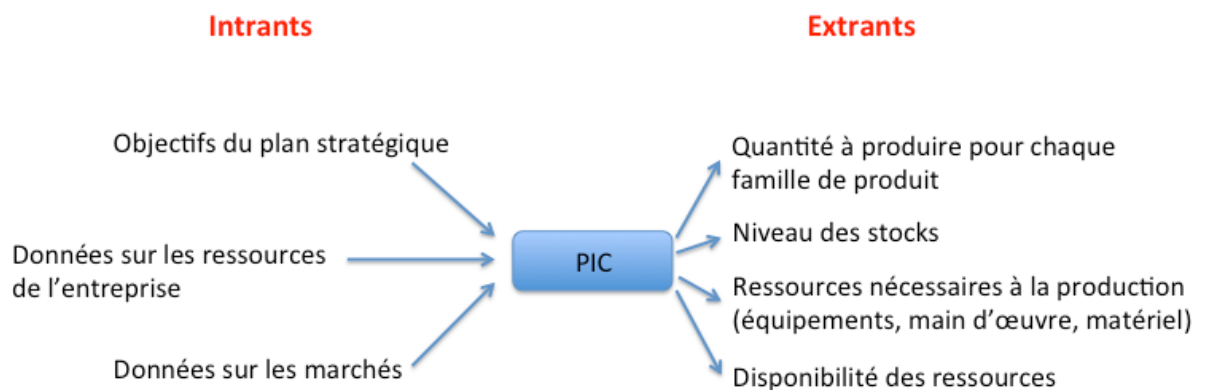


Figure 4. Les intrants et extrants du plan industriel et commercial

Le PIC se sert donc des objectifs du niveau stratégique et des données de marché et l'entreprise pour fournir une quantité de produits à réaliser famille par famille. En outre, les informations telles que le niveau des stocks, les ressources nécessaires à la production et leur disponibilité sont fournies.

Le niveau opérationnel : le plan directeur de production (PDP)

Le plan directeur de production est un outil important permettant de faire le lien entre les ventes d'un côté et la production de l'autre. Alors que le PIC va donner des objectifs de

production, le PDP va permettre la fabrication. Le PIC est alors désagrégé et les familles de produits laissent la place aux produits finis : le niveau de détail est plus accentué. Les quantités et les dates de production sont alors définies. Les objectifs majeurs du PDP, outre le fait de donner les informations nécessaires au bon déroulement du calcul des besoins nets, sont de maintenir le niveau de service client désiré, de faire le meilleur usage des matières, équipements et main d'œuvre, et de maintenir un niveau de stock préalablement évalué.

Comme il est possible de le voir sur la Figure 5, les intrants du PDP sont les suivants : le PIC, les prévisions de chaque produit fini, les limites de capacité, les stocks et les commandes.

Le PDP permettra alors en désagrégant les données du PIC l'obtention d'informations importantes concernant les plans détaillés de chaque produit, semaines par semaines. Ces informations seront nécessaires au calcul des besoins nets (CBN).

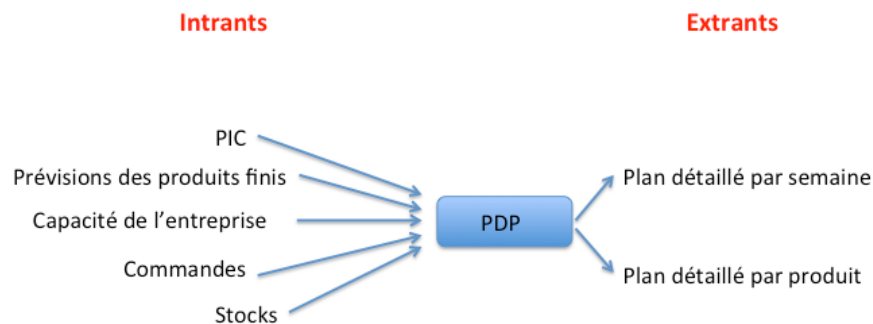


Figure 5. Les intrants et extrants du PDP

L'horizon de planification est égal, au moins, au délai cumulé d'achat et de fabrication (Vollmann *et al.* (1997)).

La réalisation du PDP se fait généralement de la manière suivante : Un premier PDP est réalisé puis comparé avec la capacité disponible. Cette comparaison ne pouvant se faire sur toutes les ressources, on ne prend en compte que les « goulots d'étranglement », c'est-à-dire les postes critiques. Il faut donc garder un équilibre entre la capacité et la charge.

Ce plan est revu chaque semaine (généralement), mais peut l'être aussi chaque jour ou chaque mois, suivant le type de produit, le type de marché ou le type d'entreprise. Toute

modification pouvant entraîner un surplus au niveau des coûts et un retard sur la livraison des commandes fermes, il est important de respecter une «fenêtre de temps» dans laquelle aucune modification n'est permise : on parle alors d'horizon «figé» ou «gelé», de un à plusieurs jours, voire semaines, où aucun changement n'est permis; au-delà de cet horizon, on parle d'horizon «négociable» qui s'étend généralement jusqu'à la fin du cycle de fabrication et d'approvisionnement, où seul le gestionnaire, après négociation, peut décider de changer le plan (les ressources sont réservées, mais il est plus facile de réaliser des changements); après cet horizon, on parle d'horizon «libre» où les changements sont permis.

Concernant le deuxième point (2) la planification hiérarchique de la production (HPP) (voir Bitran et Haas (1977)) est souvent utilisée et consiste à planifier étape par étape, de façon hiérarchique. Cette méthode est connue entre autres pour simplifier un problème trop complexe à résoudre en proposant de le résoudre de manière agrégée, puis d'utiliser le résultat pour résoudre un problème plus détaillé (Hax et Meal (1984); Schneeweiss (2003)). Une des principales tâches de la planification hiérarchique de la production est de proposer des plans stables, robustes et faisables. De nombreuses études utilisent cette méthode pour planifier la production, à différents niveaux de planification (McKay *et al.* (1995)).

Cependant, une des principales difficultés réside dans le fait d'être capable de concevoir un processus de planification intégrant ces deux niveaux de décision, tout en garantissant une bonne qualité dans la planification. Les échelles de temps entre le niveau tactique et le niveau opérationnel ne sont pas les mêmes. Typiquement, des données mensuelles sont utilisées pour la planification tactique alors que le niveau opérationnel a besoin de données journalières ou hebdomadaires. De plus, le niveau tactique travaille parfois avec des familles de produits alors que le niveau opérationnel travaille avec des produits individuels. Cette «vision macro» au plan tactique est nécessaire pour plusieurs raisons : d'une part, la connaissance des données n'est pas suffisamment grande et seules des données agrégées sont disponibles et d'autre part, le problème doit être simplifié pour être résolu dans sa globalité. Enfin (Simchi-Levi (2003)) montre qu'il est impossible d'avoir un niveau de détail poussé pour chaque niveau de planification. La quantité de données à traiter serait non seulement trop grande, mais aussi inutile pour ce que l'on désire faire ; l'agrégation des données est donc primordiale.

Aghezzaf *et al.* (2011) utilisent une approche de planification hiérarchique de la production pour résoudre un problème de planification dans un environnement à deux niveaux, composé de produits semi-finis (que les auteurs considèrent comme le niveau agrégé) et de produits finis (niveau désagrégé). Ils utilisent une approche de planification en deux étapes pour obtenir un plan de production pour les produits finis pour chaque période. Utilisant les travaux de Génin (2003) sur la stabilité et la robustesse des plans tactiques et les travaux de Ortiz *et al.* (2004) sur la désagrégation de plans tactiques en PDPs, Thomas *et al.* (2012) ont proposé une méthodologie pour désagréger un plan tactique et ont montré entre autres que cette désagrégation permettait une stabilité du plan opérationnel sous certaines conditions et ce, au prix d'ajustement par les stocks. Le plan tactique fournit des informations agrégées : famille de produits par mois. Un premier modèle permet de transformer ces familles de produits par mois en nombre d'item par mois. Une heuristique utilise ensuite ces données pour fournir un plan opérationnel stable (nombre d'item par semaine). Ortiz et Albornoz (2012) proposent une méthodologie basée sur le concept de HPP permettant une désagrégation d'un plan mensuel de familles de produits en plan hebdomadaire de produits finis. Le cas étudié concerne une entreprise qui produit des sacs réutilisables au Chili et au Pérou. La désagrégation se fait grâce à plusieurs modèles d'optimisation imposant des contraintes pour garder la cohérence du plan réalisé. Vogel *et al.* (2016) comparent deux approches : hierarchical production planning versus integrated production planning. Ils partent du principe que (1) certaines raisons justifiant l'utilité d'une approche hiérarchique pour planifier la production à différent niveau n'ont pas lieu d'être et que (2) optimiser une série de sous-problème peut conduire à une sous-optimalité du problème général. Ils proposent ainsi deux modèles, un modèle hiérarchique prenant en compte un niveau agrégé et un niveau désagrégé et un modèle intégré combinant ces différents niveaux. Dans leur contexte, il montre que l'approche intégrée délivre de meilleur résultat ; et que le temps de calcul nécessaire, bien que plus long que pour le modèle hiérarchique est acceptable.

Dans notre étude, nous utilisons donc la planification hiérarchique d'une part car les fenêtres de temps utilisées sont différentes à chaque niveau de planification, et d'autre part pour simplifier un problème qui ne peut pas être résolu de manière centralisée (Gaudreault *et al.* (2009); Moyaux *et al.* (2006)).

2.1.2. Autres aspects reliés à la décomposition du problème de planification

Au sein d'une entreprise, ou dans une chaîne de valeur, il existe de nombreux acteurs ayant leurs propres objectifs; ceux-ci peuvent alors entrer en conflit (Stevenson *et al.* (2006)). Les relations entre acteurs peuvent aussi changer dynamiquement. Il apparaît alors important de prendre en compte lors de la planification cet environnement d'affaires. Il existe différentes méthodes de planification autre que la planification hiérarchique, prenant en compte le contexte dans lequel l'entreprise se trouve. Il s'agit de la planification centralisée et de la planification décentralisée. Les prochaines sous-sections parleront de ces planifications

2.1.2.1. La planification centralisée

D'après Blackstone (2008), la planification consiste à « définir des objectifs et à choisir les différentes façons d'utiliser les ressources de l'entreprise pour parvenir à la réalisation de ces objectifs ». La planification centralisée repose, comme son nom l'indique, sur un seul coordinateur. Son rôle est d'établir un plan centralisé qui guide les planificateurs de chaque sous-système.

Le planificateur construit le plan global, puis le décompose en sous-plans synchronisés et le donne aux autres agents pour l'exécuter (figure 6 ci-dessous)

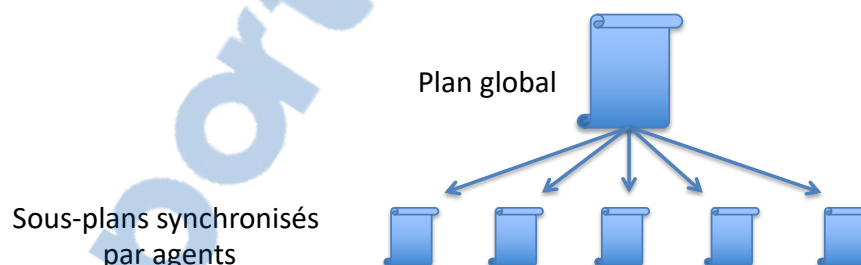


Figure 6. Création de sous plans synchronisés pour chaque agent

La planification centralisée peut cependant être difficile à mettre en place étant donné l'environnement d'affaires. Par exemple, dans la filière bois, il est impossible de mettre en œuvre ce type de planification du fait de la complexité de chaque entité (Gaudreault *et al.*

(2009)). Chaque activité du processus de transformation du bois a besoin de modèle spécialisé prenant en compte leur propres contraintes qui sont très différentes d'une activité à l'autre.

2.1.2.2. La planification distribuée

Comme pour la planification centralisée, la planification distribuée consiste en la construction d'un plan et en son exécution. En revanche, il peut y avoir distribution de la construction du plan, de son exécution, ou des deux. Il existe deux variantes dans cette approche : la planification distribuée pour des plans centralisés et la planification distribuée pour des plans distribués.

La planification distribuée pour des plans centralisés :

L'objectif est la résolution d'une tâche ou d'un problème. Cette tâche est divisée en sous-objectifs et assignée à différents agents. Chaque agent doit être en mesure de résoudre la sous-tâche qui lui a été confiée de manière autonome. Une synchronisation est ensuite faite pour élaborer un plan global et donc réaliser la tâche. L'objectif est ici commun et il y a collaboration entre les différents agents. (Figure 7)

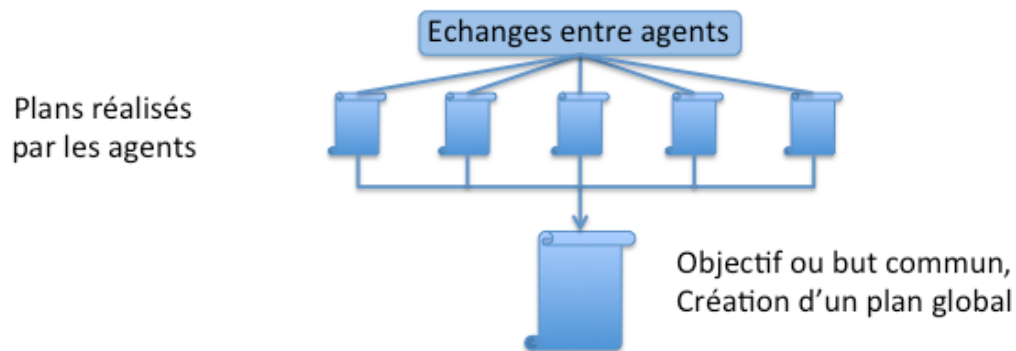


Figure 7. Planification distribuée pour des plans centralisés

L'avantage d'une telle planification réside en l'échange qui est fait entre les différents agents puisque le plan global peut tenir compte des sous-plans de chaque agent. La synchronisation n'est par ailleurs plus faite par un seul agent.

Certains travaux (Lesser (1981) et Smith (1981)) montrent toutefois que la résolution distribuée de problèmes peut s'avérer trop restrictive, car les hypothèses faites ne prennent pas en compte les conflits potentiels entre agents. Or, dans le cas d'une entreprise, lors de la planification, de nombreux départements entrent en conflits, et bien que l'objectif général soit commun, les sous objectifs de chaque département sont souvent contradictoires : augmenter la satisfaction client pour l'un, baisser les stocks de produits finis et donc les coûts de stockage pour l'autre (Arnold *et al.* (2008), Simchi-Levi (2003)), etc. De plus, il existe un coût de communication, étant donné les échanges nécessaires entre les agents. On peut également soulever l'idée qu'il n'y a pas de garantie de convergence étant donné les sous objectifs de chaque agent. Cela est encore plus vrai dans une chaîne de valeur où les différents agents peuvent être assimilés à différentes entreprises de la chaîne. Là, les convergences peuvent être difficiles à obtenir. Prenons pour exemple la chaîne de valeur forestière, décrite par D'Amours *et al.* (2009) dans le manuel de la foresterie comme allant de l'approvisionnement à la livraison du produit. Chaque organisation (fournisseurs de billes, transporteurs de bois, fabricants, distributeurs et revendeurs) qui compose cette chaîne a ses propres buts. Ceux-ci peuvent être contraires et nécessiter beaucoup de coordination et d'échanges pour arriver à « satisfaire » un but global. La coordination sera d'ailleurs abordée dans la prochaine section.

La planification distribuée pour des plans distribués :

Dans ce cas, la création du plan et l'exécution sont distribuées. Il y a plusieurs planificateurs et plusieurs exécutants. Le plan global n'est pas entièrement connu par les agents. Deux alternatives sont possibles : on parle de planification orientée tâche (il existe un but global) ou de planification orientée agent (il n'y a pas de plan ou de but global).

De la même façon que pour la planification centralisée pour les plans distribués, il existe des mécanismes de coordination permettant de gérer les conflits : la synchronisation distribuée de plans, la fusion de plans, la négociation et la convergence de plans en sont des exemples.

Le spectre d'application de ces méthodes de planification est large et touche aussi bien la logistique, le secteur de la fabrication manufacturière, l'informatique et l'intelligence artificielle. Durfee (2001) donne plusieurs exemples concernant la planification distribuée pour

des plans centralisés ou distribués : la collaboration entre les différents agents est mise en valeur pour la planification logistique et la planification de missions pour des véhicules sans pilote.

2.1.3. La coordination des activités de production

Le système de production est de plus en plus complexe notamment en raison de la présence de nombreux acteurs. Le risque et l'incertitude ne sont alors plus liés seulement aux variations de prix, aux délais de livraison ou encore à la demande volatile, mais aussi au nombre d'acteurs dans cette chaîne (Pfohl, Köhler et Thomas (2010)). Or chaque acteur doit œuvrer dans le même sens et avoir un but commun : la performance de la chaîne dans sa globalité, tout en maintenant ses objectifs personnels. On parle alors de travailler de façon organisée ou coordonnée. Bien que dans les sections précédentes, nous avons parlé de planification des opérations de production et que le fait de planifier était déjà être une forme de coordination — on peut notamment mentionner Mohammadzadeh et Zegordi (2016) qui ont développé des modèles de planification dans le but d'améliorer la coordination dans une chaîne d'approvisionnement — il devient nécessaire de mettre en place des mécanismes de coordination au sein de la chaîne de façon à assurer un meilleur arrimage des objectifs locaux et globaux tout en optimisant la performance globale de la chaîne de valeur.

2.1.3.1. Définition de la coordination

Il y a de nombreuses définitions pour la coordination et il est très difficile de la définir précisément, en incluant tous les termes qui s'y rattachent. Arshinder *et al.* (2011) préfèrent donc définir ce qu'est le manque de coordination en s'appuyant sur les travaux de Ramdas et Spekman (2000). Et les conséquences sont les suivantes : prévisions imprécises, faible capacité d'utilisation, inventaire excessif, service client inadéquat, coûts d'inventaire élevés, augmentation du temps de réponse au client, faible qualité, etc.

Néanmoins, une bonne définition de ce qu'est la coordination est « l'action de gérer les dépendances entre chaque entité et de regrouper les efforts de chacune d'entre elles pour réaliser un but commun » (Malone et Crowston (1994)).

À la question « pourquoi coordonner ? », une réponse assez simple pourrait être la suivante : on coordonne pour faciliter les échanges de biens et de services et obtenir ainsi une meilleure performance globale de la chaîne.

On voit souvent dans la littérature que coordonner permet une amélioration de la performance de la chaîne de valeur entière (Xu *et al.* (2016), Li et Li (2016)). Mais quels sont les bénéfices ? Fisher *et al.* (2000) montrent dans leurs travaux que ces bénéfices sont quantifiables et portent par exemple sur une élimination des excès de stock, une réduction des temps de fabrication, une augmentation des ventes... Tout étant intimement lié, cela permet aussi une augmentation de la satisfaction client et une amélioration à différents niveaux pour différentes fonctions (ingénierie, finances, production...).

(Arshinder *et al.*, 2011) donnent quelques perspectives en citant plusieurs auteurs dont les travaux portent sur la coordination de la chaîne de création de valeur. On peut ainsi voir qu'il est possible pour deux entreprises indépendantes de partager des ressources pour satisfaire la demande client ; on parle notamment de coopération (Narus & Anderson, 1996), de collaborer dans le but de réaliser une planification conjointe, un développement de produit conjoint ou de partager des informations (Skjoett-Larsen, 2000), ou de planification conjointe dans un contexte de prise de décisions conjointes qui minimisent les coûts d'opérations (Hill & Omar, 2006).

Une des manières de coordonner et d'arriver à un but final commun permettant une amélioration des bénéfices est donc d'apporter et d'utiliser des mécanismes de coordination. Ces mécanismes de coordination facilitent la communication, le partage des informations, des ressources ou des bénéfices et donc la collaboration. Min *et al.* (2005) parlent d'ailleurs de collaboration lorsqu'il y a échange d'informations pour l'élaboration conjointe de plans, le contrôle conjoint de la gestion et de l'exécution d'une activité. Frayret *et al.* (2004) donnent plusieurs catégories de mécanismes de coordination pour des systèmes distribués dans le but de faciliter la coordination de la production tel que la coordination par médiation, par exemple.

2.1.3.2. Les mécanismes de coordination

Les liens entre les différents acteurs de la chaîne de création de valeur peuvent donc être gérés par des mécanismes de coordination. Quelques grands types de mécanismes de coordination proposés dans la littérature englobent les contrats, la technologie de l'information,

le partage d'informations et la prise de décision conjointe, auxquels on pourrait y rajouter le partage des coûts et des bénéfices. Concernant les contrats, (Arshinder *et al.* 2011) en mentionnent différents types ainsi que leur définition. (Audy *et al.* 2012) utilisent les technologies de l'information pour partager l'information dans les entreprises ou pour optimiser le transport entre différentes usines. Concernant le partage d'information, plusieurs études ont montré l'intérêt que peut avoir une entreprise à partager son information. En particulier, Ketzenberg *et al.* (2013) montrent que les bénéfices d'une organisation peuvent augmenter de 30% en partageant l'information. De leur côté, Bian *et al.* (2016) ont montré que le partage d'information permettait une meilleure synchronisation de la planification avec notamment des gains en termes de stocks de sécurité. En ce qui concerne la prise de décision conjointe, c'est un mécanisme qui permet de prendre une décision ou de saisir une opportunité en groupe, au profit du groupe. On peut voir le processus de prise de décision se limitant au seul fait de prendre une décision, ou comme le préconise Turban *et al.* (2011) de s'intéresser à l'ensemble du processus qui aboutit à une prise de décision. Si l'on s'intéresse à ce processus, on peut voir que la prise de décision en groupe fait intervenir différentes notions comme la communication, le partage et enfin la collaboration. Finalement, la collaboration entraîne forcément des coûts et des bénéfices. Il est donc nécessaire d'avoir des méthodes ou mécanismes permettant de partager ces coûts et bénéfices équitablement lorsque plusieurs entreprises sont impliquées. Ces bénéfices sont quantitatifs et qualitatifs (Audy *et al.* (2012)). Le qualitatif est souvent difficile à partager contrairement au quantitatif. Différents travaux portent sur le partage des bénéfices. On peut mentionner entre autres (Audy *et al.* 2012) qui ont adapté cinq mécanismes de coordination de Frayret *et al.* (2004) en ajoutant un partage de bénéfices.

2.1.4. Les modèles tactique et opérationnels pour la planification de la production dans un contexte divergent avec coproduction

Un processus de production est dit *divergent* lorsque d'une même matière première sont fabriqués plusieurs produits destinés au client, ce qui les oppose aux processus plus traditionnels où avec plusieurs composants un seul produit est fabriqué. De plus, lorsque ces produits sont fabriqués en même temps, on parle de *coproduction*. De nombreuses industries présentent ce type de divergence dans leur processus de production.

Un premier exemple d'industrie devant gérer des processus divergents avec coproduction est le secteur alimentaire. Ahumada et Villalobos (2009) ont répertorié plus de cinquante modèles qui ont été développés, utilisés ou testés pour planifier toutes les activités de la chaîne d'approvisionnement alimentaire de la ferme à la table (Aramyan *et al.* (2006)). Ferrer *et al.* (2008) ont réalisé un modèle considéré comme étant représentatif de la planification des récoltes. Ce modèle prend en compte les trois différents niveaux (stratégique, tactique et opérationnel). Il s'agit d'un programme linéaire en nombres entiers permettant de planifier de façon optimale les récoltes de raisins pour faire du vin. Le modèle prend en compte la quantité des grappes à récolter par période, le nombre de travailleurs requis, le coût des opérations de récolte et les pertes dues aux retards de récoltes. La contribution majeure de ce modèle est de pouvoir quantifier la perte de qualité due notamment aux retards des récoltes dans une fonction-objectif. (Allen et Schuster, (2004)) ont créé un modèle de programmation non linéaire à un niveau stratégique pour déterminer le taux optimal de récolte de raisins et ainsi éviter le surinvestissement en capacité (trop de capacité). Ce modèle non linéaire prend en compte les changements climatiques : c'est là sa plus grosse contribution. Caixeta-Filho *et al.* (2002) ont réalisé un modèle à un niveau tactique permettant la planification de la production de fleurs dans des serres au Brésil. Le modèle décide du nombre de fleurs à produire dans chaque serre. Ce modèle, basé sur la programmation linéaire, a comme objectif de satisfaire la demande en maximisant le revenu. Ce modèle est intégré à un logiciel et est utilisé par une compagnie. Il a permis une augmentation de 32% du profit de cette entreprise. Jiao *et al.* (2005) ont réalisé un modèle à un niveau tactique permettant de planifier la récolte de sucre dans des champs de cannes à sucre en Australie. Ils utilisent la programmation linéaire pour maximiser le sucre contenu dans les cultures. Une des contraintes est l'équité entre les différents membres : ne pas récolter nettement plus chez l'un que chez l'autre. Le modèle peut prédire les quantités de sucre contenu dans les champs à l'aide d'analyses statistiques. Ce modèle a donné place à un logiciel qui est aujourd'hui utilisé dans de nombreuses régions en Australie. Maatman *et al.* (2002) ont développé un modèle stochastique pour planifier la production, la consommation, la vente, le stockage et l'achat de cultures. Ce modèle prend en considération la météo (la pluie qui peut être une source de problème). Le but est de minimiser les coûts de stockage. Selon les chercheurs, c'est une méthode simple à appliquer. Bien que ce modèle soit conçu pour une ferme, la coordination est présente aux différentes interfaces puisque l'on prend en compte la

production, le stockage, la vente et l'achat. Recio *et al.* (2003) prennent en compte deux niveaux de planification : le niveau tactique et le niveau opérationnel. Ils présentent un programme en nombres entiers au sein d'un système d'aide à la décision. On peut retrouver au sein de ce système les différentes activités des fermiers comme la sélection de cultures, la planification, les analyses d'investissements... Le but de ce modèle est la minimisation des coûts. Ce système est utilisé en Espagne.

Un autre exemple est l'industrie pétrolière. Pinto *et al.* (2000) ont proposé une vue d'ensemble de la programmation linéaire et des modèles de programmation non linéaire, ainsi que des outils commerciaux créés pour soutenir la planification et la planification dans les raffineries de pétrole. Taskin et Unal (2009) ont étudié le processus de fabrication de vitres en « float-glas » (procédé offrant une vitre plate parfaite) et développé un système d'aide à la décision au niveau tactique pour une entreprise en Turquie. Ils ont également mentionné plusieurs travaux proposant des modèles pour mieux planifier la production de cette industrie (Liu et Sherali (2000), Crama *et al.* (2001)) et les systèmes de coproduction en général (Bitran et Leong (1992), Bitran et Gilbert (1994), Joly *et al.* (2002). Enfin, Kallrath (2002) a étudié les approches de planification et d'ordonnancement pour le cas de l'industrie chimique.

Enfin, notre cas d'étude porte sur l'industrie du bois d'œuvre, possédant également un flux de produits divergent avec coproduction. L'industrie du bois est représentée par différents secteurs, allant de l'approvisionnement en bois à la livraison du produit final au client D'Amours *et al.* (2009). Il existe de nombreux modèles, à différents niveaux de planification, pour planifier ces opérations. Ces modèles seront présentés à la section 2.1.5.

2.1.5. Les politiques d'acceptation des commandes

L'objectif d'une bonne planification est de pouvoir délivrer le bon produit au bon moment au bon client final. Dans ce processus, un paramètre important entre en compte : les politiques d'acceptation des commandes. Les politiques d'acceptation des commandes définissent les règles utilisées pour accepter ou refuser une commande en fonction de la disponibilité du produit et de la capacité de production de l'entreprise. Les stratégies les plus connues sont l'ATP (Available-to-promise) et le CTP (Capable-to-promise), voir Blackstone (2008). Slotnick (2011) a proposé une revue de la littérature sur les politiques d'acceptation et

l'ordonnancement des commandes. L'étude se concentre sur l'équilibre entre les revenus et les coûts de traitement de l'acceptation d'une commande et comment les planifier. De son côté, De Man *et al.* (2017) proposent d'évaluer l'impact des politiques d'acceptation des commandes sur les performances de l'entreprise plutôt que de se focaliser sur le développement de modèles mathématiques.

Bien que l'utilisation de telles politiques d'acceptation des commandes soit très bien connue dans le domaine manufacturier traditionnel, ces mêmes politiques ne sont pas si triviales lorsque le processus est divergent avec de la coproduction, comme c'est le cas pour l'industrie forestière. Quelques études existent telles que Kilic *et al.* (2010) qui ont proposé une méthode à deux bornes pour l'acceptation et le rejet des commandes dans l'industrie alimentaire. Ils acceptent chaque commande lorsque le niveau de ressource est suffisamment élevé. Si le niveau de ressources est bas, accepter une commande n'est autorisée que si des commandes futures de plus grande valeur ne sont pas possibles. Ils comparent la méthode à une approche First Come First Served (FCFS). Azevedo *et al.* (2012) ont proposé un modèle d'acceptation des commandes pour l'industrie canadienne du bois d'œuvre résineux, mais seulement pour un environnement de production sur stock. Islam (2013) a étudié les méthodes de planification de la production et les politiques d'acceptation des commandes pour les scieries. Il a développé un modèle de programmation en nombres entiers mixte qui incluait le calcul de l'ATP et la planification de la production tout en considérant deux types de demande : le marché contractuel et le marché au comptant.

2.1.6. Environnement d'affaires et importance du contexte de marché

La planification des opérations peut se faire pour différents environnements d'affaires, par exemple un marché composé essentiellement de produits de commodité ou inversement un marché composé de produits spéciaux. Il en va de même pour un marché présentant une saisonnalité dans les prix de vente des produits plus ou moins forte ou encore un marché présentant un volume de demande variable. Lors de cette planification, il est donc important de tenir compte de l'environnement d'affaires de l'entreprise et de connaître au mieux son environnement interne et son environnement externe. La connaissance de ces environnements influe sur les décisions d'affaires et favorise la croissance de l'entreprise

L'environnement interne est le plus « facilement » contrôlable. En effet, il s'agit de connaître les forces et les faiblesses de sa propre entreprise ; mais cela peut se révéler difficile, dans certains cas. Il est cependant possible d'analyser avec objectivité chaque fonction de l'entreprise, comme le marketing, les finances, les ressources humaines, la production, la recherche et le management. Les forces et les faiblesses sont alors dégagées pour chacune de ces fonctions.

L'environnement externe apparaît clairement comme étant le plus difficile à appréhender : l'entreprise n'a en général aucun contrôle dessus. Il existe différents modèles permettant de connaître l'environnement externe de l'entreprise et donc d'en tenir compte lors de la planification de processus. On peut mentionner le modèle PEST (Politique, Economique, Social, Technologique), le modèle CFMIP (Concurrence, Fournisseur, Marché, Intermédiaires, Publics) et les cinq forces de Porter. Le modèle PEST permet d'évaluer le milieu dans lequel évolue l'entreprise. Il prend en compte l'environnement politique, économique, social et technologique. Le modèle CFMIP est moins « macro ». Il montre les interactions de l'entreprise avec différentes entités. Il considère les éléments suivants : la concurrence, les fournisseurs, le marché, les intermédiaires et les publics. Pour sa part, Porter (2008) place concurrence de l'entreprise au centre de son modèle et montre que la profitabilité dépend de cinq forces (le pouvoir de négociation des fournisseurs, le pouvoir de négociation des clients, la concurrence entre entreprises du secteur, les produits de substitution et la menace de nouveaux entrants). Plus ces cinq forces représentent une menace pour l'entreprise, plus il sera difficile pour celle-ci de se mettre en avant face à la concurrence. Le gestionnaire doit alors décider du ou des modèles à employer, en fonction du type d'entreprise.

Nous avons donc vu que lors de la planification des opérations, certains paramètres étaient importants et avaient un impact sur les performances d'une entreprise en termes de revenus générés. Nous avons également vu l'importance de l'environnement d'affaire dans la planification des opérations. Dans cette thèse, nous souhaitons être capable d'évaluer les différentes manières de planifier (stratégies de pilotage) dans plusieurs environnements d'affaires. Nous utilisons donc pour cela la simulation. La prochaine section présente donc ce qu'est la simulation et ce qu'elle permet de faire.

2.2. La simulation

La simulation est le processus de conception d'un modèle à partir d'un système réel dans le but de mener des expérimentations pour étudier le comportement du système ou pour évaluer des stratégies de pilotage de ce système (Shannon (1975)). La simulation est généralement utilisée pour soutenir les décideurs dans leurs prises de décisions. De manière générale, la simulation apparaît intéressante lorsque le problème est trop complexe, incertain ou dynamique. Les applications de la simulation sont vastes, telles que la finance, la maintenance, la production, la santé, la logistique, etc. Nous nous limiterons ici aux applications à caractère industriel, telles que la simulation de processus industriel ou de chaînes de valeur dans le secteur manufacturier. La simulation regroupe le processus de modélisation, qui s'apparente à la construction d'un modèle où des informations précises sur le système physique réel sont collectées, organisées et représentées au sein de ce modèle, ainsi que le processus de simulation qui concerne la réalisation de l'expérimentation. Il devient alors possible d'évaluer la performance d'une entreprise au travers de différents scénarios permettant de faire varier les conditions (contexte d'affaires, paramètres, etc.)

La simulation est donc un outil puissant permettant de traiter des problèmes analytiquement impossible ou très difficile à résoudre (Law (2007)). De plus c'est un outil pouvant prédire l'avenir dans le sens où de multiples possibilités faisant varier un grand nombre de paramètres peuvent être testées sans affecter le système réel. Le risque financier est ainsi réduit. La simulation permet même de tester quelles pourraient être les performances d'un système qui n'existe pas. De plus, dans la simulation, les fenêtres de temps peuvent être contrôlées (Shannon (1975)) ainsi que les conditions expérimentales (Law (2007)).

Bien que la simulation offre de nombreux avantages, la création d'un modèle, fidèle à la réalité, peut coûter très cher. De très bonnes connaissances en simulation et sur le système lui-même sont souvent nécessaires, faisant appel à de la main-d'œuvre spécialisée suivant le degré de détail que l'on souhaite obtenir dans le modèle de simulation. Par ailleurs, il est reconnu que la simplification faite lors de l'élaboration du modèle de simulation peut poser des problèmes. Il est d'ailleurs très difficile d'en mesurer l'impact (Shannon (1975)).

Les étapes d'une étude de simulation regroupent quatre grandes phases : la planification du projet de simulation (1), qui définit le problème, les objectifs et permet de récolter les données ; La modélisation du modèle (2), qui est une simplification du système existant. Le type de modèle, et son niveau de détail sont à décider ; Les phases de vérification et de validation (3) qui d'après Sargent (2013) servent à respectivement vérifier qu'il n'y a pas d'erreur de conception ou d'exécution du modèle et que le modèle représente fidèlement le système réel ; Et enfin la phase d'application (4) où des expérimentations sont réalisées. Plusieurs répliques par scénarios sont réalisées dans le but d'obtenir un intervalle de confiance significatif et des résultats sont analysés.

En fonction de l'environnement, du système étudié, des hypothèses de simplification, un modèle de simulation peut être statique ou dynamique. Un modèle statique donne l'état d'un système à un instant donné. Le temps n'est pas pris en compte et n'a aucun impact. Un modèle dynamique prend en considération le temps qui s'écoule. Ce modèle peut alors être dynamique continu où le temps qui s'écoule amène un changement d'état du système continu (modèle représentant l'écoulement d'un fluide, une réaction chimique, etc.). Pour modéliser des systèmes dynamiques continus, on utilise généralement des équations différentielles ordinaires ou algébriques pour connaître l'état du système à un moment donné (Cellier et Kofman (2006)). Enfin, le modèle peut être dynamique discret, où le temps est pris en compte, mais ce sont des événements qui viennent perturber l'état du système. On parle alors de simulation à événements discrets.

La simulation à événements discrets, contrairement à la simulation dans un environnement statique, permet de prendre en considération le temps. Ainsi, à chaque événement est associé un changement d'état dans le système. Ce type de simulation est donc largement utilisé dans l'industrie (Ingalls (2001)). Le temps y est représenté par une horloge et un événement survient à une date et à une heure précise, de façon prédite ou aléatoire. Dans le secteur forestier, la simulation à événements discrets est également beaucoup utilisée depuis longtemps (1972) où Johnson *et al.* (1972) ont étudié les systèmes de récolte du bois. Plus récemment, Opacic *et al.* (2017) ont proposé une revue de littérature sur les différentes applications de la simulation à événements discrets dans le secteur forestier montrant notamment que la simulation à événements discret était bénéfique pour comparer différentes

configurations, politiques mises en place pour améliorer la productivité. De nombreuses études utilisent la simulation à événements discrets pour mesurer des performances dans un environnement où l'état du système change perpétuellement lorsqu'un événement se produit de façon aléatoire ou non (arrivée d'une commande, bris d'une machine, etc.). Une bibliographie plus approfondie est présentée dans le Chapitre 4, énumérant notamment quelques études utilisant la simulation à événements discrets.

2.3. Les modèles de planification dans le secteur forestier

Nous avons montré dans le chapitre 1 en quoi l'environnement des entreprises de sciage était particulier. Pour rappel, la production du bois d'œuvre comporte trois sous-processus réalisés dans des installations quasi indépendantes : le sciage, le séchage et le rabotage. Chaque opération est différente et possède ses propres contraintes et caractéristiques (pour plus d'informations, voir Gaudreault *et al.* (2010)). La planification de la production est un véritable challenge du fait des caractéristiques particulières de cette industrie. En effet, d'une même matière première plusieurs produits finis sont obtenus (processus divergent) et cela de manière simultanée (co-production) (voir Öner et Bilgiç (2008)). L'impact de ce flux divergent est très grand et touche les produits intermédiaires au sciage, au séchage et enfin au rabotage, ce qui fait exploser le nombre de produits finis issus d'un même billot. De plus, c'est un marché avec une importante saisonnalité des prix de vente (Marier *et al.* (2011)). Le marché de bois d'œuvre en Amérique du Nord est un marché de commodité, dont les produits doivent répondre aux critères de la NLGA. Le prix fluctue donc grandement selon l'offre et la demande.

Les modèles tactiques utilisés sont donc spécialisés pour tenir compte de ces contraintes. Ils permettent également d'établir des cibles d'inventaire (pour quels produits bâtir des stocks) et le moment où ces quantités devraient être mises en vente pour profiter des meilleurs prix. Les contraintes et coûts liés au stockage doivent être pris en compte, de même que les contraintes liées aux contrats. Selon le volume de demande et le degré de fluctuation des prix, la stratégie à employer pourra varier grandement (Marier *et al.* (2014a)). Il existe de nombreux modèles de planification au niveau tactique. On peut mentionner entre autres celui de Singer et Donoso (2007), qui ont proposé un modèle d'optimisation pour la planification de la production dans une scierie chilienne, ou encore Marier (2011, 2014a) qui ont proposé un modèle tactique MIP

intégrant les opérations (sciage, séchage et rabotage), les ventes et la distribution (Sales and Operations Planning). Le plan annuel créé permet de maximiser le profit.

Concernant la planification opérationnelle, elle permet de définir les opérations exactes à réaliser en prenant en compte les commandes réelles et l'information fournie par le niveau tactique. Le niveau tactique sert donc de cadre, permettant au niveau opérationnel de réaliser sa planification à court terme tout en tenant compte des visions futures. Il existe également différents modèles pour ce niveau de décision permettant de planifier chacune des trois opérations de production de bois d'œuvre. Au sciage, ces modèles permettent en général la sélection du bon patron de coupe pour générer un meilleur volume de bois scié ou pour générer un meilleur rendement matière ou encore pour favoriser la coupe d'un produit en particulier. Le patron de coupe représente une façon de débiter la bille. Il en existe une multitude, tenant compte des caractéristiques naturelles de la bille. Maturana *et al.* (2010) répertorient quelques-uns de ces modèles tels que ceux de Occeña et Schmoltdt (1996); Todoroki et Rönnqvist (1999); Winn *et al.* (2004). Au séchage, plusieurs modèles existent tels que ceux de Yaghubian *et al.* (2001) qui ont développé un modèle de planification prenant en compte la possibilité d'acheter le bois sec ou de le sécher, ou encore Marier *et al.* (2016) qui a proposé un MIP générant dynamiquement des patrons de chargement des séchoirs. Un patron de chargement correspond à une façon de remplir un séchoir, tenant compte des essences (qui ne séchent pas à la même vitesse), des dimensions et des caractéristiques propres du séchoir. Au rabotage, Gaudreault *et al.* (2010) ou encore Marier *et al.* (2014b) ont proposé des modèles de planification permettant de maximiser la valeur produite en tenant compte de la demande et de minimiser les retards.

Dans cette thèse, nous souhaitons réaliser une plateforme de simulation intégrant les niveaux tactique et opérationnel et être capable, en utilisant cette plateforme de recommander une stratégie de pilotage adaptée au contexte de marché de l'entreprise.

Dans ce chapitre 2, il a été présenté différents concepts vus tout au long de ce doctorat. Des définitions et un état de l'art des travaux concernant toutes ces notions ont été donnés. Nous sommes revenus sur les particularités du secteur forestier montrant qu'il était difficile mais nécessaire d'établir des stratégies de pilotage adaptées à l'environnement d'une entreprise de sciage. Le chapitre suivant présentera donc les objectifs de ce doctorat ainsi que la méthodologie utilisée pour y arriver.

Chapitre 3 : Méthodologie

3.1. Rappel des objectifs

À titre de rappel, l'objectif général de cette thèse est de pouvoir évaluer et comparer des stratégies de pilotage aux niveaux tactique et opérationnel pour la production de bois d'œuvre, tout en tenant compte du contexte de marché de l'entreprise ainsi que de ses paramètres de production.

Cet objectif général a amené l'établissement de quatre objectifs spécifiques. Le premier objectif spécifique (1) visait à développer une plateforme de simulation permettant la modélisation du processus de planification et de production du bois d'œuvre. Ainsi, en utilisant le logiciel de simulation à événement discrets Simio, un modèle de simulation, simulant la génération, le traitement et la vente des commandes a été développé. Couplé à ce modèle de simulation, un module de planification de la production a été développé. Il est responsable de la gestion des stocks et de la génération des plans de production. Le deuxième objectif spécifique (2) consistait à utiliser cette nouvelle plateforme pour pouvoir évaluer des politiques d'acceptation des commandes dans un environnement où le flux de produits est divergent et où il y a un phénomène de co-production observé au niveau opérationnel. Bien que les politiques d'acceptation des commandes aient été largement étudiées dans un contexte manufacturier traditionnel, le choix d'une politique plutôt qu'une autre est loin d'être trivial dans un environnement de co-production avec processus divergents. Le troisième objectif spécifique (3) consistait à pouvoir évaluer la coordination entre les différentes activités du processus de transformation de bois d'œuvre. Le niveau opérationnel est alors décentralisé et nous utilisons des mécanismes de coordination pour coordonner la planification. Enfin, le quatrième objectif spécifique (4) consistait à pouvoir mesurer l'effet d'échanges d'information du niveau tactique au niveau opérationnel de façon à générer un meilleur revenu de ventes. Le niveau de planification tactique est alors pris en compte dans la plateforme de simulation pour établir une planification à plus long terme. Le choix d'une cible (transmise du niveau tactique au niveau

opérationnel) devient un paramètre important à prendre en compte et peut permettre une augmentation du revenu généré par les ventes.

3.2. Établissement du modèle de simulation

La première étape (objectif spécifique 1) a été de développer une plateforme de simulation à l'aide du logiciel Simio. Simio est un logiciel de simulation à événements discrets permettant la construction d'un modèle et la simulation de celui-ci au travers de nombreux scénarios. Une partie analyse est également présente assurant un suivi de toutes les données importantes. Ainsi, il est donc possible de suivre et d'analyser statistiquement un grand nombre de variables au cours d'une simulation. La construction de ce modèle est rendue possible par l'utilisation de « steps » permettant de réaliser une action. Il existe de nombreux « steps » déjà présents dans le logiciel. Cependant, il est possible d'en créer de nouveaux pour permettre des actions plus personnalisées, telles qu'un appel à un modèle d'optimisation externe. Le modèle créé avait pour but de simuler le processus de production, le processus de planification et les ventes au sein d'une scierie. La figure ci-dessous présente une capture d'écran du modèle de simulation tel qu'il a été conçu dans Simio.

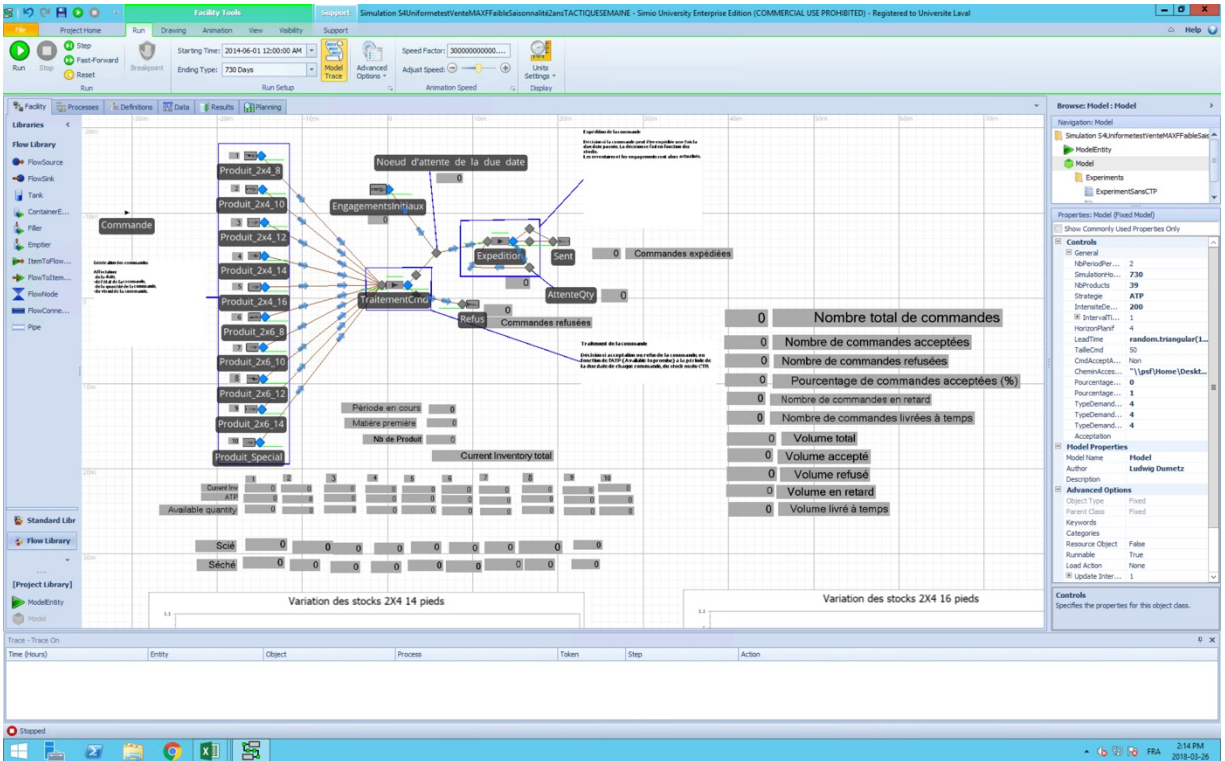


Figure 8. Capture d'écran du modèle de simulation dans Simio

Les commandes sont générées puis acceptées ou refusées selon des politiques d'acceptation des commandes qui seront décrites dans le Chapitre 4. Si la commande est acceptée, elle est envoyée au client à la date de livraison adéquate si la quantité est suffisante. Nous avons ensuite couplé à ce modèle de simulation un module de planification de la production de bois d'œuvre, responsable de la gestion des stocks et de la génération des plans de production pour chaque activité (sciage, séchage et rabotage). Plus précisément, ce module de planification de la production utilise un modèle mathématique de programmation linéaire en nombres entiers de Marier *et al.* (2014b) lui-même basé sur les travaux de Gaudreault *et al.* (2010), dans le but de générer un plan périodique de production qui tienne compte des recettes de rabotage, de la demande client et des stocks disponibles. La représentation conceptuelle de cette plateforme de simulation (modèle de simulation + module de planification de la production) est proposée dans le chapitre 4.

3.2.1. Éléments du modèle de simulation

Voici les informations sur les éléments pris en compte lors de la création de ce modèle. Bien que ces informations soient reprises et détaillées au long des trois chapitres suivants, il est important de les lister ici.

Le processus de production : le processus de production pris en compte est représentatif des usines de sciage en Amérique du Nord. Il est composé des trois grandes étapes de la transformation du bois : le sciage, le séchage et le rabotage.

Le nombre de produits finis : ce sont les produits obtenus après l'étape du rabotage. En se basant sur un plan de production d'une vraie usine de sciage, 10 produits représentant 80% de la production annuelle ont été utilisés dans nos simulations. Bien que ce nombre soit faible (on compte en général entre 300 et 500 produits fabriqués), il nous permet quand même de bien simuler la complexité du processus de transformation du bois et de ses processus divergents avec co-production.

Les paramètres de production : il s'agit des plans de coupe, des caractéristiques des séchoirs, des recettes utilisées au rabotage ou de la capacité de production de chaque unité. Comme mentionné précédemment, les plans de coupe sont utilisés au sciage et permettent de définir les produits qu'il est possible de scier dans une bille de bois. Au rabotage, différentes recettes sont utilisées pour obtenir une variété de produits finis à partir de bois secs. Plans de coupe et recettes de rabotage ont été utilisés dans le processus de production et ont été inspirés de la réalité : en nous basant sur de vrais plans de coupes et recettes de rabotage, nous les avons adaptées pour ne tenir compte que des 10 produits fabriqués. Plus de détails sont fournis aux chapitres 5 et 6.

Concernant les caractéristiques des séchoirs, ceux-ci comprennent les dimensions des séchoirs (hauteur, longueur et largeur) et la vitesse de séchage qui est entre autres fonction du type d'essence. Des détails sont également fournis aux chapitres 5 et 6.

Enfin, dans nos études, nous simulons différentes localisations du goulot. Le goulot correspond à l'activité de production de bois d'œuvre qui a la plus faible capacité de production. Nous avons donc déterminé des capacités de production au sciage, séchage et rabotage. Ces capacités dépendent entre autres des vitesses de production de chaque activité. Dans la majorité

des usines de sciage, le goulot se situe au séchage ou au rabotage. Il a donc été possible de simuler des capacités de production plus petites au séchage qu'au sciage et au rabotage en modifiant les vitesses de séchage ou en diminuant la taille des séchoirs. Pour simuler une capacité de production inférieure à l'étape du rabotage, nous avons diminué la vitesse de production de cette étape. Le chapitre 5 apporte plus d'information concernant cet élément.

La capacité maximale de production : nous avons simulé une année de production en flux poussé traditionnel. Cela a permis d'identifier la capacité de production maximale de notre usine. Il était alors possible d'en tirer la production « optimale » sur l'année pour chacun des dits produits.

La modélisation de la demande : pendant la simulation, les commandes sont générées dynamiquement selon un processus de Poisson (Ben Ali *et al.* (2014)).

La taille de la commande : elle est fixe, d'une valeur de 50 Mmpm (Mille pieds-mesure-planche) et est représentative du volume de produits finis que peut transporter un camion à pleine charge. Chaque commande ne concerne qu'un seul produit.

Intensité de la demande : dans toutes nos expérimentations, nous avons fait varier la quantité de demandes afin d'en mesurer l'effet. Par exemple, lorsqu'une usine de sciage reçoit une demande infiniment grande par rapport à ce qu'elle peut produire, quasiment toute la production pourra être vendue. En revanche, si l'usine ne reçoit qu'un faible nombre de demandes par rapport à cette même capacité de production, ce qu'elle produit devra être choisi avec soin pour être en mesure de fournir le bon bois au bon client au bon moment. Ainsi, l'*intensité de la demande* est un facteur important de nos simulations. Elle s'exprime en pourcentage de la capacité maximale de production : à 100% d'intensité, les paramètres du processus de génération des commandes sont définis afin que l'usine reçoive en moyenne (si on réalisait une infinité de simulations) des commandes équivalentes à une fois sa capacité maximale de production pour chaque produit. À 200% d'intensité de la demande, l'usine reçoit une quantité de demande équivalente à deux fois ce qu'elle peut produire, etc.

Customer lead time : il s'agit du délai entre le moment où un client passe une commande à l'usine jusqu'à la date de livraison souhaitée. Ce délai de « fabrication et d'expédition » de la

commande suit une loi triangulaire, avec un minimum de 1 semaine, un maximum de 3 semaines et une moyenne de 2 semaines. Ceci est représentatif du contexte nord-américain.

Horizon de simulation : l'horizon de simulation est compris entre 2 ans et 3 ans, selon l'expérimentation.

Horizon de planification : il dépend du type de planification (opérationnelle ou tactique) et de l'expérimentation. Ainsi, au niveau opérationnel, différents horizons de planification sont testés, allant de 2 à 4 semaines avec une fréquence de replanification de 1 semaine. Davantage d'informations seront fournies au chapitre 4. Au niveau tactique, l'horizon de planification est de 12 mois avec une replanification chaque mois. Davantage d'information sera fournie dans le chapitre 6. La replanification est faite périodiquement ou lors de l'arrivée de nouvelle commande, selon le plan d'expériences.

Chaque élément du modèle peut être changé ; c'est l'avantage de l'utilisation d'un logiciel de simulation tel que Simio. Ainsi, l'on peut adapter le modèle lors de chaque modélisation d'une usine de sciage, en s'assurant que le modèle et les éléments pris en compte représentent bien la réalité.

Durant nos expérimentations, nous avons pris en compte différents indicateurs de performance. Bien que ces indicateurs de performance soient mentionnés dans chaque article, en voici une description succincte:

Le nombre de ventes moyen : il représente le nombre de ventes moyen fait dans l'année. Dans les deux premières contributions, le nombre de ventes est choisi plutôt que le revenu, car chaque commande a le même prix de vente.

Les stocks moyens annuels : les stocks moyens annuels de chaque produit (produits finis et semi-finis) sont pris en compte. Les stocks représentent une part significative dans les coûts de production et il est intéressant de les suivre.

Les revenus générés moyens : ce sont les revenus générés par les ventes des produits. Cet indicateur est utilisé dans la troisième contribution. En effet, les prix des produits varient pendant l'année. Il devient donc obsolète de prendre en compte le nombre de ventes.

3.2.2. Vérification et validation du modèle

D'après Sargent (2013), toute création d'un modèle de simulation doit passer par deux phases importantes : la vérification et la validation. La vérification est un processus permettant de vérifier s'il n'y a pas d'erreur conceptuelle dans la construction du modèle et dans l'utilisation des données. La validation est un processus permettant de valider la véracité des résultats donnés par la simulation. Le modèle de simulation conçu a donc été vérifié tout au long de son processus de construction. La validation s'est faite sur les éléments de construction du modèle et sa paramétrisation. C'est-à-dire que des paramètres tels que les horizons de planification ou encore les politiques d'acceptation de commandes pour lesquels l'impact sur la performance globale de l'entreprise est bien connu dans la littérature ont été utilisés en simulant un cas suffisamment simple. Les résultats sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature (Vollman *et al.* (1997)).

3.3. Études de simulation

Par la suite, une méthodologie générale a été suivie et répétées pour chacune des trois publications suivantes (trois articles de journal). Cette méthodologie peut être considérée comme un processus rationnel comportant quatre étapes (El Haouzi *et al.* (2013)). La figure ci-dessous montre la méthodologie suivie.

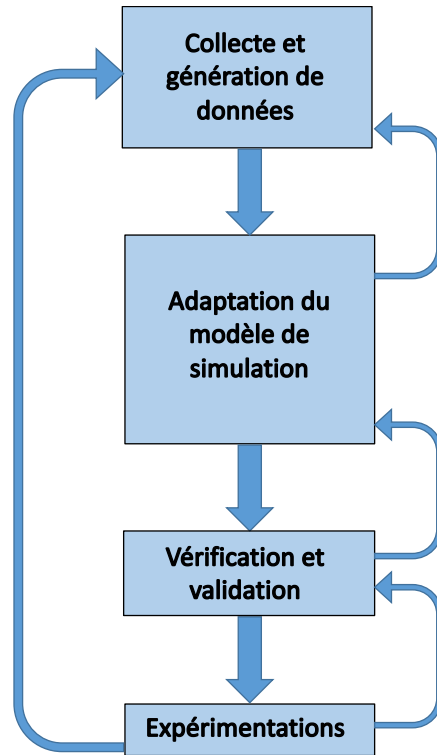


Figure 9. Méthodologie suivie

Le deuxième objectif spécifique visait à utiliser la plateforme précédemment développée pour montrer que dans un contexte particulier de co-production et de processus divergents, le choix de politiques d'acceptation de commandes n'étaient pas triviales.

Tout d'abord, des données ont été recueillies à partir d'un plan de production d'une scierie située au Québec. En particulier, le volume annuel de production par produit a pu être extrait du plan. Une loi de Pareto a ensuite été utilisée pour dégager les 10 produits représentant 80% de la production totale et c'est cet échantillon qui fut exploité dans toutes les expérimentations. D'autres données telles que les plans de coupes, par exemple, ont plutôt été générés, en tenant toutefois compte de la réalité des usines de sciage. Enfin, certaines données ont été tirées de la littérature, telles que le nombre de commandes produites pendant la simulation (suivant une loi de poisson) et les délais de livraison (suivant une loi triangulaire). La plateforme de simulation existante (objectif spécifique 1) a ensuite été adaptée, pour prendre en compte toutes les nouvelles données.

La plateforme de simulation a donc été utilisée pour montrer, en fonction du contexte et des paramètres de l'entreprise, que les politiques d'acceptation des commandes pouvaient engendrer des performances (en termes de commandes acceptées) bien différentes.

Le troisième objectif spécifique consistait à utiliser la plateforme de simulation pour mesurer l'impact de l'utilisation de mécanismes de coordination sur les commandes acceptées et sur l'inventaire moyen. L'environnement pris en compte n'est plus un environnement centralisé, comme dans la première contribution, mais un environnement décentralisé, comme c'est le cas dans la réalité. Nous avons donc utilisé de nouvelles données en plus des précédentes (comme par exemple les paramètres de production pour chacune des étapes de production du bois d'œuvre). Le modèle de simulation a alors dû être revu pour permettre de simuler la planification de la production de bois d'œuvre de manière décentralisée : planification du sciage, du séchage et du rabotage.

Ainsi, trois modèles de planification issus de la littérature sont utilisés pour obtenir un plan de production sur un horizon de quatre semaines. Au sciage, nous avons adapté le modèle de programmation linéaire en nombres entiers de Marier *et al.* (2014b) lui-même basé sur les travaux de Gaudreault *et al.* (2010) pour générer un plan périodique de production qui tienne compte de la matière première (les billes disponibles), de la capacité de sciage et des différents patrons de débit. Au séchage, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers développé par Marier *et al.* (2016) a été utilisé. Ce modèle génère dynamiquement des patrons de chargement, prenant en compte la configuration des séchoirs, différentes contraintes comme les essences de bois à sécher, ainsi que les résultats de la planification au sciage. Au rabotage, nous utilisons le modèle de programmation linéaire en nombres entiers de Marier *et al.* (2014b) lui-même basé sur les travaux de Gaudreault *et al.* (2010), dans le but de générer un plan périodique de production qui tienne compte des plans de rabotage, de la demande client et des stocks de produit secs disponible.

Lors des expérimentations, les premiers mécanismes de coordination testés ont été dégagés de Gaudreault *et al.* (2010). Un mécanisme avancé, basé sur le point de découplage a ensuite été proposé pour tirer le meilleur parti de la coordination, montrant notamment un plus grand nombre de commandes vendues et une diminution des stocks moyens.

Enfin, le quatrième objectif spécifique de la thèse consistait à utiliser la plateforme de simulation pour évaluer la coordination entre le niveau tactique et le niveau opérationnel. Plus précisément, nous avons évalué et comparé l'impact d'informations transmises du niveau tactique au niveau opérationnel sur les revenus de l'entreprise. Nous avons ensuite intégré un niveau de décision tactique dans le processus de planification de la production de bois d'œuvre. Le modèle a donc encore une fois été modifié, de façon à englober deux niveaux de planification : un niveau tactique, qui permet de définir des cibles de production (quoi produire) et des cibles d'inventaire (quel produit garder en inventaire pour le vendre plus cher à un meilleur moment); et un niveau opérationnel, qui permet de prendre en compte les commandes réelles et l'information fournie par le niveau tactique. Il devenait ainsi possible de comparer et d'évaluer la pertinence du choix d'une cible (transmise du niveau tactique au niveau opérationnel) plutôt qu'une autre sur la performance de l'entreprise, en termes de revenu généré par la vente de ses produits. Au niveau tactique, un modèle de Marier *et al.* (2014a) est utilisé. Ce modèle, utilisant la programmation linéaire, permet d'obtenir un plan de production pour le sciage, le séchage et le rabotage sur un horizon d'un an. Les contraintes aux différentes étapes de la production (matière première, configuration des séchoirs, patrons de débit, essences, ...) sont prises en compte. En fonction des prix de vente anticipés, un plan de production est généré ayant pour but de maximiser les profits de l'entreprise. Au niveau opérationnel, les mêmes modèles que pour l'objectif spécifique 3 sont utilisés.

De manière générale, le modèle de simulation original étant modifié de manière significative pour chaque contribution, la vérification et la validation ont dû être effectuées de façon répétée. Le processus de vérification impliquait notamment un retour dans la phase de développement pour corriger une erreur ou ajouter des précisions.

Finalement, les expérimentations pour chacun des trois derniers objectifs spécifiques ayant donné lieu à un article ont aussi reposées sur de nombreuses itérations de la méthodologie afin de ne pas tomber dans des cas particuliers. Par exemple, il était tout à fait possible d'obtenir des résultats menant à un cas particulier en raison de l'utilisation de données particulières (patron de coupe...). Il fallait donc soit changer les données, en refaisant toute la méthodologie, soit refaire une phase de vérification, ce qui amenait alors à la modification du modèle pour

éviter de tenir compte de cas particuliers. La méthodologie suivie dans le cadre de la thèse était donc bien adaptée à l'expérimentation de contextes diversifiés.

Chapitre 4 : Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with co-production

L'article intitulé "Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with co-production" est inséré dans ce chapitre. Il a été publié dans le journal IJPR (International Journal of Production Research) en 2016 Vol.55, Iss. 13, pp.3631-3643. La version présentée dans cette thèse est identique à la version publiée. Cet article a fait partie des 3 finalistes pour le prix David Martell 2017

Résumé

Les effets de l'utilisation de différentes politiques d'acceptation des commandes dans les secteurs manufacturiers sont généralement bien connus et documentés dans la littérature. Cependant, pour les industries confrontées à des processus divergents avec coproduction (c'est-à-dire plusieurs produits fabriqués en même temps à partir d'une matière première commune), l'évaluation la comparaison et la sélection des politiques ne sont pas des tâches banales. Cet article propose un cadre rendant possible cette évaluation. En utilisant un modèle de simulation qui intègre un ERP personnalisé, nous comparons et évaluons différentes politiques d'acceptation des commandes dans diverses conditions de marché. Les expériences sont réalisées à partir d'un cas de l'industrie des produits forestiers. Les résultats illustrent quand et comment les différentes politiques d'acceptation des commandes telles que l'ATP (available-to-promise), le CTP (capable-to-promise) et d'autres politiques connues devraient être utilisées, prenant en compte les conditions de marché liées aux industries divergentes avec coproduction. En particulier, nous montrons que les politiques avancées d'acceptation des commandes, telle que la politique *CTP*, peuvent générer de meilleurs revenus pour certains types de marché alors que, contrairement aux industries manufacturières typiques, l'ATP est plus performant que d'autres stratégies pour un modèle de demande spécifique.

Abstract:

The impacts of using different order acceptance policies in manufacturing sectors are usually well known and documented in the literature. However, for industries facing divergent processes with co-production (i.e. several products produced at the same time from a common raw material), the evaluation, comparison and selection of policies are not trivial tasks. This paper proposes a framework to enable this evaluation. Using a simulation model that integrates a custom-built ERP, we compare and evaluate different order acceptance policies in various market conditions. Experiments are carried out using a case from the forest products industry. Results illustrate how and when different market conditions related to divergent/co-production industries may call for available-to-promise (ATP), capable-to-promise (CTP), and other known strategies. Especially, we show that advanced order acceptance policies like CTP may generate a better income for certain types of market and, conversely to typical manufacturing industries, ATP performs better than other strategies for a specific demand patterns.

4.1. Introduction

For traditional manufacturing industries (e.g. assembly), the behaviour induced by mainstream planning and order acceptance policies such as available-to-promise (ATP) or capable-to-promise (CTP) is well known and documented (Slotnick 2011). The literature typically shows the trade-off between accepting orders and losing sales (Altendorfer and Minner 2015). However, it is very difficult to assess the impact of such policies for industries with divergent processes and where several co-products and by-products are made from the same raw material at the same time (i.e. co-production, see Öner and Bilgiç 2008). We denote an important difference between these two terms. A co-product is a valuable product that we can produce when producing our first choice of products. By-products are unintended and inexorably produced when producing any product. By-products are lower value products like wood chips in the lumber industry, in contrast to co-products that can be lumber products. Co-production generates inventories for products that can be hard to sell or have less value. The agro-food industry, the oil industry, the forest products industry and natural resources, in general, are all examples of manufacturing systems facing divergent/co-production processes.

For this context, selecting a production planning and an order acceptance policy (based on CTP, ATP, or others) and determining how it should be managed (e.g. planning horizon, replanning frequency, etc.) is not a tremendous task. The answer will depend on the co-production structure of the processes, the presence or absence of alternative production processes, and, of course, on market considerations. With this in mind, we developed a simulation-based framework that integrates a custom-built ERP system. It allows comparing and evaluating different order acceptance policies according to the business environment and market conditions. By testing different scenarios using the framework, one can answer questions concerning the order acceptance policy to implement, the planning horizon and planning frequency to apply, and the impact all the configurations may have on the financial performance of the company.

With the help of this framework, we were able to simulate different approaches suitable for the North American lumber industry. This industry is a very interesting case of divergent process with co-production as it produces and sells

both very standard commodity products as well as other products specifically designed for certain customers. Our experiments led to recommendations that would have been seen as counter-intuitive without any experimentations. For example, we show that advanced order acceptance policies like CTP may generate a better income for certain types of market and, conversely to typical manufacturing industries, ATP performs better than other strategies for a specific demand patterns.

The remainder of the paper is organised as follows. Section 4.2 presents preliminary notions regarding decisionmaking models for divergent production systems with co-production, as well as a description of the lumber manufacturing industry. Section 4.3 introduces the simulation framework and presents a first experiment conducted to verify and validate the model. Section 4.4 highlights how a lumber company may perform under various market conditions when adopting different production planning and order acceptance policies. Section 4.5 concludes the paper.

4.2. Preliminary notions

4.2.1 Divergent processes with co-production

In some industries, a common raw material may conduct to multiple finished and semi-finished products. This is called a divergent process (Arnold, Chapman, and Clive (2008)). When the production process produces these co-products at the same time, then it is said to be a divergent process with co-production (Gaudreault *et al.* (2011)). Facing both divergent processes and co-production makes the production planning especially challenging. As a result, the development of decision-making tools to support this specific context becomes necessary.

A first example of an industry dealing with divergent processes is the food sector. Ahumada and Villalobos (2009) listed more than 50 models that were developed, used or tested to plan all the activities of the food supply chain from farm to table (Aramyan *et al.* (2006)). Another example is the oil industry. Pinto, Joly, and Moro (2000) proposed an overview of linear programming and non-linear programming models as well as commercial tools created to support planning and scheduling in oil refineries. Taşkın and Ünal (2009) looked at the float glass manufacturing process and developed a decision support system at the tactical level for a

company in Turkey. They also mentioned several works that proposed models to better plan the production of this industry (Liu and Sherali (2000); Crama, Pochet, and Wera (2001)) and co-production systems in general (Bitran and Leong (1992); Bitran and Gilbert (1994); Joly, Moro, and Pinto (2002)). Finally, Kallrath (2002) studied planning and scheduling approaches for the case of the chemical industry. Even though those models are useful for all the industries mentioned, they didn't focus on comparison between different order acceptance policies.

4.2.2 The case of the lumber industry

Due to the limited availability of wood fibre, the heterogeneity of the material in terms of inherent characteristics, quality, physical dimensions (diameter, length, etc.), complex transformation processes and a divergent product flow, sawmilling is a difficult-to-manage process. In Canada, 90% of the forest belongs primarily to the government which decides on the quantity of wood to allocate to each forest products company (see the Annual report: « The state of Canada's forests » from the Natural Resources Canada (2015)). In the province of Quebec, this supply doesn't cover all the company's needs; the remainder has to be satisfied via auctions and private forests (i.e. unreliable supply). As a result, a forest products company facing an increasing demand will not necessarily be able to increase its procurement accordingly. Producing lumber involves a three-phase manufacturing process (Gaudreault *et al.* (2010)). It first encompasses a sawing unit responsible for sawing logs into green rough lumber according to a certain cutting pattern. At this stage, the lumber produced varies in terms of quality (grade), length and dimensions. The lumber must then be dried using a kiln unit so as to reduce its moisture content. According to Yan, De Silva, and Wang (2001), the drying operation is crucial to reduce biological damage, increase dimensional stability and reduce transportation costs. Furthermore, this step is necessary for lumber use in the construction market (Wery *et al.* (2014)). The final step is conducted by the finishing unit to obtain the desired surface and thickness.

Many optimisation models have been developed to better support lumber production planning. Marier (2011) and Marier *et al.* (2014) proposed a tactical mixed-integer programming (MIP) model that integrates the three production phases (sawing, drying, finishing) into a Sales and Operations Planning. It is used to correlate sales, marketing,

procurement and production, so as to create an annual plan that takes different product families into consideration. A similar tactical planning model was proposed by Singer and Donoso (2007) for the Chilean sawmilling industry. At the detailed operational level, Gaudreault *et al.* (2010) proposed three MIP models used to plan/schedule sawing, drying and wood finishing operations. The objective function allows maximising production value and/or minimising order lateness. A basic coordination mechanism is provided to synchronise those plans. Improved coordination mechanisms are proposed in Gaudreault, Frayret, and Pesant (2009) and Gaudreault *et al.* (2012). A stochastic version of the sawing operations planning was developed by Kazemi Zanjani, Ait-Kadi, and Nourelfath (2013). An improved version of the drying model was also proposed in Gaudreault *et al.* (2011).

4.2.3 Evaluating order acceptance policies

The previous sub-sections exposed that many researchers have proposed mathematical models which aim to plan/optimize divergent processes with co-production. However, companies do not necessarily know the best way to integrate these mathematical models within their management processes nor which of these models would be the most efficient one regarding their market contexts. The same situation applies for order acceptance policies. Order acceptance policies define the rules used to accept or reject an order depending on the product availability and the production capacity of the company. The best-known strategies are ATP and CTP, see Blackstone (2008). Many researchers have spent time studying those acceptance policies such as Vollmann, Berry, and Whybark (1997) and Taylor and Plenert (1999) that propose a heuristic technique (Finite Capacity Promising) which calculate due dates for customer orders. More recently, Slotnick (2011) proposed a literature review on order acceptance and scheduling. The study focuses on the balance between revenue and costs of processing of accepting an order and how to schedule them. Wang, Yang, and Lee (1994) developed some rules to accept or refuse an order in a job-shop environment based on profit. More recently, Moses *et al.* (2004) proposed a real-time order promising model based on the CTP in a make-to-order environment. The model takes into account the capacity requirement and generates due dates before scheduling orders. Pibernik and Yadav (2009) developed a combination of both ATP and CTP (Advanced Available-To-Promise AATP) in a make-to-stock environment while considering a stochastic demand. Kirche and Srivastava (2015)

developed a real-time order management model that takes into account due dates and possible negotiations with penalties in a make-to-order environment. Order acceptance policies received less attention for industries facing both divergent and co-production processes. Kilic *et al.* (2010) proposed a two-bound method for orders acceptance/rejection in the food industry in a stochastic environment, based on the resource level. It accepts every order when the resource level is high enough. If resource level is low, accept an order is permitted only if future orders with higher value are not possible. They compare the method to a First Come First Serve approach. Azevedo, D'Amours, and Rönnqvist (2012) proposed an order acceptance model for the Canadian softwood lumber industry but for make-to-stock environment only. Islam (2013) studied orderpromising and production planning methods for sawmills. He developed a MIP model that included ATP calculation and production planning while considering two types of demand: contract and spot market. However, only one variant ATP calculation is used without any comparison with other order acceptance policies.

4.2.4 Assessment with simulation

Comparing different production strategies or acceptance policies for various market conditions may be facilitated by the use of simulation. El Haouzi, Thomas, and Pétin (2008) used discrete-event simulation to compare different manufacturing systems for a company implementing Demand Flow Technology. Abdel-Malek, Kullpattaranirun, and Nanthavanij (2005) also exploited simulation to compare different supply chain outsourcing strategies, using the inventory levels and the total cost as performance indicators. Jerbi (2014) used simulation – coupled with optimisation – to assess allocation strategies of a forest value chain. Many works highlighted the possibilities of combining multi-agent systems with simulation. Lemieux (2010) mentioned several ones, including Julka, Srinivasan, and Karimi (2002) as well as García-Flores and Wang (2002) who provided frameworks for the simulation of supply chains in the chemical industry. Mourtzis, Doukas, and Psarommatis (2015) integrated different optimisation methods to design and operate manufacturing networks subject to various constraints (economical and environmental) and demand fluctuation. Some criteria like cost, time, environmental impact and quality are highlighted. They used discrete-event simulation to examine the complexity of the network and to compare different network configuration alternatives. Renna (2015) developed a multi-agent architecture to model the decentralised structure of a production network. He then

used the model to study diverse coordination strategies between network members. The author demonstrated that market conditions influence the performance of both the customer and the supplier. Finally, Raaymakers, J. Will M, and Jan C. (2000) used simulation to accept or refuse an order in a chemical company depending on the maximal capacity of the work centre. They showed that simulation is an efficient tool to compare and evaluate order acceptance strategies.

4.2.5 Summary

The literature showed that some models have been developed and methods used over the years to better plan production activities and order acceptance. Nevertheless, to the best of our knowledge, there are still no studies that compare diverse order acceptance policies for divergent/co-production process industries depending on market conditions. That is the challenge we aim to address in the next section.

4.3. Proposed simulation framework

This section introduces a generic framework developed to evaluate and compare different order acceptance policies according to a certain production context and diverse market conditions. A conceptual representation of the framework is shown in Figure 10. The simulation process is carried out as follows: orders are first generated according to a Poisson distribution (Ben Ali *et al.* (2014)) and a given demand lead-time distribution (i.e. time between the order arrival and the required delivery date, (see Arnold, Chapman, and Clive (2008))). Each order can next be either accepted or rejected according to a policy (ATP, CTP, or other ones). If the order is accepted, it ‘waits’ until there is material availability and a delivery date associated with it. It is then shipped. To provide support for inventory management, production planning, and ATP and CTP calculations, a custom-built ERP system has been developed using the C# programming language and connected to the simulation tool. In particular, this custom-built ERP uses a mathematical model from Marier *et al.* (2014) and the Cplex optimization solver for lumber production planning.

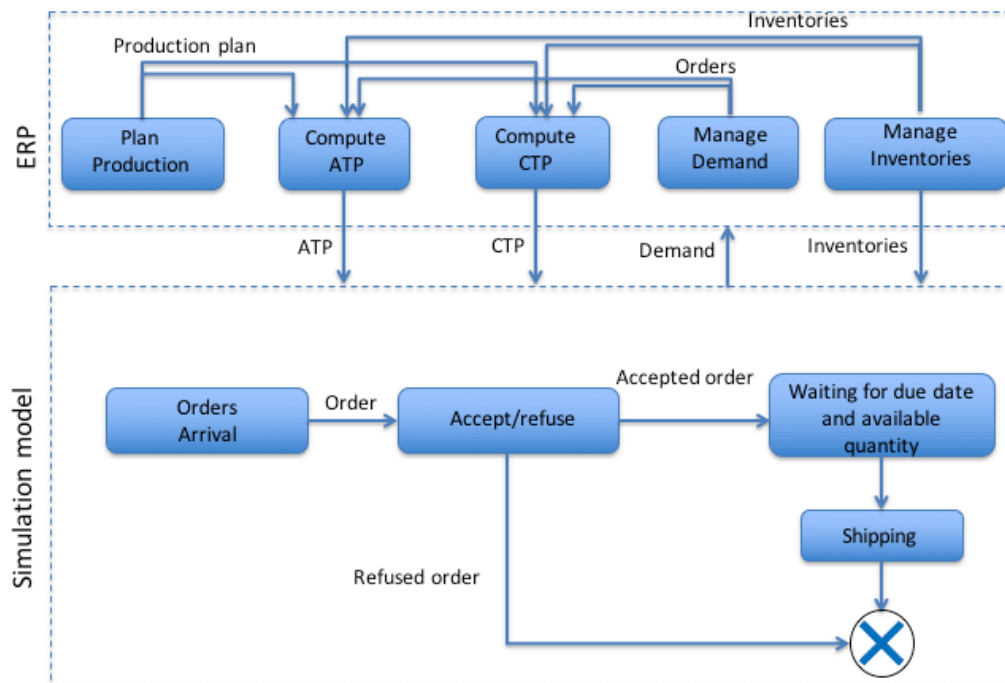


Figure 10. Conceptual representation of the model.

The next sub-section explains how the simulation analyst can configure and use the framework to assess different order acceptance policies.

4.3.1 Configuring the framework

Instead of implementing/coding ATP and CTP explicitly in our framework, we provide the simulation analyst with a set of more generic parameters that allow configuring the system in order to adopt many ATP variants, CTP variants, or other order acceptance policies of its choice. Those generic parameters that allow defining various detailed operations planning and orders acceptance policies are:

- Length of the production planning horizon;
- Replanning frequency;
- After planning/replanning to satisfy orders, should we use still available capacity according to target previously established at the tactical level?
- Is it mandatory when planning/replanning to continue satisfying previous commitments (make them hard constraints)?

- When a new tentative order arrives, are we allowed to replan (update the production plan) in order to try to satisfy it?

- Should we accept an order even though the quantity is not available according to our production plan and current commitments?

Setting the last parameter to ‘yes’ allows implementing ‘dumb’ strategies (‘accept all orders’) which can be used as a baseline to compare with other more advanced strategies. By default, an order of size Q is accepted only if:

$$Q \leq I + \sum_{t=\text{now}}^{D-1} (P_t - E_t) - \max_{D \leq t \leq T} \{ \sum_{k=D}^t (E_k - P_k) \} \quad (1)$$

where D is the order due date, T the simulation horizon, I the current inventory, P_t the production at period t and E_t the previous commitments for period t .

It is also possible to configure the system to accept orders only if the product is already in inventory (we call that policy ‘stock’).

Different combinations of the other parameters allow implementing a large variety of strategies, from ‘plan once a week without taking demand into account’ to advanced approaches such ATP or CTP. It is also possible to define different strategies for different product families, such as a mixed approach using ATP for commodity product orders and CTP for customised products.

Finally, the simulation analyst can plug-in the production planning algorithm of its choice.

4.3.2 Verification and validation of the model

Experiments were carried out in order to perform verification and validation of the model (see Sargent (2004)). By definition, model verification concerns the way the system implementation is error-free (i.e. verification to ensure that the flow equilibrium is always satisfied). Model validation checks whether the model fits the real-life system or not. In order to do this, different scenarios were tested on a case small enough to anticipate the results.

Table 1 below shows the full-factorial design used for this purpose. It defines parameter values for the order acceptance policy, the production planning policy and market conditions.

The values used in the simulation were inspired by the standards typically found in Canadian sawmills. A total of 600 scenarios were defined. The simulation horizon covered a full year, each day being divided into two production shifts (periods) of 7 h of work. Enough raw materials were available for the actual production capacity. Responses of the simulation were related to the volume of sales and the average inventory. We needed 15 replications to obtain a significant confidence interval (confidence level of 95%). The time needed to run one scenario considering the confidence interval was around 50 s, except for the CTP case which was around 10 min.

Table 1: Full-factorial design for the validation purpose

	Parameters	Level	Value
Market conditions	Demand Intensity ¹	5	100, 110, 130, 150, 175%
	Demand lead time	2	Random triangular (1,2,3); Random triangular (0.5,1,2)
	Order Size	1	50 MBFM (capacity of a full-truck load)
Production planning policy	Re-planning frequency	3	1, 2, 3 weeks
	Length of the Planning horizon	5	2, 2.5, 3, 3.5, 4 weeks
Order acceptance policy	Order acceptance policy	4	Stock, ATP, CTP, AcceptAll

Demand intensity is a parameter we defined to express the total number of orders received as a percentage of the production capacity. It is used to define the arrival rate.

MBFM stands for ‘thousand-foot board measure’. Board-foot is the unit of wood volume measurement used in North America.

4.3.2.1 Impact of the length of the planning horizon

Figure 11 shows the impact of the length of the planning horizon on the total volume of orders accepted and on the average inventory level. The parameters of the model are set for a demand intensity corresponding to 130% of the production capacity, a triangular demand lead-

¹ Demand intensity is a parameter we defined to express the total number of orders received as a percentage of the production capacity. It is used to define the arrival rate.

time distribution (1, 2, 3), and a re-planning frequency of 1 week. Results are shown for the different acceptance policies investigated (ATP, CTP, Stock, and AcceptAll). AcceptAll is utopic because accepted volume exceeds the total capacity, hence generating backorders. However, it defines an upper bound for the total volume of sales and a lower bound for the inventory level. It is the same idea as with the Stock policy, which provides the lower bound for the total volume of accepted orders and the upper bound for inventory levels when the length of the planning horizon is high enough to take the entire demand into account.

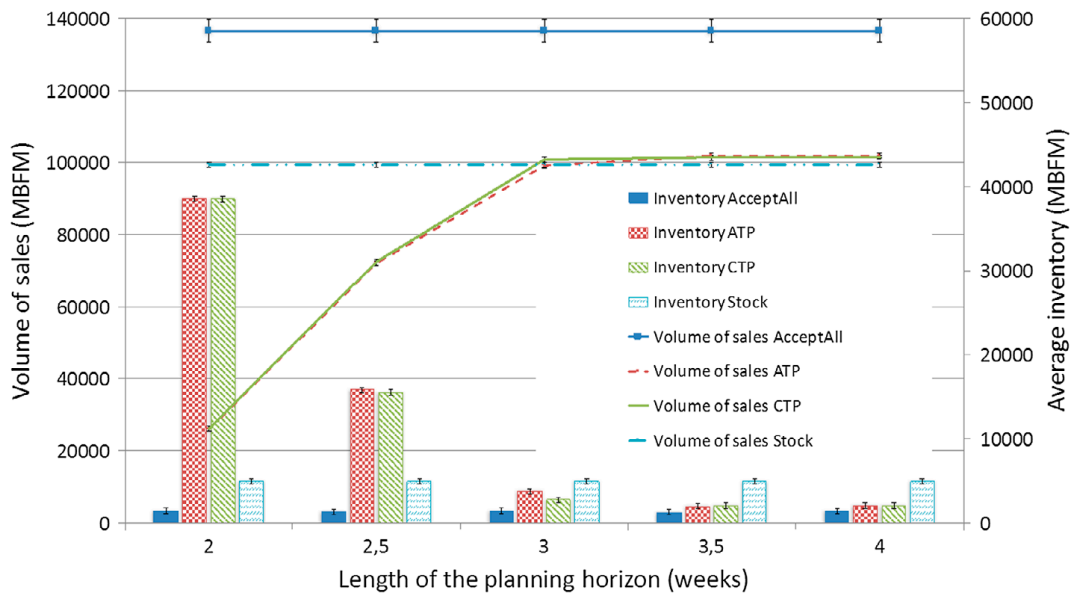


Figure 11. Impact of the length of the planning horizon (demand intensity = 130%, replanning frequency = 1 week).

If we look at the volume of orders accepted for ATP and CTP, as expected, they are greater than for Stock when we reach a planning horizon that takes into account the entire demand. Volume of accepted orders for ATP and CTP increases with the length of the planning horizon (the shorter the horizon, the more we need to refuse some orders because our production plan and ATP do not reach that point). In our specific case, with a cumulative lead time of 4 weeks and a replanning frequency of 1 week, there is no need to have a planning horizon superior to 4 weeks since no order can be received after the fourth week (although industry often uses a longer planning horizon to have a better visibility, as mentioned by Arnold, Chapman, and Clive (2008)). This result was expected (see Vollmann, Berry, and Whybark (1997)) and contributed to establish the validity of the model.

Conversely, the inventory level associated to ATP and CTP policies decreases when the length of the planning horizon increases, until we reach a planning horizon of four weeks. This result is also coherent.

Finally, we note that for ATP and CTP policies, even though the accepted volume is only slightly higher than the Stock policy (as the global production capacity remains the same), the reduction of the average inventory is significant (around 58.5% for a planning horizon of four weeks).

4.3.2.2 Impact of demand intensity

We first recall that demand intensity is the total demand expressed as a percentage of the total production capacity. Figure 12 shows the total volume of accepted orders and the average inventory according to the demand intensity.

As expected, the greater the demand intensity is, the greater the total volume of accepted orders will be. This is true until we reach a point where the entire production can be sold. For the specific case reported, it was reached at around 300% (the volume of accepted orders is then equalled to the global production capacity). An intensity of 100% of the production capacity would thus not be enough (due to the stochastic environment, demand for some specific products would be less than their production volumes; some orders would have due date outside the simulation horizon).

Regarding the average inventory level, the greater the intensity of demand is, the smaller the average inventory has to be. This is true for any policy. However, the greater the intensity is, the bigger the difference between ATP/CTP and Stock policies is.

We recall that AcceptAll policy may look attractive (less inventory). However, there is a huge number of late deliveries and therefore customer satisfaction is very poor. By comparison, on-time delivery reaches 39% for AcceptAll, against 100% for Stock, ATP and CTP policies.

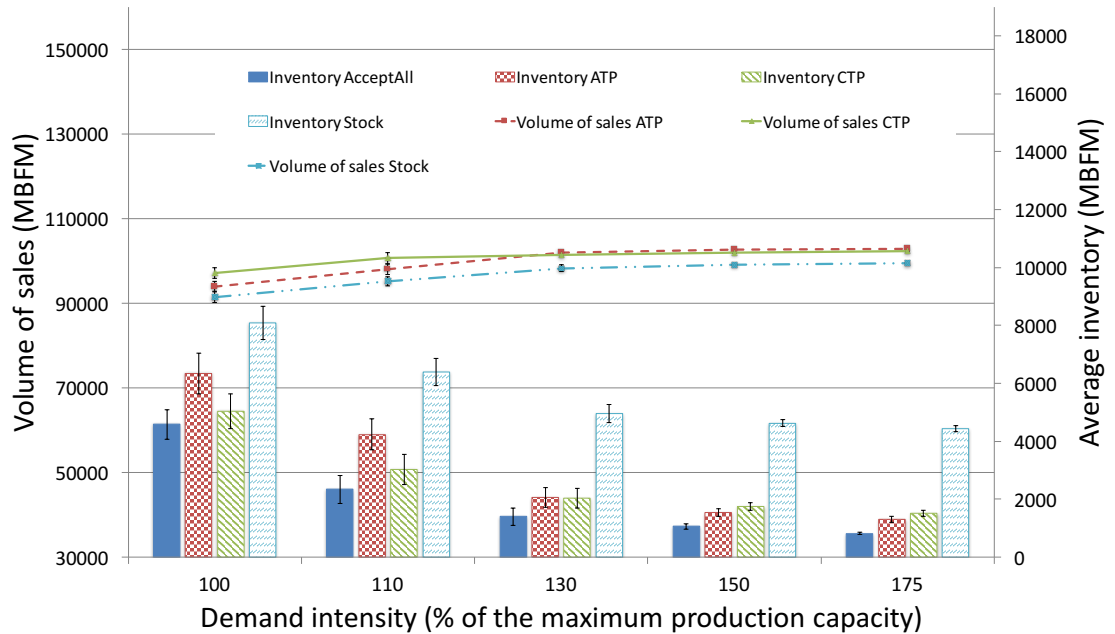


Figure 12. Impact of the demand intensity (length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week)

4.4. Using the framework to select the best policy according to market conditions

In this section, we show how the simulation model was used to determine which strategy should be followed by a company according to specific market characteristics. We will thereby measure the company's performance, in terms of volume of sales, inventory levels and total income, when a certain order acceptance strategy is applied and some market conditions faced. Those results have been established for a particular context (i.e. the forest sector) and based on specific values (i.e. reflecting the sawmilling industry). Those results should not be generalised to any types of industry nor parameter values. On the other hand, the proposed framework could be adapted and used for other industries facing divergent processes and co-production.

4.4.1 Experiments

The simulation parameters remained the same as the ones used for model validation, except for the following points: the simulation horizon covers two years, and a warm-up period of one year is set (this allowed reaching a steady state situation). A total of 240 scenarios were

simulated with a significant number of replications to have a desired confidence interval (confidence level of 95%).

4.4.2 Results and analysis

4.4.2.1 Commodity-product market

We first compare how the different policies perform in a 100% commodity-product market. For better readability, the error bars are shown every 5% on the x-axis. Figure 13 shows the sales (number of orders) according to the demand intensity for different order acceptance policies (Stock, ATP, and CTP). When demand is low, CTP accepts more orders than ATP (i.e. it pays to plan the production again according to customers' needs, otherwise opportunities are missed). This is the same result we would get in typical manufacturing system with no divergent / co-production processes. However, the particularities of our divergent/co-production process arise when demand intensity reaches 125%. From that point, ATP outperforms CTP. This is explained by the following reason.

When demand intensity reaches 125%, demand is significant enough to allow the sale of all the production planned according to forecasts. As for CTP, we recall it changes the production processes used to best fit the most recent orders. By changing the manufacturing process used, the co-products produced change too, and nothing assures that in the short term, demand will exist for these new co-products. On the other hand, ATP retains the same production plan that was established using forecasts and when demand is high, that volume is easily sold. Therefore, what is an advantage when demand is low becomes a disadvantage when demand is high. This situation is a good example of the specific impact and difficulties associated to process embedding mandatory co-production. Furthermore, forest products companies in North America have frequently to deal with this extra demand and even though they would acquire more capacity to better satisfy a demand increase, they would still not be able to increase their wood fiber procurement accordingly (i.e. limited raw material procurement).

In order to show how the ATP/CTP trigger point is affected by forecast accuracy, Figure 14 provides the same results as Figure 13, but for a situation with inaccurate forecasts. In the

previous experiments, planning was carried out using a forecast supposing that 80% of the most popular produced products would form 100% of demand. In this new experiment, we badly forecast that 20% of the less popular products will form 100% of the demand; this is obviously not the case.

The ATP/CTP trigger point is shifted to the right in comparison to Figure 4 because the ATP policy needs a greater demand intensity so that more of the low-demand produced products can be used to fulfil the demand.

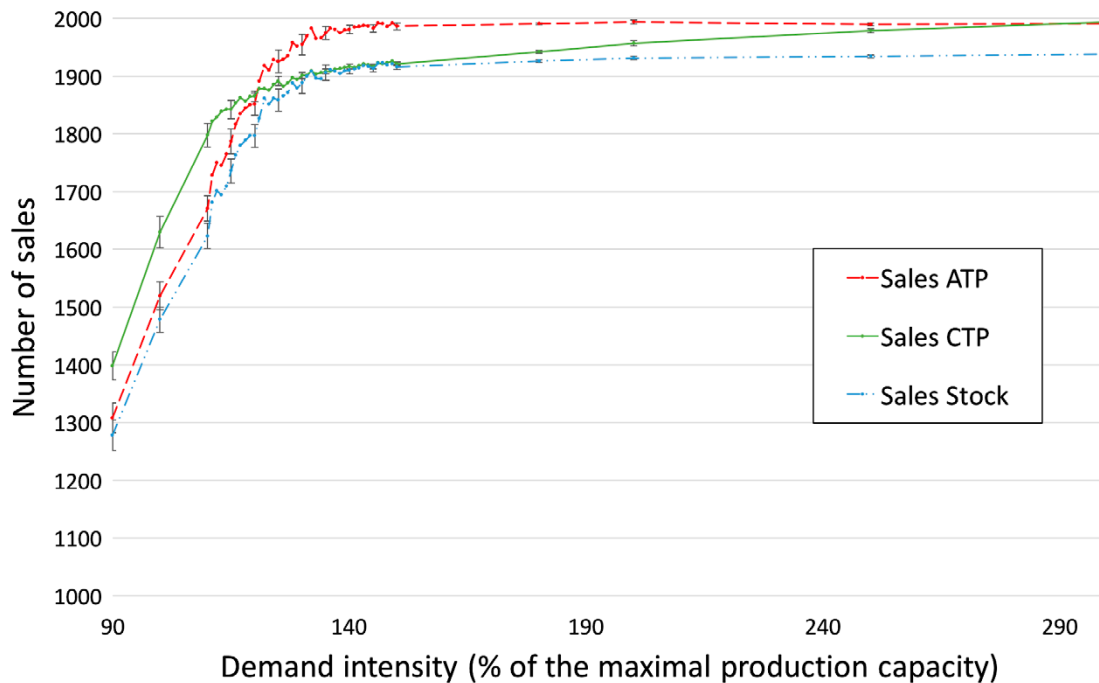


Figure 13. Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 100%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

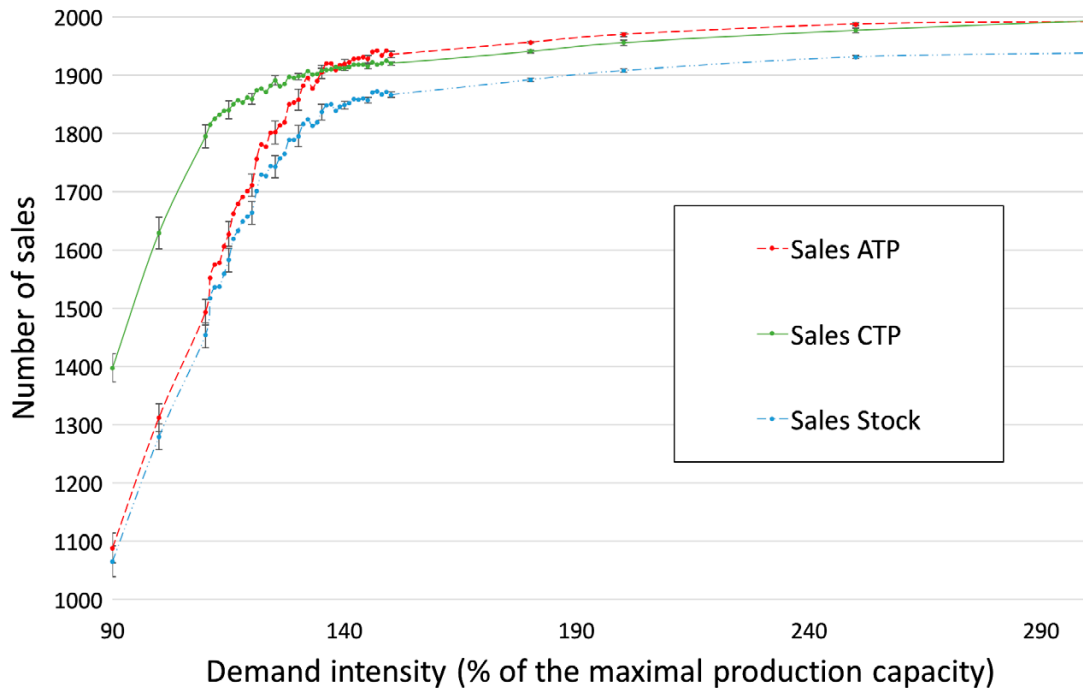


Figure 14. Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 100%; inaccurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

4.4.2.2 Consideration of a market with customised products

We previously compared different policies in a market composed of 100% commodity products. In North America, lumber are standardised by the National Lumber Grades Authority which allows for the products to be considered as a commodity. However, in recent years, the demand for customised product has increased while in Europe customized products represent the main part of the market.

In the next experiments, some additional parameters and a new order acceptance policy (a mixed approach called MIX that uses ATP for commodity product orders and CTP for customised products) are included to represent these two different markets.

Figure 15 shows the results for a market composed of 70% commodity products and 30% customised products.

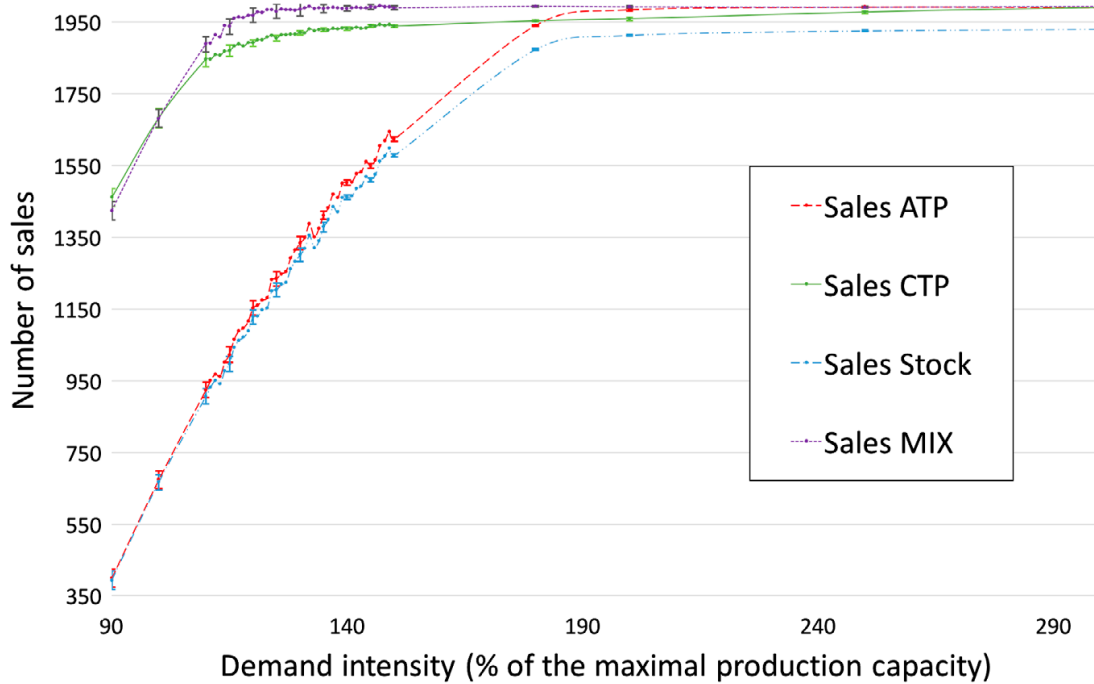


Figure 15. Number of sales according to the demand intensity (Commodity product = 70%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

CTP can again accept more orders than ATP as it can accept orders for customised products. However, when demand intensity is high enough, ATP is still able to use its entire capacity considering demand for commodity products only. ATP becomes even better than CTP for very high demand (around 190% demand intensity) for the same reason explained previously.

This figure also introduces the MIX policy. We recall that MIX policy uses the ATP to satisfy demand for commodity products. It only calls re-planning when there is demand for customised products. When demand is very low, ATP is outperformed by MIX (for the same reason ATP is outperformed by CTP). When demand intensity reaches 100%, MIX performs better than CTP because it benefits from the effect of good forecasts: MIX uses ATP for commodity products and then keeps the same production plan that was established using forecast. When demand is high, that volume is easily sold. At a very high-demand intensity level, the three policies are almost equal.

4.4.2.3 Impact of the strategies on inventory

All the previous analyses focused on the volume of sales according to the demand intensity for each strategy, without considering the average inventory over the year. However, it needs to be considered when defining company policies. The following figure (Figure 16) shows the impact of the different policies on the inventory level. We choose to represent the average inventory for a market composed of 90% commodity products and 10% customised products with an accurate forecast.

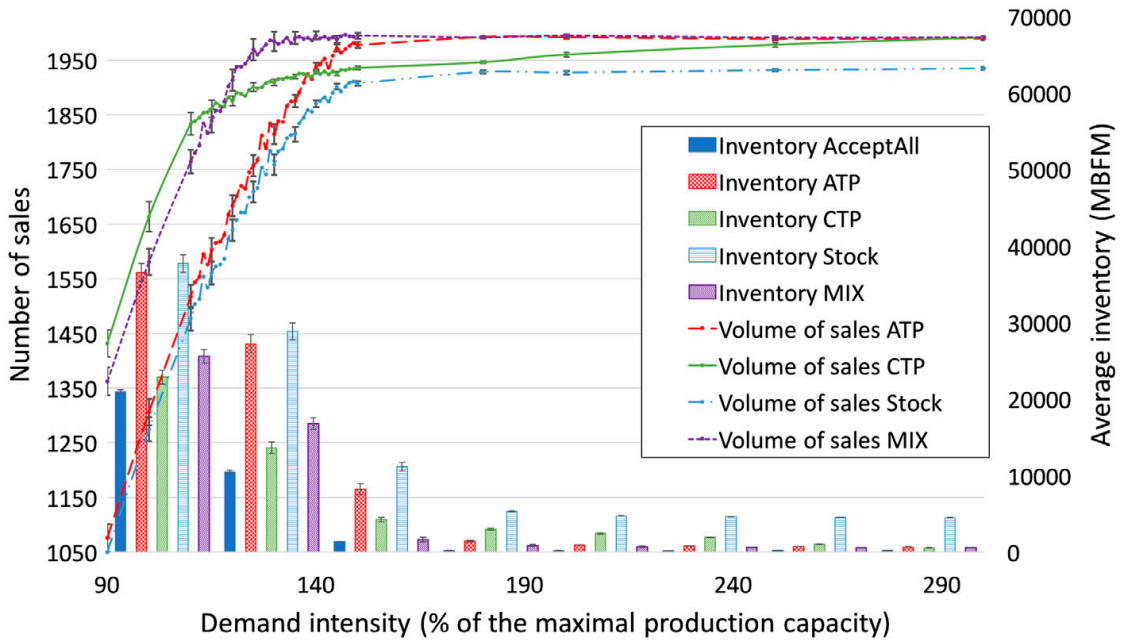


Figure 16. Average inventory over the year according to the demand intensity and the associated number of sales (Commodity product = 90%; accurate forecast; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

For any policy, the average inventory decreases with an increase of the intensity of the demand. However, a greater demand intensity involves a larger difference between ATP/CTP and Stock policies. We observed previously that for a very high demand intensity, the number of accepted orders by an ATP or a CTP policy is equal. In contrast, the average inventory for the CTP policy is smaller than for the ATP policy because the CTP policy can trigger a new plan each time an order is received. As a result, the product spends less time in stock. Finally, we recall that the AcceptAll policy is utopic (we accept orders we will not be able to fill) and is only used for comparison purposes.

If the market changes and some customised products are on demand, we observe the same trend as previously for the average inventory: the greater the intensity, the bigger the difference between ATP/CTP/MIX and Stock policies.

4.4.3 Managerial insights

The proposed framework aims to guide the decision-maker in the policy to apply according to the market conditions he is facing. However, beyond the performance indicators analysed, the fact remains that changes to sales revenues associated with customised products and market conditions can be significant. It is therefore interesting to show the effect of such a value and how it can guide the decision-maker in his choice.

4.4.3.1 Margin and total income

The revenues associated to customised products will usually be greater than the ones obtained for standard/commodity products. In North America, a customised product in the sawmilling sector can be more expensive by about 10 to 20%. For other industries, a customised product can be more expensive by 50% or more. To illustrate the importance of the choice of the strategy according to the market conditions, the figure below (Figure 17) shows the total income for each strategy according to the demand intensity. In this example, a unit price of 10\$ has been set for the commodity product and a unit price of 12\$ for the customised product. As expected, the difference in revenues associated to commodity and customised products increases the gap between approaches.

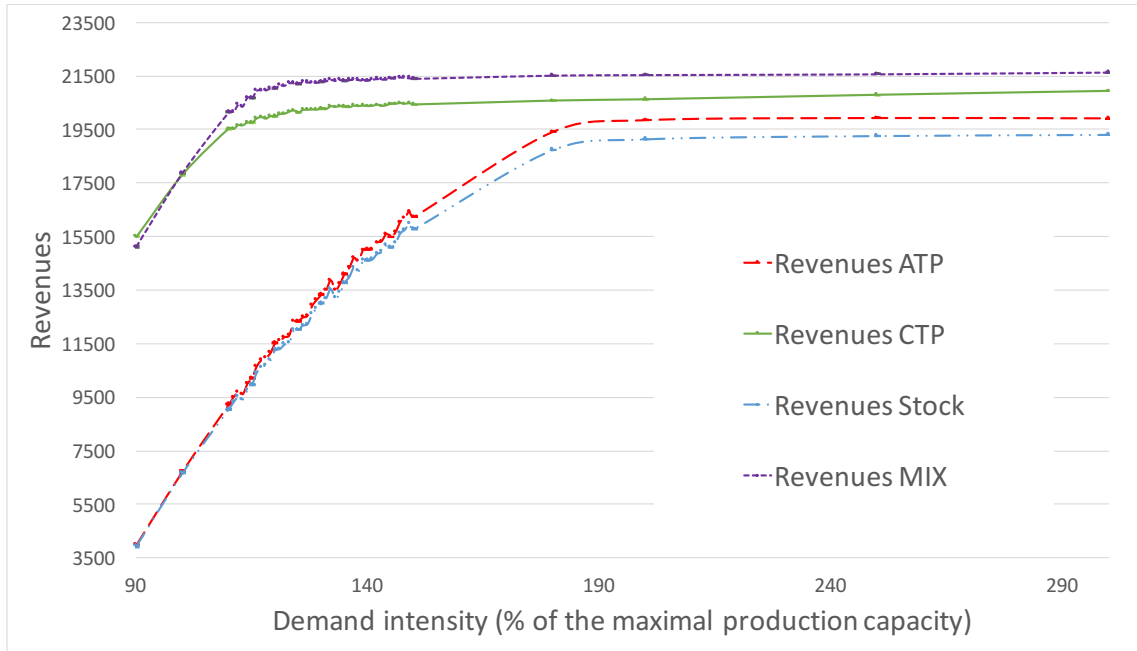


Figure 17. Revenues for each policy (commodity product = 70%, accurate forecasts; length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

Moreover, MIX and CTP show a better total income than ATP or Stock. It is interesting to see the possible margin to gain depending on the businesses involved as well as the customised product requested.

4.4.3.2 Decision chart

In order to facilitate analysis, we propose that decision-makers use a decision chart synthesising the previous results (Figure 18). Depending on the demand intensity and the proportion of orders for customised (vs. commodity) products, this chart identifies the policy that maximises profit.

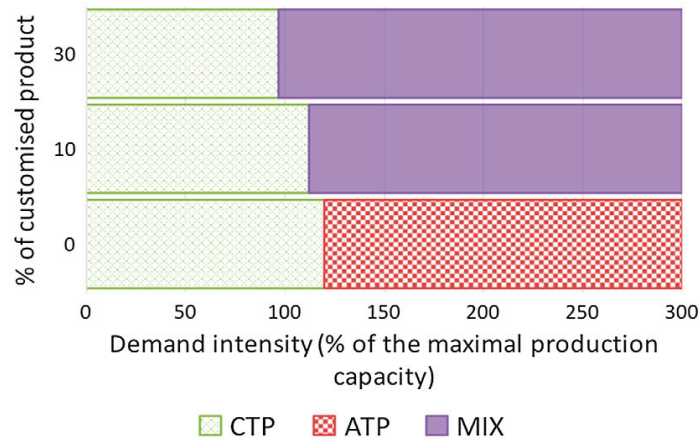


Figure 18. Decision graph taking into account the margin for a market with an accurate forecast (length of the planning horizon = 4 weeks; replanning frequency = 1 week).

We recall that this decision graph has been established for a particular context (i.e. the forest sector) and based on specific values (i.e. reflecting the sawmilling industry). The chart should rather be viewed as an ‘easy-to-read’ diagram that allows a sawmill company to rapidly understand all the possibilities the different order acceptance policies may offer depending on its business context. It would have to be recomputed each time major changes occur.

4.5. Conclusion

This article proposed a simulation framework to compare and evaluate different order acceptance policies for divergent production systems with co-production. The simulation tool developed encompasses a custom-built ERP system that covers inventory management, lumber production, planning algorithms and ATP/CTP calculation. After being verified and validated, the tool was used to perform different studies for North American lumber production context. By testing different scenarios, we were able to measure the impact of well-known order acceptance policies on the performance of a sawmilling company.

It allowed us to illustrate that the best strategy to use in divergent with co-production context often differs from the one that would have been optimal in a classical manufacturing (e.g. assembly) context. As an example, we showed that although CTP (capable-to-promise) allows us to have a better income in certain types of markets where demand is very low, ATP (available-to-promise) performs better in some other cases. Moreover, we showed that using a

mixed strategy when the market was composed by commodity products and customised products is a better option. Even though the results should not be generalised to all types of industry nor parameter values, the proposed framework could be used for other industries facing divergent processes and co-production.

In future work, this simulation framework could be used to perform a more complex study. For example, it could be adapted to take into account stochastic events in production and raw material procurement so as to propose guidelines for more agile operations management driven by demand. The framework could also allow simulating different coordination mechanisms between the tactical and operational planning level, as well as between the different departments (e.g. raw material procurement, production and sales).

4.6. Références

Abdel-Malek, L., T. Kullpattaranirun, and S. Nanthavanij. 2005. “A Framework for Comparing Outsourcing Strategies in Multi-layered Supply Chains.” *International Journal of Production Economics* 97: 318–328.

Ahumada, O., and J. R. Villalobos. 2009. “Application of Planning Models in the Agri-food Supply Chain: A Review.” *European Journal of Operational Research* 196 (1): 1–20.

Altendorfer, Klaus, and Stefan Minner. 2015. “Influence of Order Acceptance Policies on Optimal Capacity Investment with Stochastic Customer Required Lead times.” *European Journal of Operational Research* 243 (2): 555–565.

Aramyan, L., C. J. Ondersteijn, O. Van Kooten, and A. O. Lansink. 2006. *Performance Indicators in Agri-food Production Chains Quantifying the Agri-Food Supply Chain: 49–66*. The Netherlands: Springer.

Arnold, J. R. T., S. Chapman, and L. Clive. 2008. *Introduction to Materials Management*. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

Azevedo, R. C., S. D’Amours, M. Rönnqvist. 2012. *Advances in Profit-driven Order Promising for Make-to-stock Environments – A Case Study with a Canadian Softwood Lumber Manufacturer*. *International Journal of Production Economics* (Submitted).

Ben Ali, M., J. Gaudreault, S. D’Amours, and M.-A. Carle. 2014. *A Multi-level Framework for Demand Fulfillment in a Make-to-stock Environment – A Case Study in Canadian Softwood Lumber Industry*. Nancy: MOSIM.

Bitran, G. R., and S. M. Gilbert. 1994. “Co-production Processes with Random Yields in the Semiconductor Industry.” *Operations Research* 42 (3): 476–491.

Bitran, G. R., and T. Y. Leong. 1992. “Deterministic Approximations to Co-production Problems with Service Constraints and Random Yields.” *Management Science* 38 (5): 724–742.

Blackstone, J. H. (2008). *APICS Dictionary–The Standard for Excellence in the Operations Management Profession*. APICS–The Association of Operations Management Dictionary, 1-156.

Crama, Y., Y. Pochet, and Y. Wera. 2001. "A Discussion of Production Planning Approaches in the Process Industry (No. CORE Discussion Papers (2001/42))."

El Haouzi, H., A. Thomas, and J.-F. Pétrin. 2008. "Contribution to Reusability and Modularity of Manufacturing Systems Simulation Models: Application to Distributed Control Simulation within DFT Context." *International Journal of Production Economics* 112 (1): 48–61.

García-Flores, R., and X. Wang. 2002. "A Multi-agent System for Chemical Supply Chain Simulation and Management Support." *OR Spectrum* 24 (3): 343–370.

Gaudreault, J., J. M. Frayret, and G. Pesant. 2009. "Distributed Search for Supply Chain Coordination." *Computers in Industry* 60 (6): 441–451.

Gaudreault, J., P. Forget, J.-M. Frayet, A. Rousseau, S. Lemieux, and S. D'Amours. 2010. "Distributed Operations Planning in the Lumber Supply Chain: Models and Coordination." *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Pra* 17 (3): 168–189.

Gaudreault, J., J. M. 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 and Operations Research* 38 (9): 1238–1250.

Gaudreault, J., G. Pesant, J. M. Frayret, and S. D'Amours. 2012. "Supply Chain Coordination using an Adaptive Distributed Search Strategy." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 42 (6): 1424–1438.

Islam, M. S. 2013. *Order Promising and Production Planning Methods for Sawmills*. MSc., Dalhousie University.

Jerbi, W. 2014. *Intégration De L'optimisation Et De La Simulation Pour L'élaboration Et L'évaluation De Politiques De Production Et De Transport D'une Chine Logistique [Integration of Optimization and Simulation for Developing and Evaluating Production and Transport Policies of a Supply Chain]*. MSc., Université Laval.

Joly, M., L. Moro, and J. Pinto. 2002. "Planning and Scheduling for Petroleum Refineries Using Mathematical Programming." *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 19: 207–228.

Julka, N., R. Srinivasan, and I. Karimi. 2002. "Agent-based Supply Chain Management—1: Framework." *Computers and Chemical Engineering* 26 (12): 1755–1769.

Kallrath, J. 2002. "Planning and Scheduling in the Process Industry." *OR Spectrum* 24 (3): 219–250.

Kazemi Zanjani, M., Ait-Kadi, D., Nourelfath, M. (s.d.). 2013. "A Stochastic Programming Approach for Sawmill Production Planning." *International Journal of Mathematics in Operational Research* 5 (1): 1–18.

Kilic, O. A., D. P. Van Donk, J. Wijngaard, and S. A. Tarim. 2010. "Order Acceptance in Food Processing Systems with Random Raw Material Requirements." *OR Spectrum* 32 (4): 905–925.

Kirche, E. T., and R. Srivastava. 2015. "Order Management with Renegotiated Due Dates and Penalty Costs in an Integrated Supply Chain." *International Journal of Operations and Quantitative Management* 21 (2): 141–163.

Lemieux, S. 2010. *Simulateur Multiagent D'un Réseau De Création De Valeur : Application à L'industrie Forestière [Multiagent Simulator of a Value Creation Network: Application for Forest Industry]*. MSc., Université Laval.

Liu, C. M., and H. D. Sherali. 2000. "A Coal Shipping and Blending Problem for an Electric Utility Company." *Omega* 28 (4): 433–444.

Marier, P. 2011. *Gestion Intégrée Des Ventes Et Des Opérations Dans L'industrie Du Sciage [Integrated Management of Sales and Operations in the Sawmilling Industry]*. In *Expo-Conférence*. Québec: Université Laval.

Marier, P., J. Gaudreault, and B. Robichaud. November 5–7, 2014. "Implementing a MIP Model to Plan and Schedule Wood Finishing Operation in a Sawmill: Lessons Learned." In *10th International Conference of Modelling and Simulating- MOSIM'14*. Nancy, France.

Moses, S., H. Grant, L. Gruenwald, and S. Pulat. 2004. "Real-time Due-date Promising by Build-to-order Environments." *International Journal of Production Research* 42 (20): 4353–4375.

Mourtzis, D., M. Doukas, and F. Psarommatis. 2015. "A Toolbox for the Design, Planning and Operation of Manufacturing Networks in a Mass Customisation Environment." *Journal of Manufacturing Systems* 36: 274–286.

Natural Resources Canada. 2015. *The State of Canada's Forests. Annual Report.*

Öner, S., and T. Bilgic. 2008. "Economic Lot Scheduling with Uncontrolled Co-production." *European Journal of Operational Research* 188 (3): 793–810.

Pibernik, Richard, and Prashant Yadav. 2009. "Inventory Reservation and Real-time Order Promising in a Make-to-stock System." *OR Spectrum* 31 (1): 281–307.

Pinto, J. M., M. Joly, and L. F. L. Moro. 2000. "Planning and Scheduling Models for Refinery Operations." *Computers & Chemical Engineering* 24 (9): 2259–2276.

Raaymakers, Wenny HM, J. Will M. Bertrand, and Jan C. Fransoo. 2000. "The Performance of Workload Rules for Order Acceptance in Batch Chemical Manufacturing." *Journal of Intelligent Manufacturing* 11 (2): 217–228.

Renna, P. 2015. "Coordination Strategies to Support Distributed Production Planning in Production Networks." *European J. of Industrial Engineering* 9 (3): 366–394.

Sargent, Robert G. 2004. "Validation and Verification of Simulation Models." In *Simulation Conference. Proceedings of the 2004. Vol. 1.* Washington, DC: IEEE.

Singer, M., and P. Donoso. 2007. "Internal Supply Chain Management in the Chilean Sawmill Industry." *International Journal of Operations & Production Management* 27 (5): 524–541.

Slotnick, Susan A. 2011 "Order Acceptance and Scheduling: A Taxonomy and Review." *European Journal of Operational Research* 212 (1): 1–11.

Taşkın, Z. C., and A. T. Ünal. 2009. "Tactical Level Planning in Float Glass Manufacturing with Co-production, Random Yields and Substitutable Products." *European Journal of Operational Research* 199 (1): 252–261.

Taylor S. G., and G. J. Plenert. 1999. "Finite Capacity Promising." *Production and Inventory Management Journal* 40 (3): 50–56.

Vollmann, T., W. Berry, and D. Whybark. 1997. *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. New-York: McGraw-Hill.

Wang, J., J. Q. Yang, and H. Lee. 1994. "Multicriteria Order Acceptance Decision Support in over-demanded Job Shops: A Neural Network Approach." *Mathematical and Computer Modelling* 19 (5): 1–19.

Wery, J., P. Marier, J. Gaudreault, and A. Thomas. 2014. *Decision-making Framework for Tactical Planning Taking into Account Market Opportunities (New Products and New Suppliers) in a Co-production Context*. Nancy: Nancy.

Yan, G. C. K., C. W. De Silva, and X. G. Wang. 2001. "Experimental Modelling and Intelligent Control of a Wood-drying Kiln." *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 15 (8): 787–814.

Chapitre 5 : Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction

L'article intitulé "Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction" est inséré dans ce chapitre. Il a été soumis au journal IJIE (International Journal of Industrial Engineering-Theory: Applications and Practice) en février 2018. La version présentée dans cette thèse est identique à la version soumise.

Résumé

Les activités de sciage (le sciage, le séchage et le rabotage) ne peuvent pas être planifiées efficacement d'une manière centralisée en raison de la complexité du processus de production. Ainsi, des modèles mathématiques spécifiques ont été développés au fil des années pour soutenir la planification de chaque unité de production. Dans la littérature, ces modèles de planification sont habituellement évalués / testés indépendamment, ou connectés en utilisant des heuristiques et évalués pour un horizon de planification et de demande fixe. Dans cette étude, nous simulons l'utilisation de modèles de planification pour la production de bois d'œuvre dans les scieries de manière décentralisée, dans un contexte où les nouvelles commandes arrivent dynamiquement et aléatoirement et où la replanification est effectuée périodiquement. Différents mécanismes de coordination sont également simulés et évalués, montrant que les mécanismes de coordination précédemment publiés pour la planification décentralisée des opérations de sciage peuvent conduire à un taux de satisfaction client faible lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement aussi dynamique. Un mécanisme de coordination push / pull plus avancé basé sur le concept de point de découplage est également proposé, plus approprié par rapport aux caractéristiques du marché considérées dans l'étude, et conduisant à une augmentation des ventes et à une réduction des stocks.

Abstract

Sawmilling activities (e.g. sawing, drying, and finishing) cannot be efficiently planned in a centralized manner due to the complexity of the production process. Thus, specific mathematical models have been developed over the years to support planning for each production unit. In the literature, these planning models are usually evaluated/tested independently, or connected using heuristics and evaluated for a fixed demand/planning horizon. In this study, we simulate the use of planning models for decentralized sawmill production, but in a context where new orders arrive randomly and replanning is carried out periodically. Different coordination mechanisms are also simulated and evaluated, highlighting that previously published coordination mechanisms for decentralized planning of sawmilling operations may lead to a low order fill rate when used in such a dynamic environment. A more advanced push/pull coordination mechanism based on the concept of decoupling point is also proposed, revealing that it may be more appropriate regarding the market characteristics considered in the study while leading to sales increase and reduced inventory.

5.1. Introduction

Lumber production involves three main production stages: *sawing*, *drying*, and *finishing*. Since many products are generated from a single raw material, the process is known as *divergent* with uncontrolled *coproduction* (see Öner and Bilgiç (2008)) and each change made at a production stage impacts the following phases. Sawing, drying, and finishing operations are typically planned using different models in a decentralized environment. Even though these three activities share the same goal, they may lack coherence as each unit is optimized independently (Gaudreault *et al.* (2010)). This could explain why this industry often suffers from low order fill rate, high inventory, and significant lead time. Planning these operations using a centralized approach limits the specific operational details that can be taken into account (Gaudreault *et al.* (2010)). Thus, in order to keep the system decentralized while ensuring customer demand satisfaction, the lumber production process need to be synchronized using efficient coordination mechanisms.

This research focuses on the coordination of these production stages in order to increase the volume of sales and decrease the average inventory. A simulation approach inspired from Dumetz *et al.* (2016) is proposed to simulate the entire sawmilling production process and evaluate the use of different coordination mechanisms, based on different order acceptance policies. The planning processes are further simulated by integrating mathematical optimization models for each production stage.

In particular, two coordination mechanisms reported by Gaudreault *et al.* (2010) as being effective for the sawmilling industry are analyzed. In their original paper, the authors evaluated these mechanisms using *static* datasets, namely a fixed planning horizon as well as a fixed and known demand for the whole planning horizon. We now evaluate such coordination mechanisms with a more realistic dynamic order arrival process, which calls for periodic production replanning as well as the implementation of order acceptance policies (i.e. *Available-to-Promise*, *Capable-to-Promise*, *Stock*). Results show that in this context, replanning using the aforementioned mechanisms leads to poor performance, which may be explained by the high level of coproduction which affects coordination. A hybrid push/pull coordination mechanism

taking into account the decoupling point concept is therefore proposed and evaluated. Simulation reveals it leads to a higher order acceptance rate and lower inventory. From an industrial point of view, this study provides information regarding how better coordination can be achieved in a decentralized production system with coproduction.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 5.2 introduces preliminary concepts about the North American lumber industry and coordination in supply chains as well as the coordination mechanisms evaluated. Section 5.3 describes the simulation framework needed to carry out the experiments and presents the experiments and the results. Finally, Section 5.4 concludes the paper.

5.2. Preliminary concepts

5.2.1. North American lumber industry

Lumber production encompasses many particularities that distinguish it from other industries. Its production process is carried out following three production stages (sawing, drying, and finishing), as illustrated in Figure 19. Logs come from different forest areas and are processed according to several cutting patterns (1). The mix of sawn lumber obtained at the exit of the first stage are of various lengths, thicknesses, and qualities. Next, these sawn pieces of lumber are grouped according to their physical characteristics and dried using high-capacity kilns (2). The lumber is then planed, trimmed, and sorted at the finishing unit (3). The lumber is kept in stock until delivered to customers. Each production stage is therefore very different from the others by having its own particular production process. Furthermore, at each stage, an inventory of semi-finished products is typically built to ensure the continuity of the process.

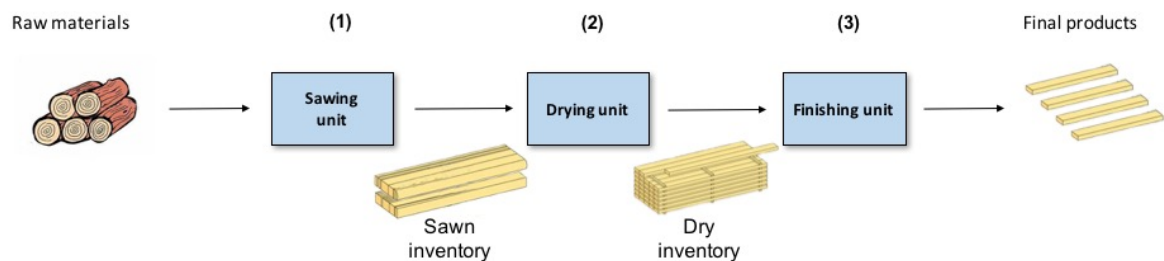


Figure 19. Description of the lumber production process

This process is also said to be *divergent*: from a single raw material, several final products are obtained. Moreover, many products are obtained at the same time and this cannot be avoided (*coproduction*). The characteristics of the logs and the cutting pattern used allow a certain control over this coproduction system (see Figure 20 adapted from Wery *et al.* (2014)). Sawmills typically use historical data to forecast the expected quantities of various products that may be obtained from a specific class of logs.

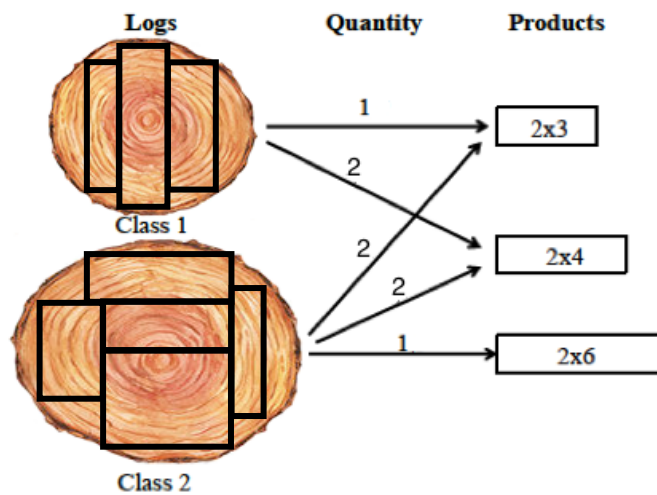


Figure 20. Example of a production matrix (Adapted from Gaudreault *et al.* (2010))

The result is that it is difficult to plan the production at each stage without the use of large inventories of semi-finished and finished products. In this context, and because the North American lumber industry is a commodity market, North American sawmills have adopted a push system that consists of producing lumber *to stock*, considering their constraints such as

supply volume, production capacity, etc., instead of taking into account the customer demand and to produce *on order*.²

A way to better respond to the demand is to plan the production stages using specialized models that take these particularities into consideration. Here are some examples of advanced tools at the operational level developed by researchers to deliver the right product to the right customer.

For the sawing operations, Maturana *et al.* (2010) presented several authors who have worked on the selection of the right cutting pattern to generate the highest volume and/or value: Oceaña and Schmoltdt (1996); Todoroki and Rönnqvist (1999); Winn *et al.* (2004). Todoroki and Rönnqvist (2002) proposed a model that considers the optimization at the sawing operations according to general demand for sawn products. Maturana *et al.* (2010) compared two methods (a mathematical model and a heuristic) to select the best cutting patterns over a period of a few weeks in a sawmill, taking into account the demand for final products. The volume supplied is predetermined and there are no stochastic events in the business environment. Gaudreault *et al.* (2010) proposed a MIP model to schedule the sawing operations in a sawmill. The goal was to maximize the production value and minimize order lateness. More recently, Alvarez and Vera (2014) proposed a robust optimization method for tactical level planning of sawing operations (i.e. the main decision concerns the quantity of logs requested to satisfy the demand). They focus on uncertainty of the sawing process yield and they showed that computing robust solutions does not much deteriorate the objective-function value.

Concerning drying operations, Gascon *et al.* (1998) developed a heuristic to minimize order lateness for the lumber drying process. Aggarwal *et al.* (1992) developed a MIP to plan drying operations for the furniture industry. Their model also included the purchase of dry wood. Yaghubian *et al.* (2001) also develop a dry kiln planning model taking into account the possibility of buying dried wood or to dry it. The objective function was to satisfy the demand at the lowest cost. Gaudreault *et al.* (2010) proposed a MIP model to schedule the drying

² The North American lumber system relies on a standardization process lead by the NLGA that defines strict dimensions and qualities. This makes lumber a commodity market. The situation is different in Europe where most pieces are made to order according to specific characteristics.

operations in a sawmill. The goal was to maximize the production value and minimize order lateness. Marier *et al.* (2016) proposed a MIP planning model that dynamically generates load patterns during the drying planning process. This model is currently used in the forest products industry.

For the finishing operations, Gaudreault *et al.* (2010) introduced a MIP model to schedule the finishing operations in a sawmill. The goal is to maximize the production value and minimize order lateness. Marier *et al.* (2014) adapted this model to plan the finishing operations in a sawmill and allow a period-to-period production plan. The model requires the unit to be at 100% of its production capacity.

Even though all of these models can certainly be helpful for this industry, there is still a need to coordinate the three main production stages and, as a result, to align the different production plans in order to ensure that the whole production system leads to global benefits, as introduced below.

5.2.2. Supply chain coordination

Coordinating an internal or external supply chain involves being able to manage dependencies between activities and efforts of each entity so as to achieve a common goal (Malone & Crowston (1994)). Rose *et al.* (2002) defined coordination as “a set of rules and procedures to ensure the operation of a group”. Conversely, the lack of coordination in decentralized systems is associated with inaccurate forecasts, low capacity usage, excessive inventory, inadequate customer service, high inventory costs, increased customer response time, and low quality (Ramdas & Spekman (2000), Kanda *et al.* (2008), Arshinder *et al.* (2011)). To facilitate the coordination of decentralized systems, some mechanisms can therefore be implemented between various activities of the same company as well as between various companies of a supply chain.

At the inter-firm level, Li and Wang (2007) proposed a review of these different coordination mechanisms for centralized and decentralized supply chains. Most common mechanisms concern the use of contracts (Cachon (2003)), information sharing (Yu *et al.* (2001)), joint decision making (Turban, Sharda, & Delen, (2011)), and cost/benefits sharing (McLaren, *et al.*(2002); Elleuch (2013); Audy *et al.* (2012)).

At the intra-firm level, coordination mechanisms typically focus on similar approaches. Muhl (2003) showed the importance of coordination encompassing different jobs (i.e. several local optimizers) in the automotive industry. The study concerned an assembly line encompassing three units: the body assembly, the painting unit, and the final assembly. Each unit was optimized independently, and various performance indicators were used to evaluate their efficiency. The idea was to vary the parameters of each local optimizer. Furthermore, in order to qualify and quantify quality of the overall flow in the entire final assembly plant, the authors developed a simulator of the production system combined with a weighted indicator system. The study showed the interest in considering the local optimizers (decentralized way) within a more global optimization approach (centralized way).

In the forest-products industry, the particularities explained in Section 5.2.1 call for specific models. However, less attention has been paid concerning coordination in the forest-products industry (Larsson *et al.* (2016); Ajayi (2016)). At the inter-firm level, the forest products supply chain still needs coordination efforts to continue expanding and become more profitable (Alam *et al.* (2014)). Moyaux *et al.* (2003) showed that information sharing can reduce the bullwhip effect and increase the performance of the forest supply chain in terms of global costs. Lehoux *et al.* (2009) showed that the profit of two forest products companies could be significantly improved via increased coordination and collaboration. Guajardo and Rönnqvist (2015) showed the benefits of a coalition between various actors for wood transportation. Alayet *et al.* (2016) proposed a centralized production planning model for multiple forest companies in order to manage wood fiber freshness and ensure enough wood chip production.

At the intra-firm level, Gaudreault *et al.* (2010) studied the problems of intra-coordination and proposed a planning model for each stage of the lumber production process (sawing, drying and finishing). These models, mentioned in Section 5.2.1, were coordinated using the following mechanisms: *Two-phase planning* mechanism and *Bottleneck-first*. The following subsections explain the mechanisms in detail as they will be part of the coordination mechanisms tested in our simulation.

5.2.2.1. Two-phase planning

In this mechanism (see Figure 21), two phases are executed. Demand is first tentatively propagated from one production stage to the other, beginning with the phase that is closest to the customer. A tentative plan is made by this unit, taking into account the customer's demand (1), but without any supply constraint (infinite supply). This allows computing the *ideal* supply needed by this unit. It becomes the demand that will be transferred to the next phase (2), etc. The sawing unit (3) plans its operations according to its real supply and the demand it received from the drying unit. Drying then produces its real production plan according to the real supply it got from the sawing unit (4). This generates the supply used by the finishing unit to plan its production (5).

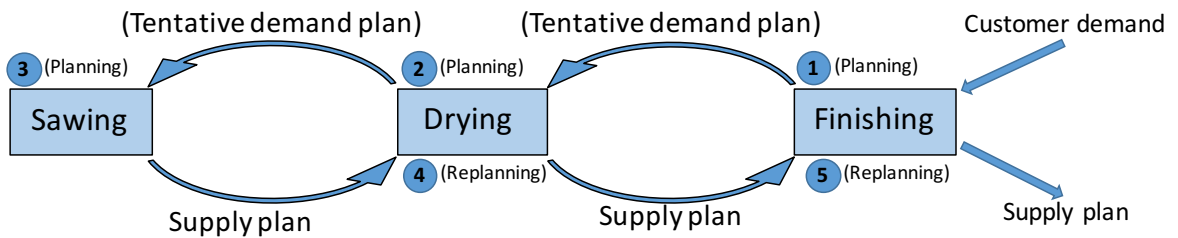


Figure 21. Two-phase coordination mechanism

5.2.2.2. Bottleneck-first planning

In this second mechanism defined as bottleneck-first planning (Figure 22), the customer demand is transferred directly to the bottleneck unit (the drying unit in most North American sawmills). The drying unit must have information about finishing processes and capacity in order to plan its own internal operations according to the demand for finished products. Production planning then occurs as in the Two-phase planning mechanism.

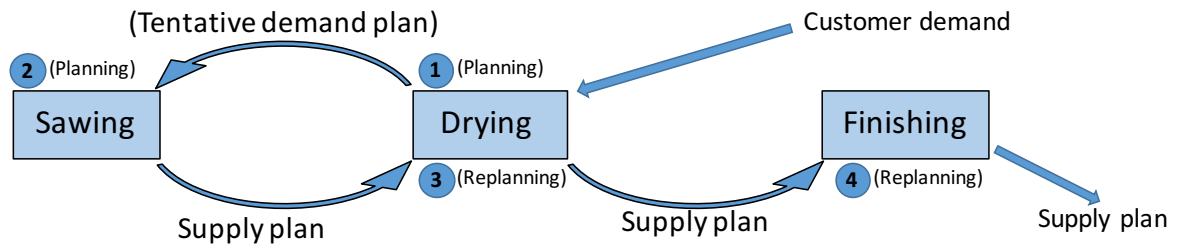


Figure 22. Bottleneck-first coordination mechanism

5.2.2.3. Evaluation of coordination mechanisms

The previous mechanisms were evaluated in Gaudreault *et al.* (2010), using real data such as production processes, products, orders, inventory, prices, various costs, supply, and capacities from a Canadian lumber company. Data were extracted from the ERP system of the company. Using an agent-based simulation platform, they evaluated these coordination mechanisms according to the number of late deliveries. The authors showed that over a fixed period of sixty days, the Bottleneck-first planning mechanism obtained the best results in terms of on-time delivered orders for a bottleneck located at the drying stage.

5.3. Assessing coordination mechanisms in a dynamic context

As opposed to the fixed planning horizon and fixed demand context explored by Gaudreault *et al.* (2010), this paper aims to simulate a lumber production system where orders are generated dynamically and periodic production replanning is carried on.

To achieve this goal, the simulation model proposed by Dumetz *et al.* (2016) was adapted for the context under investigation (Figure 23).

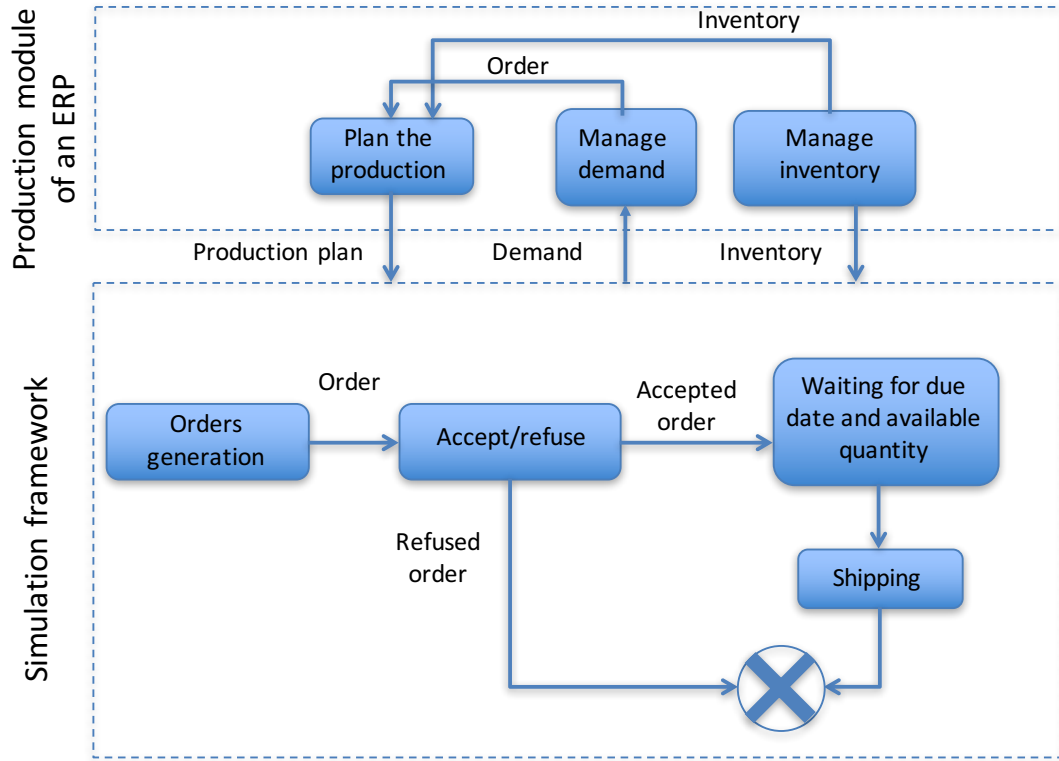


Figure 23. Conceptual representation of the simulation framework (adapted from Dumetz *et al.* (2016))

The simulation model was implemented using Simio software and combined with a “custom-built ERP” which uses mathematical models to generate a production plan for each lumber production stage. Orders are generated according to a Poisson distribution (Ben Ali *et al.* (2014); Marier *et al.* (2014)). These orders are then accepted or refused according to a predetermined order acceptance policy (e.g. *Available-to-promise (ATP)*, *Capable-to-promise (CTP)*, or *Stock* policy if the item is already in stock). Under ATP, an order of size Q is accepted only if Q is smaller than or equal to the expected inventory, for every period of the planning horizon after the due date:

$$Q \leq I + \sum_{t=\text{now}}^{D-1} (P_t - E_t) - \max_{D \leq t \leq T} \{ \sum_{k=D}^t (E_k - P_k) \} \quad (1)$$

Where D is the order due date, T is the simulation horizon, I is the current inventory, P_t is the production at period t , and E_t is the commitment at period t . Accepting an order of size Q on CTP means that a tentative production plan is computed to verify whether the order can be satisfied without compromising the previous commitments. When an order is accepted, the simulation model waits for the due date and the available quantity and then delivers the order.

In Dumetz *et al.* (2016), the sawmilling production system was considered as ‘centralized’, i.e. the model used raw material as an input and created a production plan over a given horizon for which the outputs were the final products. In this paper, the production system is decentralized because, as previously introduced, a centralized approach would not be feasible in practice due to the complex relationship between each sawmilling activity. For each production unit, a specific model from the literature is used to optimize the production plan. At the sawing stage, a model from Marier *et al.* (2014) was adapted based on the sawing model from Gaudreault *et al.* (2010) to provide a period-by-period production plan, taking into account the raw material supply, the sawing capacity, and various cutting patterns. At the drying level, a MIP/constraint hybrid planning model developed by Marier *et al.* (2016) is used to dynamically generate load patterns during the planning while taking into account the results from the sawing model, the physical constraints of the kilns, as well as various drying constraints such as the type of wood to dry. At the finishing operation, a model adapted by Marier *et al.* (2014) from Gaudreault *et al.* (2010) is exploited. The simulation developed in this article integrates these three planning models in order to evaluate different coordination mechanisms for a decentralized lumber production system

The production stages are coordinated using the Two-phase planning and Bottleneck-first planning mechanisms (as described in Sections 5.2.2.1 and 5.2.2.2). For the purpose of comparison, we will also simulate a straightforward “push” approach. Sawing operations are first planned with the sole objective of maximizing production value. Then, the drying stage is planned based on the sawn products received, and the finishing operations are finally planned (Figure 24).

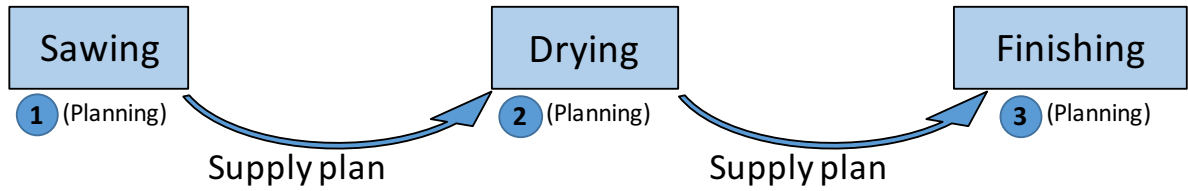


Figure 24. Push planning system

5.3.1. Experiments

In order to compare and evaluate the mechanism's ability to coordinate the decentralized lumber planning process, the efficiency of the system is measured in terms of sales and average inventory along the production process. Within Scenarios 1a and 1b, the push approach (see Figure 24) is used in combination with an ATP (1a) or a Stock (1b) order acceptance policy. We recall this planning process only takes into account the product prices without any information concerning the demand. Within Scenarios 2 and 3, the Two-phase planning and the Bottleneck-first planning mechanisms are respectively simulated, while coupled to a CTP order acceptance policy. For each received order, it is necessary to check if the current production plan allows accepting the order or not (as we would do with ATP). If not, production is tentatively replanned to check if the order could be produced without violating previous commitments. Table 2 summarizes these scenarios.

Table 2: Scenarios of coordination mechanisms and order acceptance policies

Scenario	Coordination mechanism	Order acceptance policies
1a	Push planning system	ATP
1b	Push planning system	Stock
2	Two-phase planning	CTP
3	Bottleneck-first planning	CTP

The data used comes from a North American sawmill's real production plan, although the size of the problem was aggregated in order to ensure a verifiable experiment plan. Using a Pareto-inspired approach, 10 products were considered, representing approximately 80% of the total production volume over the year. This dataset is representative of the forest products industry in North America. Incoming orders and customer lead-times for order deliveries were not extracted from an actual database, but randomly generated as in Ben Ali *et al.* (2014). A demand intensity was also used to vary the quantity of incoming orders. This demand intensity corresponds to the amount of demand received over a year and is expressed as the percentage of the maximal production capacity of the company. As an example, at a demand intensity of 100%, the amount of demand the company will receive will be equal to its entire production capacity over one year. At 200%, it will be two times its entire production capacity over one year. The simulation horizon covered one year of production, each day being divided into two production shifts (periods) of 7 hours. A warm-up period of one year was added to the simulation horizon to reach the steady state situation. Enough raw materials were available for the actual production capacity of the first activity (sawing). No late orders are tolerated as we want to ensure customer satisfaction. Dumetz *et al.* (2016) showed that an order acceptance policy which accepts all orders whatever the consequences will generate late orders and lead to very poor customer satisfaction. The key performance indicators to evaluate the usefulness of the mechanisms were the number of sales and the average inventory. The number of sales is chosen instead of the revenue because each order has the same selling value. Fifteen replications for each scenario were done which allowed reaching a significant confidence level (95%). Each replication had a computation time of one and a half to three hours (depending on the demand intensity), for a total simulation time of 1350 hours.

5.3.2. Results

Figure 25 shows the number of sales according to the demand intensity for the four scenarios tested.

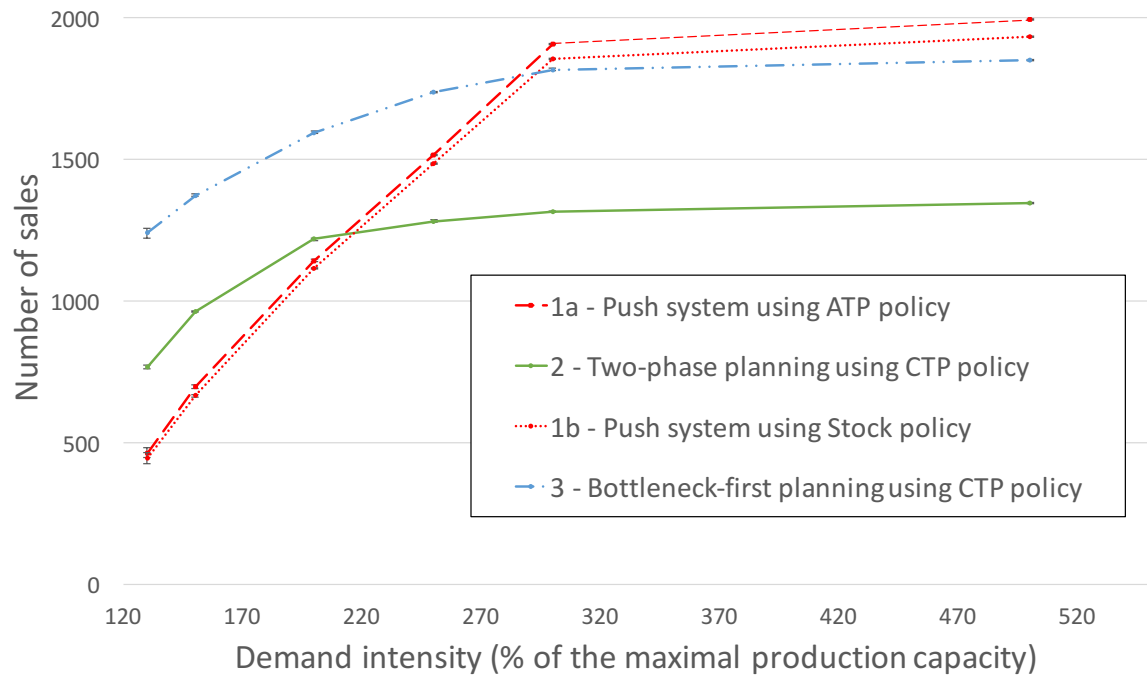


Figure 25. Number of sales according to the demand intensity (Push system, Two-phase planning and Bottleneck-first planning, using Stock, ATP and CTP order acceptance policies; confidence interval 95%).

Results show that with the push approach (1a and 1b), the ATP policy leads to better performance than the Stock policy in terms of number of sales; being able to sell a product as soon as production is planned pays off.

The Bottleneck-first approach (Scenario 3) leads to better results than the Two-phase planning mechanism (Scenario 2), as it was also observed by Gaudreault *et al.* (2010). Two-phase planning and Bottleneck-first planning mechanisms both outperform the Push approach for small and medium-demand intensities. However, at a very high demand intensity, the opposite situation occurs. This may seem counterintuitive as these mechanisms plan according to the demand. We recall that using a CTP policy leads to frequent replanning in reaction to a new order arrival. Because of the high level of coproduction the lumber industry is facing, producing the item from an order also involves producing many other items that may be difficult to sell, while desynchronizing the production units. With the push approach, the mill is driven by the global market value and the plans are kept “as is”, which minimizes this effect.

We therefore investigated a mechanism mixing pull and push in order to minimize this effect. The mechanism takes care of the decoupling point, defined by Blackstone (2008) as “the locations in the product structure or distribution network where inventory is placed to create independence between processes or entities”. Previous study investigates the impact of the location of the decoupling point on the capability to accept an order in the sawing industry (Cid *et al.* (2009)). However, in their work, only the planning process is simulated in a fix horizon. In our study, we aim to simulate the planning process, the production process and sales. We also use a rolling horizon with order that are dynamically generated.

For our case under study, coordinating the system based on this element involves using a push system to create inventory until the decoupling point and then using a pull system that takes into account the customer needs. In the experiment it is assumed that the decoupling point is associated with the drying stage. As a result, from raw material reception to the bottleneck, the production planning is carried out using a push approach, while for operations from the bottleneck to the finishing stage, the production planning is based on the Bottleneck-first approach. Figure 26 illustrates this in a context where the drying unit is the bottleneck.

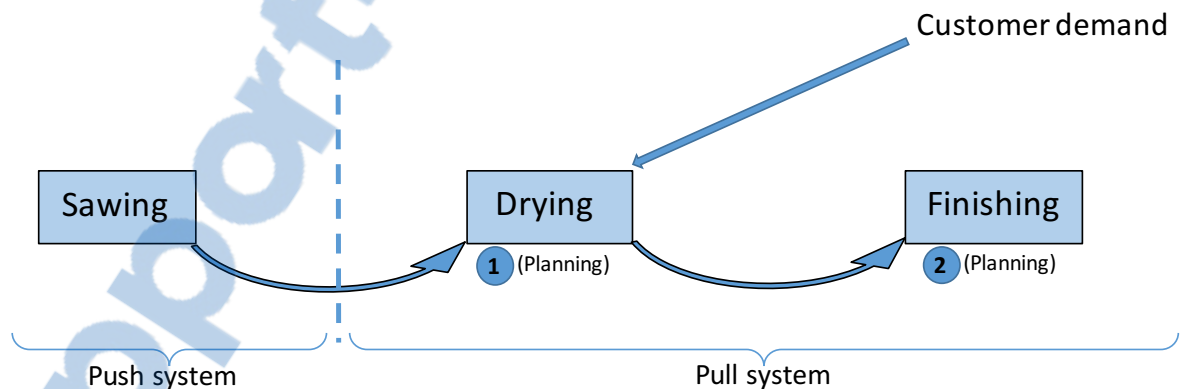


Figure 26. Decoupling point before the drying stage

Results obtained when using the new mechanisms are presented in Figure 27. The simulation model and datasets used were the same as in the previous experiments, which allow comparing the impact of the new mechanism with the one obtained from the other mechanisms tested in Scenarios 1a, 1b and 3. It can be observed that the number of sales is much greater than

the one obtained with scenarios 1 and 3. The harmful effect observed previously seems to have been eliminated. Furthermore, the new mechanism dominated the others for any demand intensity level.

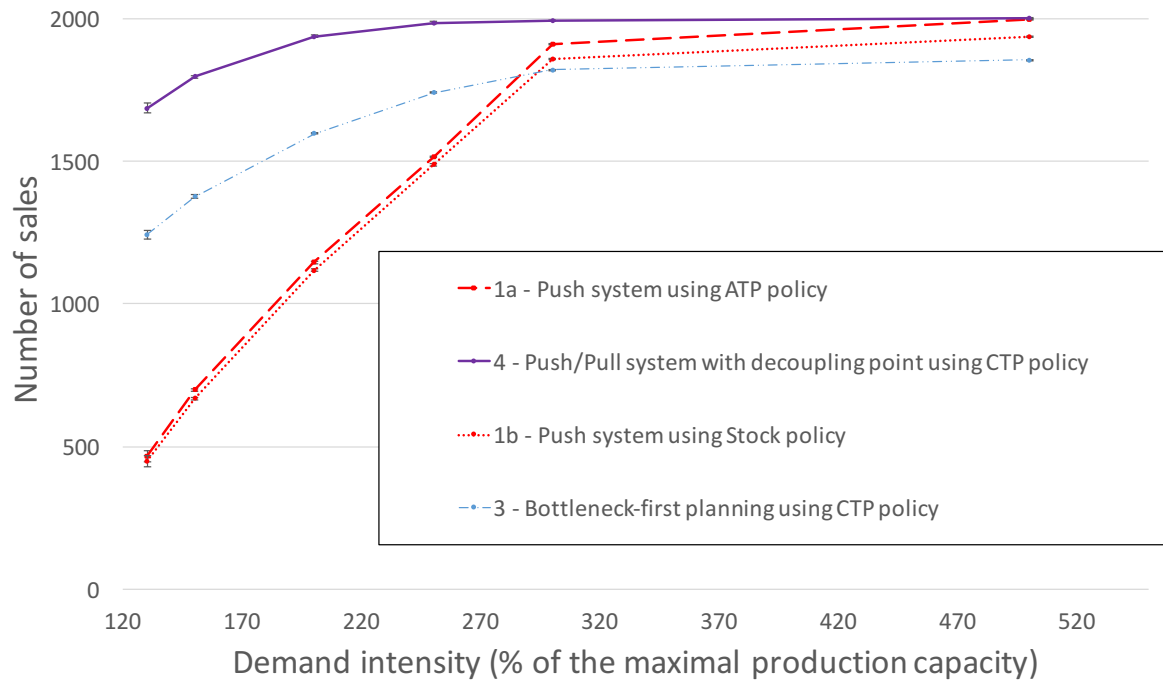


Figure 27. Number of sales according to the demand intensity (Push system, Bottleneck first mechanism, push/pull system with decoupling point using Stock, ATP, and CTP order acceptance policies) when the bottleneck is at the drying activity; confidence interval level 95%

In the previous experiments, the production bottleneck was located at the drying unit, as is the case for most sawmills in North America. We now move the bottleneck (and the decoupling point) to the finishing stage. As a counter example, we also test the situation where the decoupling point is kept at the drying unit although the finishing operation is still the bottleneck.

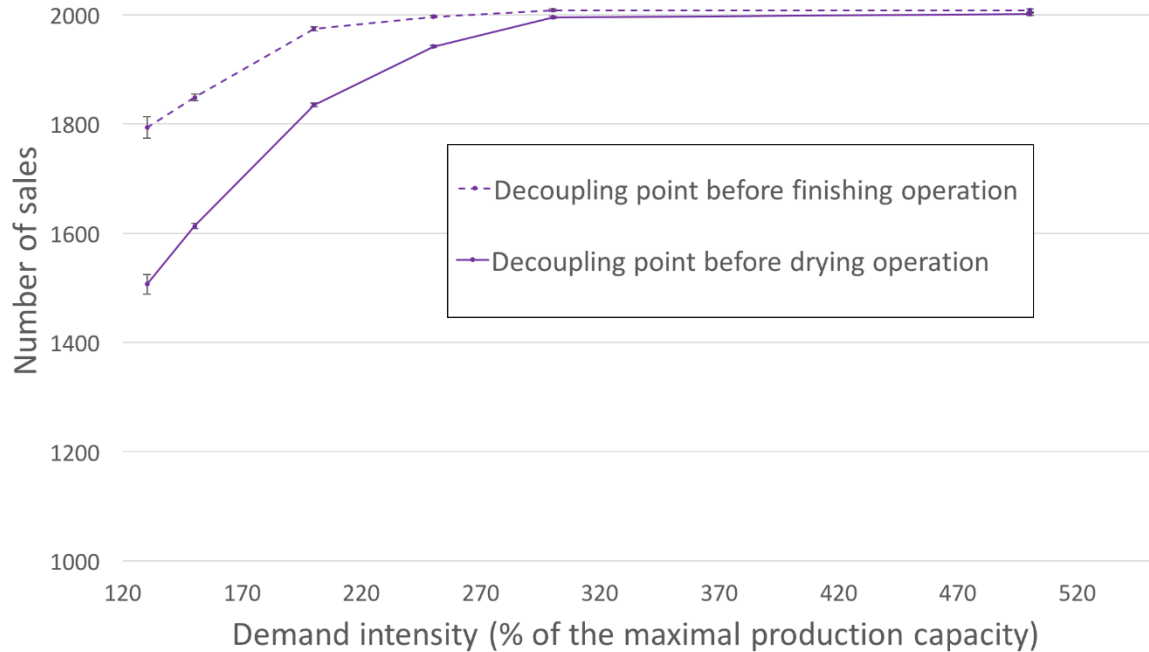


Figure 28. : Number of sales according to the demand intensity when the bottleneck is at the finishing unit; confidence interval level 95%.

As illustrated in Figure 28, better sales are obtained when the decoupling point is correctly positioned, just before the bottleneck (i.e. finishing in this case). If the decoupling point remains before the drying activity, the number of sales is indeed lower since this is not the current bottleneck.

5.3.3. Impact of the coordination mechanism on the average inventory

Another aspect the decision maker needs to consider is the average inventory level of sawn, dried, and finished products. They represent a significant part of the total production cost while requiring significant storage space and cash flow.

Figure 29 shows the average inventory (MFBM³) for a precise demand intensity (300%) for each type of product. A demand intensity of 300% was chosen because at this demand intensity, the number of sales for all scenarios is almost equal (see Figure 9). We recall that the demand intensity is the amount of orders received in one year. It is expressed as a percentage of

³ MFBM: Thousand board-feet is the unit of measure for the volume of lumber used in North America.

the maximal production capacity. Here, the bottleneck is located back at the drying stage and the same dataset as in previous experiments is used.

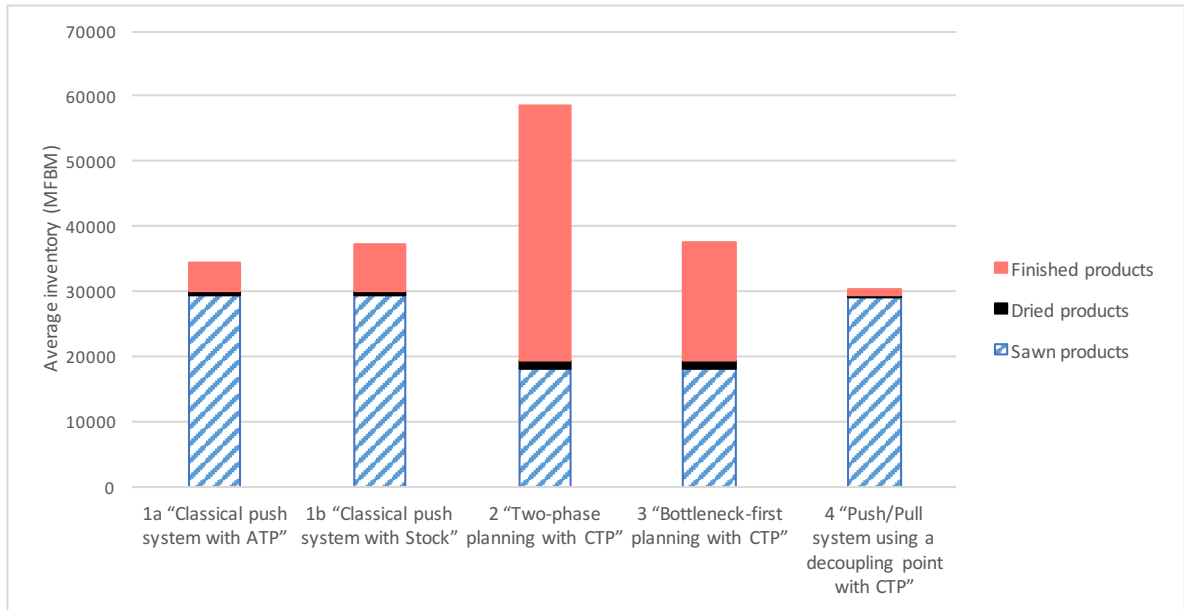


Figure 29. : Average inventory for each scenario for sawn products, dried products, and final products (Demand intensity = 300% of the maximal production capacity) when the bottleneck is at the drying stage; confidence interval 95%.

Scenario 4 (push/pull system with decoupling point) presents the smallest total average inventory. The bottleneck stage can change its plan to better fit the demand, resulting in less inventory of finished products. Other products also stay for a longer period in inventory.

It can also be observed that the average inventory of sawn products is the same for Scenarios 1a, 1b, and 4. Indeed, in all these scenarios the sawing operations are planned in the same manner. Scenarios 2 and 3 show larger inventory for finished products, caused by the coproducts obtained when replanning on demand, coupled to the lack of synchronization between drying and finishing (which is improved when introducing a decoupling point in Scenario 4).

5.4. Conclusion

In this research, we simulated the operational planning of the lumber production process, an industry dealing with a high level of coproduction. We tested and compared different coordination mechanisms in order to evaluate their performances. The market context and the production parameters of a typical North American sawmill were considered in the experiment and a rolling horizon with dynamically incoming orders was used. Coordination mechanisms known to be good in a “static” context appeared as inefficient when facing a dynamic order arrival process. This is due to the coproduction phenomenon; each time a new order arrives and is processed, it leads to the production of co-products that may be difficult to sell or that may not be needed by the next production phases. On the other hand, the proposed hybrid push/pull coordination mechanism which takes into consideration the decoupling point before the bottleneck stage seemed very profitable for any level of demand intensity, outperforming all the other approaches.

From an industrial point of view, this study provides information regarding how better coordination can be achieved in decentralized production systems with coproduction.

In future work, it would be interesting to integrate a tactical planning level that could define production targets to follow over a long period of time, in order to provide the forest products industry with a complete tool to better plan and control its lumber production system.

5.5. Références

Aggarwal, A.K., Vemuganti, R.R., and Fetner, W. (1992) A model-based decision support system for scheduling lumber drying operations. *Production and Operations Management*, 1(3): 320-328.

Ajayi, A.P. (2016). Analytical study of supply chain collaboration guiding forestry products in a developing economy. *International Journal of Business Performance and Supply chain Modelling*, 8(4): 277-298.

Alam, M.B., Shahi, C., and Pulkki, R. (2014). Economic impact of enhanced forest inventory information and merchandizing yards in the forest product industry supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48: 189-197.

Alayet, C., Lehoux, N., Lebel, L., and Bouchard, M. (2016). Centralized supply chain planning model for multiple forest companies. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54(3): 171-191.

Alvarez, P. P., and Vera, J. R. (2014). Application of robust optimization to the sawmill planning problem. *Annals of Operations Research*, 219(1): 457-475.

Arshinder, K., Kanda, A., and Deshmukh, S. G. (2011). A review on supply chain coordination: coordination mechanisms, managing uncertainty and research directions. In *Supply chain coordination under uncertainty*. Springer Berlin Heidelberg, 39-82.

Audy, J. F., Lehoux, N., D'Amours, S., and Rönnqvist, M. (2012). A framework for an efficient implementation of logistics collaborations. *International transactions in operational research*, 19(5): 633-657.

Ben Ali, M., Gaudreault, J., D'Amours, S., and Carle, M.-A. (2014). A Multi-Level Framework for Demand Fulfillment in a Make-to-Stock Environment - A Case Study in Canadian Softwood Lumber Industry. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nancy, France, November 5-7*.

Bhatnagar, R., Chandra, P. and Goyal, S.K. (1993) Models for multi-plant coordination. *European Journal of Operational Research*, 67(2): 141-160.

Blackstone, J. H. (2008). *APICS Dictionary—The Standard for Excellence in the Operations Management Profession*. APICS—The Association of Operations Management Dictionary, 1-156.

Cachon, G. P. (2003). Supply Chain Coordination with Contracts. In *Handbooks in Operations Research and Management Science: Supply Chain Management*, 11: 227-339.

Cid Yáñez, F., Frayret, J. M., Léger, F., and Rousseau, A. (2009). Agent-based simulation and analysis of demand-driven production strategies in the timber industry. *International journal of production research*, 47(22): 6295-6319.

Dumetz L, Gaudreault J, Thomas A, Lehoux N, Marier P, and El-Haouzi, H. (2016) Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with coproduction. *International Journal of Production Research*, 55(13): 3631-3643.

Elleuch, M. (2013). Collaboration entre les acteurs pour accroître le profit du réseau de création de valeur. MSc., Université Laval, Québec.

Gascon, A., Lefrançois, P., and Cloutier, L. (1998). Computer-assisted multi-item, multi-machine and multi-site scheduling in a hardwood flooring factory. *Computers in Industry*, 36: 231-244.

Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.-M., Rousseau, A., Lemieux, S., and 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): 168-189.

Guajardo, M., and Rönnqvist, M. (2015). Operations research models for coalition structure in collaborative logistics. *European Journal of Operational Research*, 240(1): 147-159.

Kanda, A., and Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions. *International journal of production Economics*, 115(2): 316-335.

Larsson, M., Stendahl, M., and Roos, A. (2016). Supply chain management in the Swedish wood products industry – a need analysis. *Scandinavian journal of forest research*, 31(8): 777-787.

Lehoux, N., Audy, J. F., D'Amours, S., and Rönnqvist, M. (2009). Issues and experiences in logistics collaboration. In *Working Conference on Virtual Enterprises*. Springer, Berlin, Heidelberg, 69-76.

Li, X., and Wang, Q. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179, 1-16.

Malone, T. W., and Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 26(1): 87-119.

Marier, P., Gaudreault, J., and Robichaud, B. (2014). Implementing a MIP model to plane and schedule wood finishing operation in a sawmill: lessons learned. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Marier, P., Gaudreault, J., and Noguer, T. (2016). Kiln Drying Operations Scheduling with Dynamic Composition of Loading Patterns. In Proceedings of ILS, Information System, Logistics and Supply Chain conference, Bordeaux, France, June 1-4.

Maturana, S., Pizani, E., and Vera, J. (2010). Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4): 667-674.

McLaren, T., Head, M., and Yuan, Y. (2002). Supply chain collaboration alternatives: understanding the expected costs and benefits. *Internet research*, 12(4): 348-364.

Moyaux, T., Chaib-Draa, B., and D'Amours, S. (2003). Multi-agent coordination based on tokens: Reduction of the bullwhip effect in a forest supply chain. In Proceedings of the 2nd international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, Saint Paul, Minnesota, 670-677.

Muhl, E., Charpentier, P., and Chaxel, F. (2003). Optimization of physical flows in an automotive manufacturing plant: some experiments and issues. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4): 293-305.

Oceña, L. G., and Schmoltdt, D. L. (1996). Grasp – A prototype interactive graphic sawing program. *Forest Products Journal*, 46(11): 40-42.

Öner, S., and Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 188(3): 793-810.

Ramdas, K., and Spekman, R. E. (2000). Chain or shackles: understanding what drives supply-chain performance. *Interfaces*, 30(4): 3-21.

Rose, B., Garza, L., Lombard, M., Lossent, L., and Ris, G. (2002). Towards a common repository for collaborative knowledge in product design activity. In Proceedings of the 1st Symposium of the working group Management Skills and Knowledge in Industrial Engineering for the GDR MACS, 85-90.

Todoroki, C. L., and Rönnqvist, M. (1999). Combined primary and secondary log breakdown optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 50(11): 219-229.

Todoroki, C. L., and Rönnqvist, M. (2002). Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17: 79-89.

Turban, E., Sharda, R., and Delen, D. (2011). *Decision support and business intelligence systems*. 9th Édition. Boston Prentice Hall.

Wery, J., Gaudreault, J., Thomas, A., and Marier, P. (2014). Decision-making framework for tactical planning taking into account market opportunities (new products and new suppliers) in a coproduction context. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Winn, M. F., Wynne, R. H., and Araman, P. A. (2004). Alog: A spreadsheet-based program for generating artificial logs. *Forest Products Journal*, 54(1): 62-66.

Yaghubian, A. R., Hodgson, T. J., and Joines, J. A. (2001). Dry-or-buy decision support for dry kiln scheduling in furniture production. *IIE transactions*, 33(2) : 131-136.

Yu, Z., Yan, H., and Edwin Cheng, T. (2001). Benefits of information sharing with supply chain partnerships. *Industrial management & Data systems*, 101(3): 114-121.

Chapitre 6 : Simulating and Evaluating Tactical-Operational Coordination Mechanisms for a Divergent Production System with Coproduction

L'article intitulé "Simulating and Evaluating Tactical-Operational Coordination Mechanisms for a Divergent Production System with Coproduction" est inséré dans ce chapitre. Il a été soumis au journal IJPE (International Journal of Production Economics) en mai 2018. La version présentée dans cette thèse est identique à la version soumise.

Résumé

Différents outils d'optimisation sont depuis longtemps utilisés en industrie, facilitant entre autres la planification de la production à des niveaux de planification différents (ex : modèles stratégiques à très long terme, modèles tactiques, et modèles opérationnels à très court terme). Choisir les mécanismes d'interopération de ces systèmes (ex: la fréquence de planification de chacun, l'information transmise entre eux et l'interprétation que doivent en faire les autres systèmes) est depuis toujours un défi.

Nous nous intéressons à la planification de la production aux niveaux tactique et opérationnel dans les scieries nord-américaines, une industrie de commodité caractérisée par des prix volatils et un processus de production divergent avec co-production. La planification tactique permet de produire des plans agrégés. On peut tirer de ces plans des informations qui deviendront des cibles et/ou contraintes pour le niveau opérationnel (ex : quantités à produire/stocker par produit et par période, cibles de vente, etc). Nous utilisons la simulation pour comparer et évaluer l'impact de différentes approches de coordination sur la performance de l'entreprise. Nous simulons à la fois le système de production, le processus de planification mis en œuvre, ainsi que le contexte de marché. Nous montrons que le choix du type d'informations à transmettre du niveau tactique au niveau opérationnel devrait varier selon plusieurs facteurs, tels que : la politique d'acceptation des commandes (ATP, CTP) utilisée par l'entreprise, l'ampleur de la saisonnalité des prix de vente, ou le fait d'être ou non dans un marché en surcapacité.

Abstract

Various optimization tools have been used in industry to facilitate production planning at different levels of aggregation (i.e. long-term strategic models, tactical models, and short-term operational models). Choosing the interoperability mechanisms of these systems, such as the planning frequencies, the information passed between them and the interpretation that other systems must make of them, has always been a challenge. This work focusses on production planning at the tactical and operational levels in North American sawmills, a commodity industry characterized by volatile prices and a divergent production process with coproduction. In this context, tactical planning produces aggregated plans and information from these plans can be used as targets and / or constraints at the operational level (e.g. quantities to be produced / kept in stock per product and per period, sales targets, etc.). A simulation of this production system was therefore developed, encompassing the planning process and the market dynamic, to compare and evaluate the impact of different coordination approaches on business economic performance. Results showed that economic performance can be enhanced by tactical-operational coordination. However, the type of information which should be shared from the tactical level to the operational level varies according to several factors, including the company's order acceptance policy, prices seasonality, and the presence or absence of overcapacity on the market.

6.1. Introduction

Production planning at the tactical and operational levels is a widely studied topic. The forest industry is not an exception and many optimization models exist to plan lumber production in order to meet demand (D'Amours *et al.* (2009)). The forest industry operates in a particular context defined inter alia by a divergent flow of products (several finished products from the same raw material) with co-production (production of several products at the same time).

The tactical planning of a sawmill aims to obtain an aggregated plan for a horizon of 12 months, which will generally be updated once a month. It integrates the three main activities of the production process which are the sawing, drying and finishing operations. This planning takes into account the company's strategic objectives, available resources, available capacity, long-term commitments, forecasts of demand and supply constraints. The tactical plan aims to maximize the expected income; it predicts how resources will be used and acts as a guide for sales and production work. In fact, information from tactical planning is used to determine the operational plan (which has a much shorter horizon of a few weeks) in order to ensure income over a long period as well as a good operational performance. For example, the tactical level might recommend keeping stocks of a particular product during certain periods in order to be able to take advantage of an improvement in future prices, which the operational level alone cannot anticipate.

Since tactical models do not have the same level of accuracy as operational models, it is necessary to communicate and / or disaggregate information from the tactical level in order to transfer it to the operational level. This information can take the form of, for example, production targets (what to produce at each period for each operation included in the timber production process), inventory targets (what quantity to keep in stock at the end of a given period) or information about estimated monthly sales prices.

This study contributes to scientific literature by addressing the coordination issue between two planning levels which have different time horizons. It proposes an approach to design the production planning process incorporating both tactical and operational planning levels. Various information can be extracted from the tactical plan to become constraints and /

or targets that will be used at the operational level. However, the type of information which should be transferred from the tactical level to the operational level depends on various factors, such as the order acceptance policy used at the sales level (Available-to-promise [ATP], Capable-to-promise [CTP]), the importance of price seasonality, or the presence of overcapacity on the market. The evaluation of the different scenarios is carried out using simulation. The simulation platform of Dumetz *et al.* (2016) is used to simulate the production system, the planning process at the tactical and operational levels, as well as the market behavior, using a rolling horizon. This simulation also implements a tactical planning model and three operational planning models (one for each production activity: sawing, drying and finishing operations) from Marier *et al.* (2014a, 2014b, 2016). The company's performance (i.e. sales volumes, revenues, inventories) is evaluated according to the planning system in place, the order acceptance policy used (ATP, CTP), and the context of the market (volume of demand, seasonality of prices). Results show that certain information / targets / constraints shared from the tactical level to the operational level can lead to performance improvement or degradation depending on the context. This is crucial information for industries as it has a direct impact on the performance of the company, in terms of generated income.

The article is organized as follows. Section 6.2 presents a brief literature review on hierarchical planning as well as on the peculiarities of tactical and operational planning in the North American lumber industry. Section 6.3 introduces the simulation model used to complete the experiments and Section 6.4 describes the experiments and the results obtained as well as a discussion. Finally, Section 6.5 concludes the paper.

6.2. Preliminary concepts

6.2.1. Hierarchical planning

The planning process encompasses a large number of decisions at different hierarchical levels (Vollmann *et al.* (1997)). At the strategic level, long-term decisions are made (business plan). At the tactical level, mid-term decisions, covering an average planning horizon of 6 to 18 months, involve defining the quantities to produce and to stock so as to meet the objectives defined at the strategic level and achieve the financial objectives defined in the budget. The

operational level establishes a detailed plan. The horizon is very short, about a few weeks, usually reviewed weekly or more often depending on the business context.

There are many mathematical models for tactical and operational production planning in various industries (see for example Díaz-Madroñero *et al.* (2014)). Nevertheless, it remains essential to ensure synergy between the two levels of planning. For example, all of the orders anticipated by the tactical level will not necessarily occur and the operational planning must take that fact into account.

It is difficult to design and validate a planning process that incorporates both tactical and operational levels while maintaining good consistency. The time scales used for planning (both the size of the planning horizon and the review frequency) at these two levels are not the same, which implies some form of disaggregation. Typically, monthly data is used for tactical planning while the operational level needs daily data. In addition, the tactical level sometimes works with product families⁴ while the operational level works with individual products. The tactical level's "macro-vision" is sometimes necessary for several reasons: on the one hand, there is not enough knowledge of the data and only aggregated data is available or makes sense, and on the other hand, the problem has to be simplified to be solved in its entirety (Simchi-Levi, (2003)).

For many years, much research work has led to proposals for obtaining tactical plans and / or disaggregation of these tactical plans into production plans for the operational level. The term Hierarchical Production Planning (HPP) (see Bitran and Haas, (1977)) is often used to describe the general planning process in stages. A problem that is too complex to solve may be simplified and solved in an aggregated way and the result may be used to solve the more detailed problem (Hax and Meal, (1984)). McKay *et al.* (1995) provided a review of the concept of HPP and highlighted different applications in the manufacturing sector. Aghezzaf *et al.* (2011) used this approach to solve a planning problem in a two-level environment, composed of semi-finished products (aggregate level) and finished products (disaggregated level), by proposing a

⁴ In our experiments, the products were not aggregated into families, in accordance with current practice of North American sawmills. The forecasts for these distinct convenience products are generally available by product. Furthermore, aggregation into families did not greatly reduce the planning model's complexity.

robust HPP model. Based on Genin's (2003) work on the stability and robustness of tactical plans and Ortiz and Thomas's (2004) work on the disaggregation of tactical plans into master production schedules through several optimization models, Thomas *et al.* (2012) proposed a methodology to disaggregate a tactical plan. They showed, among other things, that this disaggregation allowed stability of the operational plan under certain conditions (building stocks). The tactical plan provides aggregated information, i.e. product family per month. A first model makes it possible to transform these quantities of product families by month into a number of finished products per month. A heuristic is then used to provide a stable operational plan (finished products per week). Ortiz and Albornoz (2012) developed a methodology based on the concept of HPP allowing a disaggregation of a monthly plan of product families into a weekly plan of finished products. The case studied concerned a company that produces reusable bags in Chile and Peru. The disaggregation is done using several optimization models imposing constraints to keep the coherence of the final production plan. Vogel *et al.* (2016) compared two approaches: hierarchical production planning versus integrated production planning. They assumed that (1) some of the reasons justifying the use of a hierarchical approach to plan production at different levels are not legitimate and (2) optimizing a series of subproblems can lead to sub-optimality of the general problem. They proposed two models, a hierarchical model taking into account an aggregate level and a disaggregated level, and an integrated model combining these different levels. In their context, they showed that the integrated approach delivers a better result and that the necessary computation time, although longer than for the hierarchical model, is acceptable. Even though this study is interesting, most of the practical cases require a hierarchical decomposition as well as the use of several specialized models at the operational level (e.g. several factories). In the case of sawmills, it is currently not possible to use a single model to plan sawing, drying and finishing operations (see Gaudreault *et al.* (2010)).

6.2.2. Production planning for the North-America lumber industry

This study focuses on operations planning at the tactical and operational levels in North American sawmills. Lumber production consists of three sub-processes in almost independent facilities: sawing (turning logs into planks), drying (removing excess moisture from the wood), and finishing (to give parts the desired finish, then grading and trimming parts). Each operation

is different and has its own constraints and characteristics (for more information, see Gaudreault *et al.* (2010)). Production planning is a real challenge because of the particular characteristics of this industry. Indeed, from the same raw material, several finished products are obtained (divergent process) simultaneously (coproduction) (see Öner and Bilgiç (2008)). The impact of this divergent flow is very significant and affects the intermediate products at the sawing, drying and finishing operations, which multiplies the number of finished products originating from the same log. In addition, the market price for these products are highly susceptible to seasonality (Marier *et al.* (2011)). The North American lumber market is a convenience market whose products must meet the National Lumber Grades Authority (NLGA) ⁵ criteria. The price therefore fluctuates greatly depending on supply and demand.

In this context, planning at the tactical level aims to define objectives for the production of sawing, drying and finishing, by product and by period, taking into account that the coproduction phenomenon limits the options of the company (since producing one product entails the production of several, maybe unnecessary, coproducts). The tactical models used are therefore developed to take these constraints into account. They also make it possible to establish inventory targets (i.e. for which products to build stocks) and when these quantities should be sold to take advantage of the market prices. Again, storage constraints and costs need to be taken into account as well as contract constraints. Depending on the volume of demand and the price fluctuation, the strategy to be used may vary widely (Marier *et al.* (2014a)). There are many planning models at the tactical level, including Singer and Donoso (2007) who proposed an optimization model for production planning in a Chilean sawmill, or Marier (2011) and Marier *et al.* (2014) who introduced a tactical MIP model integrating operations (sawing, drying and finishing) planning and sales.

Planning at the operational level defines the exact operations schedule by taking into account the actual demand and the information provided by the tactical level. The tactical level serves as a reference frame, allowing the operational level to carry out its short-term planning

⁵ The North American lumber system relies on a standardization process lead by the National Lumber Grades Authority (NLGA) that defines strict dimensions and qualities. This makes lumber a commodity market. The situation is different in Europe where most products are made to order according to specific characteristics.

while taking into account future visions. Different models to plan for each of the three lumber production operations are also needed at this decision level. For the sawing operation, planning models generally include the selection of cutting patterns which generate either a better volume of sawn timber or a better material yield or aim to promote the cutting of a particular product. The cutting pattern represents how the log should be cut and which products will be obtained. There are a multitude of cutting patterns, taking into account the natural characteristics of the log. Maturana *et al.* (2010) listed some operational planning models such as the ones developed by Occeña and Schmoltdt (1996), Todoroki and Rönnqvist (1999) and Winn *et al.* (2004). They also developed a deterministic planning model for sawing operations for a sawmill in Chile. However, in their model, they assume that all data are known. Varas *et al.* (2014) improved this model by taking into account uncertainty in demand and raw material, using a robust optimization approach. For the drying operation, several models exist such as those of Yaghubian *et al.* (2001) who developed a planning model that takes into account the possibility of buying dry wood or drying it and Marier *et al.* (2016) who proposed a MIP model that dynamically generates loading patterns. A loading pattern indicates how a dryer should be filled, taking into account the different wood species (which do not dry at the same speed), wood dimensions and the characteristics of the dryer. For the finishing operation, Gaudreault *et al.* (2010) and Marier *et al.* (2014) proposed planning models that maximize the value produced by taking demand into account and minimizing delays.

In forestry literature, tactical disaggregation and tactical / operational coordination approaches are also studied. As it is the case for other industries, the main challenges are to obtain a certain level of coherence between the decisions taken at the different levels.

In forestry operations, Beaudoin *et al.* (2008) showed how to take into account the impact of decisions made at the tactical level on the feasibility of the operational plan. The authors propose an application of the Schneeweiss (2003) generic hierarchical model allowing for a better alignment between the different levels of planning. Their application is for the wood harvesting capacity, which determines the number of contractors to be hired during the year. For the sawing industry in Chile, Alvarez *et al.* (2015) used robust optimization to obtain tactical plans, generating robust solutions that ensure good operational feasibility. Recently, Lobos and Verra (2016) studied the problem of tactical and operational planning in a sawmill in Chile.

Their study focuses on the use of aggregated and disaggregated models at the tactical level and their short- and long-term impact on storage costs, raw material purchase costs and production costs. In their context, a model is said to be disaggregated if it uses several flow patterns for sawing and a model is said aggregated if it uses an average of all these flow patterns. They used a "two-stage formulation" (Birge and Louveaux, (1997)) to coordinate long-term decisions and short-term decisions and presented four models covering these two levels of planning (tactical and operational). In their study, only sawing is taken into account while in North America, sawmills also need to dry and finish their wood in order to meet NLGA standards, which complicates the coordination between tactical and operational levels.

This study uses proven planning models that ensure feasible production plans in order to evaluate the impact of the different types of information shared from the tactical level to the operational level on the financial performance of a typical North American sawmill. The production system, the planning process and the market context (defined by a seasonality in the selling prices of products and a demand) are taken into account.

6.3. Simulation framework

In order to compare and evaluate the impact of different coordination approaches between the tactical level and the operational level on business economic performance, both the decentralized planning process and production process (sawing, drying and finishing) are simulated. The simulation incorporates the physical production system, the planning process implemented, the market context as well as the company's order acceptance policy, whether it is ATP or CTP.

The production planning process incorporates tactical and operational planning levels. The information is shared from the tactical level to the operational level as constraints or targets to be respected (e.g. quantities to be produced / kept in stock per product and per period, sales targets, sales price forecasts, etc.).

6.3.1. Configuring the framework

The simulation framework proposed by Dumetz *et al.* (2016, 2018) was exploited and a tactical decision level was added (see Figure 30).

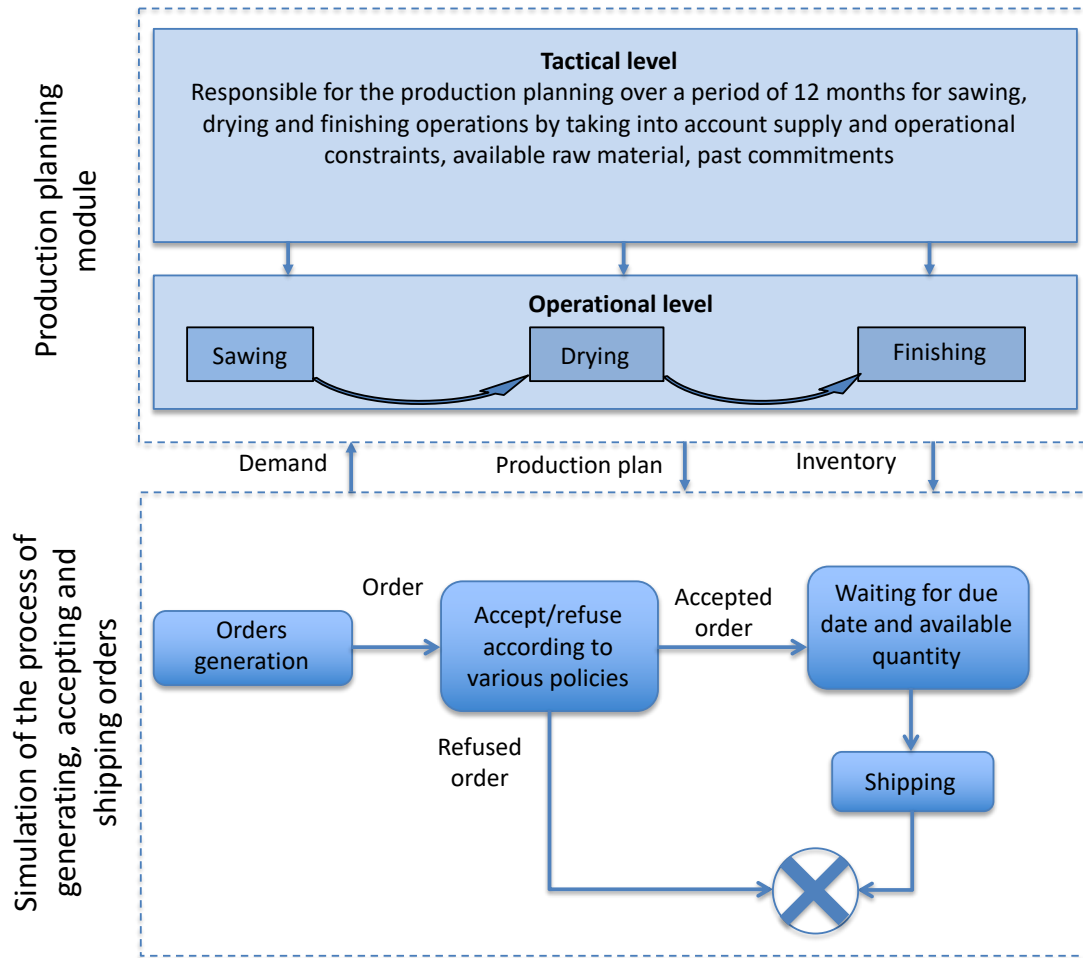


Figure 30. Conceptual representation of the simulation framework (adapted from Dumetz *et al.*, 2016 and 2018)

The simulation framework was developed in the Simio environment, a discrete event simulation software. Orders are generated following a Poisson distribution as proposed by Ben Ali *et al.* (2014). These orders are then accepted or rejected based on an order acceptance policy (e.g. ATP or CTP). In particular, with the ATP policy (Blackstone, (2008)), an order of size Q is accepted only if Q is smaller or equal to the expected stocks for each period of the planning horizon after the due date.

$$Q \leq I + \sum_{t=\text{now}}^{D-1} (P_t - E_t) - \max_{D \leq t \leq T} \{ \sum_{k=D}^t (E_k - P_k) \}$$

(1)

where D is the due date of the order, T is the simulation horizon, I is the current inventory, P_t is the production at period t and E_t are the commitments at period t .

The CTP policy (Blackstone, (2008)) amounts to first attempting to accept an order with the ATP policy, as previously explained. If the order cannot be accepted using the ATP policy, a provisional production plan is drawn up, including this new order, to check if the order can be satisfied without compromising previous commitments. If the order cannot be made in time, the customer is notified, and it is assumed that he has withdrawn his request. When an order is accepted, the simulation model waits for the delivery date and the quantity available and the order is delivered.

The simulation framework incorporates a custom-built Enterprise Resource Planning (ERP) that is responsible for tactical and operational planning. This ERP was programmed in C# .net environment, which makes use of different specialized models and algorithms taken from the literature. At the tactical level, the Sales and Operations Planning model for the lumber industry published by Marier *et al.* (2014a) is used. This integrated model provides a production plan for sawing, drying and finishing over a one-year horizon. The constraints at different stages of production (raw material, dryer configuration, flow patterns, ...) are taken into account. Based on the assumed sales prices from forecasts, a production plan is generated with the aim of maximizing income and reducing costs. Figure 31 shows the inputs and outputs used in this model.

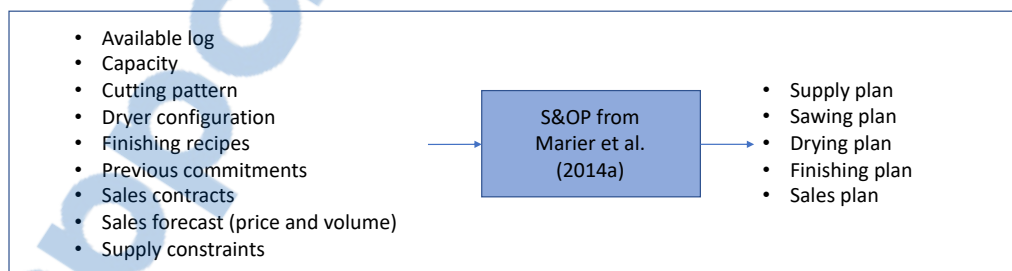


Figure 31. Inputs and outputs used in the S&OP model

At the operational level, three independent planning models for the sawing, drying and finishing operations are also exploited. For sawing, a model from Marier *et al.* (2014b) based on the work of Gaudreault *et al.* (2010) is used. This model makes it possible to obtain a plan

considering the raw material (the available logs), the sawing capacity and the different flow patterns. Figure 32 shows the inputs and outputs used in this model.

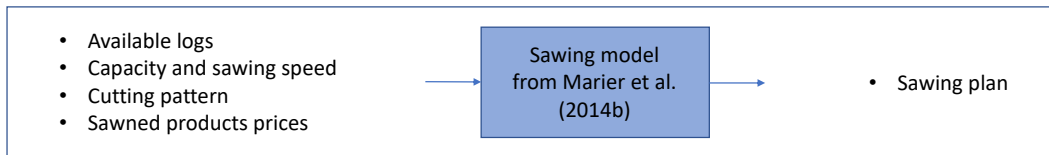


Figure 32. Inputs and outputs used in the sawing model

For drying, the MIP model developed by Marier *et al.* (2016) is used. This model dynamically generates loading patterns taking into account the configuration of dryers, different constraints such as the species of wood to be dried, as well as the results of sawing planning. Figure 33 shows the inputs and outputs used in this model.

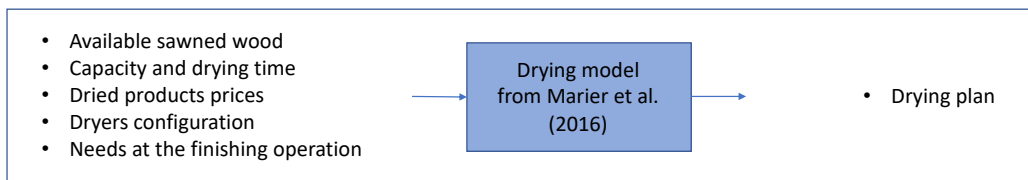


Figure 33. Inputs and outputs used in the drying model

For the finishing operation, a model from Marier *et al.* (2014b), based on the work of Gaudreault *et al.* (2010) is used. Figure 34 shows the inputs and outputs used in this model.

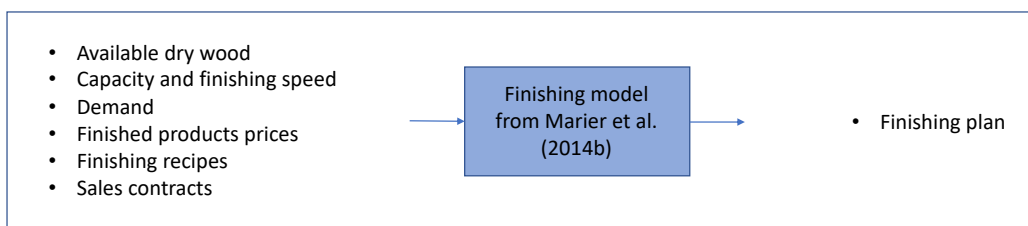


Figure 34. Inputs and outputs used in the finishing model

These models operate in a decentralized manner and coordination is done through a coordination mechanism. This coordination mechanism ensures that the needs or the demand of

each subsequent operation is taken into account. It is based on a hybrid push / pull approach which considers the decoupling point in the production system. If the decoupling point is at the drying operation, a push approach is used for sawing and a pull approach is used for drying and finishing operations. Thus, for the drying plan, finishing requirements are taken into account and for the finishing plan, final demand is used. For more information, see Dumetz *et al.* (2018).

6.3.2. Tactical-operational coordination

The tactical and operational levels have different planning horizons and review frequencies. In the proposed simulation, the tactical model is configured for a planning horizon of 12 periods of 1 month. It is rescheduled each month according to the rolling horizon principle. The operational models work on a basis of 14 periods of 12 hours worked each week. The plan covers the upcoming 56 periods (1 month), with weekly rescheduling.

Information input at the tactical level (e.g. orders) is aggregated by month. Instructions transmitted from the tactical to the operational level, such as inventory targets at the end of the month, are assigned to the last period of the corresponding model for the month in question. For a monthly production target (at the tactical level), the target is subdivided for each sub-period present at the operational level. (See Figure 35)

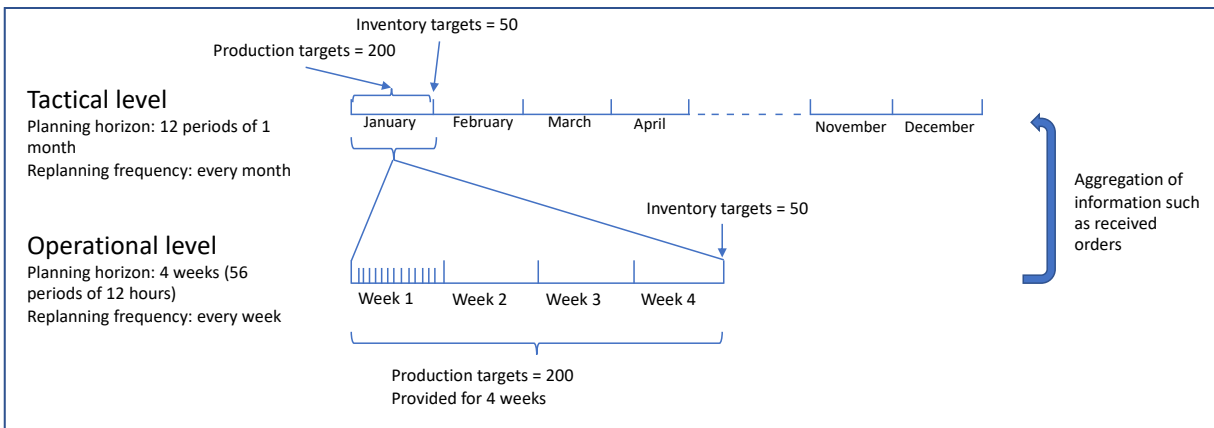


Figure 35. Tactical-operational coordination

Products are not aggregated into families since previous work from Gaudreault *et al.* (2010) and Marier *et al.* (2014a) showed that this does not help tactical models, which are linear models whose resolution time is little affected by the number of products.



6.4. Experimentations

To compare and evaluate the impact of different coordination approaches between the tactical level and the operational level on business economic performance, different planning approaches were devised. Each approach is defined by an order acceptance policy (ATP or CTP), as well as by the type of information transmitted from the tactical level to the operational level. The type of information could simply be a forecast of monthly product sales prices (which gives the operational level many planning possibilities) or more specific production and inventory targets. Table 3 shows the studied approaches.

Table 3: Description of the planning approaches evaluated

<p>Tactical instructions</p> <p>Order acceptance policy</p>	<p>Monthly price forecast for each product</p> <ul style="list-style-type: none"> -The tactical level informs the operational level of monthly selling prices -The operational level seeks to maximize the produced value 	<p>Production targets / inventory targets</p> <ul style="list-style-type: none"> - Production targets (what to produce at sawing, drying and finishing) and inventory targets extracted from the tactical plan -Information transmitted to the operational level which seeks to maximize the produced value under these constraints
<p>ATP</p>	<p>(Blue dashed line)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Order acceptance is made under the ATP policy. -Order acceptance does not create a future shortage. 	<p>(Red dashed line)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Order acceptance is made under the ATP policy, with additional constraints (inventory targets must be met). -Order acceptance does not create a future shortage.
<p>CTP</p>	<p>(Full blue line)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Order is established if it can be accepted under the ATP policy. -If this is not the case, the production plan is 	<p>(Full red line)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Order is established if it can be accepted under the ATP policy, subject to the additional constraints

	<p>modified to include this new order only if it does not compromise previous commitments</p>	<p>(inventory targets must be met).</p> <p>-If this is not the case, the production plan is modified to include this new order only if it does not compromise previous commitments under constraints that the new production plan meets the production and inventory targets.</p>
--	---	---

The case used in this simulation was inspired by a North American sawmill and is representative of the forest industry in North America. To allow reasonable simulation times, 10 products were taken into account in these experiments. The sales prices associated with these products were provided by the sawmill. The simulation covers a two-year production horizon. The raw material supply (log) has infinite capacity. The demand for each product is randomly generated using a Poisson distribution as in Ben Ali *et al.* (2014). The delivery time required by the customer is randomly generated using a triangular distribution. Each order consists of a single product with a fixed order quantity of 50 MPMP. The PMP board foot is a measurement used for lumber in North America and a MPMP corresponds to one thousand feet of board. In addition, two other parameters define the market context: (1) the magnitude of the seasonality of product prices and (2) the annual demand intensity in relation to production capacity. With respect to price seasonality (1), the industrial data used for this case study reflected the seasonality of prices on the market. In addition to the original demand scenario (average seasonality), two other seasonality scenarios were defined for analysis purposes: one where there was no seasonality (a product has the same average value each month) and one where the seasonality was amplified (strong seasonality). To amplify the seasonality of a product's sales price, the 6 highest selling prices of the year were increased by \$ 50 (or 10% on average),

whereas the other 6 sales prices (lowest prices) were decreased by \$ 50. Figure 36 illustrates the seasonality amplification process for a product.

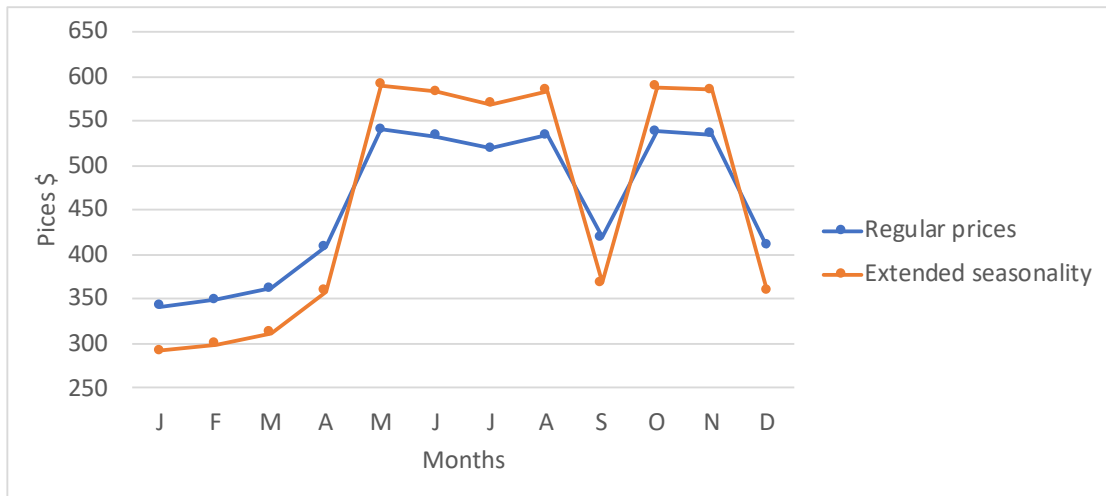


Figure 36. Seasonal amplification process

The demand intensity (2) is defined as follows. For a 100% intensity, the demand that the company will receive over one year will be equal to its entire annual production capacity. Other percentages are also tested since it has been shown (Dumetz *et al.* (2016)) that due to the coproduction phenomenon, the demand must be much greater than the production capacity to be able to sell all the products. For this reason, this intensity was varied between 200% and 3000%.

A total of 15 replications per scenario were conducted in order to obtain significant confidence intervals (95% confidence level). The total simulation time was 350 hours.

6.4.1. Results

6.4.1.1. Market without seasonality

Figure 37 shows the income according to the demand intensity in a market without seasonality.

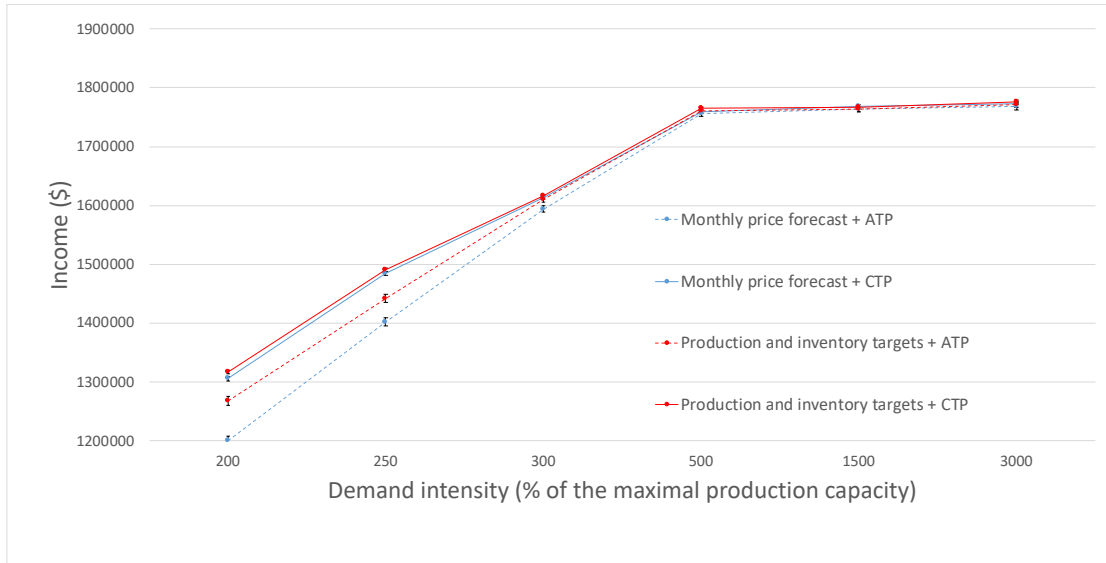


Figure 37. Income according to demand intensity, type of targets transmitted from the tactical level to the operational level and order acceptance policy used (no seasonality).

Considering results concerning the ATP policy (dashed lines), providing production targets (red dashed line) at the operational level gives a better income than only providing operational price information (blue dashed line). The phenomenon is especially noticeable at low intensity. This is because if the operational level works only on the basis of the selling price (blue dashed line), it will produce a basket of products with a maximal value, without taking into account the possible volume to be ordered in the future. The demand for some products will then be too low and it will not be possible to sell all of the created stock. Many orders that are not in line with the products stocked will be rejected, and a high level of stock will be observed. On the other hand, when the tactical level transmits production targets and inventory targets (red dashed curve) established by the tactical level, the planning takes into account demand profiles, therefore, the performance is better. Logically, as the demand intensifies, the difference between these two lines decreases.

When strictly comparing the two approaches using the CTP order acceptance policy (full lines), the performance is very similar whether the tactical level provides inventory and production targets (full red line) or simple forecasts of sales price (full blue line). Nevertheless, at low intensity of demand, there is a slight statistically significant added value with the

approach that meets the production targets of the tactical level (full red line). Indeed, although the inventory targets are zero because there is no seasonality (so no interest in building a stock in order to sell it when the price is high), this approach is slightly better because it allows taking into account the demand profile.

In general, it can be noted that for low demand intensity (less than 300%), the two approaches using a CTP policy (full lines) perform better than approaches using the ATP policy (dashed curves). In fact, any order accepted in ATP is also accepted in CTP (see the algorithm associated with the CTP policy, section 3.1) and changing the production plan makes it possible to accept more orders (CTP policy). At high intensity (more than 500%), all the curves generate an almost equal income. On the one hand, the demand is large enough that order acceptance using the ATP policy has used up all of the production capacity. On the other hand, the production plans are almost the same, regardless of the tactical targets used. Indeed, the production forecasts from the tactical level are large enough to manufacture only the most profitable products, so production plan will match the one based on sales prices.

6.4.1.2. Low seasonality market (base case)

Figure 38 shows the income according to the demand intensity for a market with low seasonality.

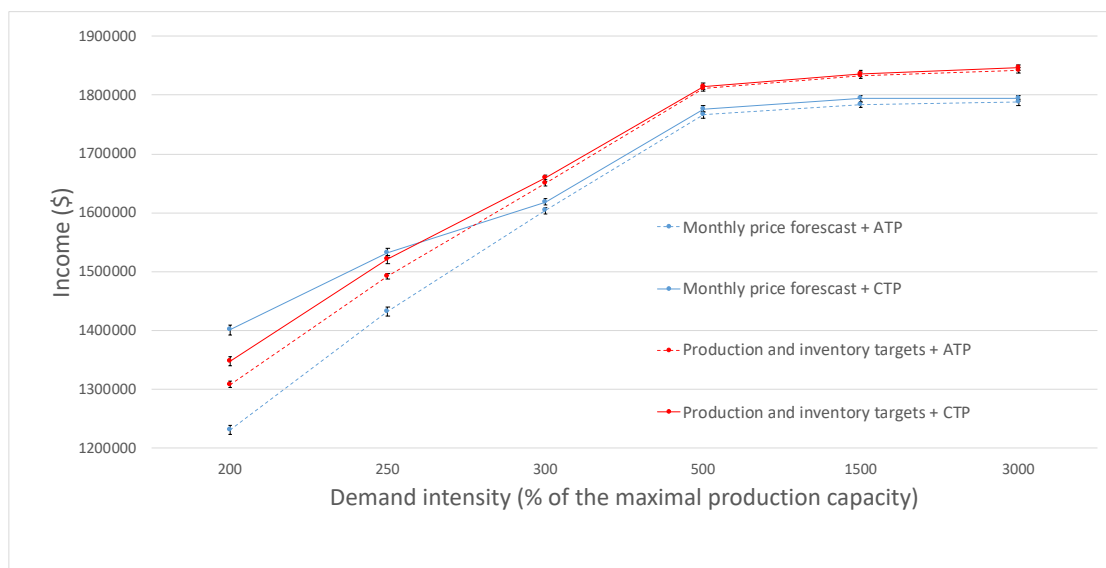


Figure 38. Income according to demand intensity, type of targets transmitted from tactical level to operational level and order acceptance policy (low seasonality)

Results show that using an ATP policy, following production targets and inventory targets from the tactical level, increases the income (red dashed line) compared to maximizing the generated value by taking into account the information on the monthly sales prices of products (blue dashed line). Unlike the case without seasonality (previous section), this superiority is valid even at high demand intensity. Indeed, this comes from the fact that by respecting inventory targets, it is possible to sell a product at a higher price in a future period.

Concerning the approaches using the CTP policy (full red and full blue lines), at low demand intensity (here below 260%), the CTP policy where the tactical level provided simple price forecasts (full blue line) presents a better income. This indicates that when the demand is low with a seasonal market, it is better for operational planning to be based on sales price forecasts rather than following production and inventory targets dictated by the tactical plan. This seems counter-intuitive but is mainly due to the following. Producing a new plan that satisfies the new order, past commitments and inventory targets all together seems very difficult. Many orders are thus refused because the new plan cannot meet all of these constraints. On the other hand, removing the constraint of following the inventory levels allows the CTP policy to be more agile in a situation where demand is low. At high intensity (above 260%), the full red and blue lines are reversed. This indicates that operational planning is better based on production and inventory targets than on price forecasts. This is due to the combination of two elements. As a reminder, any order accepted in ATP is also accepted in CTP (see the algorithm associated with the CTP policy, section 3.1). With this in mind, these two elements are: (1) the approach using the CTP policy based only on the information of the selling prices of the products (full blue line) has a performance resembling that of the associated ATP policy (blue dashed line). Indeed, the approach using the ATP policy is more and more efficient because the demand intensity increases. This leaves fewer possibilities to include a new order using the CTP policy. On the other hand, (2) the generated income using an ATP approach that meets production and inventory targets (red dashed line) is much better when demand intensity increases. Although it is still difficult to achieve a plan following all constraints, it is still possible to accept some additional orders using the CTP policy. Therefore, this approach using a CTP policy while

respecting inventory and production targets (full red line) benefits from the good performance offered by an ATP policy that follows production and inventory targets, which is better than a policy using ATP and information on the selling prices of products.

Finally, in general, when comparing approaches using the same shared information by the tactical level (blue lines for price forecast and red lines for production and inventory targets), approaches using a CTP policy give a better income compared to approaches using an ATP policy. This is valid up to a high demand intensity where income becomes almost equal. In fact, the demand is high enough that all the orders which could be accepted according to the production capacity have already been using the ATP policy: then, using the ATP policy or the CTP policy leads to the same results in terms of income.

6.4.1.3. High seasonality market

Figure 39 represents the income according to the demand intensity in a situation of high seasonality.

In general, with high seasonality market, the behavior of each line corresponds to what was already observed when the seasonality was lower. The results show that income increases for all cases, compared to Figure 38 where seasonality was low (base case). The seasonality being stronger, the income is also higher, and the crossing point of these same lines does not occur at the same demand intensity (shift to the left).

It is therefore important to take into account these market parameters when choosing tactical targets to be transmitted to the operational level.

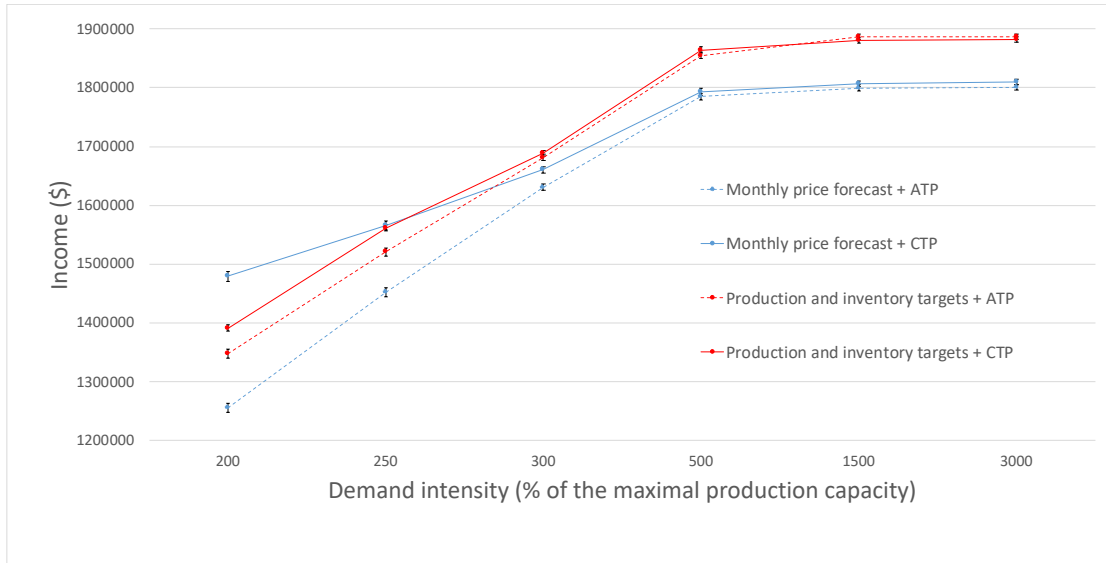


Figure 39. Income according to demand intensity, type of targets transmitted from the tactical level to the operational level and order acceptance policy (high seasonality)

6.4.2. Discussion

These results demonstrate the importance of coordinating production planning at the tactical and operational decision levels in order to achieve a plan that meets the long-term goals as well as the orders that arrive daily. This coordination is especially important because of the particular context studied here (a divergent process with co-production). The information transmitted from the tactical level to the operational level which was selected for this study (information on sales prices, production target and inventory target) are targets commonly used in the forest products industry. Results showed that the type of information transmitted, and the market context directly impacted the revenues generated. Highly relevant information for the industry, companies in the forestry sector could use these findings as a decision-making tool which recommends the best choice of information to transmit from the tactical level to the operational level according to their business context (production parameters, planning approach and market context).

6.5. Conclusion

This research studied a production planning process that incorporated tactical and operational decision-making levels of North American sawmills. Production plans based on

various information transmitted from the tactical level to the operational level were compared and evaluated by simulating the production system, the planning process as well as market behavior. In this context, the information shared from the tactical level to the operational level became targets or constraints (e.g. quantities to be produced / kept in stock per product and per period, information on the sales prices of the products used at the tactical level). These targets or constraints were used by the operational level to plan production at each stage of the lumber production process and thus meet demand. Results showed that in certain market contexts (defined by a volume of demand and a seasonality in the prices of products), the choice of the targets shared by the tactical plan and seen as constraints for the operational plan could lead to a degradation of the company's performances because of the impossibility of respecting these constraints. Conversely, for other market contexts, these same targets helped to better manage inventories and demand, especially by selling at the right time (when the selling price is higher) thus leading to an increase in income. For example, at a high demand intensity, meeting inventory targets would create a stock to sell later, at a higher price. Conversely, following these same inventory targets at a low demand intensity would lead to poor performance in terms of generated income. This is because the demand is too low or poorly known; stocks cannot be sold. These findings are vital for industries as they demonstrate the importance of coordination between various production planning levels and which information should be transmitted from the tactical plan to the operational plan to maximize income, depending on their business context.

These results were obtained in a particular context, with specific market parameters and business data. These results are therefore not prescriptive but are intended to show the importance and difficulty of choosing the coordination approach for a divergent production system with coproduction, and therefore the need for a systematic analysis of using the methodology proposed in this article. Furthermore, this methodology can be applied to other industries dealing with divergent processes with co-production, such as the agri-food sector or the oil industry.

In future work, it would be interesting to vary the calculation of targets in the tactical model based on information other than prices. For example, by setting limits by product type, setting maximum inventory levels instead of minimum levels to keep, or by proposing limits for

inventories (e.g. product A must maintain its inventory between the values x and y where $y > x$). This last proposal could possibly offer good solutions since the inventory targets are currently hard constraints to respect. If these targets were bounds, this would probably offer better opportunities to accept orders and thus increase the generated income.

6.6. Acknowledgements

We would like to thank the research consortium FORAC and its partners, as well as the financial support from NSERC.

6.7. References

Aghezzaf EH, Sitompul C, and Van Den Broecke F (2011) A robust hierarchical production planning for a capacitated two-stage production system. *Computer and Industrial Engineering*, 60: 361–372

Alvarez, P. P., Espinoza, A., Maturana, S., and Vera, J. R. (2015). Improving consistency of tactical and operational planning using robust optimization. Technical report, Universidad Catolica de Chile, School of Engineering, Santiago, Chile.

Beaudoin, D., Frayret, J. M., and LeBel, L. (2008). Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. *Canadian journal of forest research*, 38(8): 2198-2211.

Ben Ali, M., Gaudreault, J., D’Amours, S., and Carle, M.-A. (2014). A Multi-Level Framework for Demand Fulfillment in a Make-to-Stock Environment - A Case Study in Canadian Softwood Lumber Industry. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Birge, J. R., and Louveaux, F. (1997). *Introduction to stochastic programming*. 2nd Édition. New York Springer.

Bitran, G. R., and Hax, A. C. (1977). On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Sciences*, 8(1): 28-55.

Blackstone, J. H. (2008). APICS Dictionary–The Standard for Excellence in the Operations Management Profession. APICS–The Association of Operations Management Dictionary, 1-156.

D’Amours, S., Frayret, J.-M., Gaudreault, J., LeBel, L., and Martel, A. (2009). Chaînes de création de valeur. In *Manuel de la foresterie*. 2nd Édition. Éditions Multimondes. Québec, 1307-1324.

Díaz-Madroño, M., Mula, J., and Pedro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17): 5171–5205.

Dumetz L, Gaudreault J, Thomas A, Lehoux N, Marier P, and El-Haouzi, H. (2016) Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with coproduction. *International Journal of Production Research*, 55(13): 3631-3643.

Dumetz, L., Gaudreault, J., Bril El-Haouzi, H., Thomas, A., Lehoux, N., and Marier, P. (2018). Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction, *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice* (Submitted).

Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.-M., Rousseau, A., Lemieux, S., and 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): 168-189.

Genin P., (2003). Planification tactique robuste avec usage d'un APS. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.

Hax, A. C., and Meal, H. C. (1973). Hierarchical integration of production planning and scheduling. IDEAS working paper series from RePEc.

Lobos, A., and Vera, J. R. (2016). Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights. *Computers & Industrial Engineering*, 95: 53-63.

Marier, P. (2011). Gestion intégrée des ventes et des opérations dans l'industrie du sciage. Expo-Conférence. Québec, Université Laval.

Marier, P., Bolduc, S., Ali, M. B., and Gaudreault, J. (2014a). S&OP network model for commodity lumber products. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Marier, P., Gaudreault, J., and Robichaud, B. (2014b). Implementing a MIP model to plane and schedule wood finishing operation in a sawmill: lessons learned. In *Proceedings of*

MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nancy, France, November 5-7.

Marier, P., Gaudreault, J., and Noguer, T. (2016). Kiln Drying Operations Scheduling with Dynamic Composition of Loading Patterns. In Proceedings of ILS, Information System, Logistics and Supply Chain conference, Bordeaux, France, June 1-4.

Maturana, S., Pizani, E., and Vera, J. (2010). Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4): 667-674.

McKay K.N., Safayeni F.R., and Buzacott J.A. (1995). A review of hierarchical production planning and its applicability for modern manufacturing. *Production Planning & Control*, 6(5): 384-394

Oceña, L. G., and Schmoltdt, D. L. (1996). Grasp – A prototype interactive graphic sawing program. *Forest Products Journal*, 46(11): 40-42.

Öner, S., and Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 188(3): 793-810.

Ortiz Araya V., Thomas A. (2004). Proposition of disaggregation method for tactical robust planning. In IFAC/IEEE Conference on Management and Control of Production and Logistics, Santiago (Chili).

Ortiz-Araya V, and Albornoz V.M. (2012). Hierarchical planning methodology for a supply chain management. *Informatica Economica*, 16(2):14-18.

Schneeweiss C. (2003). Distributed decision making—a unified approach. *European Journal of Operation Research*, 150(2): 237-252.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., and Simchi-Levi, E. (2003). *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*. 2nd Édition. Boston McGraw-Hill/Irwin.

Singer, M., and P. Donoso. (2007). Internal Supply Chain Management in the Chilean Sawmill Industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 27(5): 524-541.

Thomas, A., Genin, P., and Lamouri, S. (2008). Mathematical programming approaches for stable tactical and operational planning in supply chain and aps context. *Journal of Decision Systems*, 17(3): 425-455.

Todoroki, C. L., and Rönnqvist, M. (1999). Combined primary and secondary log breakdown optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 50(11): 219-229.

Varas, M., Maturana, S., Pascual, R., Vargas, I., and Vera, J. (2014). Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 150: 37-51.

Vogel, T., Almada-Lobo, B., and Almeder, C. (2017). Integrated versus hierarchical approach to aggregate production planning and master production scheduling. *OR spectrum*, 39(1): 193-229.

Vollmann, T., W. Berry, and D. Whybark. (1997). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. New-York McGraw-Hill.

Winn, M. F., Wynne, R. H., and Araman, P. A. (2004). Alog: A spreadsheet-based program for generating artificial logs. *Forest Products Journal*, 54(1): 62-66.

Yaghubian, A. R., Hodgson, T. J., and Joines, J. A. (2001). Dry-or-buy decision support for dry kiln scheduling in furniture production. *IIE transactions*, 33(2) : 131-136.

Chapitre 7 : Discussion et conclusion

L'utilité de la planification n'est plus à démontrer. Son importance est cruciale dans le but de livrer le bon produit au bon moment au bon client. Une bonne planification est un gage de qualité et permet également de se démarquer face à la concurrence. Dans ce projet de doctorat, nous avons étudié la planification de la production de bois d'œuvre pour l'industrie des produits forestiers. Nous avons proposé une plateforme de simulation permettant l'évaluation comparative de stratégies de pilotage au niveau tactique et opérationnel pour les scieries nord-américaines (objectif général). Il a été vu que ces stratégies étaient composées de paramètres à définir, tels que la politique d'acceptation des commandes employée, l'horizon de planification pris en compte, les informations transmises du niveau tactique au niveau opérationnel, les mécanismes de coordination mis en place pour coordonner les activités au niveau opérationnel mais aussi pour coordonner l'échange d'information entre les niveaux de décision (tactique et opérationnel), etc. Nous avons montré que ces paramètres étaient fortement dépendant les uns des autres et influencés par le contexte de marché. L'outil proposé permet donc l'évaluation de ces stratégies dans le but de choisir celle qui sera la mieux adaptée au contexte de marché de l'entreprise.

Ensuite, dans la première publication (chapitre 4), nous avons utilisé ce modèle de simulation et proposé une plateforme de simulation plus complète pour comparer et évaluer différentes politiques d'acceptation de commandes pour des systèmes de production divergents avec coproduction. Cette plateforme de simulation englobe le précédent modèle de simulation couplé à un module de planification de la production à un niveau opérationnel. Nous avons mesuré l'impact de politiques d'acceptation de commande sur la performance d'une entreprise de sciage en termes de commandes acceptées. Cette étude a permis de montrer que la meilleure stratégie à utiliser dans un contexte divergent avec de la coproduction diffère souvent de celle qui aurait été optimale dans un contexte de fabrication classique (par exemple, assemblage). De manière surprenante au premier abord, l'approche utilisant une politique d'acceptation des commandes de type ATP s'avérait plus performante dans certains contextes de marchés, par rapport à une approche utilisant la politique CTP. Cela s'explique par la forte présence de coproduction lors du processus de transformation du bois d'œuvre.

Dans une deuxième publication (chapitre 5), nous avons simulé la planification opérationnelle du processus de production du bois d'œuvre de façon décentralisée. Nous avons utilisé le modèle de simulation et nous avons testé et comparé différents mécanismes de coordination afin d'évaluer leurs performances, en termes de nombre de ventes et de stocks moyens annuels. Le contexte de marché (quantité de demande, entre autres) et les paramètres de production d'une scierie typique en Amérique du Nord ont été pris en compte dans l'expérience et un horizon roulant avec des commandes arrivant de façon dynamique a été utilisé. Les mécanismes de coordination issue de la littérature et reconnus pour être bons dans un contexte "statique" (Gaudreault *et al.* (2010)) sont apparus inefficaces lorsque testé dynamiquement. Ceci est dû au phénomène de coproduction; chaque fois qu'une nouvelle commande arrive et est traitée, elle conduit à la production de co-produits qui peuvent être difficiles à vendre ou qui ne seront pas nécessaires pour les phases de production suivantes. Dans cette deuxième contribution, nous avons proposé un mécanisme de coordination hybride flux poussés/flux tirés qui prend en compte le point de découplage. Ce mécanisme est apparu bien meilleur dans ce même contexte dynamique. Nous avons montré qu'en utilisant un tel mécanisme, couplé à des politiques d'acceptation des commandes adéquates, le nombre de ventes augmentait, du fait de la bonne coordination entre les activités, et les stocks moyens annuels diminuait.

Dans une troisième publication (chapitre 6), nous avons conçu un processus de planification de la production intégrant les niveaux de décision tactique et opérationnel pour une scierie nord-américaine. Nous avons donc modifié le modèle de simulation existant pour y intégrer un niveau de décision tactique. Nous avons comparé et évalué différentes informations transmises d'un niveau à un autre en simulant le système de production, le processus de planification ainsi que le comportement du marché. Nous avons montré que dans certains contextes de marché (défini par un volume de demandes et une saisonnalité dans les prix des produits), le choix des cibles transmises par le plan tactique et assimilées à des contraintes pouvait mener à une dégradation de ces performances à cause de l'impossibilité de respecter ces contraintes. Inversement, pour d'autres contextes de marché, ces mêmes cibles permettent de mieux gérer les inventaires et la demande, notamment en rendant possible la vente au bon moment (là où le prix de vent est plus haut), menant ainsi à une augmentation du revenu.

D'une manière générale, chacune des trois contributions met l'accent sur un ou plusieurs paramètres à choisir lors de l'implantation d'une stratégie de pilotage : le choix de la politique d'acceptation des commandes, le choix de mécanismes de coordination adaptés pour coordonner les activités de transformation du bois d'œuvre au niveau opérationnel, le choix d'informations transmises du niveau tactique au niveau opérationnel.

Les questions qui ont été posées en introduction, telles que la politique d'acceptation de commandes à utiliser, le ou les outils à utiliser en fonction du marché, les mécanismes de coordination à mettre en œuvre ou encore les informations héritées du niveau tactique, peuvent dès lors trouver réponse. Il est possible avec cette plateforme de simulation de définir la stratégie adaptée et tous les paramètres qui la compose en fonction du contexte de marché de l'entreprise.

7.1. Les applications industrielles

Ce projet de doctorat s'est déroulé dans un contexte bien particulier : celui d'une scierie nord-américaine, caractérisé par la divergence du flux de production, de la co-production et de l'hétérogénéité dans la matière première.

Il est important de mentionner que ces résultats ainsi obtenus sont propres à un contexte particulier, (c'est-à-dire le secteur forestier) et sont basés sur des valeurs spécifiques. Si les paramètres de marché ou les données d'entreprise changent, la simulation est à refaire.

D'un point de vue industriel, cette étude peut apparaître comme une forme de guide pour mieux choisir une stratégie de pilotage en fonction du contexte de marché de l'entreprise. Chaque paramètre définissant une stratégie de pilotage à adopter a un impact sur les performances de l'entreprise, en termes de revenu généré (politique d'acceptation de commandes, mécanismes de coordination utilisés, information transmises du niveau tactique au niveau opérationnel, ...). L'outil développé dans cette thèse peut être utilisé dans le but de déterminer ces paramètres. Par ailleurs, même si les résultats de ce projet ne devraient pas être généralisés à tous les types d'industrie, ni les valeurs des paramètres, la plateforme proposée pourrait être utilisée pour d'autres industries confrontées à des processus divergents avec coproduction, telles que les industries agro-alimentaires ou pétrolières par exemple.

7.2. Les limites de la recherche

L'objectif général était d'évaluer des stratégies de pilotage au niveau tactique et opérationnel pour le contexte des scieries nord-américaines ; ces stratégies prenant en compte le contexte de marché de l'entreprise. Pour atteindre cet objectif, certaines simplifications ont été faites, soit pour rendre le modèle de simulation moins lourd en termes de temps de simulation, soit pour permettre un suivi des expérimentations. Les points suivants n'ont donc pas été abordés, non pas parce qu'ils n'étaient pas intéressants, mais parce qu'ils n'étaient pas en lien direct avec les objectifs de recherche poursuivis et n'empêchaient nullement l'atteinte de ceux-ci. Ainsi, l'aléa dans l'approvisionnement ou la production n'a pas été pris en compte : ce qui était prévu à la production par le module de planification était produit. Le nombre de produits pris en compte s'est limité à 10, mais il pourrait dans le futur être amplifié pour se rapprocher d'un cas réel. Enfin la commande n'est pas multi-produits, mais se fait pour un seul et unique produit. Ajouter tous ces éléments complexifierait toutefois de beaucoup le modèle et augmenterait significativement le temps de simulation.

Une autre limite de cette recherche, mais non des moindres, est le temps de simulation nécessaire à lors de l'exécution des scénarios. Les nombreux appels faits aux modèles de planification font que ces temps de simulations peuvent excéder la journée entière de simulation pour un seul scénario. En sachant qu'il faut exécuter plusieurs fois le même scénario pour obtenir des résultats valables (statistiquement parlant), cela amplifie beaucoup le temps de simulation. Même si le but d'un tel modèle n'est pas de répondre à la question « devrions-nous accepter cette commande », le temps de simulation pourrait être réduit.

7.3. Pistes de recherche

Concernant les pistes de recherche futures, outre les améliorations que l'on peut faire sur le modèle de simulation pour le rendre plus proche de la réalité (voir les limites dans le paragraphe précédent), elles peuvent être regroupées en deux catégories : des pistes de recherche très ciblées que l'on peut émettre pour chaque contribution et des pistes de recherche plus générales, englobant l'ensemble des contributions.

Tout d'abord de manière très ciblée, où, dans la première publication, nous utilisons le modèle de simulation pour évaluer différentes politiques d'acceptation des commandes. Il serait intéressant de prendre en compte le profit généré par l'acceptation de nouvelle commande ; et donc d'intégrer la notion de PTP (Profitable-to-promise). En utilisant l'ATP, nous n'utilisons pas la capacité maximale de production (Li, (2007)). Utiliser le CTP permet de prendre en compte la capacité maximale de l'entreprise ; seulement la notion de profit n'est pas étudiée et on peut se demander : jusqu'à quel point accepter une nouvelle commande est-il payant ?

Dans la deuxième contribution, où nous proposons d'utiliser la plateforme de simulation pour évaluer la coordination entre les activités du processus de transformation du bois d'œuvre au niveau opérationnel, il serait intéressant de tester ces mêmes mécanismes de coordination en utilisant d'autres modèles de planification. En effet, le résultat de la planification est en partie dû aux modèles que l'on utilise et leur habilité à prendre en compte les contraintes de chaque unité de transformation du bois d'œuvre.

Dans la troisième publication, où nous proposons d'utiliser la plateforme de simulation pour évaluer différentes informations transmises du niveau tactique au niveau opérationnel, il serait intéressant de varier le calcul des cibles dans le modèle tactique en se basant sur d'autres informations que des prix, par exemple en fixant des limites par type de produits, en fixant des niveaux d'inventaire maximum plutôt que des niveaux minimums à garder ou encore en proposant des bornes pour les inventaires (le produit 1 doit voir son inventaire entre les valeurs x et y où $y > x$). Cela offrirait de différentes contraintes à respecter et en fonction d'un type de marché les revenus générés pourraient être améliorés.

De manière plus générale, cet outil pourrait être utilisé au sein d'un système d'aide à la décision. Le décideur aurait alors en sa possession un moyen de choisir entre plusieurs alternatives pour atteindre un ou plusieurs objectifs (Turban *et al.* (2011)). Le modèle serait donc intégré au sein de ce système, associé à plusieurs composantes (gestion des données, interface utilisateur, gestion des connaissances...) qui sont propres à la composition des systèmes d'aide à la décision. Le décideur pourrait ainsi entrer les paramètres de production (location du goulot, capacité...) et les paramètres de marché (type de marché, prix de ventes...), puis simuler les scénarios intéressants afin de guider sa prise de décision.

Une autre piste de recherche pourrait concerner les entreprises possédant plusieurs usines de sciage par exemple, ou même un réseau inter-entreprises. Cet outil pourrait servir de base à une étude plus macroscopique. Chaque usine pourrait alors paramétrer son propre outil. L'objectif serait alors de les faire collaborer suivant un objectif global (par exemple, une meilleure répartition de la fibre aux usines, ou encore une affectation optimisée des commandes), tout en utilisant cet outil au sein de chacune d'entre elles. On peut imaginer différents types d'usine ayant chacune leur spécialité. L'outil serait alors configuré en prenant en compte ces spécificités.

Dans le même ordre d'idée, cet outil pourrait être utilisé pour évaluer d'autres formes de coordination. Dans nos travaux, nous avons évalué la coordination entre les différentes activités de production ainsi qu'entre les différents niveaux de planification (tactique/opérationnel). Arshinder *et al.* (2011) mentionne que la coordination se passe également aux interfaces de la chaîne de valeur. Il peut donc être intéressant d'étudier cette coordination entre les différents départements (l'approvisionnement, la production et les ventes).

Cet outil pourrait être également utilisé dans le but de se positionner sur un nouveau marché. Dans l'industrie du bois, de plus en plus de nouveaux marchés émergent pour lesquels il n'y a pas suffisamment de donnée historique pour établir une bonne prévision de la demande. Cet outil pourrait alors être utilisé pour évaluer différents scénarios face à l'incertitude que représente un nouveau marché.

Enfin, au travers de cette thèse, il a été possible de bien mettre en avant le phénomène de coproduction, fortement présent dans l'industrie du sciage. Même si ce phénomène est connu, il a été possible de voir à quel point il était difficile de planifier les opérations lorsqu'on fait face à cette particularité. On a pu notamment voir les conséquences de la coproduction sur le choix de politique d'acceptation des commandes dans le premier article. Cela pourrait donc entraîner divers travaux pour montrer l'impact de cette co-production sur la planification, de manière quantitative et qualitative. Des expérimentations pourraient être menées en se basant sur notre plateforme de simulation. Des modifications seraient apportées au modèle de simulation pour permettre un dosage de cette co-production, qui pour rappel se situe à chaque opération de la production de bois d'œuvre.

Bibliographie

Abdel-Malek, L., T. Kullpattaranirun, and S. Nanthavanij. (2005). A Framework for Comparing Outsourcing Strategies in Multi-layered Supply Chains. *International Journal of Production Economics*, 97(3): 318–328.

Aggarwal, A.K., Vemuganti, R.R., and Fetner, W. (1992) A model-based decision support system for scheduling lumber drying operations. *Production and Operations Management*, 1(3): 320-328.

Aghezzaf EH, Sitompul C, and Van Den Broecke F (2011) A robust hierarchical production planning for a capacitated two-stage production system. *Computer and Industrial Engineering*, 60: 361–372

Ahumada, O., and J. R. Villalobos. (2009). Application of Planning Models in the Agri-food Supply Chain: A Review. *European Journal of Operational Research*, 196(1): 1-20.

Ajayi, A.P. (2016). Analytical study of supply chain collaboration guiding forestry products in a developing economy. *International Journal of Business Performance and Supply chain Modelling*, 8(4): 277-298.

Alam, M.B., Shahi, C., and Pulkki, R. (2014). Economic impact of enhanced forest inventory information and merchandizing yards in the forest product industry supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48: 189-197.

Alayet, C., Lehoux, N., Lebel, L., and Bouchard, M. (2016). Centralized supply chain planning model for multiple forest companies. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54(3): 171-191.

Alvarez, P. P., and Vera, J. R. (2014). Application of robust optimization to the sawmill planning problem. *Annals of Operations Research*, 219(1): 457-475.

Alvarez, P. P., Espinoza, A., Maturana, S., and Vera, J. R. (2015). Improving consistency of tactical and operational planning using robust optimization. Technical report, Universidad Catolica de Chile, School of Engineering, Santiago, Chile.

Altendorfer, Klaus, and Stefan Minner. (2015). Influence of Order Acceptance Policies on Optimal Capacity Investment with Stochastic Customer Required Lead times. *European Journal of Operational Research*, 243(2): 555–565.

Aramyan, L., C. J. Ondersteijn, O. Van Kooten, and A. O. Lansink. (2006). Performance Indicators in Agri-food Production Chains. In *Quantifying the Agri-Food Supply Chain*. Springer Netherlands, 49–66.

Arnold, J. R. T., S. Chapman, and L. Clive. (2008). *Introduction to Materials Management*. 6th Édition. New Jersey Pearson Prentice Hall.

Arshinder, K., Kanda, A., and Deshmukh, S. G. (2011). A review on supply chain coordination: coordination mechanisms, managing uncertainty and research directions. In *Supply chain coordination under uncertainty*. Springer Berlin Heidelberg, 39-82.

Audy, J. F., Lehoux, N., D'Amours, S., and Rönnqvist, M. (2012). A framework for an efficient implementation of logistics collaborations. *International transactions in operational research*, 19(5): 633-657.

Azevedo, R. C., D'Amours S., and Rönnqvist M. (2012). Advances in Profit-driven Order Promising for Make-to-stock Environments – A Case Study with a Canadian Softwood Lumber Manufacturer. *International Journal of Production Economics* (Submitted).

Beaudoin, D., Frayret, J. M., and LeBel, L. (2008). Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. *Canadian journal of forest research*, 38(8): 2198-2211.

Ben Ali, M., Gaudreault, J., D'Amours, S., and Carle, M.-A. (2014). A Multi-Level Framework for Demand Fulfillment in a Make-to-Stock Environment - A Case Study in Canadian Softwood Lumber Industry. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Bhatnagar, R., Chandra, P. and Goyal, S.K. (1993) Models for multi-plant coordination. *European Journal of Operational Research*, 67(2): 141-160.

Bian, W., Shang, J., and Zhang, J. (2016). Two-way information sharing under supply chain competition. *International Journal of Production Economics*, (178): 82-94.

Birge, J. R., and Louveaux, F. (1997). Introduction to stochastic programming. 2nd Édition. New York Springer.

Bitran, G. R., and Hax, A. C. (1977). On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Sciences*, 8(1): 28-55.

Bitran, G. R., and T. Y. Leong. (1992). Deterministic Approximations to Co-production Problems with Service Constraints and Random Yields. *Management Science*, 38(5): 724-742.

Bitran, G. R., and S. M. Gilbert. (1994). Co-production Processes with Random Yields in the Semiconductor Industry. *Operations Research*, 42(3): 476-491.

Blackstone, J. H. (2008). APICS Dictionary—The Standard for Excellence in the Operations Management Profession. APICS—The Association of Operations Management Dictionary.

Cachon, G. P. (2003). Supply Chain Coordination with Contracts. In *Handbooks in Operations Research and Management Science: Supply Chain Management*, 11: 227-339.

Caixeta-Filho, J. V., van Swaay-Neto, J. M., and Wagemaker, A. d. P. (2002). Optimization of the production planning and trade of lily flowers at Jan de Wit Company. *Interfaces*, 32(1) : 35-46.

Cellier, F. E. and Kofman E. (2006). Continuous system simulation. New York Springer science & Business Media.

Chopra, S., and Meindl, P. (2013). Supply chain management: strategy, planning, and operation. 5th Édition. Boston Pearson.

Cid Yáñez, F., Frayret, J. M., Léger, F., and Rousseau, A. (2009). Agent-based simulation and analysis of demand-driven production strategies in the timber industry. *International journal of Production Research*, 47(22): 6295-6319.

Crama, Y., Y. Pochet, and Y. Wera. (2001). A Discussion of Production Planning Approaches in the Process Industry. In *CORE Discussion Papers 10/42*, Belgium.

D'Amours, S., Frayret, J.-M., Gaudreault, J., LeBel, L., and Martel, A. (2009). Chaînes de création de valeur. In Manuel de la foresterie. 2nd Édition. Éditions Multimondes. Québec, 1307-1324.

De Man, J. C., Andersen, B. S., and Strandhagen, J. O. (2017). Addressing the performance of order acceptance. *Procedia CIRP*, 63: 301-306.

Díaz-Madroñero, M., Mula, J., and Pedro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17): 5171–5205.

Dumetz L, Gaudreault J, Thomas A, Lehoux N, Marier P, and El-Haouzi, H. (2016) Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with coproduction. *International Journal of Production Research*, 55(13): 3631-3643.

Dumetz, L., Gaudreault, J., Bril El-Haouzi, H., Thomas, A., Lehoux, N., and Marier, P. (2018). Simulation and Evaluation of Coordination Mechanisms for a Decentralized Lumber Production System with Coproduction, *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice* (Submitted).

Durfee, E. H., and Rosenschein, J. S. (1994). Distributed problem solving and multi-agent systems: Comparisons and examples. Technical report in AAAI Conference in Artificial Intelligence.

El Haouzi, H., A. Thomas, and J.-F. Pétin. (2008). Contribution to Reusability and Modularity of Manufacturing Systems Simulation Models: Application to Distributed Control Simulation within DFT Context. *International Journal of Production Economics* 112(1): 48–61.

El Haouzi, H., Thomas, A., and Charpentier, P. (2013), Toward adaptive modelling & simulation for IMS: The Adaptive Capability Maturity Model and future challenges, In 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, The International Federation of Automatic Control. Sao Paulo, Brazil, 174-179.

Elleuch, M. (2013). Collaboration entre les acteurs pour accroître le profit du réseau de création de valeur. MSc., Université Laval, Québec.

Ferrer, J.-C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S., and Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112(2): 985-999.

Fisher, M. L., Raman, A., and McClelland, A. S. (2000). Rocket science retailing is almost here-are you ready? *Harvard business review*, 78(4): 115-124.

Frayret, J. M., D'Amours, S., and Montreuil, B. (2004). Coordination and control in distributed and agent-based manufacturing systems. *Production Planning & Control*, 15(1): 42-54.

García-Flores, R., and X. Wang. (2002). A Multi-agent System for Chemical Supply Chain Simulation and Management Support. *OR Spectrum*, 24(3): 343–370.

Gascon, A., Lefrançois, P., and Cloutier, L. (1998). Computer-assisted multi-item, multi-machine and multi-site scheduling in a hardwood flooring factory. *Computers in Industry*, 36: 231-244.

Gaudreault, J., J. M. Frayret, and G. Pesant. (2009). Distributed Search for Supply Chain Coordination. *Computers in Industry* 60(6): 441–451.

Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.-M., Rousseau, A., Lemieux, S., and 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): 168-189.

Gaudreault, J., Frayret J. M., Rousseau A., and D'Amours S. (2011). Combined Planning and Scheduling in a Divergent Production System with Co-production: A Case Study in the Lumber Industry. *Computers and Operations Research*, 38(9): 1238–1250.

Gaudreault, J., Pesant G., Frayret J. M., and D'Amours S. (2012). Supply Chain Coordination using an Adaptive Distributed Search Strategy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 42(6): 1424–1438.

Genin P., (2003). Planification tactique robuste avec usage d'un APS. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.

Guajardo, M., and Rönnqvist, M. (2015). Operations research models for coalition structure in collaborative logistics. *European Journal of Operational Research*, 240(1): 147-159.

Hax, A. C., and Meal, H. C. (1973). Hierarchical integration of production planning and scheduling. IDEAS working paper series from RePEc.

Hill, R., and Omar, M. (2006). Another look at the single-vendor single-buyer integrated production-inventory problem. *International Journal of Production Research*, 44(4): 791-800.

Ingalls, Ricki G. (2001). Introduction to simulation. In *Proceedings of the 33rd conference on Winter simulation*, Arlington, Virginia, 7-16.

Islam, M. S. (2013). Order Promising and Production Planning Methods for Sawmills. MSc., Dalhousie University.

Jerbi, W. (2014). *Intégration De L'optimisation Et De La Simulation Pour L'élaboration Et L'évaluation De Politiques De Production Et De Transport D'une Chine Logistique*. MSc., Université Laval.

Jiao, Z., Higgins, A. J., and Prestwidge, D. B. (2005). An integrated statistical and optimisation approach to increasing sugar production within a mill region. *Computers and electronics in agriculture*, 48(2): 170-181.

Johnson, L. R., Gochenour D. L., Jr., and Biller C. J. (1972). Simulation analysis of timber-harvesting systems. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference and Convention*, American Institute of Industrial Engineers, Anaheim, California, 353-362.

Joly, M., L. Moro, and J. Pinto. (2002). Planning and Scheduling for Petroleum Refineries Using Mathematical Programming. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 19: 207-228.

Julka, N., R. Srinivasan, and I. Karimi. (2002). Agent-based Supply Chain Management—1: Framework. *Computers and Chemical Engineering*, 26(12): 1755-1769.

Kallrath, J. (2002). Planning and Scheduling in the Process Industry. *OR Spectrum*, 24(3): 219-250.

Kanda, A., and Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: perspectives, empirical studies and research directions. *International journal of production Economics*, 115(2): 316-335.

Kazemi Zanjani, M., Ait-Kadi, D., and Nourelfath, M. (2013). A Stochastic Programming Approach for Sawmill Production Planning. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 5(1): 1-18.

Ketzenberg, M. E., Geismar, N., Metters, R., and Laan, E. (2013). The value of information for managing retail inventory remotely. *Production and Operations Management*, 22(4): 811-825.

Kilic, O. A., D. P. Van Donk, J. Wijngaard, and S. A. Tarim. (2010). Order Acceptance in Food Processing Systems with Random Raw Material Requirements. *OR Spectrum*, 32(4): 905-925.

Kirche, E. T., and R. Srivastava. (2015). Order Management with Renegotiated Due Dates and Penalty Costs in an Integrated Supply Chain. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 21(2): 141–163.

Larsson, M., Stendahl, M., and Roos, A. (2016). Supply chain management in the Swedish wood products industry – a need analysis. *Scandinavian journal of forest research*, 31(8): 777-787.

Law, Averill M. (2007). *Simulation modeling and analysis*. 4th Édition. Boston McGraw-Hill.

Lehoux, N., Audy, J. F., D 'Amours, S., and Rönnqvist, M. (2009). Issues and experiences in logistics collaboration. In *Working Conference on Virtual Enterprises*. Springer, Berlin, Heidelberg, 69-76.

Lemieux, S. (2010). *Simulateur multiagent d'un réseau de création de valeur : application à l'industrie forestière*. MSc., Université Laval.

Lesser, V. R., and Corkill, D. D. (1981). Functionally Accurate, Cooperative Distributed Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 11(1): 81-96.

Lobos, A., and Vera, J. R. (2016). Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights. *Computers & Industrial Engineering*, 95: 53-63.

Li, X., and Li, Y. (2016). Chain-to-chain competition on product sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 112: 2058-2065.

Li, X. and Wang, Q. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179, 1-16.

Li, Z. Z. S. (2007). Optimizing Order Promising. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Liu, C. M., and H. D. Sherali. (2000). A Coal Shipping and Blending Problem for an Electric Utility Company. *Omega*, 28(4): 433-444.

Maatman, A., Schweigman, C., Ruijs, A., and van Der Vlerk, M. H. (2002). Modeling farmers' response to uncertain rainfall in Burkina Faso: a stochastic programming approach. *Operations Research*, 50(3): 399-414.

Malone, T. W., and Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 26(1): 87-119.

Marier, P. (2011). Gestion intégrée des ventes et des opérations dans l'industrie du sciage. Expo-Conférence. Québec, Université Laval.

Marier, P., Bolduc, S., Ali, M. B., and Gaudreault, J. (2014a). S&OP network model for commodity lumber products. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Marier, P., Gaudreault, J., and Robichaud, B. (2014b). Implementing a MIP model to plane and schedule wood finishing operation in a sawmill: lessons learned. In *Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, November 5-7.

Marier, P., Gaudreault, J., and Noguer, T. (2016). Kiln Drying Operations Scheduling with Dynamic Composition of Loading Patterns. In *Proceedings of ILS, Information System, Logistics and Supply Chain conference*, Bordeaux, France, June 1-4.

Maturana, S., Pizani, E., and Vera, J. (2010). Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4): 667-674.

McKay K.N., Safayeni F.R., and Buzacott J.A. (1995). A review of hierarchical production planning and its applicability for modern manufacturing. *Production Planning & Control*, 6(5): 384-394

McLaren, T., Head, M., and Yuan, Y. (2002). Supply chain collaboration alternatives: understanding the expected costs and benefits. *Internet research*, 12(4): 348-364.

Min, S., Roath, A. S., Daugherty, P. J., Genchev, S. E., Chen, H., Arndt, A. D., and Glenn Richey, R. (2005). Supply chain collaboration: what's happening? *The international journal of logistics management*, 16(2): 237-256.

Mohammadzadeh, N., Zegordi, S. H. (2016). Coordination in a triple sourcing supply chain using a cooperative mechanism under disruption. *Computers & Industrial Engineering*, 101: 194-215.

Moses, S., H. Grant, L. Gruenwald, and S. Pulat. (2004). Real-time Due-date Promising by Build-to-order Environments. *International Journal of Production Research* 42(20): 4353-4375.

Moyaux, T., Chaib-Draa, B., and D'Amours, S. (2003). Multi-agent coordination based on tokens: Reduction of the bullwhip effect in a forest supply chain. In *Proceedings of the 2nd international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, Saint Paul, Minnesota, 670-677.

Muhl, E., Charpentier, P., and Chaxel, F. (2003). Optimization of physical flows in an automotive manufacturing plant: some experiments and issues. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4): 293-305.

Mourtzis, D., M. Doukas, and F. Psarommatis. (2015). A Toolbox for the Design, Planning and Operation of Manufacturing Networks in a Mass Customisation Environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 36: 274–286.

Natural Resources Canada (2015). *The State of Canada's Forests. Annual Report.*

Narus, J. A., and Anderson, J. C. (1996). Rethinking distribution: adaptive channels. *Harvard business review*, 74(4): 112-120.

Oceña, L. G., and Schmoldt, D. L. (1996). Grasp – A prototype interactive graphic sawing program. *Forest Products Journal*, 46(11): 40-42.

Öner, S., and Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 188(3): 793-810.

Opacic, L., and Sowlati, T. (2017). Applications of discrete-event simulation in the forest products sector: A review. *Forest Products Journal*, 67(3): 219-229

Ortiz Araya V., and Thomas A. (2004). Proposition of disaggregation method for tactical robust planning. In *IFAC/IEEE Conference on Management and Control of Production and Logistics*, Santiago (Chili).

Ortiz-Araya V, and Albornoz VM (2012). Hierarchical planning methodology for a supply chain management. *Informatica Economica*, 16(2):14-18.

Pibernik, R., and Prashant Y. (2009). Inventory Reservation and Real-time Order Promising in a Make-to-stock System. *OR Spectrum*, 31(1): 281-307.

Pinto, J. M., M. Joly, and L. F. L. Moro. (2000). Planning and Scheduling Models for Refinery Operations. *Computers & Chemical Engineering*, 24 (9): 2259-2276.

Porter, M. E. (2008). The five competitive forces that shape strategy. *Harvard business review*, 86(1): 25-40.

Raaymakers, Wenny HM, J. Will M. Bertrand, and Jan C. Fransoo. (2000). The Performance of Workload Rules for Order Acceptance in Batch Chemical Manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(2): 217-228.

Ramdas, K., and Spekman, R. E. (2000). Chain or shackles: understanding what drives supply-chain performance. *Interfaces*, 30(4): 3-21.

Recio, B., Rubio, F., and Criado, J. (2003). A decision support system for farm planning using AgriSupport II. *Decision Support Systems*, 36(2): 189-203.

Renna, P. (2015). Coordination Strategies to Support Distributed Production Planning in Production Networks. *European Journal of Industrial Engineering*, 9(3): 366-394.

Rose, B., Garza, L., Lombard, M., Lossent, L., and Ris, G. (2002). Towards a common repository for collaborative knowledge in product design activity. In *Proceedings of the 1st Symposium of the working group Management Skills and Knowledge in Industrial Engineering for the GDR MACS*, 85-90.

Sargent, Robert G. (2004). *Validation and Verification of Simulation Models*. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Piscataway, New Jersey.

Schneeweiss C. (2003). Distributed decision making—a unified approach. *European Journal of Operation Research*, 150(2): 237-252.

Shannon, Robert E. (1975). *Systems simulation: the art and science*. Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall.

Singer, M., and P. Donoso. (2007). Internal Supply Chain Management in the Chilean Sawmill Industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 27(5): 524-541.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., and Simchi-Levi, E. (2003). *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*. 2nd Édition. Boston McGraw-Hill/Irwin.

Skjoett-Larsen, T. (2000). European logistics beyond 2000. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 30(5): 377-387.

Slotnick, Susan A. (2011) *Order Acceptance and Scheduling: A Taxonomy and Review*. *European Journal of Operational Research*, 212(1): 1-11.

Smith, R. G., and Davis, R. (1981). Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 11(1), 61-70.

Stevenson, W. J., Benedetti, C., and Bourenane, H. (2006). *La gestion des opérations : produits et services*. 2nd Édition. Montréal, Chenelière/McGraw-Hill.

Taşkın, Z. C., and A. T. Ünal. (2009). Tactical Level Planning in Float Glass Manufacturing with Co-production, Random Yields and Substitutable Products. *European Journal of Operational Research*, 199(1): 252-261.

Taylor S. G., and G. J. Plenert. (1999). Finite Capacity Promising. *Production and Inventory Management Journal*, 40(3): 50-56.

Thomas, A., Genin, P., and Lamouri, S. (2008). Mathematical programming approaches for stable tactical and operational planning in supply chain and aps context. *Journal of Decision Systems*, 17(3): 425-455.

Todoroki, C. L., and Rönnqvist, M. (1999). Combined primary and secondary log breakdown optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 50(11): 219-229.

Todoroki, C. L., and Rönnqvist, M. (2002). Dynamic control of timber production at a sawmill with log sawing optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17: 79-89.

Turban, E., Sharda, R., and Delen, D. (2011). *Decision support and business intelligence systems*. 9th Édition. Boston Prentice Hall.

Varas, M., Maturana, S., Pascual, R., Vargas, I., and Vera, J. (2014). Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 150: 37-51.

Vogel, T., Almada-Lobo, B., and Almeder, C. (2017). Integrated versus hierarchical approach to aggregate production planning and master production scheduling. *OR spectrum*, 39(1): 193-229.

Vollmann, T., W. Berry, and D. Whybark. (1997). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. New-York McGraw-Hill.

Wang, J., J. Q. Yang, and H. Lee. (1994). Multicriteria Order Acceptance Decision Support in over-demanded Job Shops: A Neural Network Approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 19(5): 1-19.

Wery, J., Gaudreault, J., Thomas, A., and Marier, P. (2014). Decision-making framework for tactical planning taking into account market opportunities (new products and

new suppliers) in a coproduction context. In Proceedings of MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nancy, France, November 5-7.

Winn, M. F., Wynne, R. H., and Araman, P. A. (2004). Alog: A spreadsheet-based program for generating artificial logs. *Forest Products Journal*, 54(1): 62-66.

Xu, J., Chen, Y., and Bai, Q. (2016). A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, 135: 42-56.

Yaghubian, A. R., Hodgson, T. J., and Joines, J. A. (2001). Dry-or-buy decision support for dry kiln scheduling in furniture production. *IIE transactions*, 33(2) : 131-136.

Yan, G. C. K., C. W. De Silva, and X. G. Wang. (2001). Experimental Modelling and Intelligent Control of a Wood-drying Kiln. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 15(8): 787-814.

Yu, Z., Yan, H., and Edwin Cheng, T. (2001). Benefits of information sharing with supply chain partnerships. *Industrial management & Data systems*, 101(3): 114-121.